МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 1563-0064

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
И
ИНФОРМАТИКА

Научно-технический журнал **Основан в 1997 г.**

№ 4(63), октябрь – декабрь 2013 **Выходит 4 раза в год**

© *Харьковский национальный*
университет радиоэлектроники, 2013

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12097-968 ПР 14.12.2006

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА

БЕЛЯЕВ А.А., ЛУХАНИН АЛЕКСАНДР А., ЛУХАНИН АЛЕКСЕЙ А., СПОРОВ Е.А., ФЕДОРЧЕНКО Д.В., ХАЖМУРАДОВ М.А. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ГЕЛИЕВОЙ ЯЧЕЙКЕ....3

ГОРДИЕНКО Ю.Е., ПЯТАЙКИНА М.И., ЛАРКИН С.Ю., ПОЛИЩУК А.В., ПРОКАЗА А.М., СЛИПЧЕНКО Н.И. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОГО СВЧ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР....8

БОНДАРЕНКО И.Н., ГАЛИЧ А.В. МИКРОВОЛНОВЫЙ ЗОНД НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО НЕРЕГУЛЯРНОГО ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА....14

БОРОДКИНА А.Н., ГОРДИЕНКО Ю.Е., СЛИПЧЕНКО Н.И. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ В ПРИБОРАХ ДИАГНОСТИКИ ГИПЕРТОНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ....17

ИЛЬИН М.А. ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИНФРАКРАСНЫХ ВСПЫШЕК НА ОБЪЕКТЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ....21

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

БЕЗРУК В.М., СКОРИК Ю.В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ВЫБОРЕ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА....25

СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

КОЛЕНОВ И.В. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК....29

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ОБОЗНАЯ М.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО ТИПА....35

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ЛИТВИНОВСКИЙ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ВЫБОРА РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ....39

КЛИМКО О.Г., ЧЕРНИШ Ю.М. ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ДОХОДІВ МАЛОГО ПІДПРИЄМСТВА....44

ЩЕРБІНІНА С.А., ГЕРАЩЕНКО І.В. ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДІЯЛЬНОСТІ ПАТ «УКРТЕЛЕКОМ»....47

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ЗАЙЧЕНКО С.А., АЛЕКСАНДРОВ В.И., БЕЛОУС В.В., БЕРЕЗИН Н.П. МЕТОДЫ РАНЖИРОВАНИЯ ТЕСТОВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПО ГЕТЕРОГЕННЫМ МЕТРИКАМ ПОКРЫТИЯ....51

BAGHDADI AMMAR AWNI ABBAS, ХАХАНОВ В.И., ЛИТВИНОВА Е.И., ЗАЙЧЕНКО С.А. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ HDL-МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛАХ....60

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

БАРАННИК В.В., БЕКИРОВ А.Э., ХАХАНОВА А.В. МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧИСЕЛ СО ВСТРОЕННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ СТЕГАНОСИСТЕМ....69

БОНДАРЕНКО М.А. ОПТИМІЗАЦІЯ РАСТРОВИХ WEB-ЗОБРАЖЕНЬ....73

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

НЕЧИПОРЕНКО Ю. Л., РИЖОВ А. О. ХМАРА МОНІТОРИНГУ І УПРАВЛІННЯ ЗДОРОВ'ЯМ ТА ЗДОРОВИМ СПОСОБОМ ЖИТТЯ....77

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ПОДДУБНЫЙ А.В. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ВЫБОРА И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ....83

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., РУДНЕВ В.К. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МАРКЕТИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ....87

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., КОЗЛОВА А.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ....91

РЕФЕРАТИ....97

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА....103

РАДИОТЕХНИКА

УДК 536.245

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ГЕЛИЕВОЙ ЯЧЕЙКЕ

БЕЛЯЕВ А.А., ЛУХАНИН АЛЕКСАНДР А., ЛУХАНИН АЛЕКСЕЙ А., СПОРОВ Е.А., ФЕДОРЧЕНКО Д.В., ХАЖМУРАДОВ М.А.

Приводятся расчеты процесса нагрева гелиевой ячейки в поляризаторе нейтронов, моделирование распределения температуры и потоков газа в оптической ячейке для мощности лазерного излучения до 15 Вт. Определяются скорости конвективных потоков газа в оптической ячейке при однородном и одностороннем поглощении различной мощности света лазерного излучения парами рубидия.

1. Введение

Использование пучка поляризованных нейтронов и анализатора поляризации отраженных нейтронов позволяет проводить векторный анализ в нейтронной рефлектометрии. Такие исследования необходимы для изучения магнетизма слоистых наноструктур, полупроводниковых, металлических, полимерных пленок и др. Одним из эффективных способов создания поляризованного пучка нейтронов с энергией $0{,}01 \div 1$ эВ является ^{3}He спиновый фильтр. Принцип его работы основан на сильной зависимости сечения захвата нейтрона поляризованным ядром ^{3}He при параллельной и антипараллельной ориентации их спинов [1,2].

Высокая поляризация ядер ^{3}He достигается в результате спинового обмена между ядрами ^{3}He и оптически поляризованными атомами ^{85}Rb [3]. Максимальная поляризация ядер ^{3}He зависит от величины оптической поляризации атомов ^{85}Rb, скоростей релаксации поляризации ^{3}He, скорости спинового обмена ^{85}Rb–^{3}He, наличия парамагнитных примесей и ряда других факторов и достигается в узком диапазоне концентрации паров рубидия.

В работе проведено моделирование процесса нагрева гелиевой ячейки, распределение температуры и потоков газа внутри ячейки при поглощении мощности лазерного излучения парами рубидия для оценки изменения условий при оптической накачке поляризации.

2. Оптическая накачка поляризации

Для стационарного процесса накачки поляризации ядер ^{3}He предельная величина поляризации определяется выражением

$$P_{He} = \frac{\gamma_{SE}}{\gamma_{SE} + \Gamma_{He}} P_{Rb},$$

где P_{He} и P_{Rb} – средняя поляризация ядер ^{3}He и атомов рубидия, соответственно; Γ_{He} – скорость спиновой релаксации ^{3}He; γ_{SE} – скорость спинового обмена.

При облучении паров ^{85}Rb лазерным светом с длиной волны 795 нм и правосторонней циркулярной поляризацией происходит резонансное поглощение света, приводящее к поляризации атомов (почти 100%). В зависимости от скорости спинового ^{85}Rb–^{3}He взаимодействия и деполяризующих факторов достигается поляризация ядер $P_{He} \sim 60\%$ при концентрации паров ^{85}Rb $(1 \div 3) \times 10^{14}$ см$^{-3}$ [4]. Для получения такой концентрации паров ^{85}Rb необходимо поддерживать температуру расплавленного рубидия с точностью ~ 2°С. На рис. 1 показана зависимость концентрации паров рубидия от температуры [5].

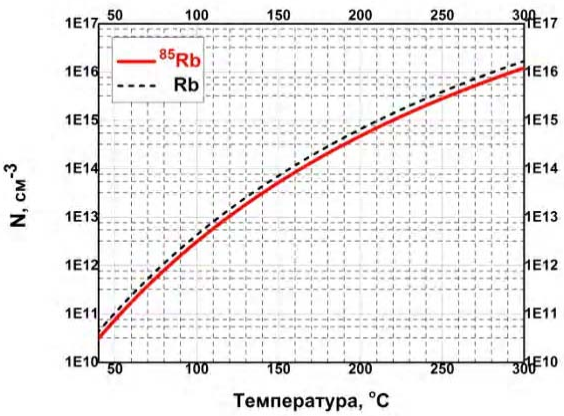


Рис. 1

В зависимости от концентрации паров рубидия, ширины спектра излучения лазерных диодов и других факторов длина, на которой происходит поглощение света, может составлять от слоя в несколько миллиметров на входе до полной длины гелиевой ячейки. В этой области поляризуются атомы ^{85}Rb и, соответственно, достигается максимальная поляризация ядер ^{3}He [6].

Гелиевая ячейка должна удовлетворять одновременно требованиям максимальной поляризации гелия и особенностям условий получения максимальной поляризации нейтронов.

Часть ячейки, находящаяся в области пучка света, должна быть термостатирована. Эта часть помещается в термокамеру, в которой предусмотрены прозрачные окна для прохождения через ячейку пучка света.

Часть ячейки с поляризованными ядрами гелия, через которую проходит пучок нейтронов, должна обеспечить получение выходного пучка нейтронов с максимальной поляризацией. Для этого, прежде

всего, необходимо обеспечить максимальное отношение ядер гелия на пути пучка нейтронов к остальным неполяризованным ядрам, из которых состоит наружная часть ячейки. Все части ячейки помещаются в однородное магнитное поле величиной ~ 30 Гс. Для выполнения таких противоречивых требований гелиевую ячейку изготавливают из двух частей – термостатируемая часть для оптической поляризации ядер гелия и наружная часть для получения поляризованного пучка нейтронов.

Во внешнем объеме поляризация ядер ^{3}He происходит за счет передачи поляризации при спин-спиновых взаимодействиях между ядрами ^{3}He (спиновая диффузия). Величина спинового потока J может быть записана как

$$J = -n(z)D(z)\frac{dP(z)}{dz}, \quad n(z),$$

где $n(z)$, $D(z)$, $P(z)$ – плотность ^{3}He.

Коэффициент спиновой диффузии и поляризация, как функции от координат в области гелиевой ячейки:

$$D(z) = D_0\left(\frac{T(z)}{T_0}\right)^{m-1} \cdot \left(\frac{n_0}{n(z)}\right),$$

здесь $D_0 = 2{,}789$ см^2/с, $T_0 = 357{,}14$ К, $m = 1{,}709$, $n_0 = 0{,}7733$ amg. (1 amg. = 2,687г10^{19} см$^{-3}$).

Кроме того, во внешнем объеме происходит ионизация атомов гелия при прохождении пучка нейтронов, приводящая к заметному уменьшению времени релаксации поляризации ядер гелия, и, соответственно, в этом объеме поляризация ядер гелия уменьшается до 10 %.

В работе [6] показано, что при потоке ^{3}He ~ 0,8 см/с через необлучаемую лазерным светом часть ячейки, скорость роста поляризации ^{3}He увеличивается по сравнению со скоростью поляризации только за счет спиновой диффузии, и максимальная величина поляризации достигает 0,99 от величины поляризации в облучаемой части. Поэтому мы, кроме расчета температурного режима в ячейке, провели расчет конвективных потоков в ячейке при однородном и неоднородном поглощении света.

3. Стабилизация температуры ячейки накачки поляризации

Поляризация ^{3}He осуществляется в сферической части ^{3}He ячейки – колбе диаметром 90 мм, помещенной в тепловую камеру. Колба выполнена из стекла с высокой прозрачностью в диапазоне длин волн света, излучаемых лазерными диодами. В тепловой камере имеются стеклянные окна для прохождения этого света. Колба заполняется газообразным ^{3}He с давлением ~ 4 атм при температуре 20°С. В ней находится также металлический рубидий, твердый при этой температуре. При температуре накачки поляризации он становится жидким.

Необходимая температура в тепловой камере достигается с помощью ее нагрева потоком воздуха со стабильной температурой. На рис. 2 приведена блок-схема системы стабилизации температуры. Цифрами 1 – 6 обозначены места расположения датчиков температуры.

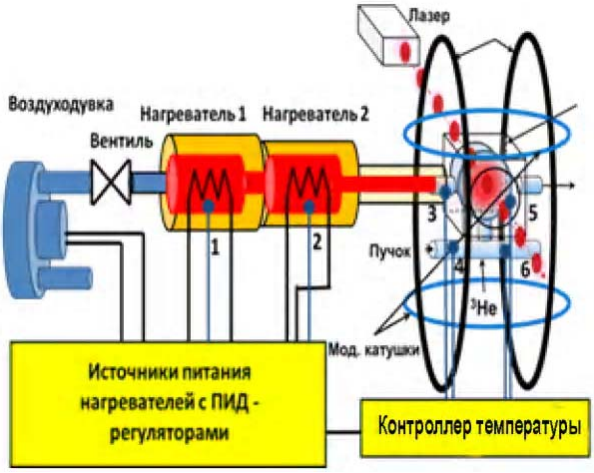


Рис. 2

Система стабилизации температуры состоит из тепловой камеры, воздуходувки, двух нагревателей, управляемых пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором, датчиков температуры и измерительных приборов. Тепловая камера изготовлена из керамики с теплопроводностью 24 Вт/(м×К). На трубках подачи горячего воздуха и наружных стенках тепловой камеры находится теплоизоляция. Все используемые материалы – немагнитные диэлектрики с малым поглощением высокочастотной мощности в радиочастотном диапазоне. Воздуходувка обеспечивает регулируемую подачу потока воздуха в тепловую камеру с производительностью до 80 м^3/ч и избыточным давлением до 5000 Па. Мощность каждого из нагревателей до 1000 Вт.

Система стабилизации температуры обеспечивает длительное поддержание температуры входного воздуха в тепловую камеру с точностью ± 2°С в диапазоне $50 \div 300$°С.

4. Модель тепловой камеры и ячейки для оптической накачки поляризации

Тепловая камера имеет внешний размер 150×150×150 мм и изготовлена из шести керамических пластин толщиной 8 мм. В противоположных стенках камеры сделаны окна диаметром 80 мм для прохождения света лазерного излучения. Окна закрыты оптически прозрачными стеклами для длины волны света 795 нм. Толщина стекол 6 мм. Для входа и выхода воздушного потока и переходной трубки между двумя частями ^{3}He ячейки имеются отверстия диаметром 20 мм. На рис. 3 показана модель тепловой камеры с ячейкой для оптической накачки поляризации. Стрелкой показано направление потока горячего воздуха.

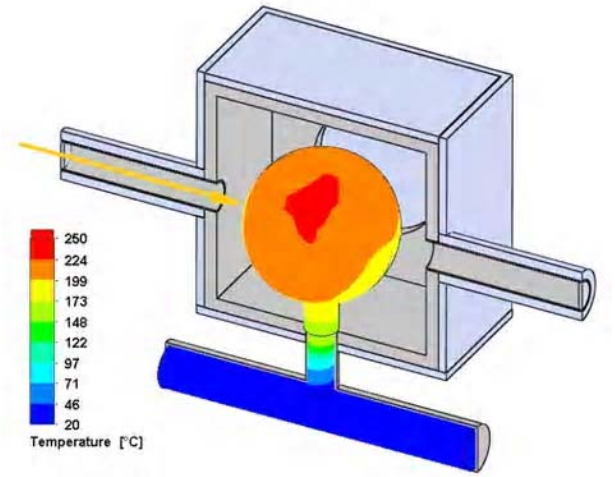


Рис. 3

В качестве элементов, имитирующих тепловыделение при поглощении света лазерных диодов, в ячейку оптической накачки поляризации добавлены равномерно расположенные по диаметру лазерного пучка 32 тонких нагревателя с направлением осей нагревателей параллельно оси пучка фотонов. При однородном выделении тепла длина нагревателей была равна расстоянию между внутренними стенками колбы. Для одностороннего выделения тепла длина нагревателей составляла 1 см со стороны входа лазерного излучения. Нагреватели равномерно выделяли тепло по своей поверхности. Расчеты производились для суммарного тепловыделения 0, 5, 10, 15 Вт.

5. Моделирование

Моделирование процессов конвекции в тепловой камере осуществлялось при помощи пакета SolidWorks 2011 с модулем SolidWorks Flow Simulation. Данный пакет позволяет создать пространственную модель тепловой камеры и провести термо- и гидродинамический расчеты методом конечных элементов.

Как известно, гидродинамика вязкой жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса, которые описывают законы сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости. При использовании метода конечных элементов осуществляется дискретизация этих дифференциальных уравнений. В частности, в SolidWorks Flow Simulation применяется метод конечных объемов, при котором расчетная область покрывается расчетной сеткой, ячейки которой имеют форму параллелепипедов, а значения независимых переменных рассчитываются в центрах этих ячеек.

Если записать в общем виде уравнения сохранения для объема ячейки

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V A dV + \oint_S \vec{J} d\vec{S} = \int_V F dV ,$$

где V – объем ячейки; S – боковая поверхность ячейки; A – независимая величина (масса, импульс, энергия); $\vec{J}$ – поток соответствующей величины; F – соответствующая массовая сила, то в результате дискретизации мы получим уравнения в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(AV) + \sum_{i=1}^{6} J_i s_i = FV,$$

здесь J_i – поток через соответствующую грань ячейки; s_i – площадь этой грани; суммирование производится по всем граням ячейки.

При построении расчетной сетки возможна ситуация, когда ячейка будет пересечена границей твердого тела и жидкостью. Такие ячейки называются «частичными» и рассматриваются особым образом. В частности, в них вводятся дополнительные внутренние грани, и для этих граней используется дополнительная процедура для расчета граничных условий. Параметры расчетной сетки приведены в таблице.

Таблица 1

Модель тепловыделения	Число ячеек разбиения			
	Газ	Твердое тело	Частичные	Всего
Однородная	85870	28193	59692	173755
Односторонняя	52545	28193	43296	124034

Целью моделирования было получение распределения температуры во всех элементах тепловой камеры, в стенках ячейки, в потоке горячего воздуха и в гелии. Кроме того, в гелии и в потоке воздуха вычислялись распределения давлений и скорости потока.

Граничные условия при моделировании выбирались следующим образом. На границе тепловой камеры с внешней средой и внешней части ячейки с гелием задавался коэффициент теплоотдачи 10 Вт/(м$\times$К), который соответствует охлаждению слабо конвективным потоком внешнего воздуха. Температура на внешней поверхности теплоизоляции и внешней части ячейки составляла 20°С.

Температура воздуха на входе в тепловую камеру составляла 195°С, объемный расход составлял 3 л/с. На выходе задавалось давление, равное атмосферному.

Начальное давление гелия внутри замкнутой ячейки было 4 атм при 20°С. При нагреве давление гелия повышалось до 5,5 $\div$ 6 атм. При моделировании конвекции учитывалось влияние гравитации. Малые примеси азота и паров рубидия не учитывались.

В качестве теплотехнических и термодинамических характеристик для применяемых материалов и газов использовались данные, включенные в базу данных SolidWorks Flow Simulation.

6. Результаты моделирования

В результате моделирования получены объемные распределения температуры, давлений, величины и компонентов потоков газов в тепловой камере и гелиевой ячейке для оптической накачки поляризации. На рис. 4 показано распределение температуры в тепловой камере и гелиевой ячейке в сечении, проходящем через ее центр, при одностороннем тепловыделении 15 Вт на входе пучка лазерного излучения. Стрелкой показано направление излучения лазерных диодов.

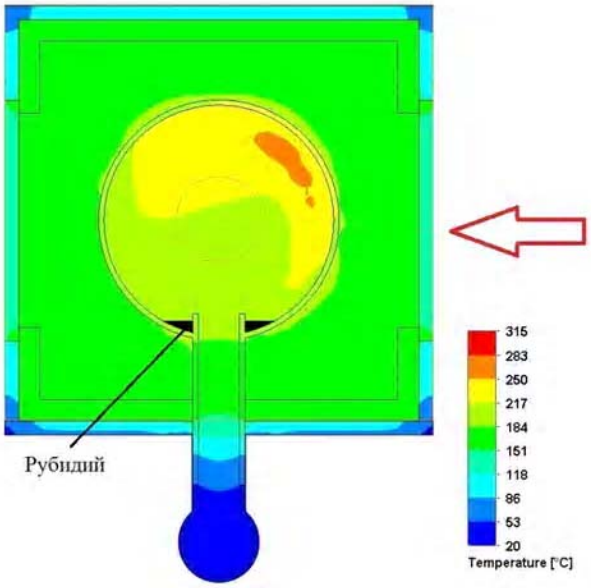


Рис. 4

На рис. 5 и рис. 6 приведена зависимость температуры в тепловой камере и гелиевой ячейке при однородном (рис. 5) и одностороннем (рис. 6) выделении тепла при поглощении мощности лазерного излучения для 1 ÷ 15 Вт (D – расстояние от центра ячейки).

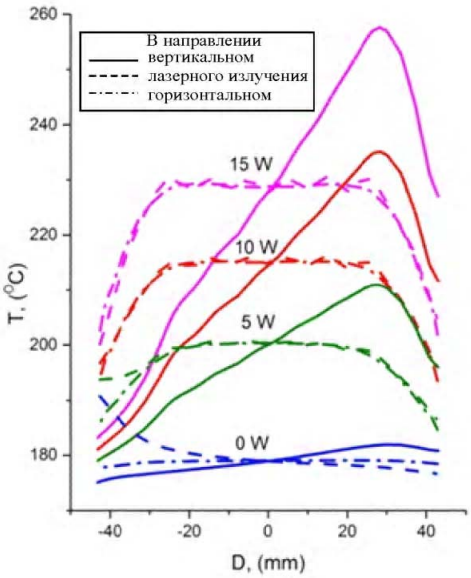


Рис. 5

Как видно из расчетов, при одностороннем тепловыделении область с максимальной температурой смещается в зону поглощения света парами рубидия. В этой области достигается температура до 290°С (см. рис. 4). Однако в области жидкого рубидия температура находится в пределах 180° ± 5°С как при однородном, так и при одностороннем выделении тепла. Наблюдается повышение температуры жидкого рубидия ~ 1°С на 2 Вт поглощаемой мощности лазерного излучения.

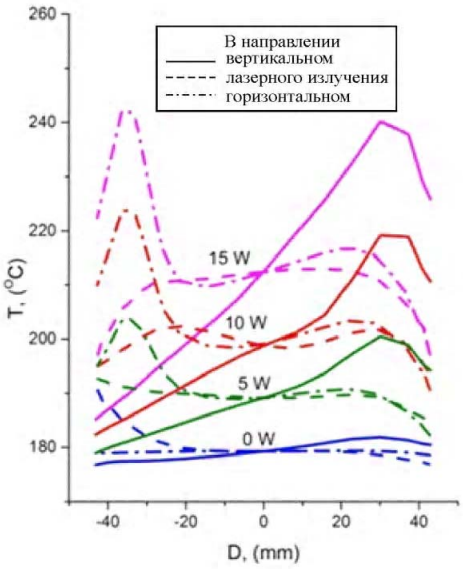


Рис. 6

Для получения максимальной поляризации ядер гелия и малого времени накачки поляризации необходимо поддержание оптимальной концентрации атомов рубидия в оптической ячейке и, соответственно, необходима коррекция температуры входного потока горячего воздуха.

Значительные изменения температуры (до 100°С) в гелиевой ячейке приводят к появлению конвективных потоков гелия. На рис. 7 приведены траектории движения газа в гелиевой ячейке при одностороннем выделении тепла 15 Вт.

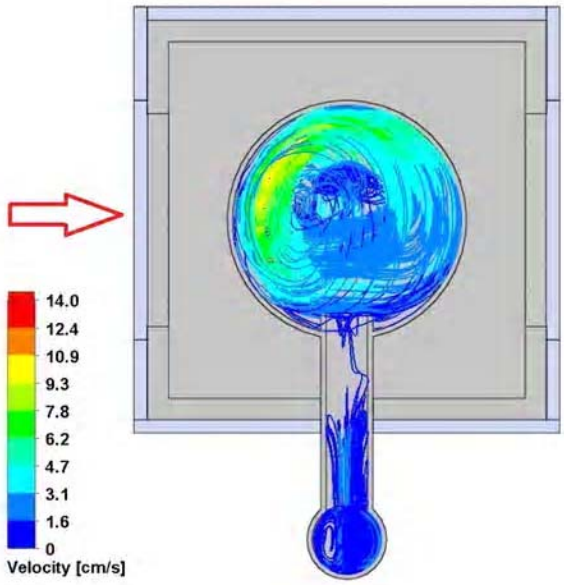


Рис. 7

На рис. 8 и рис. 9 приведены зависимости величин компонент скоростей конвективных потоков гелия на оси пучка лазерного излучения при однородном (рис. 8) и одностороннем (рис. 9) выделении тепла для $1 \div 15$ Вт. Стрелкой указано направление излучения лазерных диодов. (L – расстояние от центра ячуйки).

Характер конвекции гелия сильно отличается от длины области поглощения мощности. Отсутствие нулевых компонентов скорости конвективных потоков во всем объеме гелиевой ячейке свидетельствует об эффективном перемешивании гелия, приводящего к получению более однородной поляризации ядер гелия по всему объему ячейки. Распределение температуры на поверхности гелиевой ячейки позволяет провести оценку длины поглощения лазерного излучения в гелиевой ячейке.

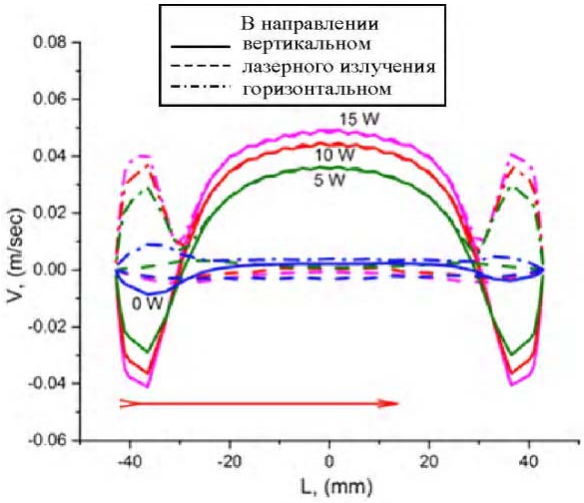


Рис. 8

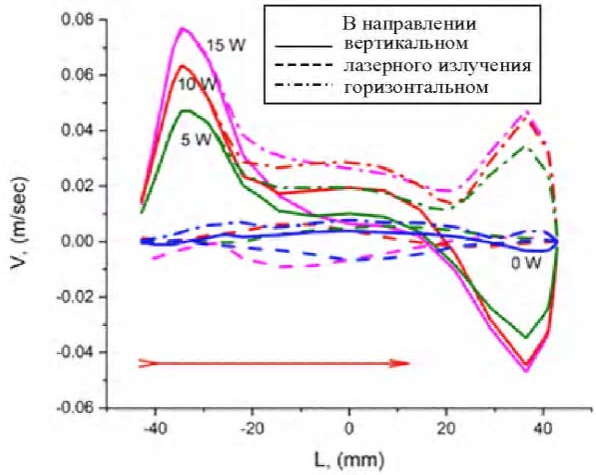


Рис. 9

7. Выводы

Проведен анализ и моделирование температурного режима в ячейке для создания оптимальных условий при оптической накачке поляризации атомов рубидия и получения высокой ($\geq 60\%$) поляризации ядер ^{3}He.

Моделирование показывает на увеличение неоднородности температуры в облучаемом объеме до 100°C в зависимости от поглощаемой мощности парами рубидия. Это приводит к изменению температуры в расплавленном рубидии $\approx 0{,}5^{o}$C/Вт и соответственно, к изменению давления упругих паров рубидия, поэтому необходима коррекция температуры потока горячего воздуха.

Нагрев гелия в области поглощения лазерного излучения приводит к появлению конвективных потоков гелия до 15 см/с. При длительной релаксации ядерной поляризации гелия его конвективные потоки способствуют скорости роста поляризации ядер гелия и достижению ее максимальной величины по всему объему гелиевой ячейки.

Литература: 1. *Tong X. et al*. In situ polarized ^{3}He system for the Magnetism Reflectometer at the Spallation Neutron Source // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol.83, 075101. P.1-6. **2.** *Wietfeldt F.E. and Gentile T.R.* A New Method for Precision Cold Neutron Polarimetry Using a ^{3}He Spin Filter // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2005. 110. P. 305-308. **3.** *Chupp T.E. et al.* Polarized, high-density, gaseous He targets // Phys. Rev. C. 1987. Vol.36, N6. P.2244-2250. **4.** *Chann B. et al.* Production of highly polarized ^{3}He using spectrally narrowed diode laser array bars // J. Appl. Phys. 2003. Vol.94, No.10. P.6908-6914. **5.** *Daniel A*. Steck. Rubidium 85 D Line Data. http://steck.us/alkalidata (revision 2.1.6, 20 September 2013). **6.** *Dolph P.A.M. et al*. Gas dynamics in high-luminosity polarized 3He targets using diffusion and convection // Phys. Rev. C. 2011. Vol.84, 065201. P.1-13.

Поступила в редколлегию 09.09.2013

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

Беляев Андрей Анатольевич, младший научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: физика высоких энергий, обработка экспериментальных данных, математическое моделирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-63-94, e-mail: belyaev@kipt.kharkov.ua

Луханин Александр Алексеевич, младший научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: ядерная физика, исследование и обработка экспериментальных данных, моделирование тепловых процессов. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-63-94, e-mail: alukhanin @kipt.kharkov.ua

Луханин Алексей Александрович к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: ядерная физика, системы охлаждения и термостатирования. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-34-74, e-mail: lukhanin@kipt.kharkov.ua

Споров Евгений Александрович, научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: экспериментальные исследования в физике высоких энергий, криогеника, сверхпроводящие магнитные системы. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Ака-

демическая, 1, тел. (057)335-63-94. e-mail: sporov @kipt.kharkov.ua

Федорченко Дмитрий Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: методы Монте-Карло, математическое моделирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-65-94, e-mail: fdima@kipt.kharkov.ua

Хажмурадов Манап Ахмадович, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: методы Монте-Карло, математическое моделирование, автоматизированные системы управления. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46, e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua.

УДК536.331

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОГО СВЧ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

ГОРДИЕНКО Ю.Е., ПЯТАЙКИНА М.И., ЛАРКИН С.Ю., ПОЛИЩУК А.В., ПРОКАЗА А.М., СЛИПЧЕНКО Н.И.

Исследуются особенности применения микроволнового излучения как средства высоколокального нагрева, отжига и перелегирования полупроводниковых слоистых структур при помощи ближнеполевых СВЧ излучателей с микроразмерной апертурой. Предлагается вариант такого модификатора на основе конусного коаксиального волновода. Основное внимание уделяется локализации тепловыделения и специфике пространственно-временного распределения температуры в зависимости от электрических и тепловых параметров объектов исследования. Показывается, что при определенном соотношении параметров пленки и подложки возможно также осуществить геттерирование дефектов из подложки.

1. Введение

В современной технологии субмикронных элементов электронной техники традиционные приемы локализации модифицирующего воздействия на функциональные структуры исчерпывают свой предел применения. Поэтому, например, вместо лазерных технологий отжига предлагается использовать СВЧ поверхностный кратковременный нагрев [1, 2] и т.п.

Развитие сканирующих зондовых технологий [3, 4] обещает коренное изменение принципов технологии микро- и наноэлектроники. Учитывая прогресс в области разработки ближнеполевых высоколокальных источников СВЧ электромагнитного поля для сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) [5, 6], можно предположить создание и развитие новых так называемых СВЧ микро- и нанотехнологий. К первым достижениям в этом направлении следует отнести работы, в которых экспериментально показана возможность СВЧ сверления отверстий около 1 мм диаметром в диэлектриках и пластинах полупроводников [7, 8], а также СВЧ диффузионного перелегирования кремния в локальной приповерхностной области [9]. При этом был использован СВЧ аппликатор, являющийся по сути некоторым аналогом СВЧ зондов, применяемых в СММ. В цитированных выше работах по СВЧ микроскопии показано, что локальность таких зондов может достигать десятых и сотых долей микрона. Следовательно, для СВЧ микротехнологий характерными могут быть субмикронные размеры реализуемых областей.

Теоретически вопрос высоколокального СВЧ теплового воздействия на полупроводниковые и диэлектрические объекты уже обсуждался нами в работах [10, 11] применительно к однородным образцам. Реальные объекты в технологии микроэлектроники являются тонкопленочными структурами на различных подложках. Тонкие пленки на полупроводниковых подложках при этом могут быть эпитаксиальными; диэлектрическими в качестве пассивирующих, гетерирующих, легирующих слоев; металлоподобными (силициды) и металлическими с функциональным или технологическим назначением. СВЧ локальный разогрев таких структур является многопараметровым процессом и абсолютно не изучен.

Процессы установления температуры в системе “пленка-подложка” при локальном СВЧ разогреве, в принципе, должны существенно зависеть от соотношения электрофизических, включая и тепловые, параметров пленки и подложки. Применительно к локальному СВЧ разогреву тонкопленочных полупроводниковых структур до сих пор исследования не производились. Учитывая предполагаемый сложный их характер, целесообразно вначале ограничить такие исследования, не рассматривая температурные зависимости параметров структуры “пленка на подложке”.

Целью данной работы является получение количественных сведений о локализации СВЧ тепловыделения и возникающего распределения температуры в слоистых структурах при локальном их разогреве с использованием СВЧ микромодификатора на основе ближнеполевых излучателей. Для этого необходимо решить следующие задачи:

– используя ранее разработанный метод численного исследования, установить зависимость СВЧ локального тепловыделения от параметров пленки;

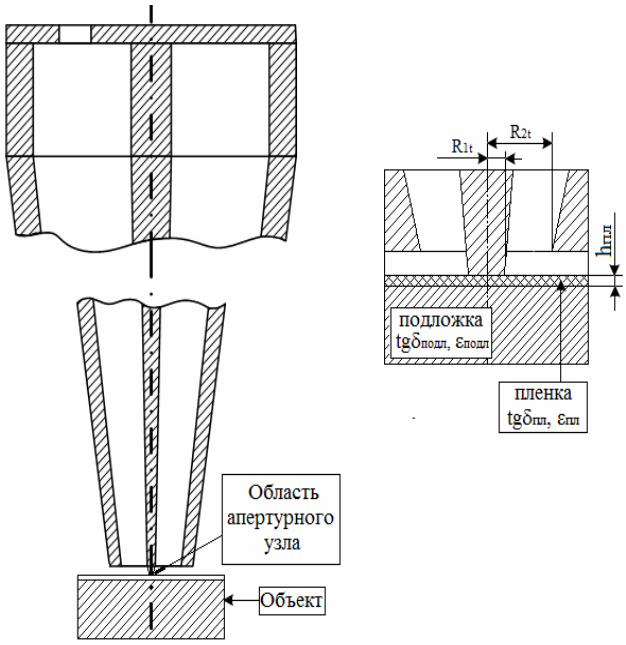
– решая численно уравнение теплопроводности для полученных источников, количественно исследовать пространственно-временное распределение темпера-

туры в образце без учета температурных зависимостей параметров системы;

– из анализа полученных результатов оценить возможности локализации СВЧ тепловой модификации в системе “пленка-подложка”.

2. Общие положения и соотношения

В разрабатываемых СВЧ микротехнологиях в отличие от традиционного СВЧ нагрева макрообъектов СВЧ излучатели должны иметь микроразмерную апертуру. Как уже отмечалось, при их проектировании можно использовать опыт разработки СВЧ ближнеполевых зондов для СММ. В частности, наибольшее распространение могут получить СВЧ микромодификаторы с коаксиальной апертурой на основе коаксиальных, прямоугольных или даже полосковых волноводов. Схематично апертурный узел подобных модификаторов представлен на рис.1,а со встраиванием его в конусный коаксиальный волновод. На рис.1,б в деталях схематично представлен апертурный узел со слоистым полупроводниковым объектом (тонкая полупроводниковая или диэлектрическая пленка на полупроводниковой подложке) с набором характеризующих его параметров.



а б

Рис. 1. Схематическое изображение СВЧ микромодификатора

Численное моделирование и исследование высоколокального СВЧ теплового воздействия на тонкопленочные полупроводниковые структуры в работе базируется на совместном решении уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности. Для осесимметричной геометрии микромодификатора (см.рис.1) эти уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial E_{ri}}{\partial t} = (\varepsilon\varepsilon_0)^{-1}\left(\frac{\partial H_{\varphi i}}{\partial z} + \sigma_i E_{ri}\right); \qquad (1)$$

$$\frac{\partial E_{zi}}{\partial t} = (\varepsilon_i\varepsilon_0)^{-1}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial(rH_{\varphi i})}{\partial r} - \sigma E_{zi}\right); \qquad (2)$$

$$\frac{\partial H_{\varphi i}}{\partial t} = (\mu_i\mu_0)^{-1}\left(\frac{\partial E_{zi}}{\partial r} - \frac{\partial E_{ri}}{\partial z}\right), \qquad (3)$$

$$C\rho\frac{\partial T(r,z)}{\partial T} = \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda r\frac{\partial T(r,z)}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\frac{\partial T(r,z)}{\partial z}\right] + q(r,z,t), \qquad (4)$$

где ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, соответственно; E_{ri}, H_{ri}, E_{zi}, H_{zi} – напряженности СВЧ поля в свободном пространстве и в разных частях электродинамической системы; ε_i, μ_i – диэлектрическая и магнитная проницаемости заполнения i-й области; σ_i – электропроводность материала заполнения i-й области; T(r,z) – искомое пространственное распределение температуры в объеме объекта; C, ρ, λ – удельная теплоемкость, удельная плотность, коэффициент теплопроводности материала объекта, соответственно; q(r, z) – удельная мощность тепловых источников.

Решение уравнений Максвелла (1)-(3) находится при выполнении следующих граничных условий:

на проводящих стенках коаксиального волновода:

$$E_{\tau i}(R_{сти}, z) = \frac{1+j}{\sigma_{сти}\cdot\delta_{сти}}\left[\vec{H_i}, \vec{n_0}\right], \quad \left[\vec{H_i}, \vec{n_0}\right] = \vec{J_{si}}, \qquad (5)$$

где $E_{\tau i}$ – тангенциальная составляющая напряженности СВЧ электрического поля; $\vec{J_{si}}$ – вектор поверхностной плотности тока; $\vec{n_0}$ – вектор нормали к границе; $\vec{H_i}$ – вектор магнитного поля; $\delta_{сти}$ – глубина скин-слоя в стенках; $\sigma_{сти}$ – удельная электропроводность материала стенок.

На границе “свободное пространство-полупроводник”:

$$E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}; E_{1\tau} = E_{2\tau};$$

$$\left[\vec{n_0}, \left(\vec{H_1} - \vec{H_2}\right)\right] = \sigma\vec{E_2} = \omega\varepsilon\varepsilon_0 tg\delta\vec{E_2}, \qquad (6)$$

где σ – удельная электропроводность полупроводника; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь полупроводника; ω – циклическая частота СВЧ поля; H_1 и H_2 – напряженность магнитного поля в свободном пространстве и полупроводнике, соответственно, на границе “свободное пространство-полупроводник”; E_1 и E_2 – напряженности электрического поля в свободном пространстве и полупроводнике; $\vec{n_0}$ – вектор нормали к границе “свободное пространство-полупроводник”; $E_{1\tau}$, $E_{2\tau}$, E_{1n}, E_{2n} – тангенциальные и нормальные составляющие напряженности электрического поля в свободном пространстве и в полупро-

воднике на границе “свободное пространство-полупроводник”.

При решении уравнения теплопроводности (4) на границах объекта должны выполняться следующие условия:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{гр} = -\frac{\alpha}{\lambda}\left(T_{пов} - T_{о.ср}\right), \qquad (7)$$

где α – коэффициент теплопередачи поверхности объекта; $T_{пов}$ – температура поверхности объекта; $T_{о.ср}$ – температура окружающей среды.

Удельная мощность тепловыделения источников в общем виде выражается соотношением:

$$q(r,z,t) = \sigma(E_r^2 + E_z^2), \qquad (8)$$

Как показано в [11], решение этих уравнений целесообразно осуществить по FDTD алгоритму, в том числе с использованием метода независимых тепловых потоков.

Полный алгоритм решения самосогласованной задачи СВЧ локального тепловыделения и пространственно-временного установления температуры разбивается на следующие этапы:

– задание геометрии модификатора и электрофизических параметров объекта;

– введение режима СВЧ питания по возбуждению волновода (мощность на входном порту, временной характер воздействия и др.);

– определение плотности распределения тепловых источников в объекте через найденное из решения уравнений Максвелла для всех частей электродинамической системы “микромодификатор - объект” распределение СВЧ электрического поля в объекте;

– решение тепловой задачи на заданном временном интервале;

– расчет пространственного распределения электрофизических параметров объекта в случае необходимости учета их температурной зависимости.

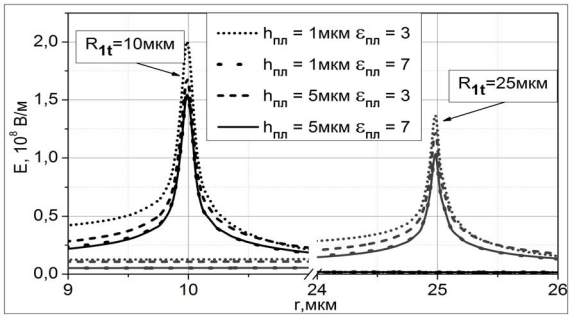
Напомним, что, как было указано выше, в данной работе последний этап не реализовывался.

Исследования производились на рабочей частоте микромодификатора f_0 = 8 ГГц. Мощность на входном порту составляла 25 Вт. СВЧ воздействие осуществлялось одиночным импульсом с длительностью от 10^{-8} до 10^{-3} с. Объектом исследования была тонкая пленка на кремниевой подложке, параметры которой: $C_{подл}$ - = 703 Дж/(кг•К); $\lambda_{подл}$ = 163 Вт/(м•К); $\varepsilon_{подл}$ = 12. Зазор между острием модификатора и объектом считался нулевым. Также пренебрегалось теплоотводом модификатора.

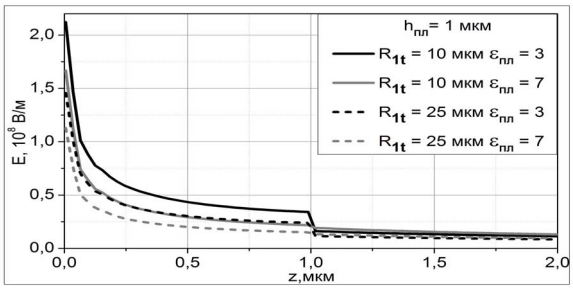
3. Результаты исследования

Выполненное в работе численное моделирование локального СВЧ воздействия на слоистую полупроводниковую структуру позволило установить: пространственно-временное распределение СВЧ электрического поля в системе, плотность тепловыделения и температуры.

На рис.2,а,б приведено пространственное распределение СВЧ электрического поля при двух значениях радиуса острия модификатора (R_{1t} = 10 мкм и R_{1t} = 25 мкм). Рис.2,а позволяет количественно подчеркнуть ту особенность, что толщина пленки практически не влияет на поперечную локализацию СВЧ поля в объекте.



а



б

Рис. 2. Пространственное распределение СВЧ электрического поля

Существенно также влияет на величину напряженности СВЧ поля в объекте и ее распределение по глубине значение диэлектрической проницаемости материала пленки. С ее уменьшением поле в пленке возрастает, в том числе, и вследствие лучшего согласования модификатора с объектом.

Отдельные исследования показывают, что заметное влияние электропроводности пленки на величину поля в ней начинает появляться только при $tg\delta_{пл} > 1$.

При более детальном исследовании и анализе складываются количественные представления о следующей физической модели СВЧ локального воздействия ближнеполевого модификатора на объект.

Ближнее СВЧ поле модификатора в контактном режиме (зазор равен нулю) при $\varepsilon_{пл} < 10$; $tg\delta_{пл} < 1$ и $h_{пл} > R_{1t}$ имеет поперечное пространственное распределение, аналогичное исходному (без пленки). Абсолютное его значение при этом уменьшается с увеличением $\varepsilon_{пл}$. При $tg\delta_{пл} > 1$ поле дополнительно ослабляется. При этом, кроме обычной физической природы СВЧ поляризации диэлектриков и полупро-

водников, сказывается еще и влияние объекта на согласование в линии передачи.

При $h_{пл} < R_{1t}$ картина качественно не изменяется, за исключением того, что в подложке появляется заметное по величине СВЧ поле. Количественно проявляется та особенность, что СВЧ поле в подложке зависит от $\varepsilon_{пл}$; $h_{пл}$.

Основной целью исследований распределения СВЧ поля здесь является получение более глубоких представлений о физической природе пространственно-временного распределения тепловых источников для температурной части задачи. На рис.3 представлено распределение плотности тепловыделения по глубине образца. (Предыдущие результаты убеждают, что параметры пленки на поперечное распределение СВЧ воздействия существенно не влияют).

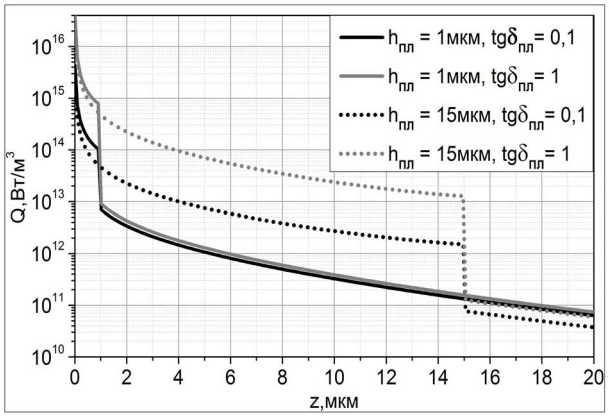


Рис. 3. Пространственное распределение тепловыделения по глубине структуры (R_{1t} = 10мкм, $\varepsilon_{пл}$ = 5.3; $tg\delta_{подл}$ = 0.01)

Наличие скачка при $z = h_{пл}$ и слабая зависимость Q при z = 0 от $tg\delta_{пл}$ свидетельствует о преимущественно ближнеполевом характере изменения тепловыделения по сравнению с рассогласованием в линии. Основной причиной этого может быть согласующее действие конусности линии, питающей апертурный узел. На рис.4 представлен график распределения СВЧ тепловыделения по радиусу структуры для пленки толщиной 1 мкм.

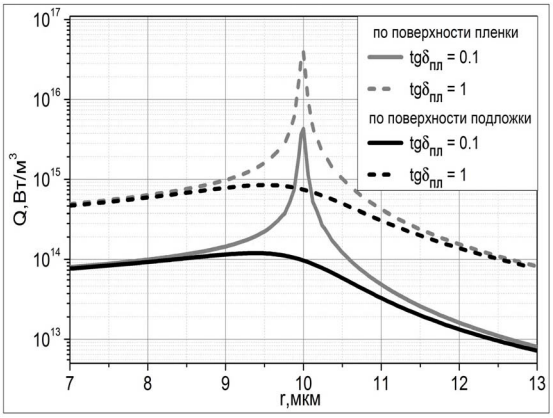


Рис. 4. Распределение СВЧ тепловыделения по радиусу структуры ($h_{пл}$ = 1мкм; R_{1t} = 10мкм, $\varepsilon_{пл}$ = 5.3; $tg\delta_{подл}$ = 0.01)

Распределение СВЧ тепловыделения по поверхности пленки качественно повторяет распределение СВЧ поля, представленное на рис.2. Тепловыделение растет пропорционально увеличению $tg\delta_{пл}$. Распределение тепловыделения по поверхности подложки не имеет ярко выраженного "трубчатого" характера. Это связано с различием $\varepsilon_{подл}$ и $\varepsilon_{пл}$, а также с толщиной пленки.

Представленные на рис.5 зависимости кинетики установления температуры на поверхности объекта от параметров пленки показывают хорошо физически интерпретируемые количественные закономерности. В частности, это резкая зависимость устанавливающейся температуры от толщины пленки и величины $tg\delta_{пл}$. Особенностью также является заметное влияния теплопроводности материала пленки.

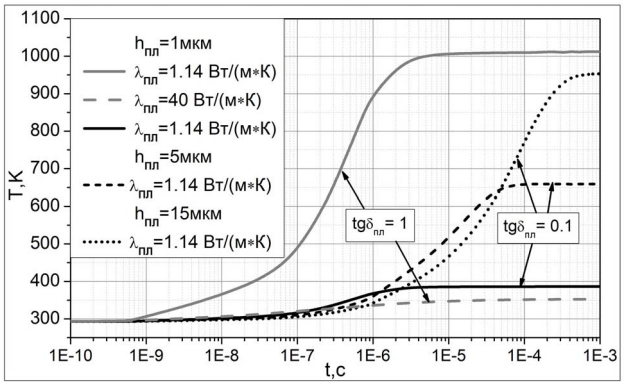
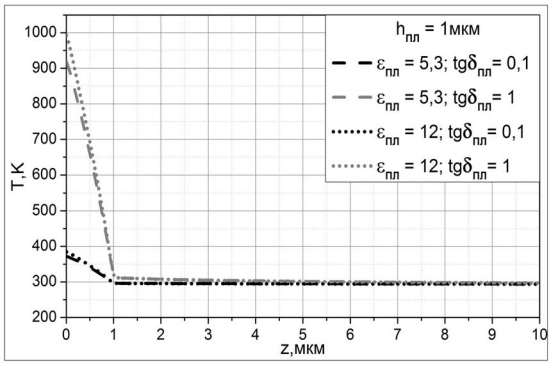


Рис. 5. Динамика установления пространственного распределения температуры ($tg\delta_{подл}$ = 0.01; $\varepsilon_{пл}$ = 5.3)

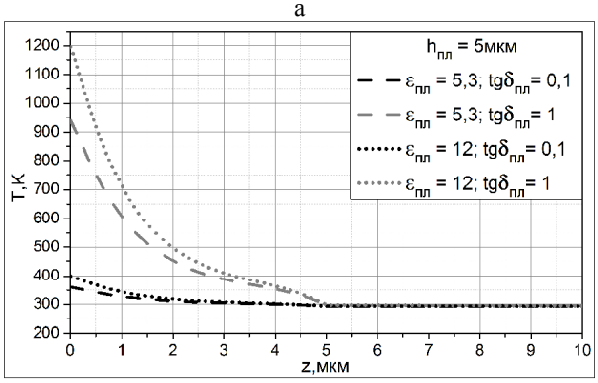
Рис. 6 – 8 иллюстрируют наиболее информативную зависимость пространственного распределения устанавливающейся в системе температуры от толщины пленки (при $h_{пл} < R_{1t}$); значения $\varepsilon_{пл}$ и $tg\delta_{пл}$; а также от соотношения ее теплопроводности с подложкой. Из этих зависимостей убедительно следует высокая управляемость величиной температуры в пленке значением $tg\delta_{пл}$ и ее теплопроводностью. Фактически можно при $h_{пл} < R_{1t}$ локализовать СВЧ нагрев в пленке, слабо изменяя температуру подложки.

Как видно из рис.7,а, поперечное распределение температуры мало зависит от толщины пленки, в то время как распределение ее вглубь слоистой структуры имеет характерные перепады на границе пленки с подложкой. Величина теплопроводности сильно влияет на скорость и локальность нагрева.

Из рис.8 можно сделать вывод, что локализация СВЧ нагрева приповерхностной части подложки с весьма ослабленным нагревом пленки осуществима. Этот результат важен как новый принципиальный факт. Практическое значение он может иметь для гетерирования дефектов из приповерхностной области подложки.

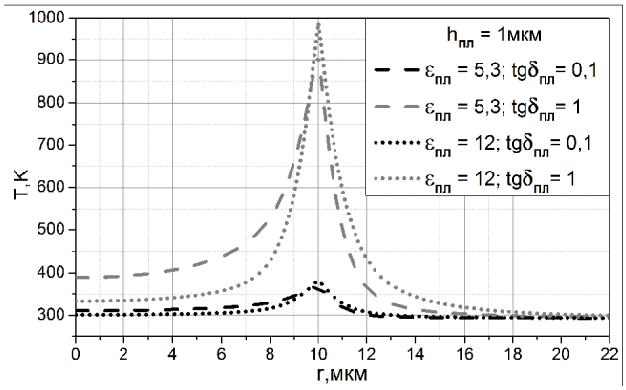


а

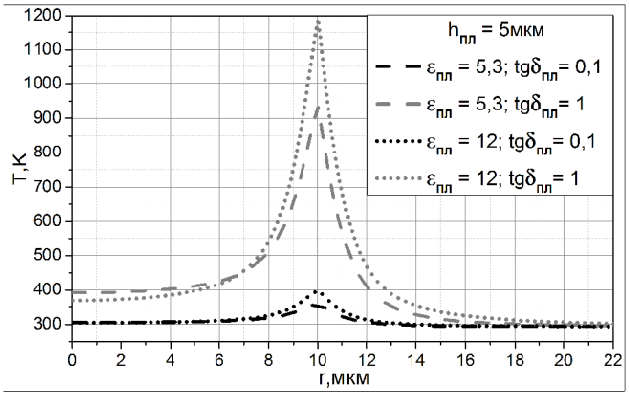


б

Рис. 6. Распределение температуры по глубине объекта (R_{1t} = 10мкм, τ = 1мкс; $\lambda_{пл}$ = 1.14 Вт/(м•К), $tg\delta_{подл}$ = 0.01)



а

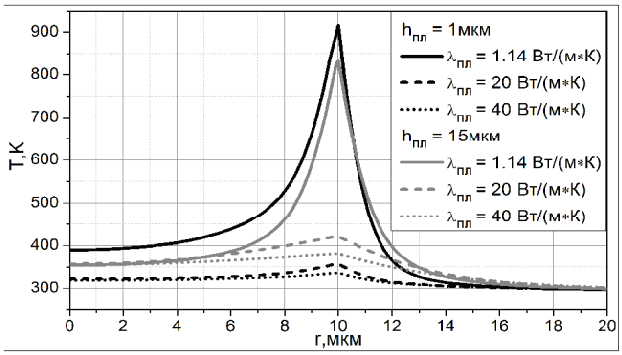


б

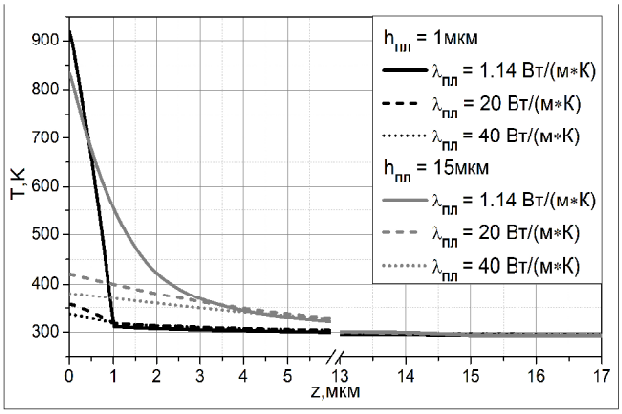
Рис.7. Распределение температуры по радиусу объекта (R_{1t} = 10мкм, τ = 1мкс; $\lambda_{пл}$ = 1.14 Вт/(м•К), $tg\delta_{подл}$ = 0.01)

Как видно из рис.7,а, поперечное распределение температуры мало зависит от толщины пленки, в то время как распределение ее вглубь слоистой структуры имеет характерные перепады на границе пленки с подложкой. Величина теплопроводности сильно влияет на скорость и локальность нагрева.

Из рис.8 можно сделать вывод, что локализация СВЧ нагрева приповерхностной части подложки с весьма ослабленным нагревом пленки осуществима. Этот результат важен как новый принципиальный факт. Практическое значение он может иметь для гетерирования дефектов из приповерхностной области подложки.



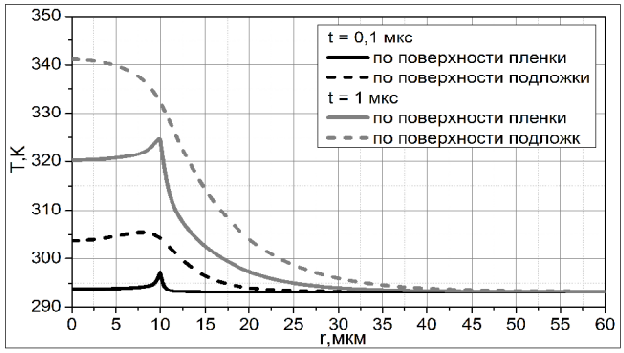
а



б

Рис.8. Влияние теплопроводности на пространственное распределение температуры ($\varepsilon_{пл}$ = 5.3; $tg\delta_{пл}$ = 1; τ = 1мкс, $tg\delta_{подл}$ = 0.01)

На рис.9 приведены результаты исследования распределения температуры для разного времени воздействия при $tg\delta_{пл} << tg\delta_{подл}$, $\lambda_{пл}$ = 1.14Вт/(м•К), $\varepsilon_{пл}$ = 5.3.



а

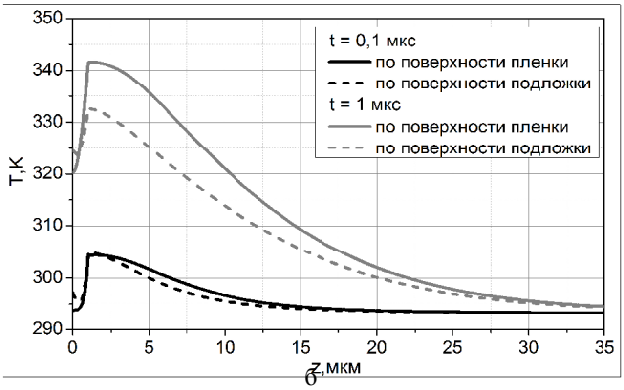


Рис. 9. Пространственное распределение температуры по поверхности пленки и подложки (а), а также вглубь объекта (б) ($h_{пл}$ = 1мкм; $tg\delta_{пл}$ = 0.01; $tg\delta_{подл}$ = 1)

Данный эффект также возможно использовать для гетерирования дефектов приповерхностной области подложки.

4. Выводы

В результате проведенного численного моделирования высоколокального воздействия СВЧ излучения на слоистую структуру объекта исследования были определены: пространственное распределение поля в объекте, локализация тепловыделения, кинетика и пространственное распределение температуры. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– толщина пленки практически не влияет на поперечную локализацию СВЧ поля в объекте, однако сказывается на продольном его распределении (по глубине). Более весомое влияние оказывают электрофизические параметры пленки: с уменьшением $\varepsilon_{пл}$ поле в пленке возрастает; влияние $tg\delta$ пленки на величину поля в ней начинает заметно проявляться только при $tg\delta_{пл} > 1$;

– локальность тепловыделения по радиусу объекта мало зависит от параметров пленки, в отличие от распределения вглубь исследуемой структуры. Величина тепловыделения существенно зависит как от $tg\delta$ пленки, так и от ее толщины;

– на кинетику и пространственное распределение температуры в подложке сильно влияет как толщина пленки, так и ее тепловые и электрофизические параметры. Фактически можно при $h_{пл} < R_{1t}$ локализовать СВЧ нагрев в пленке, слабо изменяя температуру подложки.

Управляя временем воздействия, можно достичь различного соотношения нагрева пленки и подложки при условии, что $tg\delta_{пл} < tg\delta_{подл}$. Один из возможных вариантов использования этого явления – гетерирование дефектов приповерхностной области подложки.

Литература: 1. *МОП-СБИС*. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антоннети, Д.Антониадиса и др. М.: Радио и связь, 1988. 496 с. **2.** *Thompson Keith*, Booske J.H., Ives R.L. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano // Journal of vacuum Science and Technology. Microelectronics and Nanometer Structures. 2005. Vol.23, №3. P.970-978. **3.** *Неволин В.К.* Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. М.: МИЭТ, 1996. 90с. **4.** *Koyanagi H.,* Hosaka S., Imura R., Shirai M. // Appl. Phys. 1995. Vol.67. P.2609-2611. **5.** *Steven M. Anlage,* Vladimir V. Talanov, Andrew R. Schwartz Principles of near-field microwave microscopy // Scanning probe microscopy. Electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale. 2007. Vol.I. P. 215-253. **6.** *Гордиенко Ю.Е., Камышан А.А., Ларкин С.Ю.* Сравнительный анализ характеристик резонаторных зондов для СММ // Радиоэлектроника и информатика. Электроника. 2011. №1. С.24-29. **7.** *Jerby E,* Herskowits R., Livshiys P. and et al. Silicon heating by a microwave-drill applicator with optical thermometry // Semiconductor Science and Technology. 2007, №22. P. 863-869. **8.** *Yehuda* Mair and Eli Jerby Localized rapid heating by low-power solid-state microwave drill // Transactions on microwave theory and techniques. 2012. Vol.60, №8. P. 2665-2672. **9.** *Livshits P.,* Dikhtyar V., Inberg A., Shahadi A., Jerby E. Local doping of silicon by a point-contact microwave applicator // Microelectronic engineering. 2011. Vol.88. P.2831-2836. **10.** *Гордиенко Ю.Е., Полетаев Д.А., Проказа А.М., Слипченко Н.И.* Высоколокальный СВЧ нагрев полупроводников и диэлектриков // Прикладная радиоэлектроника. 2013. Т.12, №3. С.452-458. **11.** *Gordienko Yu.Ye.,Taran Ye.P.* The model of numerical investigation of highly localized thermal effect of the microwave electromagnetic field upon semiconductive substances // Telecommunications and radio engineering, 2013. Vol.72, №20. P.1899 – 1913.

Поступила в редколлегию 12.09.2013

Рецензент: д-р физ.-мат.наук, проф. Должиков В.В.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов и объектов, микроэлектронные датчики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Пятайкина Мария Игоревна, аспирантка каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика и модификация материалов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Ларкин Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, ген.директор ЗАО "НПК Наука". Адрес: Украина, 03148, Киев, пр. 50-летия Октября, 2-б, тел. +38-044-236-10-85.

Полищук Александр Викторович, аспирант каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Проказа Александр Михайлович, м.н.с. каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика и модификация материалов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Слипченко Николай Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: солнечная энергетика, микроволновая микроскопия материалов и сред. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

УДК 621.372

МИКРОВОЛНОВЫЙ ЗОНД НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО НЕРЕГУЛЯРНОГО ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

БОНДАРЕНКО И.Н., ГАЛИЧ А.В.

Исследуются возможности применения нерегулярных запредельных структур с диэлектрическим и магнитным заполнением для создания зондов локальной СВЧ-диагностики материалов и объектов. Проводятся численные исследования характеристик СВЧ зондов на основе запредельного прямоугольного волновода.

1. Введение

В последние годы активно развиваются методы локальной диагностики материалов, сред и структур, типичными представителями которых являются различные методы сканирующей зондовой микроскопии [1]. Электромагнитные поля микроволнового диапазона также могут служить эффективным инструментом для бесконтактной локальной диагностики при использовании устройств микроволновой техники, обеспечивающих формирование локализованных электромагнитных полей в области взаимодействия с локальным участком или малоразмерным объектом диагностики [2, 3].

Обычно такая задача решается с помощью различных видов зондовых или микрозондовых устройств, сопрягаемых либо с линиями передачи, либо с резонаторными структурами. Достаточно широко теоретически и экспериментально развита также практика использования микроволновых апертурных резонаторных измерительных преобразователей [4, 5].

Общим недостатком упомянутых устройств является необходимость как конструктивного, так и электродинамического сопряжения зондовых структур с измерительными цепями или измерительными преобразователями. При этом с уменьшением геометрических размеров зонда, напрямую связанного с повышением локальности формируемых полей, возрастают конструктивные и технологические сложности их объединения с элементами и устройствами измерительной схемы.

В данной работе предлагается указанные проблемы решать с помощью запредельных нерегулярных волноводов, заполняемых материалами с такими величинами диэлектрической и магнитной проницаемости, которые позволяют снимать запредельность при сохранении малых геометрических размеров выходной части зонда и необходимой структуры поля.

2. Основная часть

В качестве объекта исследования был выбран запредельный нерегулярный волновод на основе волновода прямоугольного сечения. Достоинствами такого волновода являются: возможность работы на одном основном типе волны H_{10}, фиксированная поляризация распространяющейся электромагнитной волны, независимость типа волны, поляризации и условий распространения от размеров узкой стенки волновода, возможность регулирования степени запредельности изменением размеров широкой стенки волновода.

Нерегулярный волновод упрощенно можно представить в виде, показанном на рис.1. Амплитуда волны в запредельном волноводе ($\lambda > \lambda_{кр.}$) уменьшается по экспоненциальному закону:

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\sqrt{1-\lambda_{кр}^2/\lambda^2}\cdot z\right), \qquad (1)$$

где E_0 – амплитуда волны на входе запредельного волновода; $\lambda_{кр.}$ – критическая длина волны запредельного волновода на рабочем типе волны; λ – рабочая длина волны; $E(z)$ – амплитуда волны при некотором значении координаты z.

Величины затухания в таком запредельном прямоугольном волноводе регулируется с помощью диэлектрика, вводимого в запредельный участок. При этом величина диэлектрической проницаемости ε определяется из условия:

$$\varepsilon = (\lambda/2a)^2. \qquad (2)$$

Переход от стандартного волновода к запредельному осуществляется плавно, чтобы избежать нежелательных дополнительных переотражений в линиях связи. Волновод делиться на два отрезка, один из них расположен до плоскости отсечки и не вносит заметного затухания в амплитуду распространяющейся волны, и другой, который расположен за плоскостью отсечки и является нерегулярным запредельным волноводом. Координата плоскости отсечки определяется из условия равенства $\lambda_{кр.}$ рабочей длине волны λ для данного сечения волновода. Из рис.1 можно определить, что плоскость отсечки расположена на расстоянии от начала нерегулярного волновода $(2a-\lambda)/4tg\theta$.

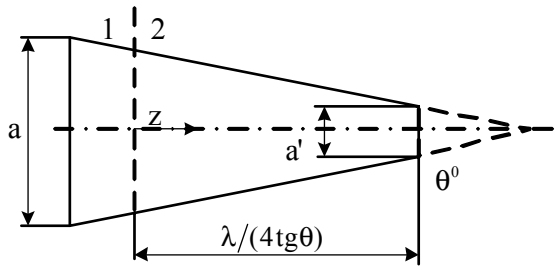


Рис. 1. Схема нерегулярного волновода

Минимальный размер апертуры зондовой структуры на основе прямоугольного волновода определяется из соотношения (2) при заданном значении диэлектрической (или магнитной) проницаемости материала заполнения. На рис. 2 представлен график зависимости, с помощью которого можно определить величи-

ну диэлектрической (или магнитной) проницаемости для конкретной апертуры зондовой структуры в зависимости от рабочей длины волны. Из графиков рис. 2 следует, что при размерах апертур a' = 1…5 мм величина проницаемостей заполнения превышает значение 10 (максимальное для твердых технологичных диэлектриков) и, соответственно, в этих случаях необходимо выбирать заполнение с $\mu > 10$. На рис. 3 представлены зависимости длин нерегулярных участков волновода (z) от рабочей длины волны (λ) при разных углах раскрытия апертуры.

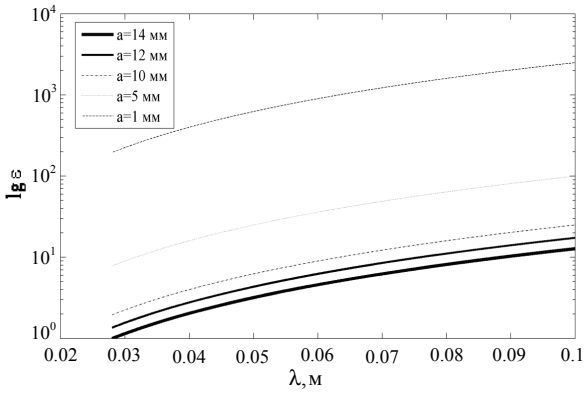


Рис. 2. Зависимость величины ε (или μ) от λ при заданных размерах апертуры зондовой структуры

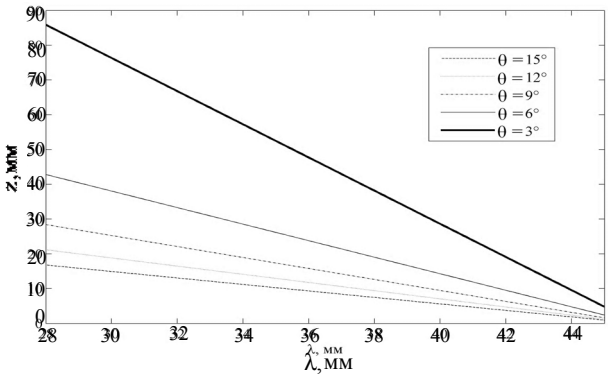


Рис. 3. Зависимость длины нерегулярного участка волновода (z) от λ при разных углах раскрытия апертуры

Если представить нерегулярный запредельный волновод в виде большого количества соединенных друг с другом регулярных волноводов длиной Δz, то для расчета коэффициента затухания можно использовать следующее соотношение [6]:

$$\alpha_i = 20\lg\left(\exp\left\{-\sum_{k=1}^{n}\frac{\pi}{(\lambda/4\mathrm{tg}\theta - k\Delta z)\,\mathrm{tg}\theta}\times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times\sqrt{1-\frac{\left[4(\lambda/4\mathrm{tg}\theta - k\Delta z)\,\mathrm{tg}\theta\right]^2}{\lambda^2}}\cdot\Delta z\cdot 2\right\}\right), \qquad (3)$$

где $n = z/\Delta z$.

На рис.4 приведены графики $\alpha(z)$, вычисленные для запредельных нерегулярных волноводов по формуле (3). При этом: $\lambda = 32$ мм, $\Delta z = 1$ мм, a = 23 мм, θ = 15°, 12°, 9°, 6°, 3°.

Как видно из графиков (см. рис.4), из-за высокого затухания в запредельном волноводе потери энергии достигают уровня ~80-90 дБ. Чем меньше угол раскрытия апертуры и больше длина нерегулярного участка волновода, тем уровень затухания выше. Более того, уровень затухания ~80-90 дБ достигается при длинах запредельных участков значительно меньших, чем определяются из графиков рис. 3.

Численное моделирование рассматриваемых волноводных структур с запредельными участками позволяет выявить коэффициенты отражения и передачи (рис.5-10) [7].

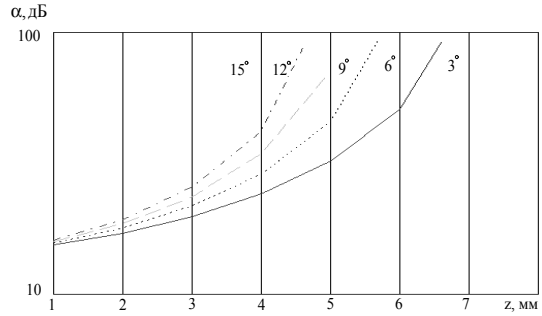


Рис.4. Графики зависимости коэффициента затухания от длины запредельного участка нерегулярного волновода

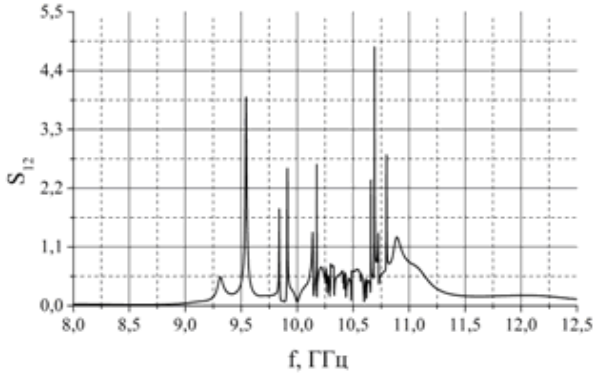


Рис. 5. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (3x3) при ε (или μ) = 25

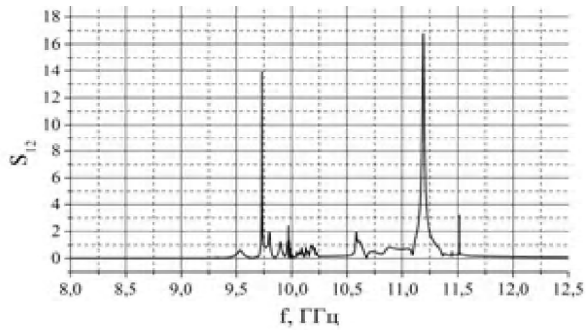


Рис.6. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (3x3) с клиновидным согласователем при ε (или μ) = 25

На узком конце волновода формируется поле с повышенной напряженностью, однако в регулярной части возникают стоячие волны, а коэффициенты отражения и передачи в рабочем диапазоне имеют сильно изрезанные характеристики. Это обусловлено, во-первых, выбором диэлектрика с пониженным значением ε (по формуле (2) для таких размеров величина ε должна быть ~ 100 и более) и, во-вторых, резким несогласованным переходом в регулярной и незапредельной части волновода от области без заполнения к области с заполнением.

Использование клиновидного согласователя позволяет в некоторых случаях значительно уменьшить амплитуду стоячих волн в незапредельной области и повысить напряженность поля в узкой части запредельного участка.

При увеличении значения проницаемости (ε или μ или ε • μ) заполнения наблюдается сужение рабочего диапазона и уменьшение количества резонансных откликов.

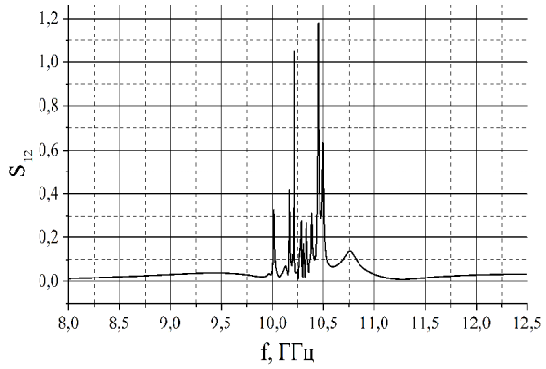


Рис.7. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (2x2) при ε (или μ) = 56,25

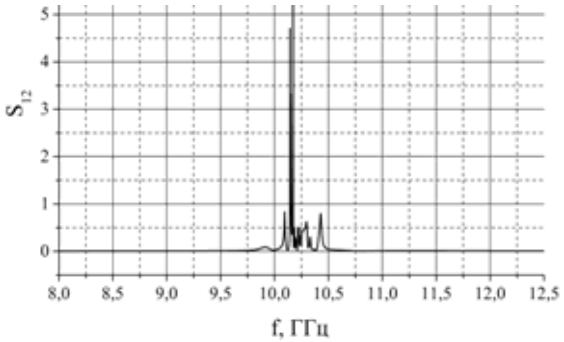


Рис. 8. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (2x2) с клиновидным согласователем при ε (или μ) = 56,25

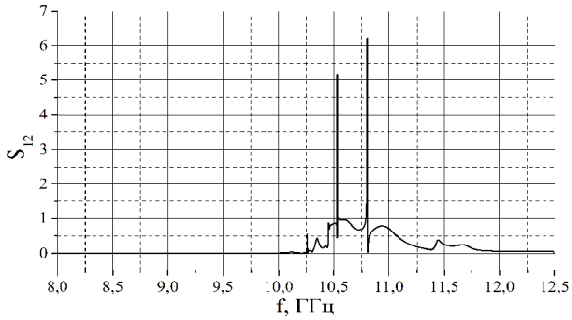


Рис.9. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (1x1) при ε (или μ) = 225

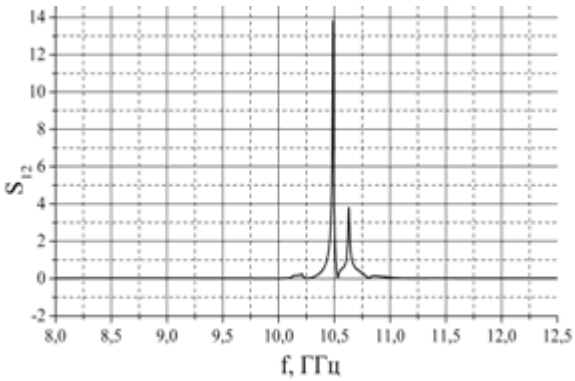


Рис.10. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (1x1) с клиновидным согласователем при ε (или μ) = 225

Фактически при очень сильной степени запредельности (размеры выходных сечений 3x3, 2x2, 1x1 мм), компенсируемой с помощью заполнения с большими значениями проницаемости, характеристики возможной зондовой структуры на основе прямоугольного нерегулярного волновода ухудшаются в связи с сокращением рабочего диапазона частот и проявлением резонансных явлений.

Поскольку распределения полей рассчитывались для соответствующих максимальных значений коэффициентов передачи и при этом не наблюдалось резонансных распределений в области вставок, можно предположить, что их источником являются процессы в регулярных и незапредельных областях, обусловленные недостаточным согласованием запредельной и незапредельной частей волновода.

3. Выводы

Рассматриваемые в работе нерегулярные волноводные структуры с запредельностью, снимаемой с помощью диэлектрического или магнитного заполнения, представляются достаточно перспективными для создания микрозондовых структур для локальной микроволновой бесконтактной диагностики различных материалов и объектов.

Достоинством этих устройств является их конструктивная простота, а также возможность формирования в выходной апертуре фиксированной поляризации электромагнитного поля.

К недостаткам (в перспективе преодолимым) можно отнести необходимость более тщательного подбора материала заполнения с требуемыми характеристиками и принятие мер по оптимизации геометрии внешней части вставки для согласования ее с регулярной частью волновода.

Литература: 1. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144с. **2.** *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P.* et al. Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. 537p. **3.** *Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R.* Principles of near-field microwave microscopy // Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale / edited by S.V.Kalinin, A.Gruverman. New York: Springer-Verlag, 2007.

Vol. 1. P. 215-253. **4.** *Гордиенко Ю. Е.* Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонаторных СВЧ-датчиков апертурного типа / Ю. Е. Гордиенко, А. Ю. Панченко, Р. С. Фар // Радиотехника. Х., 1998. Вып. 107. С. 93–103. **5.** Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: монографія / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін. ; за ред. Я. І. Лепіха. Одеса : Астропринт, 2011. 352 с. **6.** *Бондаренко И.Н.* Регулируемые элементы связи на основе запредельных волноводов / И.Н. Бондаренко, Н.О. Гнесь, А.С. Гнесь // Радиотехника. Х., 1986. Вып. 76. С. 114–119. **7.** *Бондаренко И.Н.* Измерительный зонд на основе запредельного волновода / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич, А.В. Шахов // Сб. научн. трудов 6 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Харьков-Крым, 2013. С. 82-85.

Поступила в редколлегию 14.09.2013

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

Бондаренко Игорь Николаевич, д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрою микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: криогенная радиофизика, техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Галич Александр Владимирович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

УДК 615.47:616-074

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ В ПРИБОРАХ ДИАГНОСТИКИ ГИПЕРТОНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

БОРОДКИНА А.Н., ГОРДИЕНКО Ю.Е., СЛИПЧЕНКО Н.И.

Проводится анализ конструкций СВЧ резонаторных датчиков в целях их оптимизации для получения наиболее полной информации о комплексном значении диэлектрической проницаемости в диапазоне частот релаксации свободной воды в биообъектах. Анализ проводится с использованием результатов решения уравнений Максвелла для цилиндрических областей. Определяются возможности совершенствования конструкций датчиков, позволяющие при сохранении точности измерений существенно уменьшить объемы клинических проб.

Введение

Оперативная диагностика кардиологических патологий, выбор путей их лечения и доз препаратов определяют успешность профилактики и лечения этих заболеваний. В настоящее время установлено, что комплексное значение диэлектрической проницаемости проб эритроцитов пациента в области частот релаксации свободной воды содержит информацию, необходимую в лечебной практике этих патологий [1,2].

В настоящее время широко распространены четвертьволновые коаксиальные резонаторные измерительные преобразователи (РИП) [3]. Они обладают возможностью локальной концентрации поля в заданном объеме образца, широким рабочим частотным диапазоном. Использование коаксиальной измерительной апертуры (КИА) малого диаметра позволяет существенно увеличить разрешающую способность этих РИП.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвященных применению СВЧ РИП для исследования биообъектов [4]. Современные прямые численные методы позволяют существенно уточнить модель РИП с КИА, учесть геометрию апертуры, положение и размеры образца.

Однако в известных работах не проводилась оптимизация конструкции датчика для проведения измерений нескольких параметров. Кроме того, теоретические работы основаны на упрощенных моделях РИП, которые позволяют учесть только колебательные потери в резонаторной системе. Излучение энергии за пределы образца, которое существенно влияет на информационные параметры (добротность и частоту), в этих моделях исключено из анализа. Проведение теоретической калибровки требует обязательного учета этого фактора. Также важным условием успешного использования КРИП для сканирования биообъектов является инвариантность информационных сигналов к величине зазора между датчиком и образцом и к толщине самого образца.

Таким образом, актуальными являются задачи как совершенствования конструкций РИП с КИА, так и развития их теоретических моделей.

Цель данной работы – определение путей совершенствования конструкций датчиков, обеспечивающих при сохранении точности измерений существенное уменьшение объемов клинических проб и, тем самым, снижение стрессовой нагрузки пациентов.

1. Особенности конструкции РИП

Конструкция РИП в виде четвертьволнового коаксиального резонатора с КИА и помещением исследуемого объекта на открытом торце выбрана с учетом возможности перекрытия диапазона частот $5\cdot10^6\ldots4\cdot10^{10}$ Гц, который обеспечивает возможность исследования объектов с разным соотношением свободной и связанной воды.

Предлагаемая конструкция схематически показана на рис. 1.

Минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов: $R_1/R_2 = 0{,}28$. Очевидно, что максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном соотношении. Воздушный за-

зор под плоскостью апертуры необходим для сохранности образца биоматериала. Сам образец толщиной h_{21} и электрофизическими параметрами $\varepsilon_{21}, tg\delta_{21}$ нанесен на подложку толщиной h_2 и электрофизическими параметрами $\varepsilon_2, tg\delta_2$.

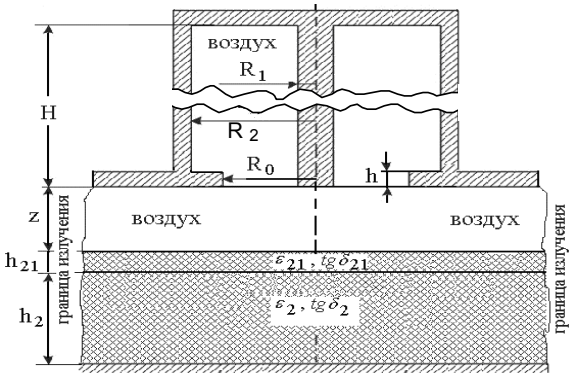


Рис. 1. Электродинамическая структура РИП

2. Определение параметров резонансной камеры РИП

Параметры РИП и системы помещения образца должны обеспечить максимальное его влияние на добротность. При этом нагруженная добротность РИП не должна быть меньше 100.

Провести численный анализ электродинамической структуры (см.рис. 1) можно на основе результатов решения уравнений Максвелла с учетом потерь на излучение. Это позволяет оптимизировать конструкцию РИП и выбрать необходимые соотношения конструктивных параметров [5,6].

Частота максимума дисперсии воды около 10 ГГц. Поэтому рабочая длина волны РИП должна составлять $\lambda = 3$ см. Согласно [7] одномодовый режим коаксиальной линии сохраняется в диапазоне частот:

$$f < \frac{c}{\pi(R_2 - R_1)}, \qquad (1)$$

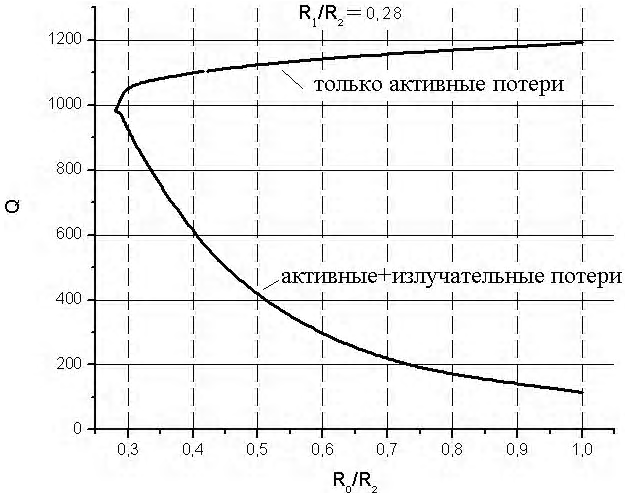
где c – скорость света.

Резонансная частота идеального четвертьволнового резонатора находиться из условия:

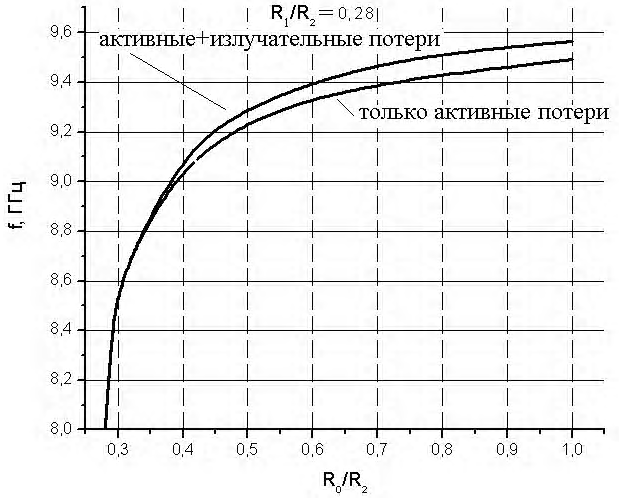
$$f_0 = \frac{c(2n-1)}{4H}. \qquad (2)$$

С учетом предварительной теоретической оценки [7,8] были выбраны следующие геометрические размеры модели (см.рис.1.): $H/\lambda = 1{,}25$; $R_2/\lambda = 0{,}17$; $h/H = 5{,}6 \cdot 10^{-3}$; $z = \infty$; $h = 0$ (простой четвертьволновой резонатор, нагруженный на свободное пространство). Проводимость стенок резонатора принята равной $\sigma = 5{,}8 \cdot 10^6$ См/м.

В результате численного решения уравнений Максвелла с учетом потерь в стенках и на излучение и решения уравнений Гельмгольца, учитывающих только потери в стенках, получены следующие зависимости добротности и резонансной частоты РИП от размеров коаксиальной апертуры (рис. 2).



а

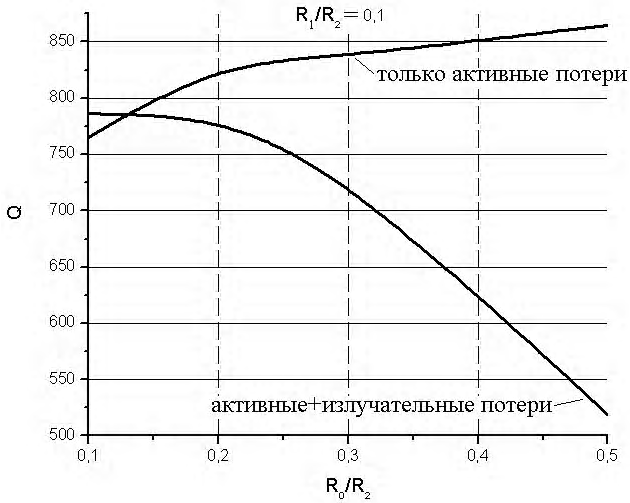


б

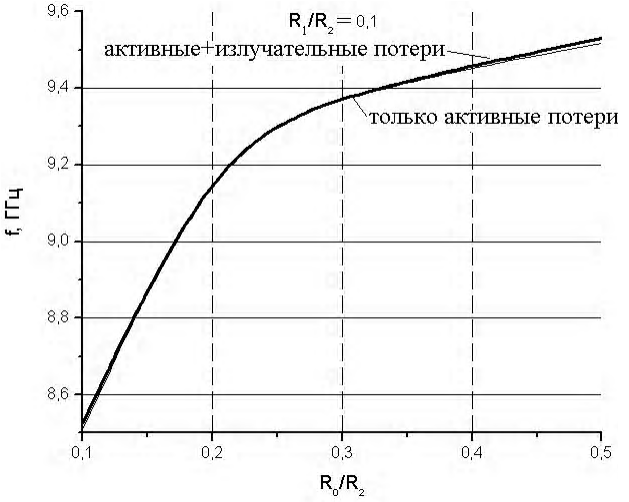
Рис. 2. Зависимость добротности (а), и частоты (б) от размеров апертуры

Необходимость учета потерь на излучение наиболее явно проявляется во влиянии размеров апертуры на величину добротности (см. рис. 2, а). Даже при малых апертурах добротности, вычисленные с учетом потерь на излучение и без него, отличаются почти в 2 раза. В то же время учет излучения почти не влияет на вычисленное значение резонансной частоты (см. рис. 2, б). Как видно из этих графиков, уменьшение размеров апертуры позволяет снизить потери на излучение в свободное пространство.

На рис. 3 показаны результаты аналогичного расчета добротности и резонансной частоты РИП, но при соотношении радиусов коаксиала $R_1/R_2 = 0{,}1$.



а



б

Рис. 3. Зависимость добротности (а) и частоты (б) от величины апертуры при неоптимальном соотношении радиусов резонансной камеры

Как видно из графика (см. рис. 3 а), отношение R_1/R_2 существенно влияет на добротность РИП, в данном случае она уменьшилась в 1,5 раза. Поведение резонансной частоты РИП (см. рис. 3, б) аналогично приведенному на рис. 2,б.

Уменьшение добротности вынуждено, если РИП предназначен для исследования объектов малых размеров. Выход из этой ситуации может быть в использовании более сложной конструкции РИП, в которой $h \neq 0$ (см. рис.1).

3. Оценка влияния КИА на работу РИП

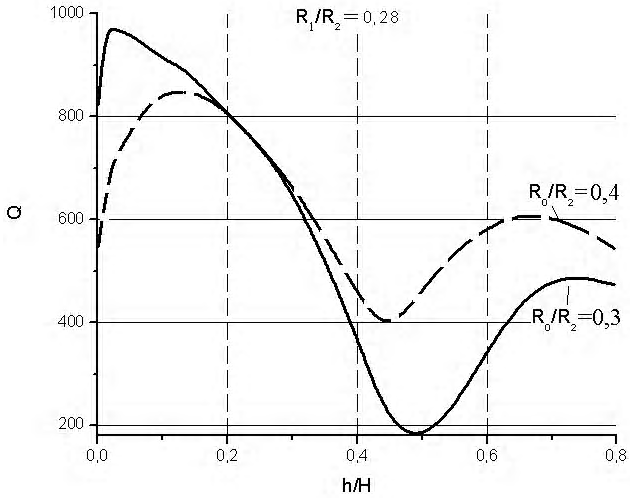
Физические процессы в РИП с КИА более сложные, чем в простом четвертьволновом резонаторе. Данный РИП может функционировать в нескольких режимах:

1. Коаксиальная апертура резонансно настроена на рабочую частоту и создает с основной резонансной камерой систему связанных резонаторов. При исследовании образца изменяется резонансная частота и добротность КИА, что приводит к изменению резонансной частоты и добротности всей системы.

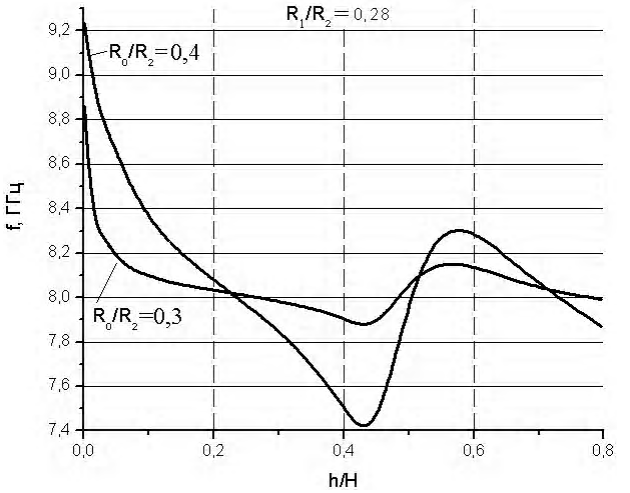
2. Коаксиальная апертура согласована с резонатором в области их соединения, но работает в режиме линии передачи, нагруженной образцом. При сканировании изменяется согласование такой линии с резонатором, что вызывает изменение добротности и резонансной частоты системы.

3. Коаксиальная апертура первоначально согласована как с резонатором, так и с образцом. Несогласованность со стороны образца при сканировании изменяет добротность и резонансную частоту системы.

Реализовать какой-либо из данных режимов в чистом виде весьма проблематично. Режим работы задается выбором геометрии коаксиальной апертуры. Наиболее часто коаксиальная апертура функционирует в нескольких режимах одновременно. На рис. 4 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от высоты апертуры h при разных значениях размеров апертур.



а



б

Рис. 4. Зависимость добротности (а) и резонансной частоты (б) от параметров апертур

Изменение добротности (см. рис. 4, а) носит резонансный характер. Более острый резонансный пик наблюдается при меньшей апертуре, что соответствует уменьшению потерь на излучение. Уменьшение резонансной частоты (см. рис. 4, б) обусловлено ростом емкости апертуры при увеличении ее высоты.

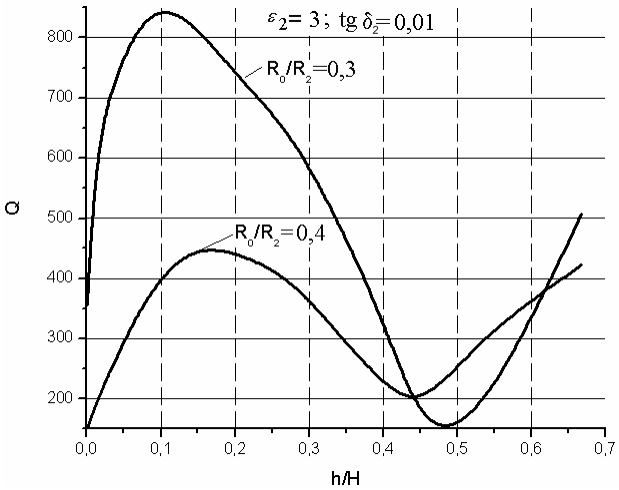
Исследуя особенности режимов работы РИП с КИА, учтем физические факторы. При соотношениях $h/\lambda \approx 0{,}5$ реализуется 1-й режим (рис.4, а,б). Анализируя графики нужно учесть, что они построены для случая $H/\lambda = 1{,}25$. Этот режим характеризуется существенным уменьшением добротности, так как соотношение радиусов резонансно настроенной КИА не оптимальное.

Функционирование во втором режиме также предполагает увеличение отношения h/H, которое приводит к вырождению конструкции, сглаживанию ее характеристик. Поэтому использование РИП с КИА при таких конструктивных решениях нецелесообразно. По сути, с увеличением h данный РИП превращается в коаксиальный четвертьволновой резонатор с неоптимальным соотношением радиусов R_1/R_2.

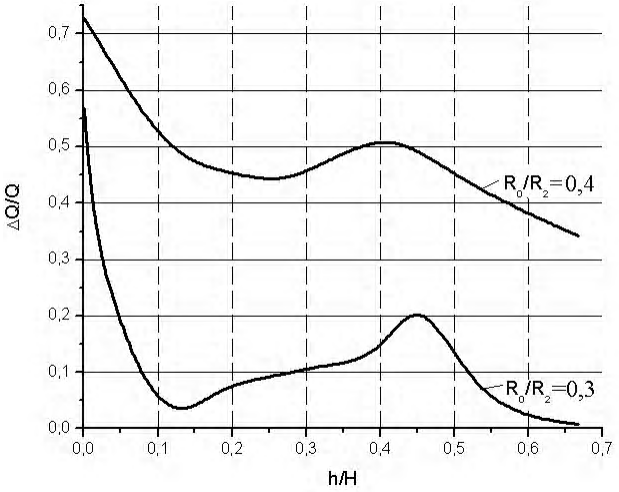
Очевидно, что наибольшее влияние образца на выходные параметры РИП с КИА будет наблюдаться при малых радиусах апертуры. При этом отношение h/H должно быть в пределах 0,01…0,05.

Чувствительность РИП к изменению параметров образца позволяют оценить зависимости добротности и относительного ее изменения от высоты коаксиальной апертуры h [9]. Эти зависимости приведены на рис. 5.Данные графики также получены с помощью численного решения уравнений Максвелла для модели с параметрами: $H/\lambda = 1{,}25$; $R_2/\lambda = 0{,}17$; $R_1/R_2 = 0{,}28$; $z = 0$; $h_{21} = 0$; $h_2/\lambda = 0{,}14$; $\sigma = 5{,}8 \cdot 10^6$; $\varepsilon_2 = 3$; $tg\delta_2 = 0{,}01$; $\lambda = 3$ см. Относительное изменение добротности рассчитано исходя из добротности системы, нагруженной на свободное пространство, и добротности, нагруженной на образец с параметрами $\varepsilon_2 = 3$; $tg\delta_2 = 0{,}01$.

Как видно из графика (рис. 5, а), добротность РИП при сканировании образца с параметрами $\varepsilon_2 = 3$; $tg\delta_2 = 0{,}01$ остается очень высокой даже при раскрывах апертуры $R_0/R_2 > 0{,}3$. Имеется четко различимый максимум чувствительности датчика при высоте апертуры $h/\lambda \approx 0{,}5$ (см.рис. 5, б). Здесь также надо учитывать, что $H/\lambda = 1{,}25$. Данный факт согласуется с физическими условиями и свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с этим, из графиков на рис. 5, б видно, что даже при оптимальной высоте коаксиальной апертуры $h/\lambda \approx 0{,}5$ чувствительность РИП в 2…2,5 раза меньше, чем при высоте $h \to 0$. Этот факт обусловлен значительным провисанием поля из апертуры в исследуемый образец. Такое поведение зависимости $\Delta Q/Q$ подтверждает сделанное выше предположение, что наибольшая чувствительность датчика обеспечивается при малой высоте апертуры – $h/H < 0{,}05$.



а



б

Рис. 5. Зависимость Q (а) и $\Delta Q/Q$ (б) от параметров апертуры

Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости учета потерь на излучение в численных и аналитических моделях резонаторных измерительных преобразователях с открытой коаксиальной измерительной апертурой. Эти потери являются следствием волновой природы физических процессов в системе резонатор-образец.

Разработанная и реализованная расчетная модель СВЧ резонаторного датчика позволила учесть величину излучения из открытого конца резонаторного датчика. Это является важным фактором, который существенно влияет на результат измерений и который должен учитываться при теоретической калибровке таких датчиков и при определении параметров образца.

Разработанная модель является основой для создания методики оптимизации конструкций РИП с КИА, которая позволит учесть электрофизические характеристики исследуемого объекта и конструкции, где он размещается.

Литература: 1. *Введение* в биомембранологию /Под ред. А.А. Болдырева. М.: Изд-во МГУ, 1990. 208с. **2.** *Стрюк Р.И.* Адренореактивность и сердечно-сосудистая система/ Стрюк Р.И., Длусская И.Г. // М.: Медицина. 2003. 160с. **3.** *Steinhauer D. E.* Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope. / Steinhauer D. E., Vlahacos C. P., Dutta S. K., Feenstra B. J., Wellstood F. C., Anlage S. M. // Appl. Phys. Lett. 1998. № 72. P. 861 – 863. **4.** *Щеголева Т.Ю.* Исследование биологических объектов в миллиметровом диапазоне радиоволн / Т.Ю. Щеголева // К.: Наук. думка. 1996. 182 с. **5.** *Гордиенко Ю. Е.* Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов / Гордиенко Ю. Е., Петров В. В., Полетаев Д. А. // Радиотехника. 2008. № 154. С. 61 – 66. **6.** *Гордиенко Ю.Е.* Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой. / Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Полетаев Д.А. // Радиотехника. 2009. № 157. С. 108 – 114. **7.** *Кураев А. А.* Электродинамика и распространение радиоволн. / Кураев А. А., Попкова Т. Л., Синицын А. К. // Мн.: Бестпринт, 2004. 358 с. **8.** *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ / Лебедев И. В. // М.: Высш. школа, 1970. 440 с. **9.** *Бондаренко И.Н.* Формирование сигналов сканирования в микроволновой микроскопии с резонаторным микрозондом / Бондаренко И.Н., Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю. // Радиотехника. 2009. № 158. С. 59 – 67.

Поступила в редколлегию 14.09.2013

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

Бородкина Анна Николаевна, аспирант каф. микроэлектронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: биофизика, радиофизика, СВЧ методы измерений, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 7021-362.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов и объектов, микроэлектронные датчики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Слипченко Николай Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. Микроэлектроники, электронных приборов и устройств, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: Солнечная энергетика, микроволновая микроскопия материалов и сред. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

УДК621.397

ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИНФРАКРАСНЫХ ВСПЫШЕК НА ОБЪЕКТЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

ИЛЬИН М.А.

Рассматриваются метод идентификации инфракрасных (ИК) маркеров, располагаемых на объекте, и процедура вычисления координат маркеров по видеоизображениям их вспышек в трехкамерной телевизионной системе. Метод оперирует идентификационными областями маркеров, что позволяет отличить один маркер от других с учетом их возможного перекрытия, а также предсказать будущее положение каждого маркера. Метод может найти применение для управления виртуальными декорациями при студийных видеосъемках, построения скелетной анимации и слежения за подвижными объектами.

Введение

Оптический трекинг, или определение координат объекта и прослеживание его движения оптоэлектронными средствами с применением световых маркеров на объекте, является весьма эффективным. Использование цифровых телевизионных средств, формирующих изображения большого числа маркеров на цифровом видеорастре, еще более повышает эффективность оптического трекинга – появляется возможность оценки всех шести степеней свободы подвижного объекта – его 3D координат и трех углов ориентации. При этом возникают задачи идентификации каждого маркера системы трекинга и измерения 2D координат центров их видеоизображений, получаемых с разных ракурсов. В существующих системах используются самые разнообразные системы идентификации. Одни применяют метод, определяющий порог яркости, другие системы основаны на изменении спектра каждого маркера, однако все они имеют общий недостаток – существует ограничение на количество маркеров в системе. Поэтому возникает также задача разработки метода идентификации, который позволит снять и это ограничение. С решением сформулированных задач были связаны исследования, отдельные результаты которых приведены ниже.

1.Оценка параметров видеоизображения маркера

Для нахождения координат программа действует по следующему алгоритму:

– определяется порог чувствительности для поиска ярких пятен в зависимости от фона;

– производится поиск областей, имеющих точки, которые превышают этот порог;

– производится яркостный анализ пятна, определяются его границы и рассчитывается интегральная яркость [1].

Основой для обнаружения засветок маркеров на изображении является сегментация. Она представляет собой процесс разбиения изображения на множество областей (наборов пикселей), соответствующих структурным единицам в сцене или определенным объектам. Цель состоит в том, чтобы найти такие объекты, какие представляют интерес по геометрии изображения, и отказаться от избыточной информации, т.е. от

областей в изображении, не представляющих такого интереса. Часто это делается в качестве первого шага, прежде чем применяются аналитические алгоритмы, которые позволяют извлекать более абстрактную информацию из данных изображения. Это один из наиболее важных шагов в извлечении информации из изображения. Сегментация изображения является низкоуровневой процедурой, работающей на уровне отдельных пикселей. Существует несколько методов для определения принадлежности пикселя к интересующей зоне. Один из наиболее простых методов для выделения принадлежности пикселя к выбранному сегменту в изображении – это сегментация порога. Она определяет диапазон значений яркости для исходного изображения, тогда пиксели в пределах этого диапазона выбираются, как принадлежащие к области, представляющей интерес, все другие пиксели отклоняются, как принадлежащие к фону. При использовании инфракрасного света в оптической системе слежения маркеры могут быть легко разделены по порогам. Маркеры излучают либо отражают инфракрасный свет, излучения с другими длинами волн будут отфильтрованы, поскольку инфракрасный фильтр установлен в передней части объектива. Таким образом, области в изображении, представляющие маркер, имеют намного более высокие значения яркости по сравнению с фоном, как показано на рис. 1.

Рис. 1. Вид засветок ИК маркеров

Для определения положения маркера на изображении вычисляется взвешенный вклад пикселей, принадлежащих к маркеру. Для сферических маркеров это обычно соответствует центру маркера. Рис. 2 показывает крупным планом вид одного пятна. Видно, что яркость пикселей возрастает по направлению к центру пятна. Если $F(j,k)$ является яркостью пикселя в позиции j,k, то координаты центра засветки по горизонтали и вертикали (u, v) в пикселях рассчитываются следующим образом [2]:

$$\bar{u} = \frac{\frac{1}{K}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} jF(j,k)}{\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} F(j,k)} \qquad \bar{v} = \frac{\frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} kF(j,k)}{\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} F(j,k)},$$

где J,K – общее количество пикселей по горизонтали и вертикали соответственно.

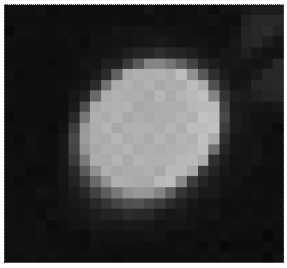


Рис. 2. Крупный план светового пятна засветки маркера

Сегментация и обнаружение засветки могут быть выполнены за один проход, что сводится к снижению требований к памяти и уменьшению количества инструкций для процессора, что улучшает вычислительную производительность.

2. Идентификация маркеров и определение их координат

Идентификация маркеров осуществляется по первому их последовательному включению и дальше контролируется по их идентификационным областям (рис. 3).

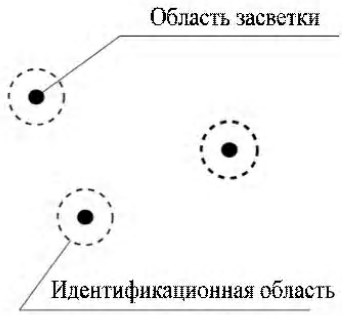


Рис. 3. Идентификационные области маркеров

Размеры идентификационных областей маркеров выбираются в блоке синхронизации системы в зависимости от скорости движения объекта, чтобы координаты новых положений маркеров не выходили за пределы своих областей. При возможном перекрытии двух областей идентификация маркеров осуществляется согласно векторам их движения. Если в какой-то момент времени невозможно идентифицировать маркеры, что маловероятно, то их координаты не принимают участие в расчетах 3D координат объекта [3].

После включения, в каждом следующем кадре, устройство обработки информации определяет новые координаты центров засветки маркеров и идентифицирует засветки маркеров по их нахождению в соответствующих идентификационных областях предыдущего кадра. Затем осуществляется перемещение этих идентификационных областей для расположения их центров в точках растра с новыми координатами центров засветок соответствующих маркеров в целях проведения дальнейших оценок координат маркеров. В результате определяются текущие координаты центров засветок всех маркеров и осуществляется их идентификация. Алгоритм идентификации приведен на рис. 4.

Был разработан алгоритм, основанный на предсказании положения засветок, что позволяет ускорить поиск, начав его в месте наиболее вероятного появления засветки, при разных ограничениях, выявленных экспериментальным путем.

Далее находятся координаты маркеров по засветкам на светочувствительных матрицах измерительных видеокамер телевизионной системы. Для этого определяются матрицы вращения и переноса, а также учитываются внутренние параметры камеры, такие как фокусное расстояние и центр координат.

В гомогенных координатах проективное преобразование записывается как

$$m = PM,$$

где $m = (u, v, s)^T$, $M = (X, Y, Z, S)^T$.

В общем виде матрица калибровки внутренних параметров измерительных камер следующая [4]:

$$K_i = \begin{bmatrix} k_u & k_c & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

здесь k_u и k_v выражают горизонтальное и вертикальное фокусное расстояние с точки зрения размеров пикселя; k_c – параметр, учитывающий отклонение плоскости матрицы от плоскости линз; u_0, v_0 – координаты фокальной точки.

Поскольку требуемое соотношение сторон ячеек ПЗС матриц измерительных видеокамер 1:1, то матрица калибровки

$$K_i = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для каждой камеры телевизионной системы проективная матрица P^i представляется произведением следующих матриц:

$$P^i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & v_i \\ 1 & 0 & -u_i \\ -v_i & u_i & 0 \end{bmatrix} \cdot K_i \cdot [R_i \cdot T_i],$$

где R_i, T_i – матрицы вращения и переноса, первая матрица учитывает ошибку перепроецирования; K_i - матрица калибровки.

Матрица R_i (3×3) содержит координаты объекта в евклидовой системе координат XYZ и углы вращения α, β, γ вокруг, соответственно, осей X,Y,Z по часовой стрелке:

$$R_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\sin\gamma & \cos\gamma\cos\beta \end{bmatrix}.$$

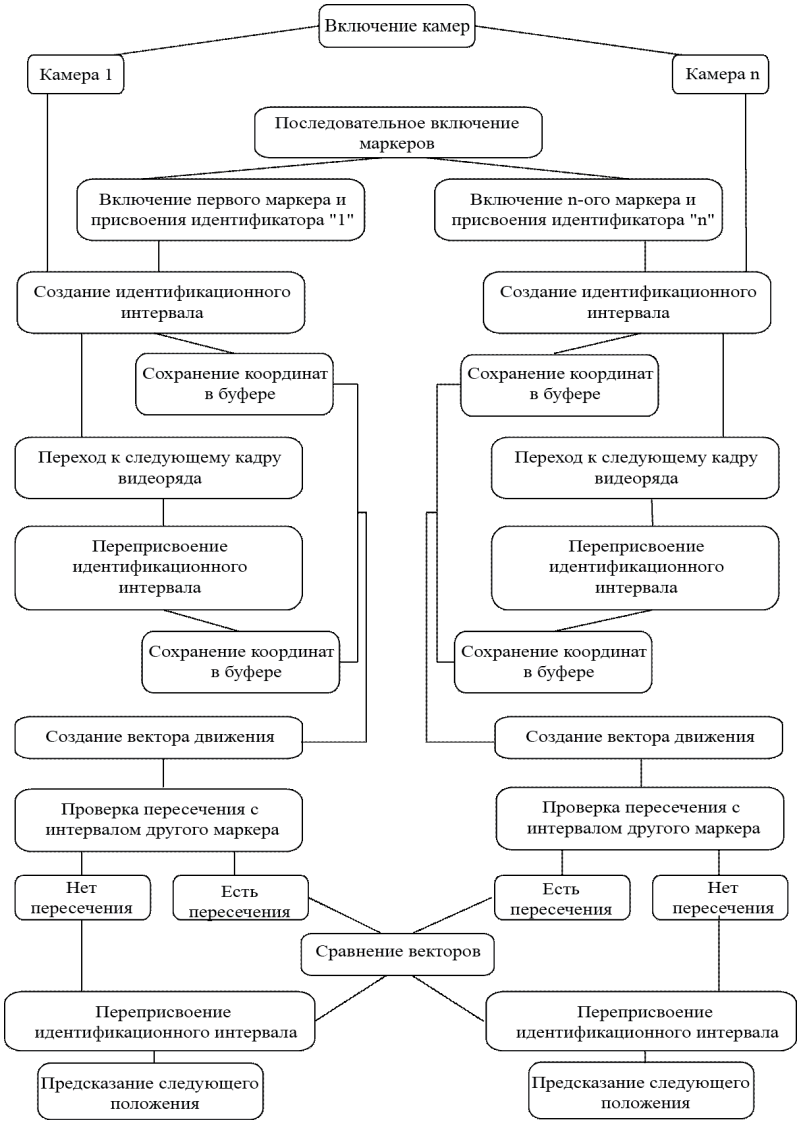


Рис. 4. Алгоритм идентификации маркеров

С учетом матрицы переноса T_i выражение можно представить в виде $P^i = \left[A^i \middle| b^i\right]$, где для трехкамерной телевизионной системы

$$A^i = [A_1 \quad A_2 \quad A_3]^T,$$

здесь

$$A_1 = \begin{bmatrix} R^i_{31}(v - u_0) - fR^i_{21} \\ fR_{11} + R_{31}(v_0 - u) \\ fR_{11} + R_{31}(v_0 - u) \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} R^i_{32}(v - u_0) - fR^i_{22} \\ fR_{12} + R_{32}(v_0 - u) \\ u(fR_{22} + u_0 R_{32}) - v(fR_{12} + v_0 R_{32}) \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} fR^i_{23} + R_{33}(v - u_0) \\ R_{33}(v_0 - u) - fR_{13} \\ u(fR_{23} + u_0 R_{33}) - v(v_0 R_{33} - fR_{13}) \end{bmatrix},$$

и

$$b^i = \begin{bmatrix} T_{31}(v - u_0) - fT_{21} \\ T_{31}(v_0 - u) - fT_{11} \\ u(fT_{21} + u_0 T_{31}) - v(fT_{11} + v_0 T_{31}) \end{bmatrix}.$$

Реконструкция 3D точки M осуществляется методом наименьших квадратов [5]: $M = (A^T A)^{-1} A^T b$.

После определения всех засветок на изображении одной камеры для каждой из них вычисляются эпиполярные линии, относящиеся к другим камерам, и оптимизируется с их помощью поиск точек соответствия вблизи этих линий. Если у нас есть две соответствующие засветки на изображениях с двух камер, засветку на изображении с третьей надо искать вблизи точки пересечения двух эпиполярных линий.

Выводы

Разработанный метод идентификации маркеров позволяет надежно соотнести рассчитанные координаты центров засветок с определенным маркером, что расширяет возможности трекинга, так как появляется возможность использования большого числа маркеров. Ожидается также сокращение времени расчета координат маркеров за счет предварительного определения возможного перекрытия маркеров и предсказания их будущих положений.

Литература: 1. *Rohlf J.* A High Perfomance Multiprocessing Toolkit for Real Time 3D Graphic / J. Rohlf, J. Helman / [In A. Glassner, editor]. Proceedings of SIGGRAF, IRIS ’94, 1994. **2.** *Automatic* color blob segmentation and fast arbitrary shape tracking/ Bizhong W. etc.// Visual information engeneering, 2008. P. 408-413. **3.** *Faugeras D.* Three dimensional computer vision / D. Faugeras. The MIT Press, 1992. **4**. *Faugeras D.* The geometry of multiple images / D. Faugeras, Q.-T. Luong, The MIT Press, 2001. **5.** *Foursa M.* Real-time infrared tracking system for Virtual Environments / M. Foursa // ACM SIGGRAPH VRCAI conference proceedings, 2004. P. 427-430.

Поступила в редколлегию 11.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Синотин А.М.

Ильин Максим Анатольевич, мл. науч. сотр. ПНИЛ ЗА кафедры радиоэлектронных систем ХНУРЭ. Научные интересы: радиотехнические и телевизионные системы. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Чернышевского 25, тел. 706-19-36, e-mail: kudla_max@mail.ru.

УДК 338.984:519.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ВЫБОРЕ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

БЕЗРУК В.М., СКОРИК Ю.В.

Рассматриваются теоретические и практические аспекты выбора предпочтительного варианта системы с учетом совокупности показателей качества на основе метода анализа иерархий.

1. Введение

Средства телекоммуникаций (устройства, технологии) являются важными компонентами современных инфокоммуникаций [1,2]. При их проектировании возникают требования строгого учета совокупности противоречивых показателей качества. Это определяет необходимость применения методов многокритериальной оптимизации при выборе оптимальных проектных решений из множества допустимых вариантов [2-4].

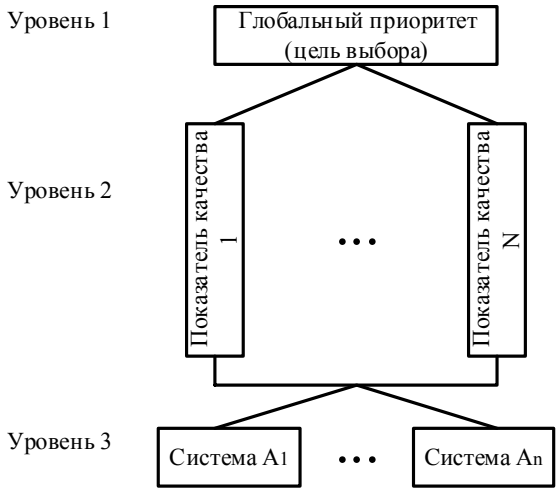
Решением задач многокритериальной оптимизации является нахождение, в общем случае, не одного, а некоторого множества Парето-оптимальных решений, которые могут быть использованы при проектировании [3,4]. Часто для дальнейших этапов создания инфокоммуникаций требуется выбирать единственный проектный вариант средств телекоммуникаций. Для сужения множества Парето до единственного проектного решения могут быть использованы разные методы, основанные на привлечении дополнительной информации о предпочтениях заказчика.

В данной статье предлагается для выбора единственного проектного варианта средств телекоммуникаций использовать метод анализа иерархий (МАИ) [5]. Приводятся практические особенности применения МАИ на примерах сравнительного анализа и выбора единственного проектного варианта разных типов средств телекоммуникаций.

2. Особенности метода анализа иерархий

Метод анализа иерархий состоит: в декомпозиции проблемы выбора единственного проектного варианта некоторой системы на простые составляющие части и получении суждений экспертов по парным сравнениям различных элементов проблемы выбора [1]. В результате обработки полученных численных данных суждений экспертов согласно определенной математической процедуре получают компоненты глобального вектора приоритетов, которые характеризуют приоритетность выбора вариантов проектируемой системы и определяют выбор единственного проектного варианта системы [2].

Принцип декомпозиции предусматривает структурирование проблемы выбора в виде иерархии уровней, что является первым этапом применения МАИ. На рисунке представлена в наиболее общем виде иерархия проблемы выбора, которая строится с вершины (цель выбора) через промежуточные уровни (показатели качества системы) к самому низкому уровню (альтернативные варианты построения системы).



Декомпозиция задачи выбора в иерархию уровней

Принцип сравнительных суждений экспертов в МАИ состоит в том, что объекты проблемы выбора сравниваются экспертами попарно по важности. Попарно сравниваются важности разных вариантов систем (на уровне 3) и разных показателей качества (на уровне 2). Результаты парных сравнений приводятся к матричной форме:

$$\begin{pmatrix} a_{11}a_{12}...a_{1j} \\ a_{21}a_{22}...a_{2j} \\ ... \\ a_{i1}a_{i2}...a_{ij} \end{pmatrix}. \qquad (1)$$

Оценки парных сравнений элементов a_{ij} находятся с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов.

Далее выполняется некоторая обработка матриц парных сравнений элементов иерархий на уровнях 2 и 3. С математической точки зрения эти задачи обработки сводятся к вычислению главного собственного вектора, который после определенной нормировки становится вектором приоритетов элементов на соответствующем уровне иерархии.

Компоненты главного собственного вектора вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений элементов на каждом уровне

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} a_{ij}}\ ,\ i, j = \overline{1, n}\ . \qquad (2)$$

Компоненты вектора приоритетов элементов вычисляются через главный собственный вектор как:

$$P_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i}\ ,\ j = \overline{1, n}\ . \qquad (3)$$

Вначале на основе матрицы парных сравнений показателей качества (1), полученной на уровне 2, вычисляются компоненты главного собственного вектора (2) и вектора приоритетов (3) показателей качества системы $\vec{P}$.

Аналогично находятся оценки матриц парных сравнений вариантов систем на уровне 3 в отдельности по отношению к каждому показателю качества системы. На основе этих матриц вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов $\vec{Q}_i$, $i = \overline{1, n}$ по отношению к показателям качества. С использованием этих данных вычисляются значения компонентов вектора глобальных приоритетов $\vec{C}$ согласно:

$$C_j = \sum_{i=1}^{n} P_i Q_{ij}\ ,\ j = \overline{1, N}\ , \qquad (4)$$

где n – число показателей качества; N – число сравниваемых вариантов систем.

По максимальному значению компонентов вектора глобальных приоритетов (4) выбирается наиболее предпочтительный вариант системы.

Рассмотрим практические особенности использования МАИ на примерах выбора наиболее предпочтительного варианта средств телекоммуникаций из некоторого множества допустимых вариантов с учетом совокупности показателей качества.

3. Сравнительный анализ и выбор систем связи с различными видами модуляции

Для сравнительного анализа были выбраны системы цифровой связи с когерентной MPSK и некогерентной MFSK с различным числом позиций M при вероятности битовой ошибки $P_b = 10^{-5}$ [3]. В качестве показателей качества выбраны отношение сигнал/шум $K_1 = E_b/N_0$ при различном числе позиций M и эффективность использования полосы пропускания $K_2 = R/W$.

Предполагается, что до модуляции осуществляется фильтрация по Найквисту (идеальная прямоугольная), так что минимальная двойная полоса пропускания на промежуточной частоте (intermediate frequency – IF) $W_{IF} = 1/T$, где T – длительность символа. Таким образом, эффективность использования полосы частот $R/W = \log_2 M$. При модуляции MPSK R/W растет с увеличением M. Предполагается, что полоса передачи равна $W_{IF} = M/T$. Эффективность использования полосы частот равна $R/W = (\log_2 M)/M$. При модуляции MFSK значение R/W снижается с увеличением M. Эффективность применения полосы частот изменяется с коэффициентом модуляции (разнесение частот, деленное на скорость передачи).

В табл. 1 представлены исходные данные для сравнения вариантов систем связи с MPSK и MFSK при разном числе позиций M [3].

Таблица 1

Показатели качества	Вид модуляции							
	MPSK				MFSK			
	M				M			
	2	4	8	16	2	4	8	16
	1	2	3	4	5	6	7	8
K_1	10	10	13	18	13	10	8	7
K_2	1	2	3	4	1/2	1/2	1/3	1/4

Исходные значения показателей качества K_1 и K_2 нормированы к максимальному значению и приведены к сопоставимому виду. Затем с учетом суждений экспертов сформированы матрицы парных сравнений указанных показателей качества, а также разных вариантов систем по отношению к каждому показателю качества. По этим матрицам вычислены компоненты главных собственных векторов и векторов приоритетов согласно (2), (3) и (4) с использованием программного комплекса, созданного в среде EXEL.

В табл. 2 для примера приведены вычисленные оценки компоненты главного собственного вектора и компоненты вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 2

Показатели качества	K_1	K_2	$\vec{V}$	$\vec{P}$
K_1	1	1/2	0,707	0,333
K_2	2	1	1,414	0,667

Вычисленные значения компонент вектора приоритетов вариантов модуляции в системе связи по отношению к показателям качества приведены в табл. 3 (первые два столбца). Здесь же в последней строке приведен вектор приоритетов показателей качества.

Компоненты вектора глобальных приоритетов $\vec{C}$ приведены в последнем столбце табл. 3.

Таблица 3

Варианты	K_1	K_2	$\vec{C}$
1	0,117	0,078	0,09087
2	0,098	0,179	0,15227
3	0,045	0,25	0,18235
4	0,021	0,366	0,25215
5	0,038	0,049	0,04537
6	0,082	0,042	0,0552
7	0,214	0,02	0,08402
8	0,384	0,015	0,13667
$\vec{P}$	0,33	0,67	

В рассмотренном множестве вариантов модуляций в цифровой системе связи по максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов наиболее предпочтительным вариантом модуляции является вариант. Ему соответствует система связи с когерентной MPSK при числе позиций $M = 16$, отношении сигнал/шум E_b/N_0 =18 дБ, эффективности использования полосы пропускания $R/W = 4$ бит/с/Гц.

4. Сравнительный анализ и выбор вариантов построения сети мобильной связи 3-го поколения

При проведении сравнительного анализа вариантов построения сотовых сетей мобильной связи (ССМС) стандарта UMTS выбраны следующие параметры сети: вероятность блокировки $P_{бл}$, плотность обслуживаемых абонентов N_a/S_0 (N_a – число обслуживаемых абонентов, S_0 – площадь обслуживаемой территории), необходимое количество базовых станций в сети N_{BTS}. Эти параметры характеризуют качество работы сети и могут быть использованы как показатели качества сети K_i. В табл. 4 представлены исходные данные для $P_{бл}$, а также рассчитанные параметры N_a/S_0 и N_{BTS} [4].

Таблица 4

№ варианта ССМС	K_1	K_2	K_3
	$P_{бл}$	N_a/S_0	N_{BTS}
1	0,1	166	11
2	0,07	192	21
3	0,04	142	15
4	0,02	183	18
5	0,02	189	22

В табл. 5 приведена матрица парных сравнений показателей качества и вычисленные оценки компонент главного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 5

Показатели качества	K_1	K_2	K_3	$\vec{V}$	$\vec{P}$
K_1	1	5	3	2,46	0,62
K_2	1/5	1	1/5	0,34	0,09
K_3	1/3	5	1	1,19	0,29

Полученные значения компонент вектора приоритетов вариантов систем по отношению к показателям качества, а также компоненты вектора глобальных приоритетов $\vec{C}$ приведены в табл. 6.

Таблица 6

Номер варианта ССМС	K_1	K_2	K_3	$\vec{C}$
1	0,03	0,07	0,51	0,1779
2	0,04	0,45	0,07	0,0863
3	0,11	0,04	0,26	0,1498
4	0,47	0,16	0,12	0,3418
5	0,35	0,29	0,04	0,2551
$\vec{P}$	0,62	0,09	0,3	

Максимальному значению компонент вектора $\vec{C}$ соответствует наиболее предпочтительный вариант ССМС, который характеризуется минимальной допустимой вероятностью блокировки $P_{бл} = 0{,}02$, плотностью обслуживаемых абонентов N_a/S_0 = 183 аб./км^2 и количеством базовых станций N_{BTS}=18.

5. Сравнительный анализ и выбор технологий мобильной связи HSPA, WiMAX и LTE

Для сравнительного анализа были выбраны технологии мобильной связи (МС) HSPA, WiMAX и LTE [7-9]. В результате развития создана технология HSPA+ (HSPA - релиз 7 и отдельные поправки релиза 8). В нисходящем канале их отличает модуляция 64-QAM с SIMO (1x2) или 64-QAM с SIMO (2x2). В восходящем канале добавлена модуляция 64-QAM и улучшены возможности для VoIP. Поправки в соответствии с релизом 8 позволяют использовать в нисходящем канале режим MIMO (2x2) с модуляцией 64-QAM, рассматривается возможность применения MIMO больших порядков в нисходящем канале и MIMO (2x2) – в восходящем.

Сети мобильной связи WiMAX предоставляют сервисы как подвижным, так и неподвижным пользователям. Мобильный WiMAX (релиз 1.5) имеет сравнимые с HSPA+ (релиз 8) пиковые скорости в нисходящем канале при одинаковой модуляции, скорости кодирования и ширине канала. При этом у мобильного WiMAX в восходящем канале пиковая скорость выше в 2-3 раза. Мобильный WiMAX поддерживает ширину полосы частот канала до 20 МГц при частотном и временном дуплексировании. Его частотные профили планируются в диапазонах 700, 1700, 2300, 2500 и 3500 МГц. Мобильный WiMAX обеспечивает «гладкую IP - сеть» (из конца в конец).

Следующим шагом эволюции систем 3GPP являются системы Long Term Evolution (LTE). Их отличает технология OFDMA в нисходящем канале и SC-FDMA – в восходящем. Модуляция – до 64-QAM, ширина канала – до 20 МГц, дуплексирование TDD и FDD. Применяются адаптивные антенные системы, гибкая сеть доступа. Сетевая архитектура – полностью IP–сеть. В системе LTE применяются технологии и методы, уже используемые в мобильном WiMAX. Системы LTE – это революционное улучшение 3G. LTE представляет собой переход от систем CDMA к системам OFDMA, а также переход к полностью IP–системе с коммуникацией пакетов. Поэтому внедрение этой технологии на существующих сетях мобильной связи означает необходимость новых радиочастотных ресурсов для получения преимущества от широкого канала.

Мобильный WiMAX представляет гладкую IP-сеть, сеть LTE более сложна. Если сеть WiMAX основывается полностью на IP-протоколах IEEE, то сеть LTE более сложна, включает больше протоколов.

В табл. 7 представлены исходные значения показателей качества разных стандартов сотовой сети связи: K_1 – спектральная эффективность (нисходящий канал), K_2 – радиус действия, K_3 – скорость передачи данных.

Таблица 7

Показатели качества	HSPA		WiMAX	LTE
	Релиз 7	Релиз 8	Релиз 1.5	
Спектральная эффективность	0,87	1,75	1,59	1,57
Радиус действия, км	30	40	50	5
Скорость Мбит/с	21	35	48	75

Для рассмотренных технологий на основе суждений экспертов сформированы матрицы парных сравнений указанных показателей качества и вариантов технологий по отношению к показателям качества. В табл. 8 приведены вычисленные оценки компоненты главного собственного вектора показателей качества и компонент вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 8

Показатели качества	K_1	K_2	K_3	$\vec{V}$	$\vec{P}$
K_1	1	3	1/3	1	0,258
K_2	1/3	1	1/5	0,405	0,105
K_3	3	5	1	2,464	0,637

Вычисленные значения компонент вектора приоритетов вариантов технологий по отношению к каждому показателю качества, а также компоненты вектора глобальных приоритетов $\vec{C}$ приведены в табл. 9.

Максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов $\vec{C}$ соответствует наиболее предпочтительный вариант технологии мобильной связи. Это технология LTE со скоростью передачи данных 75Мбит/с, спектральной эффективностью 1,57бит/Гц/с и радиусом действия 5км.

Таблица 9

МС	K_1	K_2	K_3	$\vec{C}$
1	0,057	0,13	0,043	0,05534
2	0,494	0,279	0,093	0,21586
3	0,285	0,548	0,359	0,35866
4	0,165	0,043	0,505	0,3704
$\vec{P}$	0,26	0,1	0,64	

6. Выводы

Научная новизна работы состоит в применении метода анализа иерархий для сравнительного анализа и выбора наиболее предпочтительного варианта средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества.

Приведены примеры решения задач сравнительного анализа и выбора наиболее предпочтительного проектного варианта для разных типов средств телекоммуникаций, в частности, для цифровых систем связи с разным видом модуляции, разных технологий сетей мобильной связи 4-го поколения, разных вариантов построения сети мобильной связи 3-го поколения.

Практическая значимость результатов состоит в том, что сформулированы рекомендации по применению метода анализа иерархий при выборе наиболее предпочтительных проектных вариантов средств телекоммуникаций.

Литература: 1. *Семенов Ю.В.* Проектирование сетей связи следующего поколения. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 236с. **2.** *Безрук В.М.* Принятие оптимальных решений в инфокоммуникациях с учетом совокупности показателей качества // Наукоемкие технологии в инфокоммуникациях: обработка и защита информации / В.М. Безрук, А.Н. Буханько, Д.В. Чеботарёва. Харьков: ХНУРЭ, 2013. С. 104 – 125. **3.** *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 176с. **4.** *Чеботарёва Д.В., Безрук В.М.* Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи. Х.: Компания СМИТ, 2013. 148с. **5.** *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связи, 1993. 278с. **6.** *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104с. **7.** *Берлин А.Н.* Цифровые сотовые системы связи. М.: Эко-Трендз, 2007. 230с. **8.** *Holma H., Toskala A.* LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access. Finland .John Wiley s Sons, Ltd. 2009. 433c. **9.** *Вишневский В., Портной С., Шахнович И.* Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. Техносфера, 2009. 472с.

Поступила в редколлегию 21.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Лошаков В.А

Безрук Валерий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий. кафедрой «Сети связи» ХНУРЭ. Научные интересы: многокритериальная оптимизация и моделирование сложных технических систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14. E-mail: bezruk@kture.kharkov.ua

Скорик Юлия Валериевна, аспирантка кафедры «Сети связи» ХНУРЭ. Научные интересы: многокритериальная оптимизация сетей связи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14. E-mail: Skorik_Y@list.ru.

УДК 681.5; 535.32

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

КОЛЕНОВ И.В.

Рассматривается проблема автоматизации лабораторного эксперимента. Разрабатывается и реализуется универсальный программно-аппаратный комплекс, который содержит в себе блок управления, блок регистрации сигнала и программную клиентскую часть для управления и математической обработки сигнала. Комплекс может служить базой для автоматизации широкого спектра экспериментальных задач.

Введение

В настоящее время практически каждый экспериментатор сталкивается с необходимостью автоматизации экспериментальных установок. Эта задача возникает как при создании нового оборудования, так и при модернизации уже имеющегося. В обоих случаях установка не может считаться современной, если процессы измерения и первичной обработки экспериментальных данных не автоматизированы. Помимо простого ускорения процедуры измерений автоматизация позволяет качественно улучшить характеристики установки и может дать возможность ставить эксперимент, принципиально невозможный при ручном способе измерений.

Промышленность предлагает большое количество готовых решений как для управления механическими и электронными частями автоматизируемой установки, так и для сбора и обработки данных [1-3]. Однако такие решения избыточны, дороги (от $500), ориентированы на промышленное использование и не предлагают готового комплексного подхода к решению задачи, поскольку их еще нужно согласовать с оборудованием и разработать программное обеспечение для управления экспериментом. Соответственно, они зачастую не могут быть использованы непосредственно самим экспериментатором для решения его конкретной задачи, поскольку последний далеко не всегда имеет достаточный для этого уровень знаний электроники и программирования. Кроме того, подобные «доработки» требуют значительных временных затрат и отвлекают от основной деятельности. Некоторые простые решения уже устарели [4]. Поэтому *актуальным* является создание современной программно-аппаратной платформы (набора аппаратных и программных средств), на базе которой исследователь мог бы с минимальными затратами ресурсов самостоятельно автоматизировать конкретный эксперимент.

1. Цель и задачи работы

Любой эксперимент состоит в измерении отклика исследуемого объекта на некоторые внешние воздействия. Например, это может быть зависимость электропроводности объекта от его температуры, коэффициента отражения зеркала из исследуемого материала от длины волны света, т.е. эксперимент заключается в регистрации зависимости набора параметров исследуемого объекта от набора параметров, задающих внешнее воздействие. При этом измеряемые параметры исследуемого объекта, как правило, преобразуются в напряжение при помощи соответствующих датчиков.

Параметры внешнего воздействия в большинстве случаев задаются положением некоторых механических регуляторов (барабан длин волн монохроматора, угол поворота алидады гониометра). При такой обобщенной схеме эксперимента *целью* работы является создание набора аппаратных и программных средств для автоматизации максимально широкого спектра лабораторных установок. Для практической реализации поставленной цели требуется решить следующие *задачи*:

1) разработка и реализация аппаратной и программной частей блока оцифровки измеряемого сигнала;

2) разработка ПО для обработки полученных данных для ПК;

3) разработка и реализация аппаратной и программной частей для исполнительных механизмов, задающих положения механических регуляторов.

При разработке системы в первую очередь принимались во внимание следующие критерии: надежность, простота реализации и использования, доступность и стоимость комплектующих.

2. Общее описание системы

В качестве исполнительных механизмов были выбраны шаговые двигатели (ШД), так как они имеют ряд достоинств: относительная простота управления, точность и стабильность позиционирования, малая величина шага, большой статический момент [5].

Общая блок-схема системы автоматизации широкого класса экспериментов с помощью разработанной платформы приведена на рис.1.

В качестве АЦП для измерения и оцифровки сигналов предлагается использовать стандартную звуковую карту (ЗК) персонального компьютера (нами была использована C-Media M-CMI8738). К преимуществам данного решения можно отнести: 1) простоту использования, 2) доступность и дешевизну при достаточно высоких метрологических характеристиках, 3) возможность увеличения количества каналов пу-

тем добавления дополнительных ЗК. Недостатки: 1) для измерения абсолютных величин требуется калибровка, 2) динамический диапазон ЗК достаточно узкий (обычно $0 \div 1$ В), 3) ЗК нижней ценовой категории имеют относительно высокие собственные шумы.

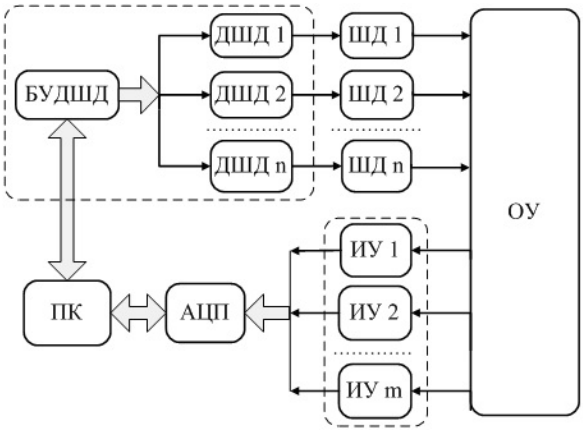


Рис. 1. Общая блок-схема системы автоматизации эксперимента с помощью программно-аппаратной платформы, где ПК – персональный компьютер, БУДШД – блок управления шаговыми двигателями, ДШД – драйвер шаговых двигателей, ШД – шаговый двигатель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ИУ – измерительный усилитель, ОУ – объект управления

Таким образом, устройство сопряжения, состоящее из двух частей: 1) блока управления ШД и 2) блока измерительных усилителей (ИУ) (выделены пунктиром на схеме) – единственный нестандартный элемент.

Блок измерительных усилителей в данной работе не рассматривается, так как конструкция усилителя, служащего для согласования сигнала датчика с входом АЦП, зависит от датчика и АЦП. Так, при использовании фотоэлектронных умножителей для преобразования светового потока в электрический ток может применяться преобразователь ток-напряжение [6].

Блок управления ШД состоит из блока управления драйверами шаговых двигателей (БУДШД) и самих драйверов шаговых двигателей (ДШД).

Программная часть платформы состоит из прошивки микроконтроллера и библиотеки функций для написания клиентской части со стороны ПК.

Далее рассмотрим детально блок управления шаговыми двигателями и методику измерения сигнала.

3. Блок управления шаговыми двигателями

Блок сопряжения драйверов ШД с ПК собран на основе микроконтроллера ATmega8 фирмы Atmel. Принципиальная схема блока приведена на рис. 2.

Из всего разнообразия интерфейсов ПК для подключения БУШД к компьютеру был выбран стандартный COM порт, который работает по протоколу RS232 [7] из-за простоты программирования со стороны ПК. Кроме того, большинство современных микроконтроллеров имеют как минимум один интерфейс USART (протокол RS232) но с логическими уровнями TTL

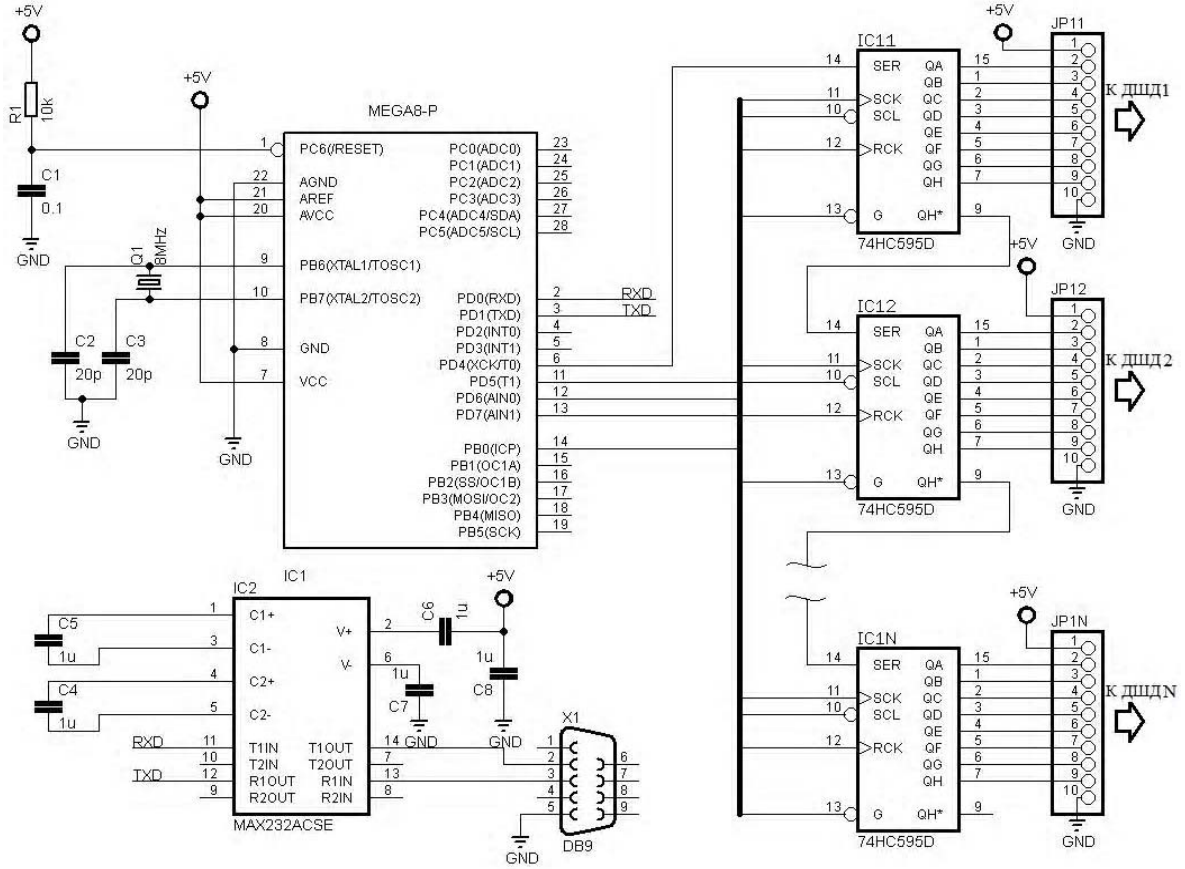


Рис. 2. Принципиальная схема блока управления драйверами ШД

[6]), что избавляет разработчика от его программной реализации в контроллере. Недостатком этого интерфейса является его отсутствие в некоторых современных ПК. Эта проблема решается с помощью специальных преобразователей USB-UART [8].

Для преобразования логических уровней между МК и ПК была использована микросхема MAX232, включенная по стандартной схеме из технической документации (рис. 2).

Основная функция микроконтроллера в данной схеме состоит в повороте нужного ШД на заданное количество шагов (градусов). Непосредственно переключение обмоток ШД выполняется ДШД.

Для управления одним ДШД требуется 8 сигнальных выводов МК. ATmega8 имеет всего 18 выводов, которые можно использовать для данной цели. Таким образом, напрямую можно подключить всего 2 ДШД, что недостаточно для многих задач. Поэтому возникает необходимость увеличения эффективной разрядности портов МК.

Для этого был применен последовательно-параллельный преобразователь (ППП) на основе восьмиразрядных сдвиговых регистров HC595.

Регистры HC595 имеют 5 управляющих входов: SER – последовательный вход данных, SCK – тактовый вход для сдвига данных по положительному фронту импульса, SCL – сброс регистров, RCK – тактовый вход для вывода данных на выходы регистров (1-7-й и 15-й выводы микросхемы) по положительному фронту, G – вход включения HC595. Выход 9 служит для каскадирования регистров.Работа с ППП сводится к следующему. На входе SER устанавливается нужный бит и подается положительный импульс на вход SCK. Эта процедура проводится 8ЧN раз (пока не будут записаны данные во все сдвиговые регистры). Далее подается положительный импульс на вход RCK и записанные данные подаются на выход регистра (выводы QA – QH).

Такая схема ППП позволяет управлять теоретически сколь угодно большим количеством ШД при помощи пяти выводов МК.

Для управления ШД были разработаны драйверы ШД (ДШД), которые подключаются к схеме управления через разъемы JP11-JP1N (рис. 3).

В простейшем случае минимальный угол поворота ШД определяется его устройством, а именно, количеством полюсов статора [5]. Включение одной обмотки приводит к фиксации ротора возле одного из соответствующих ей полюсов. Выключение одной обмотки и включение следующей приводит к повороту ротора к следующему полюсу и т.д. Такой режим работы называется полношаговым. Если одновременно включить две обмотки, обеспечив в них одинаковый ток, то ротор можно зафиксировать в среднем положении между полюсами (полушаговый режим). В общем случае, подавая разный ток в соседние обмотки, можно зафиксировать ротор в любом промежуточном по отношению к полюсам статора положении (микрошаговый режим), что позволяет значительно уменьшить минимальный шаг.

Реализация микрошагового режима является нетривиальной задачей, поэтому основой ДШД была выбрана специализированная микросхема LS8290, которая позволяет реализовывать микрошаговый режим вращения ШД (вплоть до 1/32 номинального шага) (см. рис. 3). Данный контроллер имеет 4 вывода для

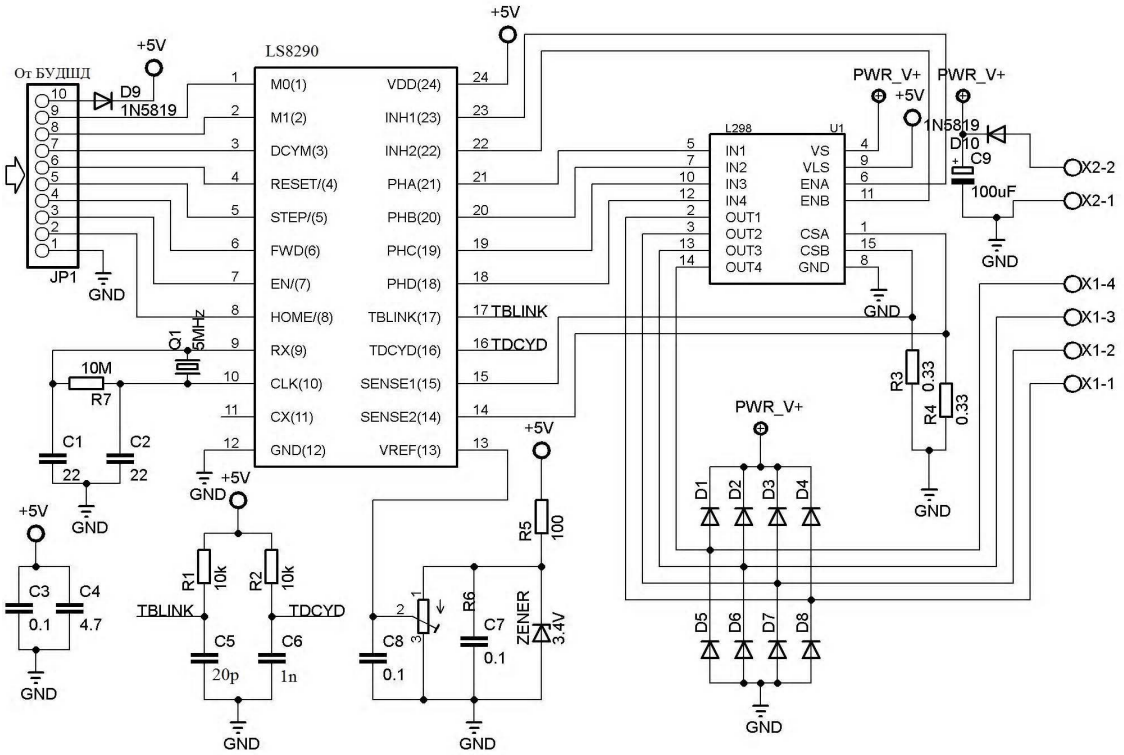


Рис. 3. Принципиальная схема драйвера шагового двигателя

управления четырехфазным двигателем (выводы 18-21) и 2 вывода для регулировки тока при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (выводы 22-23). К этим выводам можно подключать как 2 Н-моста для биполярной схемы включения двигателя, так и 4 транзистора для управления униполярным ШД. В конкретном случае использовались ШД с биполярной схемой включения (поскольку они имеют больший вращательный момент), поэтому в качестве силовой части используются Н-мосты L298N.

Регулировка тока в обмотках двигателя происходит следующим образом. В зависимости от текущих параметров ШИМ (зависит от этапа в цикле микрошага [8]) и опорного напряжения V_{ref} встроенный ЦАП формирует напряжение, которое сравнивается с напряжением на токовых шунтах R3 и R4, включенных последовательно с Н-мостами. Когда напряжение на каком-либо шунте достигает напряжения на выходе ЦАП, соответствующий вывод ШИМ отключается, тем самым отключая соответствующую обмотку ШД. Частота считывания показаний напряжения с токовых шунтов задается RC цепочкой, подключенной к выводу TBLINK.

Выводы 1 и 2 контроллера LS8290 задают кратность дробления шага, выводы 3 и 16 задают режим ШИМ [8], вывод 4 позволяет сбросить LS8290 в начальное состояние, по возрастающему фронту импульса на выводе 5 микросхема выполняет шаг заданной кратности, вывод FWD задает направление вращения двигателя, вывод EN позволяет отключать микросхему путем подачи на него высокого логического уровня, 8-й вывод возвращает ротор ШД на начало цикла дробления шага. Более подробная информация о данных микросхемах и других схемах включения приведена в фирменной документации [9].

Диоды D1 – D8 служат для шунтирования тока самоиндукции обмоток, концы которых подключаются к разъемам X1-1 – X1-4.

4. Методика измерения сигнала

Выше были рассмотрены вопросы, связанные с управлением регуляторами, которые задают параметры эксперимента. Не менее важной является задача корректной регистрации измеряемого полезного сигнала. Проблема состоит в том, что сигнал с детектора после усиления представляет собой, как правило, сумму полезного сигнала с помехами различной природы (пульсации и шумы источников питания, нулевой сигнал детектора и его шумы, паразитные сигналы, которые могут попадать в детектор, минуя основной измерительный канал). Особенно эта проблема актуальна для типичной ситуации слабых низкочастотных узкополосных сигналов, уровень которых может быть значительно ниже уровня помех.

В таких случаях для уверенной регистрации полезных сигналов необходимо применять особые методики, одной из которых является синхронное детектирование (СД) [10].

Рассмотрим суть СД. Полезный низкочастотный сигнал $s(t)$ переносится в область более высоких частот (в 50-100 раз выше, чем занимаемая им спектральная область) путем модуляции, т.е. умножения на опорный периодический сигнал заданной частоты (временной зависимостью сигнала $s(t)$ в дальнейшем можно пренебречь и полагать его равным константе s). Частота модуляции не должна совпадать с частотой возможных периодических помех. На входе синхронного детектора детектируемый сигнал, в общем случае, будет суммой полезного промодулированного сигнала и помех. Полезный сигнал может быть извлечен из измеренного путем демодуляции, которая заключается в перемножении измеренного и опорного сигналов с последующим интегрированием.

Обычно СД реализуется аппаратно, и его общая схема представлена на рис. 4.

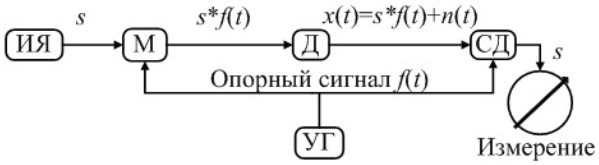


Рис. 4. Схема измерения сигнала при помощи синхронного детектирования, где ИЯ – исследуемое явление, М – модулятор, Д – датчик, СД – синхронный детектор, УГ – управляющий генератор

ИЯ является источником полезного сигнала s. Модулятор М перемножает полезный сигнал и опорный сигнал $f(t)$, полученный от управляющего генератора УГ. При прохождении сигнала от модулятора до СД к нему могут добавляться различные аддитивные помехи. В итоге на вход СД поступает сумма $x(t) = s \cdot f(t) + n(t)$. СД умножает эту сумму на опорный сигнал и проводит интегрирование, результатом которого является искомый сигнал без аддитивных помех, который может подаваться на вход измерительного прибора.

Из схемы видно, что для реализации СД требуется специальное оборудование. Однако если частота опорного сигнала известна, то аппаратную часть можно упростить, убрав из схемы синхронный детектор. Вместо этого сигнал измеряется целиком при помощи быстродействующего АЦП и передается компьютеру, который выполняет синхронное детектирование программно. При этом опорный сигнал генерируется компьютером в виде массива отсчетов. Программное синхронное детектирование значительно упрощает и удешевляет измерительную часть установки, сохраняя метрологические характеристики на достаточно высоком уровне.

Как уже говорилось, демодуляция сводится к вычислению следующего интеграла:

$$s = \frac{1}{T}\int_0^T x(t) \cdot f(t)dt, \qquad (1)$$

где T – время интегрирования, которое должно быть кратным периоду опорного сигнала. В общем случае

фаза $x(t)$ неизвестна и может не совпадать с фазой опорного сигнала, т.е. вместо интеграла (1) имеет место соотношение:

$$s(\phi) = \frac{1}{T}\int_0^T x(t+\varphi_0)\cdot f(t+\varphi)dt \,. \qquad (2)$$

Поэтому для проведения СД необходимо подобрать фазу φ генерируемого опорного сигнала так, чтобы она совпадала с φ_0. Из теории СД следует, что такому значению φ соответствует максимальное значение $s(\varphi)$ [9]. В результате, рабочее соотношение для программного СД выглядит следующим образом:

$$s = \max_{\varphi} s(\varphi) \,. \qquad (3)$$

Как показал численный эксперимент, при детектировании сгенерированный опорный сигнал не обязательно должен точно совпадать по форме с модулирующим сигналом; важно лишь совпадение фазы и частоты. Удобно использовать опорный сигнал в виде меандра, принимающего логические значения ±1. В этом случае $s(\varphi)$ имеет кусочно-линейный вид.

Решение задачи максимизации функции (3) может быть выполнено любым численным методом. В данной работе для этих целей используется метод «золотого сечения» [11]. Точность измерений зависит от точности вычисления интеграла, поэтому он вычисляется методом парабол [11].

5. Аттестация методики измерения

Аттестация ПО измерительной части платформы проводилась с помощью численных экспериментов, а также на реальной экспериментальной установке. Для численного эксперимента был сгенерирован сигнал $x(t)$, состоящий из смеси полезного сигнала s, модулированного меандром частотой 72 Гц, и помех (белый шум, синусоиды частотой 50 и 100 Гц, постоянная составляющая). Интенсивность шумов являлась одним из варьируемых параметров численного эксперимента. Частота дискретизации была принята 44,1 кГц, что соответствует стандарту звуковых карт.

На рис. 5 приведена зависимость погрешности σ программного СД от соотношения сигнал/шум SNR.

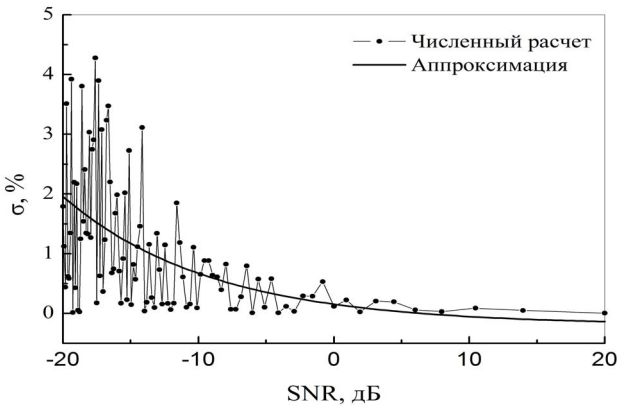


Рис. 5. График зависимости погрешности σ программного синхронного детектора от соотношения сигнал/шум (SNR) и его аппроксимация экспонентой

Расчет проводился в диапазоне SNR от 20 дБ до –20 дБ. Время интегрирования составляло 50 периодов опорного сигнала. Из рис. 5 видно, что даже для SNR -20 дБ погрешность не превосходит единиц процентов и с увеличением соотношения сигнал/шум быстро уменьшается. В области больших шумов данная зависимость аппроксимируется экспонентой.

При фиксированном значении SNR погрешность можно уменьшить путем увеличения времени интегрирования. На рис. 6 приведены расчетные зависимости погрешности от времени интегрирования для значений SNR -12дБ и -26 дБ, а также их аппроксимации экспоненциальной функцией. Время интегрирования приведено в количестве периодов опорного сигнала.

Из рис. 6 видно, что с увеличением времени интегрирования тренд погрешности убывает экспоненциально. Данные зависимости также хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями.

Кроме численной аттестации были проведены испытания данной системы на реальном приборе (эллипсометр с вращающимся анализатором) [12]. В качестве полезного сигнала здесь выступает оптическое излучение, детектором служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Тракт распространения света открытый, поэтому на измеряемый сигнал накладываются «засветки» от внешних источников света, а также темновой ток ФЭУ, шумы блоков питания ФЭУ, усилителя. Суммарное значение SNR составило ~5 дБ.

Рис. 6. Зависимости погрешности у синхронного детектора от количества периодов сигнала

На рис. 7 приведена зависимость уровня реального измеренного постоянного сигнала от номера измерения. Измеренные точки имеют среднеквадратичный разброс не более 0,6 %, что соответствует расчетам.

Работа с программным синхронным детектором сводится к вызову единственной функции, в качестве параметров которой передаются массив измеренных данных и несущая частота.

6. Программное обеспечение платформы

Программное обеспечение платформы состоит из прошивки микроконтроллера блока управления ДШД и пользовательской библиотеки для создания клиентского ПО со стороны ПК.

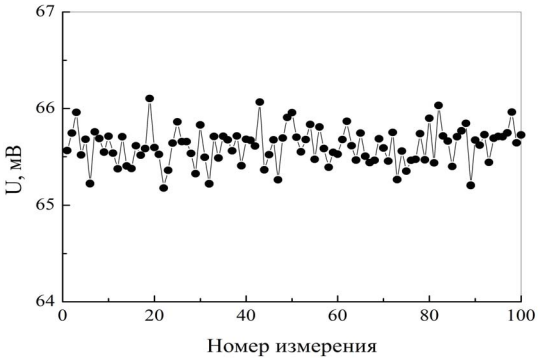


Рис. 7. График зависимости интенсивности сигнала U от номера измерения

Прошивка МК написана на языке С с использованием стандартных библиотек для микроконтроллеров AVR от компании Atmel.

Пользовательская библиотека платформы написана на языке С++ в среде Borland C++ Builder. Библиотека представляет собой класс HSPlatform, интерфейс которого состоит из трех рабочих методов:

1) void RotateStepper(int ENum, int Mode, int Dir, int SNum) - принимает номер двигателя, режим дробления шага, направление вращения и количество шагов, преобразует принятые данные в посылку и отправляет ее МК через последовательный интерфейс. По окончанию вращения двигателя МК пересылает ПК соответствующую посылку;

2) void MeasureSignal(double* data1, double* data2, int length) - принимает указатели на массивы данных и их длину. В первый массив будут записаны данные с «левого» канала ЗК, а во второй – с «правого»;

3) double SyncDemod(double* data, int length, double signal_frequency) - принимает массив измеренных данных, количество элементов массива и частоту модуляции сигнала. Выполнив все необходимые операции с данными, метод возвращает значение измеренного сигнала.

Выводы

Разработан универсальный набор аппаратных и программных средств (программно-аппаратный комплекс) для автоматизации физического эксперимента, который позволяет управлять механическими частями установки при помощи шаговых двигателей, проводить измерение малых электрических сигналов, сравнимых с шумом.

Практическая значимость: комплекс позволяет эффективно решать задачу автоматизации эксперимента различного масштаба в лабораторных условиях без привлечения специалистов в области электроники и системного программирования. Система была использована для автоматизации нескольких действующих экспериментальных установок [12, 13].

Литература: **1.** L-CARD [Электронный ресурс]. Режим доступа: www. URL: http://www.lcard.ru. **2.** АКОН [Электронный ресурс]. Режим доступа: www. URL: http://www.akon.com.ua. **3.** ХОЛИТ Дейта Системс [Электронный ресурс]. Режим доступа: www. URL: http://holit.com.ua. **4.** *Galuza A. A.* A System for the Automation of a Cryogenic Spectral Ellipsometer [Текст] / A. A. Galuza, K. A. Slatin, A. I. Belyaeva, etc. // Instruments and Experimental Techniques. 2003. Vol. 46, No. 4. P. 477-479. **5.** *Acarnley P.* Stepping motors: a guide to theory and practice [Текст] / P. Acarnley. – Milton Keynes: Lightning Source UK Ltd, 2007. 172p. **6.** *Horowitz P.* The art of electronics [Текст] / P. Horowitz, W. Hill. New York: Cambridge University Press, 1989. 1134 p. **7.** *Axelson J.* Serial port complete [Текст] / J. Axelson. Madison: Lakeview Research, 2007. 380p. **8.** *Axelson J.* USB complete [Текст] / J. Axelson. Madison: Lakeview Research, 2009. 504p. **9.** LS8290 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www. URL: http://www.lsicsi.com/pdfs/Data_Sheets/LS8290.pdf. **10.** *Max J.* Mйthodes et techniques de traitement du signal [Текст] / J. Max, J. L. Lacoume. Dunod, 2004. 384 p. **11.** Numerical recipes in C: the art of scientific computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. New York: Cambridge University Press, 2007. 1237 p. **12.** *Беляева А.И.* Спектральный эллипсометрический комплекс для диагностики радиационных превращений в металлах и сплавах [Текст] / А. И. Беляева, А. А. Галуза, В. Ф. Клепиков, и др // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. №2. С. 191-197. **13.** *Belyaeva A.I.* Effect of sputtering on the Samples of ITER-Grade Tungsten preliminarily irradiated by tungsten ions: optical investigations [Текст] / A.I. Belyaeva, A. A. Galuza, I. V. Kolenov etc // The Physics of Metals and Metallography. 2013. Vol.114, No.8. P. 703–713.

Поступила в редколлегию 12.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук Литвиненко В.В.

Коленов Иван Викторович, м.н.с. ИЭРТ НАНУ. Научные интересы: оптические методы исследования материалов, диагностика радиационных превращений в металлах. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел. 707-63-37. E-mail: ivan.kolenov@gmail.ru.

УДК519.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО ТИПА

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ОБОЗНАЯ М.Ю.

Рассматривается класс оптимизационных задач транспортного типа. Исследуется классический способ решения – метод потенциалов, предлагается новый алгоритм на основе генетических алгоритмов, позволяющий находить оптимальный план перевозок с большей продуктивностью. В качестве объекта исследования рассматривается задача управления воздушным транспортом [1].

1. Введение

Сейчас, во времена свободного рынка, очень острой стала проблема оптимизации на производстве, в бизнесе. Из-за сильной конкуренции все стремятся минимизировать свои затраты на производство, перевозку, тем самым повысить конкурентоспособность своего продукта или услуги. Чтобы достичь наибольшего эффекта, имея ограниченные средства, надо составить план, или программу действий. Раньше план в таких случаях составлялся «на глаз». В середине XX века был создан специальный математический аппарат, помогающий это делать обоснованно, с максимальным результатом. Соответствующий раздел математики называется математическим программированием. Транспортная задача является представителем класса задач математического программирования, поэтому обладает всеми качествами линейных оптимизационных задач. Одновременно она имеет ряд дополнительных свойств, которые позволили разработать специальные методы ее решения.

Анализ исследуемой проблемы. Транспортная задача – это один из первых примеров оптимизации на линейных сетях. В настоящее время она стала типовой для промышленных фирм, имеющих несколько предприятий, складов, рынков сбыта и оптовых баз. Модель применяется главным образом при решении плановых задач. В этом случае стратегические решения сводятся к выбору транспортных маршрутов, по которым продукция различных предприятий доставляется в различные конечные пункты назначения.

Состояние проблемы. Под названием «транспортная задача» объединяется широкий круг задач с единой математической моделью. Данные задачи относятся к задачам линейного программирования и могут быть решены симплексным методом. Однако матрица систем ограничений транспортной задачи настолько своеобразна, что для ее решения разработаны специальные методы. Эти методы позволяют найти начальное опорное решение, а затем, улучшая его, получить оптимальное решение.

В общей постановке транспортная задача состоит в отыскании оптимального плана перевозок некоторого однородного груза с баз потребителям.

Различают два типа транспортной задачи: по критерию стоимости (план перевозок оптимален, если достигнут минимум затрат на его реализацию), по критерию времени (план оптимален, если на его реализацию затрачивается минимум времени).

Актуальность рассмотренной задачи состоит в том, что в наше время составление расписания очень важно, как его правильность, так и количество задействованного транспорта (ресурсов). Очень важным является вопрос о составлении актуального плана с точки зрения минимизации времени простоя ресурсов и использования оптимального их количества.

Сущность исследования заключается в поиске наиболее эффективных математических алгоритмов и программных методов для решения задач транспортного типа со спецификой рассматриваемой задачи.

Цели исследования заключаются в минимизации времени выполнения цикла рейсов и оптимальном использовании транспортных ресурсов. Для достижения целей решаются такие задачи: анализ алгоритмов, которые помогли бы решить поставленные задачи; адаптация выбранного алгоритма для решения проблемы; составление подсистемы, которая на основе адаптированного алгоритма выводит перечень рейсов, решающих поставленную задачу за минимально оптимальное время; обеспечение «понимания» подсистемой вводимого расписания для корректного решения задачи; определение количества требуемых ресурсов для выполнения составленного расписания.

2. Постановка задачи

Исследуемый в статье класс оптимизационных задач транспортного типа является типичным представителем специальных задач математического программирования. Эти модели часто описывают перемещение (перевозку) какого-либо товара из пункта отправления (исходный пункт, например, место производства) в пункт назначения (склад, магазин, грузохранилище).

Назначение транспортной задачи – определить объем перевозок из пунктов отправления в пункты назначения с минимальной суммарной стоимостью перевозок. При этом должны учитываться ограничения, налагаемые на объемы грузов, имеющиеся в пунктах отправления (предложения), и ограничения, учитывающие потребность грузов в пунктах назначения (спрос). В транспортной модели предполагается, что стоимость перевозки по какому-либо маршруту прямо пропорциональна объему груза, перевозимого по этому маршруту. В общем случае транспортную модель можно применять для описания ситуаций, связанных с управлением запасами, движением капиталов, составлением расписаний, назначением персонала.

Транспортная задача может быть рассмотрена как обычная задача математического программирования, ее специальная структура позволяет разработать алгоритм с упрощенными вычислениями, основанный на симплексных отношениях двойственности.

Решение задачи состоит в определении неизвестного плана перевозок, минимизирующего суммарные транспортные расходы и удовлетворяющего ограничениям, налагаемым на объемы грузов в пунктах отправления (предложения) и пунктах назначения (спрос).

Постановка классической транспортной задачи звучит так: от m поставщиков (A1,A2,…,Am) с некоторой грузоподъемностью предприятие перевозит однородные грузы n потребителям (B1,B2,…,Bn). Объемы поставки и потребления, а также стоимости транспортировки приведены в таблице.

Поставщики	Потребители				Запасы
	B_1	B_2	…	B_n	
A_1	c_{11}	c_{12}	…	c_{1n}	a_1
A_2	c_{21}	c_{22}	…	c_{2n}	a_2
…	…	…	…	…	…
A_m	c_{m1}	c_{m2}	…	c_{mn}	a_m
Заявки	b_1	b_2	…	b_n	

Необходимо определить потребности транспортных средств, которые нужны для выполнения плана перевозок. В случае закрытой модели весь имеющийся в наличии груз развозится полностью и все потребности заказчиков удовлетворены:

$$\sum_{i=1}^{m} a_i = \sum_{j=1}^{n} b_j , \qquad (1)$$

где a_i – количество груза на i-м складе; b_j – потребность в грузе j-го потребителя.

Количество груза, имеющегося на каждой из m баз, обозначается $a_1, a_2, \dots, a_m$. Заказы каждого из потребителей обозначаются как $b_1, b_2, \dots, b_n$. Соответственно, $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}, c_{21}, c_{22}, \dots, c_{mn}$ – стоимости перевозки единицы груза от i- го поставщика к j-му потребителю. Требуется найти такой план перевозок, при котором все запасы будут израсходованы, заявки удовлетворены, а общая стоимость транспортировок была бы минимальной.

Авиакомпания хочет организовать полеты «туда» и «обратно» так, чтобы минимизировать время простоя каждого самолета, который выполняет рейс на авиалинии, перевозит пассажиров и груз. Во время рейса используется определенное количество ресурсов (горючее, смазочные материалы, затраты на обслуживание), которые составляют в стоимостном выражении себестоимость рейса. Необходимо исследовать распределение самолетов по авиалиниям, при котором выполняются запланированные показатели перевозок при минимальной общей стоимости перевозок.

Транспортная задача линейного программирования в настоящее время широко распространена в теоретических обработках и практическом применении на транспорте и промышленности. Особенно важное значение она имеет в деле рационализации поставок важнейших видов промышленной и сельскохозяйственной продукции, а также оптимального планирования грузопотоков и работы различных видов транспорта.

3. Математическая модель задачи

Для построения математической модели введем следующие обозначения: n – количество типов транспортных единиц n=5, m – количество маршрутов m=3. Индекс будем использовать для указания маршрутов и для указания типов транспортных средств: вместимость (чел.); грузоподъемность самолета (т); план перевозки пассажиров за месяц на i-й авиалинии (тыс. чел./мес.); стоимость эксплуатации j – го самолета на i- й авиалинии за один месяц (млн. грн./мес.); план перевозки грузов за месяц на i-й авиалинии (т/мес.); максимальное количество рейсов j-го типа самолета на i-й авиалинии за один месяц; имеющееся в наличии у авиакомпании количество самолетов; коэффициент исправности. Целевая функция, задающая критерий минимизации, имеет вид:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}c_{ij} \to \max , \qquad (2)$$

где $F(x)$ задает общую стоимость перевозок за один месяц.

Определим ограничения, присутствующие в условии задачи: $s_{ij} = q_{ij}u_i, \forall_{ij}$ – объем перевозок пассажиров (тыс. чел./мес.), $o_{ij} = q_{ij}v_i, \forall_{ij}$ – объем перевозок грузов (т/мес.)

Хотя самолет перевозит и пассажиров и груз одновременно, ограничения по выполнению перевозок для пассажиров и для груза можно рассматривать отдельно:

$$\left\{\begin{array}{l} \sum_{j=1}^{n} x_{ij}s_{ij} \ge a_i \\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij}o_{ij} \ge b_i \end{array}\right\}, i = \overline{1,m} , \qquad (3)$$

$$\left\{\begin{array}{l} \sum_{j=1}^{n} x_{ij}u_{ij}q_{ij} \ge a_i \\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij}v_{ij}q_{ij} \ge b_i \end{array}\right\}, i = \overline{1,m} . \qquad (4)$$

Также учитываются ограничения на количество самолетов каждого типа, которые имеются у авиакомпании, и ограничение на неотрицательность искомых переменных. Учитывая тот факт, что некоторые самолеты могут иметь неисправности, эти ограничения имеют вид:

$$\left\{\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \le p_{ij}k_{ij}, j=\overline{1,n} \\ x_{ij} \ge 0, \forall_i, j\end{array}\right\}, i=\overline{1,m}. \quad (5)$$

Заметим, что суммарный возможный объем перевозок всеми самолетами превышает суммарный план и, следовательно, требование целочисленности можно опустить. При этом дробные значения xij будут означать частичное использование одного самолета j- ого типа на i-й авиалинии.

Полная математическая модель поставленной задачи выражается так:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}c_{ij} \to \max. \quad (6)$$

при условиях

$$\left\{\begin{array}{l}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}u_{ij}q_{ij} \ge a_i \\ \sum_{j=1}^{m} x_{ij}v_{ij}q_{ij} \ge b_i \\ \sum_{j=1}^{m} x_{ij} \le p_{ij}k_{ij}, j=\overline{1,n} \\ x_{ij} \ge 0, \forall_i, j\end{array}\right\}, i=\overline{1,m}. \quad (7)$$

4. Методы и алгоритмы решения задачи

Для решения исследуемых задач существует не один метод, но транспортные задачи являются глубоко вырожденными, так как одна работа должна выполняться только одним исполнителем, и не всякий алгоритм сможет решить их. Рассмотрим некоторые из методов [1].

Симплекс-метод хорошо справляется с т-задачами, но так как эта задача транспортного типа особого назначения, т.е. на каждый заказ назначается только один исполнитель, то она глубоко вырождена, и симплекс-метод не применим.

Венгерский метод основан на некоторых довольно трудных и нетривиальных комбинаторных свойствах матриц. Он дает хорошие результаты, но его трудно программировать. Преобразование матриц происходит таким образом, чтобы найти в ней нули, которые были бы единственными в строке и в соответствующем столбце, которые и будут искомым планом.

Метод Мака, имеет преимущество более простого интуитивного обоснования. Это логический процесс. Данный метод основан на идее выбора в каждой строке минимального элемента. Минимальные элементы строк не распределены по всем столбцам матрицы. Здесь используется идея сложения (или вычитания) одного и того же значения со всеми элементами строк по столбцам. Если в каждом столбце имеется подчеркнутый элемент, работа алгоритма закончена. По элементам, которые соответствуют оптимальному выбору, может быть вычислена соответствующая стоимость.

Для использования метода потенциалов будем строить опорный план методом северо-западного угла[3]. Заполнение таблицы транспортной задачи начинается с левого верхнего угла и состоит из ряда однотипных шагов. На каждом шаге, исходя из запасов очередного поставщика и запросов очередного потребителя, заполняется только одна клетка и соответственно исключается из рассмотрения один поставщик или потребитель. Сущность метода состоит в следующем. Пользуясь таблицей, будем распределять груз, начиная с загрузки левой верхней, условно называемой северо-западной ячейки, двигаясь затем от нее по строке вправо или по столбцу вниз. В клетку (1;1) занесем меньшее из чисел a_1, b_1, т.е. $x_{11} = \min(a_1,b_1)$. Если $a_1 > b_1$, то $x_{11}=b_1$ и первый потребитель B_1 будет полностью удовлетворен. В дальнейшем 1-й столбец таблицы в расчет не принимается; в нем переменные $xi1 = 0$ для $i=\overline{2,m}$. Двигаясь вправо по первой строке таблицы, заносим в соседнюю клетку меньшее из чисел (a_1-b_1) и b_2, т.е. $x_{12} = \min(a_1-b_1, b_2)$. Если $(a_1-b_1) < b_2$, то запасы первого поставщика исчерпаны и первая строка таблицы в дальнейшем в расчет не принимается. Переходим к аналогичному распределению запаса груза второго поставщика.

Если $b_1 > a_1$, то $x_{11} = \min(a_1,b_1) = a_1$. При этом запас первого поставщика будет исчерпан, а потому $x_{1k}= 0$ для $k=\overline{2,n}$. Первая строка из дальнейшего рассмотрения исключается. В клетку (2;1) заносим наименьшее из чисел $(a_2,b_1 - a_1)$. Процесс распределения по второй, третьей и последующим строкам (столбцам) производится аналогично распределению по первой строке или первому столбцу до тех пор, пока не исчерпаются ресурсы. Последней заполняется клетка(m;n). После того, как опорный план построен, вычисляется оценочная матрица C1. Для расчета элементов матрицы необходимо сначала определить все потенциалы β_j и α_i. Строим схему перевозок, которая отвечает начальному опорному плану x_0, т.е. соединяем коммуникациями пункты отправления и назначения, для которых x_{ij}. Определяем последовательно все потенциалы пунктов отправления и назначения, принимая для удобства $\alpha_i = 0$. Потом по формуле находим элементы матрицы C1, которые отвечают базисным элементам плана x_0 и должны быть заняты нулями.

При последующих итерациях используются такие алгоритмы.

1. Если в оценочной матрице C(k+1) все элементы положительны, план x(k) – оптимальный, в противном случае следует приступить к его улучшению.

2. Избираем наибольший по модулю отрицательный элемент оценочной матрицы, и начиная из соответствующего ему элемента x_{st}, строим замкнутую цепочку. Потом определяем минимальный элемент среди всех нечетных по порядку расположения в цепочке, считая первым x_{st} элемент.

3. Строим новый план x(k+1) , прибавляя θ ко всем четным элементам цепочки и отнимая от нечетных. Элементы матрицы x(k), которые не попадают в цепочку, перемещаются в матрицу x(k+1) без изменений.

4. С помощью подобных преобразований матрицы C(k) находим оценочную матрицу C(k+1) для нового плана x(k+1) . Для этого подчеркиваем в матрице C(k) все элементы, которые отвечают ненулевым элементам матрицы x(k+1) (они обязательно равняются 0). В матрице C(k) зачеркиваем строку, которая содержит элемент Cst. Если в этой строке имеют место подчеркнутые элементы, то зачеркиваем соответствующие этим элементам столбцы. Если же в каждом зачеркнутом столбце имеют место подчеркнутые элементы, зачеркиваем соответствующие им строки, и так до тех пор, пока описываемая процедура может выполняться. После этого ко всем элементам зачеркнутых строк прибавляем |Cst|, от элементов зачеркнутых столбцов отнимаем |Cst|. Получаем новую оценочную матрицу. Если в матрице C(k+1) нет отрицательных элементов, то план x(k+1) – оптимальный, иначе переходим к следующей итерации. На этом итерации завершаются.

5. Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы (ГА) есть поисковые алгоритмы, основанные на механизмах натуральной селекции и натуральной генетики. Они реализуют «выживание сильнейших» среди рассмотренных структур, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования эволюции поиска. В каждой генерации новое множество искусственных последовательностей создается, используя части старых и добавляя новые части с «хорошими свойствами». ГА – это не просто случайный поиск. Он эффективно использует информацию, накопленную в процессе эволюции.

Цель ГА двояка: абстрактно и формально объяснить адаптацию процессов в естественных системах; спроектировать искусственные программные системы, которые содержат механизмы естественных систем. Центральная система поиска в ГА – поиск баланса между эффективностью и качеством для выживания в различных условиях. ГА отличаются от других оптимизационных и поисковых процедур следующим: работают в основном не с параметрами, а с закодированным множеством параметров; осуществляют поиск из популяции точек, а не из единственной точки; используют целевую функцию, а не ее различные приращения для оценки информации; используют не детерминированные, а вероятностные правила.

ГА берет множество натуральных параметров оптимизационной проблемы и кодирует их как последовательность конечной длины в некотором конечном алфавите. В естественных системах общая генетическая упаковка называется генотип. В натуральных системах организм формируется посредством связи генетической упаковки с окружающей средой и называется фенотип. В естественной терминологии хромосомы состоят из генов, которые могут иметь числовые значения, называемые «аллели».

Начальное условие задачи – распределение транспортных средств. Необходимо закодировать это условие в хромосому.Для этого план перевозок нужно представить в виде развернутой строки. Генами в данном случае будут выступать элементы ячеек плана. При генерации популяции будем использовать случайные значения генов. Размер популяции для матрицы стоимостей размерностью m на n элементов необходимом брать в районе m*n. Количество генов в хромосоме соответственно будет равняться m*n.

Фитнесс-функцией (целевой функцией) для популяции является суммарная стоимость перевозки всех грузов:

$$f(k) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} . \qquad (8)$$

Для каждой сгенерированной особи считаем значение целевой функции, после чего вычисляем отношение ее приспособленности к суммарной приспособленности популяции:

$$Ps(i) = \frac{f(k)}{\sum_{i=1}^{k} f(k)} . \qquad (9)$$

Полученное значение определяет вероятность выбора особи для дальнейших операций – кроссинговера и мутации. К хромосомам с наилучшей фитнесс-функцией ($f(k) \to \min$) применяется оператор кроссинговера, который заключается в попарном «скрещивании» выбранных на предыдущем этапе особей. Например, имея хромосомы A = 10, 11, 12, 8, 7 и B = 1, 2, 3, 4, 5, после применения к ним оператора кроссинговера мы получим хромосомы C = 10, 11, 12, 4, 5 и D = 1, 2, 3, 8, 7. После скрещивания применяем к отобранным хромосомам оператор мутации. Он заключается в случайном изменении одной или нескольких позиций в хромосоме. Например, хромосома A = 10, 11, 12, 8, 7 после мутации может принять вид A = 10, 8, 12, 11, 7.

Оператор кроссинговера применяется с вероятностью 60%, мутации – 40%. Как ни странно, именно

вероятностный подход позволяет генетическим алгоритмам достигать оптимума в решаемой задаче.

Применив разработанный алгоритм к задаче транспортного типа, получили следующий результат: на каждой итерации особи в популяции улучшали свою целевую функцию, стремясь к оптимальному решению, и на четырнадцатой итерации было получено решение задачи, в то время как при использовании метода потенциалов оптимальное решение было найдено только на двадцать второй.

Рассмотренные вычислительные алгоритмы были исследованы и апробированы для различных типов транспортных задач [4, 5].

6. Выводы

В результате проведенного исследования была проанализирована оптимизационная задача транспортного типа, рассмотрена ее математическая модель, а также один из основных методов ее решения – метод потенциалов. Рассмотрены понятия эволюционного подхода к решению задач и, в частности, разработан алгоритм решения оптимизационной задачи транспортного типа на основе генетических алгоритмов. В ходе исследования сделаны выводы о том, что несмотря на сложность программной реализации, новый алгоритм является более производительным и позволяет находить оптимальное решение за более короткий срок.

Научная новизна. В ходе исследования впервые применен эволюционный подход к рассматриваемому классу задач. Таким образом, создан первый алгоритм решения оптимизационных задач транспортного типа на основе генетических алгоритмов.

Практическим значением полученных результатов является то, что разработанным методом можно решать транспортные задачи на любом предприятии транспортного типа и в отличие от уже существующих методов решения новый алгоритм является более производительным и не требует закупки более дорогостоящей вычислительной техники.

Литература: 1. *Гвоздинский А.Н.* Разработка информационной подсистемы управления воздушным транспортом/ А. Н Гвоздинский, Е. А. Гольцев//Радиоэлектроника и информатика. 2010. №2. С. 47-51. **2.** *Гвоздинський А.М.* Методи оптимізації в системах прийняття рішень: навчальний посібник /А.М. Гвоздинский, Н.А. Якімова, В.О. Губін // Харків : ХНУРЕ, 2006 С.325. **3.** *Гвоздинський А.Н.* Эволюционный подход к решению оптимизационных задач транспортного типа // А. Н Гвоздинский, С. В. Мельник // АСУ и приборы автоматики. 2009. №147. С. 76-80. **4.** *Гвоздинский А.Н.* Об одном подходе к решению задач составления расписания в системах управления объектами транспортного типа./ А. Н. Гвоздинский, А.А. Куликова // АСУ и приборы автоматики. 2010. №150. С. 101-106. **5.** *Гвоздинский А.Н.* Исследование и разработка методов решения задач закрепления потребителей за поставщиками с учетом возврата транспортных средств / А. Н. Гвоздинский, М.А. Гаврюшенко // АСУ и приборы автоматики. 2010. №150. С. 106-111.

Поступила в редколлегию 15.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Танянский С.С

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Академика Ляпунова, 7, кв. 9. тел. 702-38-23, моб. 096-304-76-02.

Обозная Мария Юрьевна, студентка специальности «Искусственный интеллект» факультета компьютерных наук ХНУРЭ. Научные интересы: методы принятия решений в системах искусственного интеллекта. Адрес: Украина, 61183, Харьков, ул. Метростроителей, 4, кв. 111, тел. 716 – 78 – 57, моб. 095-008-77-81.

УДК519.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ВЫБОРА РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ЛИТВИНОВСКИЙ А.Ю.

Исследуются методы решения задач в производственном планировании современного промышленного предприятия. Предлагаются оптимизационные методы решения задач производственного планирования, позволяющие оптимально распределять ресурсы и выявлять «узкие места» предприятия.

Введение

В современном мире человек, стараясь сделать все наилучшим образом, в основу любой целенаправленной деятельности закладывает процессы принятии решений. Теория принятия решений – быстро развивающаяся наука. Задачи, которыми она занимается, порождены практикой управленческих решений на различных уровнях – от отдельного подразделения или малого предприятия до государств и международных организаций. В научных областях она позволяет выделить наиболее важные проблемы, способы их изучения и эффективного устранения. Процессы принятия решений являются важным этапом при проектировании новой техники, разработке технологии ее создания и последующей эксплуатации. В экономике – обеспечивают оптимальное функционирование и взаимодействие производственных и хозяйственных организаций. В статье рассмотрим применение данных процессов. Ведь задача планирования организационной деятельности предприятия приобретает все более широкие масштабы. Эффективная работа организации без методов принятия решений теперь так же невозможна, как и без внедрения новейших технологий.

1. Анализ проблемы

На сегодняшний день практически не существует предприятий-монополистов. В условиях жесткой конкуренции промышленные предприятия сталкиваются с проблемой эффективного размещения производственных ресурсов в целях получения наибольшей прибыли, расходуя при этом минимум затрат. Именно поэтому так высока роль построения такой стратегии управления ресурсами, которая была бы направлена на формирование оптимальной и эффективной производственной программы предприятия в условиях динамично меняющейся экономической среды и большой конкуренции.

Состояние проблемы. Ввиду ограниченности производственных ресурсов и времени, в управлении современным предприятием большое значение имеет рациональное их использование, которое определяет комплекс задач производственного планирования. К данному комплексу относятся такие важные задачи, как решение вопросов себестоимости, уровня загруженности оборудования, фонда заработной платы, производственных площадей, ассортимента и объема выпускаемой продукции. Для решения этих задач разработано множество методов планирования организационной деятельности предприятия. Однако необходимо не просто составить оптимальную производственную программу (план выпуска продукции) на планируемый период так, чтобы полностью удовлетворить спрос потребителей. Также требуется правильно проанализировать полученное решение, выявив «узкие места» на производстве, и дать рекомендации по их разрешению. Ведь нередко бывает так, что после анализа выявляется либо существование дефицита определенного вида продукции, либо тот факт, что выпуск продукта данного типа экономически нецелесообразен.

Актуальность исследований. Совершенствование производственного планирования является первоочередной актуальной задачей в системе управления современным предприятием.

Возрастающая конкуренция и глобализация современной экономики выдвигает требования к исследованию и применению в организационном управлении современных информационных технологий и компьютерных средств, т.е. осуществляется стремительный прогресс интеллектуальных методов принятия решений.

Цель исследования. Целью исследования является рассмотрение существующих методов решения задач принятия решений в управлении производственным планированием, на основе которого можно создать оптимальную производственную программу работы предприятия.

Необходимо изучить деятельность производственного предприятия, определить эффективные методы планирования для его производственной деятельности.

Задачи исследования. Основным задачами данного исследования являются:

– экспериментальное моделирование оптимизации производственного процесса на предприятии. Процесс оптимизации должен включать: определение критериев оценки эффективности производственного процесса, формулировку задач оптимизации на основе данных критериев, исследование, выбор и применение методов для решения соответствующих задач;

– анализ полученного решения, с выявлением «узких мест» на производстве и дача рекомендаций по их разрешению;

– разработка программного продукта, позволяющего программно реализовать поставленные задачи.

Объект исследования. В качестве объекта исследования данной работы выбран конкретный пример производственного процесса некоторого предприятия при заданных ограничениях таких производственных ресурсов, как фонд производственного времени, затраты материалов на производство продукции, комплектующие изделия, затраты труда, фонд заработной платы, объем выпуска и себестоимость продукции.

2. Формальная постановка задачи

Для решения поставленной задачи следует составить математическую модель производственного процесса предприятия. Это значит сформировать систему ограничений, основанную на имеющихся производственных ресурсах, и сформировать функции цели, нахождение оптимальных значений которых приведет к получению оптимальной программы производства. При составлении функции цели должны быть учтены все показатели эффективности работы предприятия. Для выявления «узких мест» на предприятии следует составить двойственную задачу для каждой функции цели. После того, как математическая модель будет сформирована, для получения окончательных результатов нужно применить методы линейного программирования, в частности симплекс-метод.

Рассмотрим на конкретном практическом примере построение математической модели некоторого предприятия [1].

Значения ограничений ресурсов рассматриваемого предприятия приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Плановые задания

Лимитированные ресурсы и показатели	Номенклатуры изделий				
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
Ограничение по ассортименту	$\geq$ 10000	$\leq$ 30000	$\geq$ 15000	$\geq$ 20000	$\geq$ 30000

Обозначим количество каждой i-й продукции, которую выпускает данное предприятие, как X_i; фонд

производственного времени – T_i; материалы – M_i; комплектующие изделия – k_i; трудозатраты – L_i; фонд заработной платы – S_i; выпуск продукции в стоимостном выражении – P_i; себестоимость – C_i; ограничение по ассортименту – A_i; объем ресурсов – R_j.

Таблица 2

Нормы затрат ресурсов

Лимитированные ресурсы и показатели	Номенклатура изделий					Объем ресурсов $x10^5$
	B1	B2	B3	B4	B5	
Фонд производственного времени, станко-часов	2	2	1	1	3	9
Материалы, кг	1	2	3	4	2	8
Комплектующие изделия, шт	3	1	3	4	2	6
Трудозатраты, часов	3	4	1	2	2	5
Фонд заработной платы, грн	3	2	3	4	1	9,5
Выпуск продукции в стоимостном выражении	10	12	8	16	11	25
Себестоимость, грн	3	4	4	2	1	

Количество каждой i-й продукции, которую выпускает данное предприятие – X_i. Введем ограничение по фонду производственного времени в общем виде, которое представлено формулой.

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^{5} T_i * X_i \le R_1, i = \overline{1,5}. \quad (1)$$

Подставив значения из табл. 1, мы получим первое уравнение системы ограничений:

$$F_1(x) = 2x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 + 3x_5 \le 9*10^5. \quad (2)$$

Ограничение по объему используемых материалов в общем виде представлено формулой.

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^{5} M_i * X_i \le R_2, i = \overline{1,5}. \quad (3)$$

В численном виде второе уравнение системы ограничений имеет вид:

$$F_2(x) = x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + 2x_5 \le 8*10^5. \quad (4)$$

Ограничение по количеству комплектующих изделий в общем виде представлено формулой.

$$F_3(x) = \sum_{i=1}^{5} k_i * X_i \le R_3, i = \overline{1,5}. \quad (5)$$

Таким образом, в численном виде третье уравнение системы ограничений будет иметь вид:

$$F_3(x) = 3x_1 + x_2 + 3x_3 + 2x_4 + 4x_5 \le 6*10^5. \quad (6)$$

Ограничение по затратам труда в общем виде представлено формулой

$$F_4(x) = \sum_{i=1}^{5} L_i * X_i \le R_4, i = \overline{1,5}. \quad (7)$$

Четвертое уравнение системы ограничений в численном виде будет иметь вид:

$$F_4(x) = 3x_1 + 4x_2 + x_3 + 2x_4 + 2x_5 \le 5*10^5. \quad (8)$$

Ограничение по фонду заработной платы труда в общем виде представлено формулой

$$F_5(x) = \sum_{i=1}^{5} S_i * X_i \le R_5, i = \overline{1,5}. \quad (9)$$

Пятое уравнение системы ограничений в численном виде имеет вид:

$$F_5(x) = 3x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + x_5 \le 9{,}5*10^5. \quad (10)$$

Ограничение по выпуску продукции в стоимостном выражении в общем виде представлено формулой

$$F_6(x) = \sum_{i=1}^{5} P_i * X_i \le X_i \le R_6, i = \overline{1,5}. \quad (11)$$

И наконец, шестое уравнение системы ограничений в численном виде имеет вид:

$$F_6(x) = 10x_1 + 12x_2 + 8x_3 + 16x_4 + 11x_5 \le 25*10^5. \quad (12)$$

Данные об ассортименте дают следующие ограничения [1]:

$$x_1 \ge 10000, \quad (13)$$

$$x_2 \le 30000, \quad (14)$$

$$x_3 \ge 15000, \quad (15)$$

$$x_4 \ge 20000, \quad (16)$$

$$x_5 \ge 30000. \quad (17)$$

Таким образом, в численном виде система ограничений для рассматриваемой задачи имеет вид:

$$\left.\begin{array}{c} 2x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 + 3x_5 \le 9*10^5 \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + 2x_5 \le 8*10^5 \\ 3x_1 + x_2 + 3x_3 + 2x_4 + 4x_5 \le 6*10^5 \\ 3x_1 + 4x_2 + x_3 + 2x_4 + 2x_5 \le 5*10^5 \\ 3x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + x_5 \le 9{,}5*10^5 \\ 10x_1 + 12x_2 + 8x_3 + 16x_4 + 11x_5 \le 25*10^5 \\ x_1 \ge 10000 \\ x_2 \le 30000 \\ x_3 \ge 15000 \\ x_4 \ge 20000 \\ x_5 \ge 30000 \end{array}\right\} \quad (18)$$

При этом необходимо учитывать условие $X_i \ge 0$, $i = \overline{1,5}$.

Теперь составим функции цели, которые позволят определить наиболее оптимальное использование ресурсов и оптимизировать работу предприятия.

Целью работы каждого предприятия является получение максимально возможной прибыли. Этого можно добиться рядом способов, например, максимизируя объем выпуска продукции, минимизируя себестоимость или производственное время.

Исходя из сказанного выше, запишем функции цели для данной задачи.

В качестве первой функции цели будет выступать максимизация прибыли предприятия. Запишем ее в общем виде:

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^{5}(P_i - C_i) * X_i \to MAX, i = \overline{1,5}. \quad (19)$$

Для конкретных значений рассматриваемого в [1] примера функция цели будет иметь вид:

$$F_1(x) = 7x_1 + 8x_2 + 4x_3 + 14x_4 + 10x_5 \to MAX \quad (20)$$

Вторая функция цели будет выражать максимизацию валового объема выпуска продукции в денежном выражении. Запишем ее в общем виде:

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^{5} P_i * X_i \to MAX, i = \overline{1,5}. \quad (21)$$

Для конкретных значений функция примет вид:

$$F_2(x) = 10x_1 + 12x_2 + 8x_3 + 16x_4 + 11x_5 \to MAX \quad (22)$$

Третьей функцией цели представим минимизацию себестоимости, которая имеет общий вид:

$$F_3(x) = \sum_{i=1}^{5} C_i * X_i \to MIN, i = \overline{1,5}. \quad (23)$$

Запишем эту функцию с конкретными значениями:

$$F_3(x) = 3x_1 + 4x_2 + 4x_3 + 2x_4 + x_5 \to MIN. \quad (24)$$

И наконец, в роли четвертой функции цели будет выступать минимизация производственного времени:

$$F_4(x) = \sum_{i=1}^{5} T_i * X_i \to MIN, i = \overline{1,5}. \quad (25)$$

В численном виде эта функция имеет вид:

$$F_4(x) = 2x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 + 3x_5 \to MIN. \quad (26)$$

Совокупность системы ограничений и функций цели составляет математическую модель задачи оптимизации производственного процесса данного предприятия. Чтобы решить поставленную задачу, необходимо найти оптимальное решение для каждой функции цели. Следует отметить, что общая модель данной задачи является многокритериальной.

3. Исследование методов решения

Поскольку поставленная задача относится к классу экстремальных задач, для ее решения целесообразным будет применение методов математического программирования, а также современных эволюционных методов оптимизации [2].

Математическое программирование (оптимальное программирование) – область прикладной математики, объединяющая различные математические методы и дисциплины. Это математическая дисциплина, изучающая теорию и методы решения задач о нахождении экстремумов функций на множестве конечномерного векторного пространства, определяемых линейными и нелинейными ограничениями (равенствами и неравенствами).

Общая задача математического программирования состоит в нахождении оптимального (максимального и минимального) значения целевой функции, причем значения переменных должны принадлежать некоторой области допустимых значений.

Методы исследования зависят непосредственно от рода деятельности того или иного предприятия. В зависимости от этого мы стараемся добиться разных целей: найти оптимальный состав смеси, вычислить наиболее выгодный путь доставки продукции, распределить самолеты на посадочных полосах. В зависимости от задач предприятия применяются различные типы решаемых задач: о назначении, о смесях, о распределении ресурсов. Однако все они сводятся к одному разделу: задачам логического программирования.

Существуют следующие виды математического программирования: линейное; нелинейное; дискретное; динамическое; выпуклое.

Что касается эволюционных методов оптимизации, пригодных для решения исследуемого примера, то наиболее применимым для данной задачи является генетический алгоритм, изложенный в [3].

Наиболее известным и широко применяемым на практике для решения общей задачи линейного программирования является симплекс-метод. Симплекс-метод, известный также под названием метода последовательного улучшения плана, позволяет переходить от одного допустимого базисного решения к другому, причем так, что значения целевой функции непрерывно возрастают. В результате оптимальное решение находят за конечное число шагов (исключая вырожденные задачи, в которых наблюдается явление «зацикливания»). Для выбранного объекта исследования симплекс-метод позволяет дать оценку полученному решению, на базе которого можно оценить производственный план предприятия, выявив «узкие места» на производстве и дав рекомендации по их разрешению [4].

Для задач математического программирования существует понятие двойственности. Содержание двойственности состоит в сопоставлении исходной задачи другой задаче, формируемой по определенным правилам и называемой двойственной. Если задача математического программирования – результат моделирования конкретной экономической ситуации, то двойственность и та информация, которую двойственность порождает, позволяют провести глубокий анализ моделируемой ситуации.

Для решения задачи, исследуемой в данной работе, используем генетический алгоритм типа метода муравьиных колоний.

Основу поведения муравьев составляет самоорганизация, механизмы которой обеспечивают теоретически оптимальное поведение. Принципы его состоят в достижении системой некоторой глобальной цели в результате низкоуровневого взаимодействия ее элементов. Здесь имеется в виду использование системой только локальной информации. Метод муравьиных колоний хорошо адаптирован к вычислению моделей (1), (2) [2].

Для решения задач, представленных моделями (3), (4), используем генетические алгоритмы [5].

Поиск оптимального решения похож на эволюцию популяции индивидов, которые представлены наборами хромосом. В этой эволюции действуют три механизма, среди которых наиболее существенными являются: создание начальной популяции; скрещивание; мутации.

В результате смены поколений вырабатывается такое решение поставленной задачи, которое не подлежит дальнейшему улучшению. Общую схему генетического алгоритма (ГА) можно продемонстрировать на рассмотрении задачи минимизации производственного времени (25).

Общая схема ГА представляется таким образом:

1. Выбор начальной популяции $S_k(0)$ $\{S_{k1}, S_{k2},\ldots, S_{kn}\}$, где n – длина цепочки. Считать $f^* = \max \{f(S_k) \mid S_k \in S_k(t)\}$, t:= 0.

2. Пока не выполнен критерий остановки, делать следующее:

– выбирать родителей S_{k1}, S_{k2} из популяции $S_k(t)$ (отбор);

– строить новое решение S_k по S_{k1}, S_{k2} (скрещивание);

– модифицировать S_k (скрещивание);

– если $f^* < f(S_k)$, то $f^* := f(S_k)$;

– обновлять популяцию и считать t:=t+1.

3. Поиск оптимального компромиссного решения. После решения локальных задач оптимизации используют игровую «компромиссную» векторную функцию, устанавливающую «меру оценки», т.е. отклонение значений целевых функций от оптимальных значений остальных. Эта «мера» устанавливается по формуле [4]

$$A = \left\| a_{ij} \right\|_{mn} = \frac{F_j(x_j) - F_i(x_j)}{F_j(x_i)}, i, j = \overline{1,3}, \quad (27)$$

A – матрица платежей матричной игры двух лиц X и F с нулевой суммой, которая определена множеством чистых стратегий $\{x_1, x_2, x_3\}$.

Выводы

В ходе данного исследования рассмотрены методы решения задач производственного планирования. На конкретном примере проанализировано решение задачи данного класса. Построена математическая модель задачи оптимизации производственного процесса современного предприятия. Исследованы методы решения оптимизационных задач с использованием различных алгоритмов решения.

Научной новизной результатов исследований, приведенных в статье, является метод решения полученной математической модели производственного процесса современного предприятия с учетом таких производственных ресурсов, как фонд производственного времени, затраты материалов на производство продукции, комплектующие изделия, затраты труда, фонд заработной платы, объем выпуска и себестоимость продукции. На основе обширного анализа методов решения задач производственного планирования предложены вычислительные алгоритмы. С помощью этих методов можно не только получить план эффективной производственной программы предприятия, но также дать оценку его работы.

Практическое значение. Исследование задач производственного планирования позволяет глубже рассмотреть проблемы оптимизации производственного процесса на современном предприятии. Нахождение оптимального плана производства позволяет повысить такие показатели его эффективности, как прибыль предприятия, валовой объем выпуска продукции, себестоимость, уровень загруженности оборудования. Полученные результаты исследования могут найти применение при решении реальных задач в будущем. Разработана программная реализация соответствующего метода может быть применена при планировании работы как малых частных фирм, так и крупных государственных предприятий. Благодаря этому будет достигнута наибольшая прибыль и затраты будут минимальными. Также будет обеспечена высокая конкурентоспособность предприятия, что очень важно в условиях современного рынка. Рассмотрен конкретный пример, показана сфера его использования.

Литература: 1. *Безгинова О.Н.* Исследование и разработка методов и решения задач производственного планирования / О.Н. Безгинова, А.Н. Гвоздинский, М.Д. Поважная // АСУ и приборы автоматики. 2010. №150. С.63-67. **2.** *Гвоздинский А.Н.* Применение методов эволюционной оптимизации для решения задач производственного планирования / А.Н. Гвоздинский, В.А. Малышкин, С.В. Ткачев // АСУ и приборы автоматики. 2011. №154. С.97-102. **3.** *Гвоздинский А.Н.* Принципы и методы оптимизации в современных организационных системах управления/ А.Н. Гвоздинский, А.Е. Козлова, А.О. Дроздов // Бионика интеллекта. 2013. №2 (81). С.66-70. **4.** *Гвоздинський А.М.* Методи оптимізації в системах прийняття рішень: навчальний посібник / А.М. Гвоздинський, Н.А. Якімова, В.О. Губін // Харків: ХНУРЕ. 2006. С.325. **5.** *Гвоздинский А.Н.* Методы аналитической обработки данных / Гвоздин-

ский А.Н., Клименко Е.Г. // Радиоэлектроника и информатика. 2000. №4. С.111-112.

Поступила в редколлегию 20.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Танянский С.С.

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, професор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. акад. Ляпунова, 7, кв. 9, тел. 702-38-23.

Литвиновский Антон Юрьевич, студент 4 курса факультета КН ХНУРЭ. Научные интересы: процедуры принятия решений в производственных процессах. Адрес: Украина, 62341, Харьковская обл., Дергачевский р-н., пгт. Малая Даниловка, ул. Левченко, 59, тел. 098-525-80-32.

УДК519.86

ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ДОХОДІВ МАЛОГО ПІДПРИЄМСТВА

КЛИМКО О.Г., ЧЕРНИШ Ю.М.

Розглядається важливість застосування економіко-математичного моделювання економічних показників діяльності малого підприємства, а саме апарату адаптивного моделювання. Для виконання аналізу динаміки показників застосовується модель динамічної регресії та модель Брауна. Оцінюється якість прогнозів.

Вступ

Розвиток та підтримка малого й середнього бізнесу є економічними реаліями сьогодення. Підприємництво є важливим сектором вітчизняної економіки. Воно сприяє насиченості ринку товарами та послугами, створенню нових робочих місць, зменшенню рівня безробіття. З його розвитком держава пов'язує вирішення соціальних проблем суспільства та забезпечення впровадження реформ у економіці. Продуктивна робота таких підприємств є значним джерелом поповнення бюджетів всіх рівнів, що сприяє розвитку країни [1].

Використання економіко-математичного моделювання для економічних показників діяльності підприємства є дуже важливим. Підвищення вимог до обґрунтованості й надійності прогнозних оцінок є логічним наслідком посилення ролі прогнозування в рішенні завдань сучасного управління економічними системами. Тому адекватність в описі процесів можна досягти, якщо використовувати моделі, побудову яких засновано на адаптивних принципах. Використання традиційних методів прогнозування не забезпечує необхідного рівня надійності економічних показників, що пов'язано з діяльністю підприємств малого бізнесу в умовах невизначеності та відсутністю стабільності на ринку України. Таким чином моделі, які основані на адаптивних принципах, дозволяють отримати необхідний рівень адекватності економічних показників.

1. Огляд останніх джерел досліджень і публікацій

Першими розроблювачами основних засад використання апарату адаптивного моделювання соціально-економічних процесів були Р.Браун, Ч.Хольт та Р.Майєр. У подальшому цим питанням стали займатися В.В. Давнис, В.М. Чадєєв, Е.М. Левицький, Ю.П-. Лукашин, В.П. Бородюк, та інш.

Сфери та методи можливого застосування адаптивних моделей більшість авторів використовували для рішення загальних технічних або кібернетичних завдань.

Методи цього апарату застосовуються у випадках, де основною інформацією для прогнозу є часові ряди, а інструментом прогнозу виступає модель. Первісна оцінка параметрів моделі заснована на даних початкового часового ряду. З новими даними, які отримуються на кожному наступному кроці, виконується коригування моделі у часі. Дані проходять адаптацію до нових умов розвитку. Модель, отримуючи нову інформацію, пристосовується до неї.

В основі адаптивних методів лежить побудова економіко-математичних моделей, які самовдосконалюються у часі, враховуючи цінність різних членів часової послідовності та надання достатньо точної оцінки майбутніх членів даного ряду. Такі моделі призначені перш за все для короткострокового прогнозування.

Інструментом прогнозу в адаптивних моделях є математична модель з єдиним фактором «час». При оцінюванні параметрів адаптивних моделей рівням ряду присвоюють різну вагу залежно від того, наскільки сильний їх вплив на поточний рівень. Це дозволяє враховувати зміну в тенденції, а також будь-які коливання, у яких простежується закономірність. Ці моделі представляють процес розвитку як лінійну тенденцію з постійно змінюваними параметрами [2, 3, 5].

2. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення прогнозних значень рівня доходів підприємства від надання сервісних послуг та від продажу товарів. Для практичного використання запропонованої методики необхідно вирішити такі *задачі*:

1) проаналізувати метод динамічної регресії та модель Брауна;

2) перевірити адекватність моделей за відповідними критеріями;

3) визначити точність прогнозу;

4) проаналізувати динаміку показників діяльності підприємства.

Для дослідження було обрано мале підприємство, що займається продажем електронної техніки та її сервісним обслуговуванням.

Розглядаючи в динаміці стан підприємств, що займаються аналогічною діяльністю, неважко помітити зменшення товарообігу. Перш за все це пояснюється зниженням конкурентоспроможності малих підприємств по відношенню до крупних мережевих фірм, що займаються продажем по всій території України. Малим підприємствам стає все важче відстоювати свої позиції на ринку. Тому доцільно застосувати економіко-математичне моделювання для прогнозування значень економічних показників на майбутній період. Для економічного аналізу та моделювання стану підприємства було обрано дві моделі: динамічної регресії (модель експоненційного згладжування) та адаптивна модель Брауна.

3. Аналіз методу динамічної регресії та моделі Брауна

Суть методу експоненціального згладжування полягає в тому, що ряд даних згладжується за допомогою зваженої ковзної середньої, у якій вага підпорядковується експоненціальному законові розподілу. Така ковзна характеризує значення процесу наприкінці інтервалу згладжування, тобто є середньою характеристикою останніх рівнів ряду. Саме ця властивість застосовується при прогнозуванні.

Метод динамічної регресії включає один параметр α, що був запропонований саме для оновлення цих значень.

Прогнозним значенням для першого періоду вважаємо його реальне значення. Друге прогнозне значення одержуємо з рівності

$$\overline{y_2} = \overline{y_1} + \alpha(y_2 - \overline{y_1}) = \alpha y_2 + (1-\alpha)\overline{y_1}.$$

Для кожного наступного етапу прогнозне значення встановлюється на основі попереднього значення:

$$\overline{y_t} = \alpha y_t + (1-\alpha)\overline{y_{t-1}},$$

де y_t – фактичне значення в період t; $\overline{y_{t-1}}$ – прогнозне значення за попередній період.

Значення α є параметром згладжування (вагою t-го значення рівня часового ряду), який змінюється динамічно. Від значення α залежить вага попередніх рівнів ряду динаміки і відповідно до цього ступінь їх впливу на рівень згладжування, а отже значення прогнозних оцінок. Чим більше значення параметра згладжування, тим менший вплив на прогнозні оцінки попередніх рівнів та вплив згладжування експоненційної середньої. Автор методу простого експоненційного згладжування Р.Браун запропонував таку формулу розрахунку α:

$$\alpha = \frac{2}{n+1},$$

де n – число рівнів часового ряду, що належать до інтервалу згладжування.

Для зміни α потрібно визначити помилки прогнозу на один та два періоди. Шукана оцінка для параметра в момент часу t отримується при мінімізації суми квадратів похибок за попередні періоди:

$$\alpha_t = \frac{\sum_{t=1}^{T}(y_{t+2} - \overline{y})(y_{t+1} - \overline{y})}{\sum_{t=1}^{T}(y_{t+1} - \overline{y_t})^2},$$

тобто відношення регресії помилки за другий період до регресії за перший період. Сума береться за всіма періодами від першого до останнього з номером T, де T – період, до якого дійшли на етапі моделювання.

Лінійна адаптивна модель Брауна вміщує два параметри. Для використання цієї моделі потрібно визначити параметр $\beta \in [0,1; 0,3]$. Це коефіцієнт, який характеризує знецінення даних за одиницю часу і відображає ступінь довіри наступним спостереженням. Далі робимо прогнозування методом аналітичного вирівнювання за лінійною функцією Y=A·t+B.

Значення A та B є параметрами моделі Брауна. За допомогою функції ЛИНЕЙН (табличного процесора MS Excel) обчислюються їх початкові значення. Наступні значення змінюються динамічно за такою формулою:

$$B_t = A_{t-1} + B_{t-1} + \beta^2 \cdot (y_{t-1} - \overline{y_{t-1}});$$
$$A_t = A_{t-1} + \beta^2 \cdot (y_{t-1} - \overline{y_{t-1}}).$$

Використавши значення A і B, одержимо прогноз на кілька періодів [4].

4. Оцінка якості прогнозів

Для будь-якої економіко-математичної моделі питання про можливість її застосування для аналізу та прогнозування економічного явища може бути вирішено після встановлення адекватності, тобто відповідності досліджуваному процесові чи об'єкту.

Для перевірки адекватності моделей було застосовано такі критерії:

1. Критерій серій – визначення випадковості відхилень від тренду.

2. Критерій піків – перевірка рівності нулю математичного сподівання.

3. R/S-критерій – визначення відповідності розподілу залишкової компоненти нормальному закону.

4. Критерій Дарбіна-Уотсона – визначення незалежності значень залишкової компоненти.

В ході дослідження діяльності підприємства було проаналізовано показники прибутку від продажу та сервісної діяльності фірми за останні п'ять років.

Для перевірки адекватності моделей Брауна та динамічної регресії використано основні показники, що перелічені вище. Параметри адекватності визначено як для прибутку фірми від реалізації товару, так і для прибутку фірми від післяпродажного обслуговування та ремонту техніки.

У табл. 1 та 2 наведено результати перевірки моделей на адекватність для екстраполяції доходів підприємства від надання послуг (ремонт та обслуговування) та від продажу електронної техніки відповідно.

Таблиця 1

Критерій	Критерій серій	Критерій піків	Рівність математичного сподівання залишкової компоненти нулю	Критерій Дарбіна-Уотсена	Висновки
Умова адекватності	$k_{max}<k$ $v>v_1$	p>m	$t_{розр}<t_{крит}$	$d>d_2$ $d>d_1$	
Значення постійних показників	k=9,17 v1=22,97	m=32,36	$t_{крит}$=2,001	d_1=1,549 d_2=1,616	
Адаптивна модель Брауна	k_{max}=4 v=34	p=38	$t_{розр}$=0,0611	d=1,540 (2,46)	не адекватна
	адекватна	адекватна	μ=0	не адекватна	
Метод динамічної регресії	k_{max}=5 v=25	p=36	$t_{розр}$=0,1659	d=1,93	адекватна
	адекватна	адекватна	μ=0	адекватна	

Таблиця 2

Критерій	Критерій серій	Критерій піків	Рівність математичного сподівання залишкової компоненти нулю	Критерій Дарбіна-Уотсена	Висновки
Умова адекватності	$k_{max}<k$ $v>v_1$	p>m	$t_{розр}<t_{крит}$	$d>d_2$ $d>d_1$	
Значення постійних показників	k=9,17 v1=22,97	m=32,36	$t_{крит}$=2,001	d_1=1,549 d_2=1,616	
Адаптивна модель Брауна	k_{max}=3 v=41	p=46	$t_{розр}$=0,0611	d=1,15 (2,851)	не адекватна
	адекватна	адекватна	μ=0	не адекватна	
Метод динамічної регресії	k_{max}=6 v=31	p=41	$t_{розр}$=1,1351	d=1,9724	адекватна
	адекватна	адекватна	μ=0	адекватна	

З отриманих результатів видно, що в обох випадках доцільно застосовувати модель простого експоненційного згладжування (метод динамічної регресії). Вона відповідає всім критеріям адекватності.

При визначенні точності прогнозу було розглянуто основні характеристики адаптивних моделей прогнозування для екстраполяції доходів підприємства від надання послуг (ремонт та обслуговування) та від продажу електронної техніки, які наведено у табл. 3 та 4.

Таблиця 3

Модель	Точність	Середньо-квадратична похибка	Середня відносна похибка	Коефіцієнт кореляції	Критерій Фішера		Критерій Стьюдента	
	r=	S	$\delta_{сер}$	R	$F_{розр}$	$F_{кр}$	$t_{розр}$	$t_{кр}$
Адаптивна модель Брауна	51,48	84,29	48,52	0,5406	12,181	3,153	4,936	2,001
Метод динамічної регресії	83,8	29,98	16,2	0,9146	150,99	3,153	17,38	2,001

Таблиця 4

Модель	Точність	Середньо-квадратична похибка	Середня відносна похибка	Коефіцієнт кореляції	Критерій Фішера		Критерій Стьюдента	
	r=	S	$\delta_{сер}$	R	$F_{розр}$	$F_{кр}$	$t_{розр}$	$t_{кр}$
Адаптивна модель Брауна	77,65	27,92	22,35	0,8057	54,574	3,153	10,447	2,001
Метод динамічної регресії	78,47	18,3	20,59	0,8398	72,132	3,153	8,926	2,001

Отже, при аналізі показників рівня доходів малого підприємства від ремонту та обслуговування електронної техніки і від її продажу доцільно використовувати модель динамічної регресії. Це підтверджено критеріями адекватності моделі фактичним даним. Точність моделі динамічної регресії приймає значення 83,3% при екстраполяції доходів від надання послуг та 78,47% – від продажу. Ці показники є вищими, ніж у моделі Брауна.

Середньоквадратична похибка складає 29,98 та 18,3%. Значення коефіцієнта кореляції 0,9146 та 0,8398, що свідчить про високий лінійний зв'язок між ознаками, в даному випадку «часу» та «доходу». Стосовно критеріїв Фішера та Стьюдента: розрахункові значення критеріїв перевищують критичні (табличні) значення, а це підтверджує статистичну значущість моделі регресії.

Таким чином, для прогнозування розвитку підприємства необхідно у обох випадках використати метод динамічної регресії. Для більш наочного представлення реальних та розрахункових даних надано діаграми (рис.1, 2).

Рис.1. Діаграма залежності фактичних та розрахункових даних доходу фірми від продажу

Рис. 2. Діаграма залежності фактичних та розрахункових даних доходу фірми від сервісу

Прогноз на перші три місяці 2014 року по доходу підприємства від продажу електронної техніки та її сервісного обслуговування за методом динамічної регресії наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Період (роки)	Період	Дохід від надання послуг, тис.грн. (y_t)	Теоретичні дані y_r	Дохід від продажу, тис.грн. (y_t)	Теоретичні дані y_r
2014	61		**79,04**		**32,42**
	62		**88,59**		**40,26**
	63		**84,34**		**34,73**

За результатами розрахунку прогнозні значення від надання сервісних послуг: на січень – 79,04 тис.грн, лютий – 88,59 тис.грн, березень – 84,34 тис.грн. При цьому точність прогнозу складає 83,8%. Для показника доходу фірми від продажу електронної техніки отримуємо такі прогнозні значення: січень – 32,42 тис.грн, лютий – 40,26 тис.грн, березень – 34,73 тис.грн. При цьому точність прогнозу складає 78,47%.

Висновки

Дослідивши динаміку доходу на майбутні періоди, слід зазначити, що керівництву підприємства потрібно звернути увагу на ремонт та сервісне обслуговування електронної техніки, як найбільш перспективний напрям розвитку.

Для подальших досліджень в зазначених економічних умовах рекомендовано використовувати адаптивні моделі прогнозування, тому що вони мають змогу пристосовуватися до нестабільних ситуацій та робити прогноз на основі адекватних даних.

Література: 1. *Аналітичний* звіт про стан і перспективи розвитку малого та середнього підприємництва в Україні // Державна служба України з питань регуляторної політики та розвитку підприємництва. К., 2013. 55 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.dkrp.gov.ua/info/1220 **2.** *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учебное пособие / П.Лукашин. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с. **3.** *Давнис В.В.* Адаптивные модели: анализ и прогноз в экономических системах / В.В.Давнис, В.И.Тинякова. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2006. 380 с. **4.** *Скрильник І.І.* Навчальний посібник з дисципліни «Прогнозування соціально-економічних процесів» для економічних спеціальностей усіх форм навчання / Скрильник І.І., Климко О.Г. Полтава: Видавництво ПолтНТУ, 2012. 228 с. **5.** *Коломицева А.О.* Умови й переваги використання адаптивних раціональних прогнозів у завданнях розвитку інноваційно-орієнтованих систем // Проблеми економіки. Математичні методи та моделі в економіці. 2012. №2. С.48-50.

Надійшла до редколегії 04.12.2013

Рецензент: д-р екон. наук, доц. Онищенко А.М.

Климко Олена Генріхівна, старший викладач кафедри економічної кібернетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: економіко-математичне моделювання, прийняття рішень. Адреса: Україна, 36021, Полтава, вул. Алмазна 1-А, кв. 34, тел. (053-2) 68-01-41.

Черниш Юлія Миколаївна, студентка групи 402-ЕК факультету менеджменту та бізнесу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: прогнозування та прийняття рішень. Адреса: Україна, 36007, Полтава, вул. М.Бірюзова, 84, кв.84, тел. (053-2) 56-75-13.

УДК519.86

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДІЯЛЬНОСТІ ПАТ «УКРТЕЛЕКОМ»

ЩЕРБІНІНА С.А., ГЕРАЩЕНКО І.В.

Будуються моделі множинної лінійної регресії доходу й собівартості наданих послуг у вигляді функціональних залежностей від окремих економічних показників. На їх основі визначаються прогнозні значення доходу й собівартості реалізованої продукції на майбутній період для ефективного планування діяльності підприємства.

Вступ

На сьогоднішній день найпоширенішою послугою, якою користується кожна людина, є зв'язок. В сучасних умовах розвитку ринку послуг зв'язку України на етапі глобалізації та входження у світовий телекомунікаційний простір виникає необхідність обґрунтування та дослідження питань аналізу показників діяльності підприємств, що надають ці послуги, зокрема ПАТ «Укртелеком». Для підприємств будь-якої форми власності дуже важливо враховувати фінансові результати, що відображають динаміку витрат і доходів протягом певного часу. Однак сама фінансова інформація, виражена в грошовій формі, без належного аналізу, ефективності використання не дає повної оцінки поточного стану і перспектив розвитку підприємства.

Ефективне управління сучасним підприємством неможливе без використання методів економіко-математичного моделювання. Для багатофакторних моделей чи явищ доцільно використовувати методи множинного кореляційно-регресійного аналізу, які дають змогу вивчити та кількісно оцінити внутрішні й зовнішні наслідкові зв'язки між утворюючими модель факторами та встановити закономірності функціонування і тенденції розвитку досліджуваної результативної ознаки. Результати аналізу доходу, собівартості та інших економічних показників можуть бути використані для ефективного планування діяльності підприємства.

Окремі аспекти вивчення моделювання економічних процесів підприємств знайшли відображення в наукових працях В.Б. Васюти [1], М.Я. Квика й Г.Г. Цегелика [2], В.М. Порохні та М.Г. Пивоварова [3], В.В. Вітлинського й О.В. Піскунова [4], В.С. Дубініна й Н.В. Черевика [5] та інших.

1. Мета та завдання дослідження

Розвиток підприємства в сучасних умовах потребує глибокого і всебічного аналізу основних показників його діяльності та факторів, що на них впливають. Метою даного дослідження є розробка економіко-математичних моделей залежності доходу та собівар-

тості від впливу інших економічних показників для конкретного підприємства України.

Аналіз взаємозв'язків основних економічних показників діяльності підприємства та прогнозування їх значень на майбутній період є завданням даної роботи. Інформаційна база дослідження створена на підставі річної звітності ПАТ «Укртелеком» за 2002-2012 рр., що займається наданням телекомунікаційних послуг.

2. Основний матеріал та результати

Важливим показником діяльності підприємства є розмір його доходу, що відображає кількість наданих послуг підприємством у грошовому вимірі за певний період часу. Дохід – це валове надходження економічних вигід протягом періоду, що виникає в ході звичайної діяльності суб'єкта господарювання, коли власний капітал зростає в результаті цього надходження, а не в результаті внесків учасників власного капіталу [6]. Побудова економіко-математичної моделі залежності доходу від факторів впливу дає можливість визначити обсяг наданих послуг на майбутній період, що актуально для планування діяльності підприємства.

При аналізі економічної ефективності виробництва доцільно дослідити собівартість продукції. Собівартість промислової продукції (робіт, послуг) - це виражені в грошовій формі поточні витрати підприємства на її виробництво і збут. Витрати на виробництво утворюють виробничу (заводську) собівартість, а витрати на виробництво і збут – повну собівартість продукції [7]. Від її рівня залежать як рентабельність окремих видів наданих послуг, так і фінансові результати діяльності підприємства в цілому, темпи розширеного виробництва, фінансовий стан суб'єкта економіки.

Для побудови та реалізації моделей взаємозв'язків основних економічних показників використаємо пакет прикладної програми STATISTICA 8.0 – це універсальна інтегрована система, призначена для статистичного аналізу та обробки даних [8].

Регресійний аналіз (англ. regression analysis) – це метод визначення відокремленого і спільного впливу факторів на результативну ознаку та кількісної оцінки цього впливу шляхом використання відповідних критеріїв. Він проводиться на основі побудованого рівняння регресії і визначає внесок кожної незалежної змінної у варіацію досліджуваної (прогнозованої) залежної змінної величини. Рівняння регресії показує, як в середньому змінюється результативна ознака під впливом зміни факторних ознак [9].

Оберемо три економічних показники діяльності підприємства (предиктори), що мають тісний зв'язок з доходом (Y_1): сума оборотних активів (X_1), основні засоби (X_2) та собівартість наданих послуг (X_3). Вихідні дані наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Період	Дохід (тис. грн)	Сума оборотних активів (тис. грн)	Основні засоби (тис. грн)	Собівартість наданих послуг (тис. грн)	Витрати на оплату праці (тис. грн)	Амортизація (тис. грн)
2002	4453	1320	4928	2100	975	670
2003	5114	1495	5962	2599	1094	793
2004	7209	2017	6731	4302	1490	959
2005	7786	3342	7561	5140	1580	972
2006	7894	2233	8447	5146	1751	1025
2007	8039	2686	8989	5212	1896	1147
2008	7890	2084	9318	5698	2272	1288
2009	8131	2000	8943	5651	2357	1360
2010	8007	1600	8054	5581	2317	1383
2011	8040	1873	7213	4729	2153	1339
2012	8335	1172	7081	6100	2091	949

Для виконання поставленої задачі застосуємо метод фіксованої лінійної регресії, оберемо залежні й незалежні змінні й визначимо компоненти лінійної регресії, вибір яких базується на кореляційному аналізі. В результаті моделювання отримано таке рівняння лінійної множинної регресії:

$$Y_1 = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 ,$$

де b_0 – вільний член рівняння; b_1, b_2, b_3 – розрахункові коефіцієнти рівняння регресії.

Результати оцінювання параметрів рівняння множинної лінійної регресії наведені в табл. 2.

Таблиця 2

N=11	Regression Summary for Dependent Variable: Y (Таблица.sta) R= ,96229801 R?= ,92601745 Adjusted R?= ,89431065 F(3,7)=29,206 p<,00025 Std.Error of estimate: 425,77					
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(7)	p-level
Intercept			3138,320	827,3752	3,793103	0,006775
X1	-0,038649	0,117927	-0,081	0,2470	-0,327733	0,752698
X2	-0,167716	0,225943	-0,161	0,2170	-0,742290	0,482071
X3	1,123722	0,220904	1,193	0,2344	5,086934	0,001420

Таблиця містить стандартизовані (БЕТА) і не стандартизовані (B) регресійні коефіцієнти, їх стандартні помилки й рівні значущості. Коефіцієнт множинної кореляції R=0,96, коефіцієнт детермінації R^2=0,92, значення F-критерію $F_{роз}$ (29,2)>F_t (3,7). Отже, залежність між результативною ознакою і предикторами висока (R^2>0,9); побудована лінійна регресія адекватно описує дану залежність, вільний член є статистично значущим.

Величина *Бета* дає змогу визначити вклади кожного з предикторів. Так, в залежну змінну доходу великий вклад вносить собівартість реалізованої продукції (X_3=1,1237), оборотні активи й основні засоби, близькі за значенням (X_1 = -0,0386; X_2 = -0,1677). Від'ємний знак коефіцієнтів при змінних означає, що зі збільшенням вартості оборотних активів та основних засобів зменшуються доходи підприємства.

Рівняння лінійної множинної регресії використано для прогнозу доходу на майбутній період. Значення предикторів на майбутній період визначено методом екстраполяції (рис.1.) та отримано результати передбачення (рис. 2.).

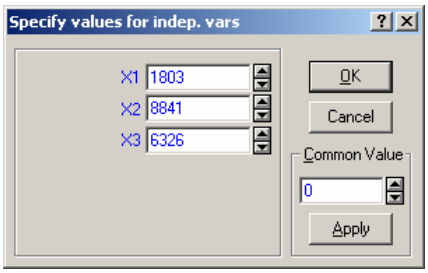


Рис. 1. Вікно введення значень незалежних змінних

Variable	B-Weight	Value	B-Weight * Value
X1	-0,080954	1803,000	-145,96
X2	-0,161083	8841,000	-1424,14
X3	1,192612	6326,000	7544,46
Intercept			3138,32
Predicted			9112,69
-95,0%CL			8496,97
+95,0%CL			9728,40

Рис. 2. Прогнозні значення на наступний період

Отже, дохід на наступний період буде мати значення 9112,69 тис. грн з 95%-м довірчим інтервалом (8496,97 тис. грн; 9728,40 тис. грн).

Однією з умов коректного застосування регресійного аналізу є відповідність закону розподілу залишків нормальному закону. Дана гіпотеза перевіряється за допомогою нормальних імовірнісних графіків (рис.3).

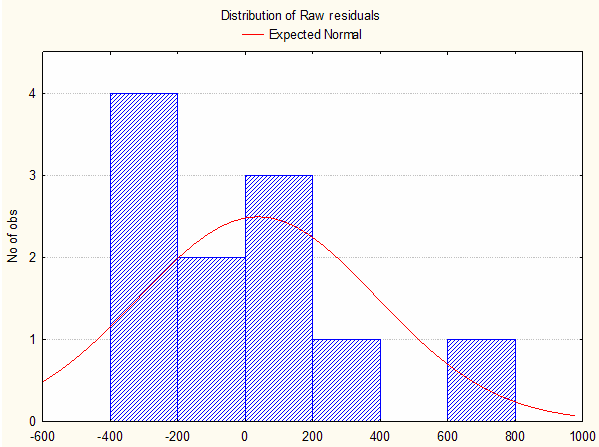


Рис. 3. Гістограма відхилення розподілу залишків

На осі X наведено спостереження, а по осі Y – інтервали. Для того, щоб припущення про нормальний розподіл залишків було вірним, потрібно, щоб досліджувані значення потрапляли на пряму лінію. У іншому разі на графіку спостерігатиметься сильне відхилення від прямої. З побудованого графіка видно, що є відхилення розподілу залишків, але воно несуттєве, тому гіпотеза про розподіл залишків за нормальним законом приймається.

Отже, за розрахунками ми отримали модель відображення функціональної залежності доходу від трьох економічних показників, яка має вигляд:

$$Y_1 = 3138{,}32 - 0{,}081 \cdot X_1 - 0{,}161 \cdot X_2 + 1{,}193 \cdot X_3 .$$

Враховуючи отримані залежності між доходом та факторами впливу, можна зробити такі висновки. Збільшення оборотних активів, до певного оптимального рівня спричиняє підвищення доходу. Подальше зростання оборотних активів приводитиме до того, що підприємство матиме в своєму розпорядженні вільні активи, утримання яких призводить до витрат і відповідного зниження доходу від наданих послуг. Введення в дію нових основних засобів, а також їх модернізація або реконструкція призводить до зменшення доходу. Коефіцієнт кореляції даної моделі рівний (0,96), отже, вона є адекватною і її можна застосовувати для економічного аналізу діяльності підприємства.

З попередніх спостережень видно, що серед всіх предикторів вплив собівартості наданих послуг є найбільшим. Тому доцільно побудувати модель залежності собівартості наданих послуг (X_3) від витрат на оплату праці (Z_1) та амортизації основних засобів (Z_2) (табл.1). В результаті моделювання отримано таке рівняння лінійної множинної регресії:

$$X_3 = b_0 + b_1 \cdot Z_1 + b_2 \cdot Z_2 ,$$

b_0 – вільний член рівняння; b_1, b_2 – розрахункові коефіцієнти рівняння регресії.

Результати оцінювання параметрів рівняння множинної лінійної регресії наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Regression Summary for Dependent Variable: X3 (Таблица.sta)
R= ,91315671 R?= ,83385517 Adjusted R?= ,79231896
F(2,8)=20,075 p<,00076 Std.Error of estimate: 562,37

N=11	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(8)	p-level
Intercept			143,6903	831,7602	0,172754	0,867135
Z1	0,652831	0,369977	1,6650	0,9436	1,764518	0,115648
Z2	0,275766	0,369977	1,4106	1,8925	0,745361	0,477379

За розрахунками отримано такі результати:

– коефіцієнт кореляції $R = 0{,}91$;

– коефіцієнт детермінації $R^2 = 0{,}83$;

– значення F-статистики $F_{роз}$ (20,075) > F_t (2,8).

Таким чином, залежність між результативною ознакою і предикторами висока (R^2=0,83); побудована лінійна регресія адекватно описує дану залежність, вільний член є статистично значущим.

За значенням Бета визначено вклади предикторів у залежну змінну собівартості наданих послуг, саме: витрати на оплату праці (Z_1=0,6528), а амортизація (Z_2 = 0,2757).

Рівняння лінійної множинної регресії застосовано для прогнозу собівартості наданих послуг. Значення предикторів на майбутній період визначено методом екст-

раполяції та отримано результати передбачення (рис. 4-5). Прогноз: собівартість наданих послуг на наступний рік буде мати значення 6313,50 тис. грн з 95%-м довірчим інтервалом (5542,71 тис. грн; 7084,29 тис. грн).

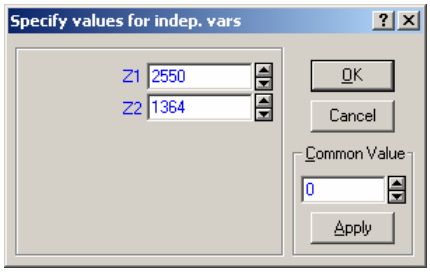


Рис. 4. Вікно введення значень незалежних змінних

Variable	B-Weight	Value	B-Weight * Value
Z1	1,665011	2550,000	4245,777
Z2	1,410587	1364,000	1924,040
Intercept			143,690
Predicted			6313,508
-95,0%CL			5542,717
+95,0%CL			7084,298

Рис. 5. Прогнозні значення на наступний період

Гістограму залишків наведено на рис. 6.

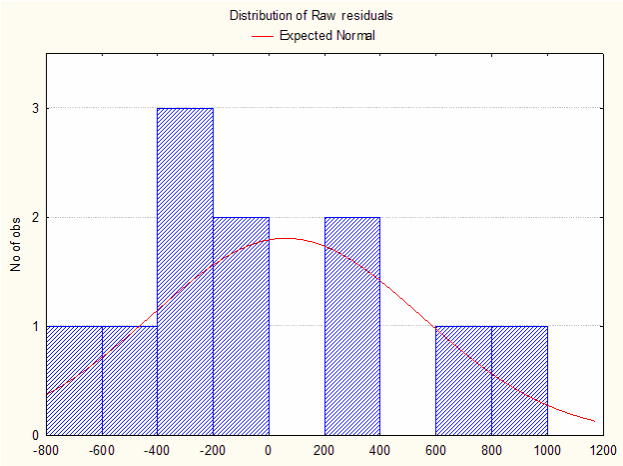


Рис. 6. Гістограма розподілу залишків за нормальним законом

З побудованого графіка видно, що є відхилення розподілу залишків, але воно є несуттєве, тому гіпотеза вважається прийнятою. Отже, за розрахунками ми отримали модель відображення функціональної залежності собівартості наданих послуг від двох економічних показників, яка має вигляд:

$$X_3 = 143{,}69 + 1{,}66 \cdot Z_1 + 1{,}41 \cdot Z_2 .$$

Залежність відгуку від предикторів відповідає їх реальному опису і свідчить про те, що збільшення витрат на оплату праці або амортизації основних засобів призводить до збільшення собівартості наданих послуг. Дана модель адекватна і вона конкретно описує залежності наявних факторів і її можна застосовувати для економічного аналізу на даному підприємстві.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було розроблено моделі множинної лінійної регресії залежності доходу та собівартості телекомунікаційних послуг підприємства ПАТ «Укртелеком» від факторів впливу з метою прогнозування і ефективного управління діяльністю підприємства. Наведену методику дослідження можна застосовувати для інших підприємств України.

Література: 1. *Васюта В.Б.* Розвиток малого підприємництва в Україні у 2004 р. // Економіка і регіон. №4(7). 2005. С. 93–96. **2.** *Квик М.Я.* Моделювання та прогнозування динаміки розвитку малих підприємств у регіонах України // Науковий вісник НЛТУ України. 2009. Вип. 19.1. 308 с. **3.** *Порохня В.М.* Сценарне моделювання частки малих підприємств у валовому внутрішньому продукті України // Науково-виробничий журнал «Держава і регіони», серія: Економіка та підприємництво. 2011. № 5. 220 с. **4.** *Вітлінський В. В.* Моделювання та управління розвитком малого підприємництва // Вчені записки [Електронний ресурс]. 2012. Вип. 14. Ч. 1. С. 261-268. **5.** *Черевик Н.В.* Оптимізація продукції малого підприємства з використанням економіко-математичного моделювання // Електронне наукове фахове видання ДДАУ України «Ефективна економіка». № 5. 2011. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.economy.nayka.com.ua. **6.** Міжнародний стандарт бухгалтерського обліку 18 (МСБО 18). Дохід IASB; Стандарт, Міжнародний документ від 01.01.2012 [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/929_025. 7.*Гетьман О.О.* Економіка підприємства: Навчальний посібник [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://pidruchniki.ws/10480304/ekonomika/ponyattya_sobivartosti_produktsiyi. **7.** *Халафян А. А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных: Бином-Пресс ISBN 978-5-9518-0215-6. 2007. 512 с. **8**. *Купалова Г.І.* Теорія економічного аналізу: Навчальний посібник [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://pidruchniki.ws/13590421/ekonomikaosnovni_termini_teoriya_ekonomichnogo_analizu.

Надійшла до редколегії 13.11.2013

Рецензент: д-р екон. наук., доц. Онищенко О. М.

Щербініна Світлана Адамівна, асистент кафедри економічної кібернетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: економіко-математичне моделювання, підвищення економічної ефективності житлового будівництва в регіоні. Адреса: Україна, 36000, Полтава, вул. Карла Лібкнехта, 12, кв. 11, тел.:(05322)20789, 0954950656.

Геращенко Ірина Владиславівна, студентка групи 402-ЕК факультету менеджменту та бізнесу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: прогнозування та прийняття рішень. Адреса: Україна, 36000, Полтава, пр. Першотравневий, 27, кв. 221, тел. 0668865910.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

УДК681.324:519.613

МЕТОДЫ РАНЖИРОВАНИЯ ТЕСТОВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПО ГЕТЕРОГЕННЫМ МЕТРИКАМ ПОКРЫТИЯ

ЗАЙЧЕНКО С.А., АЛЕКСАНДРОВ В.И., БЕЛОУС В.В., БЕРЕЗИН Н.П.

Рассматривается проблема неэффективности процесса автоматизированного регрессионного тестирования моделей цифровых устройств на этапе функциональной верификации. Предлагается подход к уменьшению стоимости вычислительных затрат на выполнение наборов регрессионных тестов, опирающийся на устранение избыточности тестовой нагрузки, выявляемой сравнением времени работы индивидуальных тестов и степенью их влияния на совокупность автоматических и функциональных метрик покрытия.

1. Введение

Задача функциональной верификации состоит в демонстрации, что разрабатываемое устройство функционирует в соответствии с требованиями спецификации и намерениями разработчика. Современные проекты настолько велики, что добиться полного анализа всех возможных ситуаций, используя традиционные системы логического моделирования на базе языков VHDL и Verilog, очень трудно. В последнее время активно развиваются новые технологии, позволяющие повысить эффективность проверки корректности логического функционирования СБИС. В список наиболее значимых входят технологии автоматизации генерации тестов (testbench automation, TBA), технологии верификации на основе анализа ассерций (Assertion-based verification, ABV), технологии верификации на основе анализа тестового покрытия (coverage-driven verification, CDV), а также моделирование на уровне транзакций (transaction-level modeling, TLM). Любая отдельно взятая технология не в состоянии на 100% обеспечить валидацию проекта. Решить эту задачу можно только в рамках комплексной методологии верификации.

При использовании псевдослучайной генерации стимулов необходимо организовать сбор и анализ информации о том, какие сценарии уже были проверены. Корректирующую обратную связь для генераторов стимулов может предоставить система анализа функционального покрытия. Функциональное покрытие – некоторая общая оценка, характеризующая завершенность процесса верификации относительно заданного плана тестирования. Основной смысл технологии верификации на основе анализа функционального покрытия заключается в использовании различных метрик для прогнозирования и управления процессом оптимизации формирования и применения тестовых сценариев. Современная технология CDV применяет методы псевдослучайной генерации тестов в рамках заданной системы ограничений. После сбора и анализа информации о функциональном покрытии система ограничений может быть скорректирована (автоматически или вручную) таким образом, чтобы обеспечить проверку всех определенных верификационным планом ситуаций.

Регулярное регрессионное тестирование проектов современных цифровых систем промышленного уровня требует сверхбольших вычислительных ресурсов. Автоматизированное тестирование использует программные средства для выполнения тестов и проверки результатов выполнения, что помогает сократить время тестирования и упростить его процесс. Одной из главных проблем автоматизированного тестирования является его трудоемкость: несмотря на то, что оно позволяет устранить часть рутинных операций и ускорить выполнение тестов, большие ресурсы могут тратиться на обновление самих тестов. В ранее проводившихся исследованиях основное внимание уделялось либо достижению более высоких параметров производительности конкретных вычислительных процедур в цикле верификации, либо повышению уровня абстракции модели, либо созданию обратных связей между методами верификации.

Эффективность функциональной верификации может быть достигнута путем ликвидации непроизводительных затрат на создание, поддержку и регулярные запуски избыточных тестов. В качестве критерия оценки избыточности тестовых наборов предполагается использование различных метрик покрытия. Однако в существующих подходах недостаточно проработаны методологические вопросы комбинирования различных метрик покрытия при оценке эффективности тестовых наборов. Несмотря на интенсивное развитие GRID-систем, в том числе в виде облачных кластеров, минимизация нерациональной утилизации вычислительных ресурсов в процессе верификации является чрезвычайно актуальной задачей.

Основной *целью* данного исследования является разработка методологии уменьшения избыточности тестовых наборов на основе систематического анализа эффективности каждого теста для формирования общего уровня покрытия относительно других тестов. Для достижения цели требуется решить ряд *задач*:

1. Формально определить критерии удовлетворения тестирования с учетом всех интересующих автоматических и функциональных метрик покрытия.

2. Создать математическую модель процесса тестирования, как совокупности набора тестов, результатов их запуска и влияния на пространство покрытия.

3. Разработать процедуры слияния результатов тестирования с учетом временных, пространственных составляющих, а также различных видов метрик покрытия.

4. Сформулировать методы ранжирования тестов по соотношению между степенью их влияния на покрытие, достижение уникального покрытия, а также стоимостью вычислительных затрат на их запуск.

2. Кумулятивное гетерогенное покрытие

Элементарной единицей анализа покрытия является точка покрытия P (coverage point) – некоторое состояние, переход, событие внутри верифицируемой системы, оказывающее, по мнению проектировщика, существенное влияние на ее функционирование. Для подтверждения полноты процесса функциональной верификации необходимо при помощи измерений во время моделирования зафиксировать количество активизаций каждой из выбранных точек покрытия и сравнить их с заданными пороговыми значениями:

$$P = \{c, g, w\},\ C(P) = \begin{cases} 1, c \geq g \\ 0, c < g \end{cases}, \qquad (1)$$

где c – счетчик (counter) активизаций точки покрытия; g – заданное пороговое значение счетчика (goal); $C(P)$ – предикат, определяющий достаточную степень активизации точки покрытия P, а w – относительный безразмерный весовой коэффициент точки покрытия в общем покрытии.

Совокупность всех заданных некоторой метрикой точек покрытия формирует пространство покрытия (coverage space):

$$S = (P_1, \ldots, P_N). \qquad (2)$$

Анализ покрытия состоит в измерении доли $C(S)$ точек среди всех заданных точек, для которых во время моделирования зафиксировано достаточное количество активизаций:

$$C(S) = \frac{\sum_{i=1}^{N} C(P_i) \times w_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \times 100\%, \qquad (3)$$

где числитель представляет собой взвешенное количество всех точек покрытия, признанных активизированными, а знаменатель – общее число точек покрытия.

Достижение желаемой доли $C(S)$ наблюдаемых точек называют целью покрытия (coverage goal). Значение цели покрытия редко устанавливается на уровень 100%, поскольку достижение абсолютного покрытия выходит за рамки экономически приемлемых затрат.

Способ представления данных покрытия в виде точек и пространств, механизмы извлечения данных покрытия из входного HDL-описания, принцип измерения, лежащий в основе процедуры инкрементирования счетчиков, полностью зависят от конкретных метрик и их реализации в рамках конкретной системы моделирования. Рассматриваемая в данной работе модель полностью абстрагируется от деталей реализации сбора статистики покрытия, особенностей преобразования одних видов покрытия в другие, от семантики конкретных метрик покрытия.

В целях удобства анализа пространство покрытия S может быть декомпозировано на некоторое множество субпространств $(S'_1, \ldots S'_M)$ (coverage scope). В таком случае их покрытие анализируется отдельно, а общий результат является средним арифметическим с учетом весов:

$$C(S) = \frac{\sum_{k=1}^{M} (C(S'_k) \times \sum_{i=1}^{N_k} w_{ki} \times W_k)}{\sum_{k=1}^{M} (\sum_{i=1}^{N_k} w_{ki} \times W_k)} \times 100\%, \qquad (4)$$

где $C(S'_k)$ – покрытие субпространства k; N_k – число точек покрытия в субпространстве k; w_{ki} – весовой коэффициент точки покрытия i в k; W_k – вес субпространства относительно других субпространств.

Формула (4) может быть применена к любому уровню иерархии проекта рекурсивным образом, соответственно, глубина декомпозиции не ограничивается. Типично информация о покрытии декомпозируется в соответствии с естественной иерархией компонентов проекта. В первую очередь вычисляется покрытие субпространств самых нижних уровней иерархии, а затем происходит композиция результатов на вышестоящих уровнях иерархии. Вышестоящий уровень использует при вычислении и итоговый уровень покрытия конкретного субпространства $C(S'_k)$, и подсчитанные множители, представляющие суммы весов.

Покрытие (4), вычисленное для высшего уровня иерархии для некоторой отдельно взятой метрики X, обозначим как $C(S^{REC})$ и будем называть рекурсивным общим покрытием типа X.

Поскольку отдельные блоки в иерархии могут быть использованы более 1 раза, сохраняя при этом идентичную реализацию, возникает потребность в вычислении единого агрегированного пространства покрытия блока $C(\overline{S})$ за счет суммирования счетчиков из экземпляров:

$$C(\overline{S}) = \frac{\sum_{i=1}^{N} C(\overline{P}_i) \times w_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \times 100\%, \qquad (5)$$

$$C(\overline{P}) = \begin{cases} 1, (\sum_{j=1}^{N_{inst}} c) \geq t, \\ 0, (\sum_{j=1}^{N_{inst}} c) < t, \end{cases} \quad (6)$$

где $C(\overline{P})$ – предикат, задающий достаточность активизации агрегированной точки покрытия по сумме счетчиков точек из отдельных экземпляров блока, а N_{inst} – число экземпляров блока.

Формула (4) может быть также применена и к агрегированному покрытию, однако в отличие от рекурсивного покрытия глубина декомпозиции общего пространства покрытия на субпространства всегда равна 1. Некоторые языки описания аппаратуры, например SystemVerilog, допускают наличие вложенных модулей. С точки зрения анализа агрегированного покрытия такие модули имеет смысл учитывать отдельно от родительских модулей.

Фактически, покрытие (4) в применении к агрегированным данным представляет собой средневзвешенное покрытие списка всех блоков проекта. Обозначим такую величину, вычисленную для конкретной метрики X, как $C(S^{AGGR})$ и назовем общим агрегированным покрытием типа X.

Агрегированное покрытие является менее точной оценкой по сравнению с рекурсивной, поскольку в вычислении участвует меньшее количество точек покрытия. Однако процесс его измерения требует меньших вычислительных затрат. Можно утверждать, что при идентичных весах конкретных точек покрытия, относительных весах субпространств общее агрегированное покрытие не может быть меньше, чем общее рекурсивное покрытие:

$$C(S^{AGGR}) \geq C(S^{REC}). \quad (7)$$

Показатели $C(S^{AGGR})$ и $C(S^{REC})$ могут быть получены отдельно для любого вида покрытия, используемого в верификационном процессе. Если предположить, что собранные данные нескольких метрик согласованы и сбалансированы между собой системой моделирования при помощи весовых коэффициентов, представляет интерес вычисление специального показателя, объединяющего результаты всех метрик покрытия в единую оценку. Такую оценку будем называть кумулятивным гетерогенным покрытием:

$$K^{AGGR} = \frac{\sum_{i=1}^{N} C(S_i^{AGGR}) \times \Omega_i}{\sum_{i=1}^{N} \Omega_i}, \quad (8)$$

$$K^{REC} = \frac{\sum_{i=1}^{N} C(S_i^{REC}) \times \Omega_i}{\sum_{i=1}^{N} \Omega_i}, \quad (9)$$

где K^{AGGR} и K^{REC} – агрегированное и рекурсивное кумулятивное гетерогенное покрытие соответственно; $C(S_i^{AGGR})$ и $C(S_i^{REC})$ – общее агрегированное и рекурсивное покрытие некоторой метрики i, а Ω_i – вес метрики покрытия i относительно других метрик.

Разумной стратегией является установка большего веса Ω_i для высокоуровневых функциональных метрик (ассерционное покрытие, покрытие covergroup), для покрытия конечных автоматов и меньшего веса для низкоуровневых менее информативных автоматических метрик покрытия (покрытие инструкций, разветвлений, термов управляющих выражений, переключений). Если учет тех или иных метрик в кумулятивном гетерогенном покрытии, по мнению инженера, не имеет смысла, метрике должен быть поставлен в соответствие нулевой вес, а вычисление соответствующих индивидуальных показателей общего покрытия можно отключить наряду с предшествующими процессами сбора информации о покрытии и предварительного инструментирования HDL-модели.

Смысл показателей покрытия (8) и (9) состоит в комплексной высокоуровневой оценке завершенности процесса верификации. Кумулятивное покрытие учитывает влияние всех выбранных в верификационном процессе метрик покрытия одновременно, принимая во внимание их значимость при помощи весов. Этот показатель менее точен по сравнению с индивидуальными показателями метрик, и его следует использовать лишь для грубой оценки покрытия в целом. Безусловно, достижение желаемых уровней $C(S_i^{AGGR})$ или $C(S_i^{REC})$ для конкретных метрик является немаловажным. Однако если такие показатели достигнуты для одной из применяемых метрик, например, для ассерционного покрытия, но не достигнуты для других, например, покрытия инструкций, то вывод о достаточности верификации следует считать преждевременным.

3. Наборы тестов в контексте анализа покрытия

Динамические методы функциональной верификации, в основе которых стоит использование имитационного моделирования (симуляции), предполагают создание набора тестов для проверки корректности поведения проектируемой системы. Под термином “тест” в широком смысле следует понимать некоторый автоматизированный самостоятельный, самодостаточный, самопроверяющийся сценарий проверки корректности использования проектируемой системы либо ее отдельных элементов на интересующем уровне абстракции.

В общем случае для теста T характерны следующие составляющие:

$$T = \{O, G, I, R, A\}, \quad (10)$$

– определенный объект тестирования O (object) в виде конкретного блока, группы блоков, образующих более крупные компоненты проектируемой системы либо проекта в целом;

– цель тестирования G (goal), связанная с пунктом (пунктами) верификационного плана, задается в виде некоторого предиката, требующего удовлетворения;

– тестовые воздействия I (inputs), заданные либо в явном виде в форме последовательности тест-векторов, либо генерируемые программно во время моделирования детерминированным либо ограниченным псевдослучайным способом;

– ожидаемые реакции R (responces), заданные либо в явном виде при помощи заготовленной последовательности значений наблюдаемых выходов либо в виде программного кода, реализующего некоторый предикат, который определяет корректность реакции;

– верификационная избыточность в виде самопроверяющихся ассерций A (assertions), ни одна из которых не должна быть нарушена за время моделирования.

Тесты, связанные общей тематикой, объектом тестирования и близкими целями, объединяют в наборы (test suits), организованные по иерархическому принципу. Зачастую программная составляющая связанных тестов в существенной мере обобщена и повторно используется с отличием в виде настроек, параметров, связей с конкретными сигналами.

$$S = \{O, T_1, ..., T_n\} \quad O \in S \Leftrightarrow O \in T_1 \Leftrightarrow O \in T_n . \quad (11)$$

Набор тестов для современных цифровых систем может оказаться значительным по размеру, и для их регулярного запуска с сохранением быстроты отклика верификационного процесса часто применяют вычислительные кластеры. В качестве кластера может выступать как внутренняя GRID-система проектной организации, так и публичные облачные системы.

С течением времени и реализация объекта тестирования, и компоненты самого теста могут изменяться. Если в связи с исправлением ошибок, уточнением требований изменяется тест T, то требуется его перезапуск на неизменившейся версии объекта O. Если же изменяется реализация объекта тестирования O, то должно быть повторно выполнено тестирование всех тестовых наборов S, объектом тестирования которых является O либо другой объект, в состав которого входит объект O.

Очевидно, с точки зрения уменьшения вычислительных затрат, необходимо выявить минимальный набор тестов, который необходимо запустить при изменении объекта тестирования. Для упрощения поиска минимального тестового набора должна быть построена функция трассировки $TRACE(P \in O, T) \in \{0,1\}$, основанная на применении запросов к некоторому постоянному хранилищу, содержащему проектные статистические данные. Отказ от использования функции трассировки означает необходимость запуска всех имеющихся тестов при изменении любого объекта тестирования. Такая стратегия подтвердит отсутствие регрессий, однако является крайне нерациональной с точки зрения вычислительных затрат.

Запуском L текущей версии теста T на текущей версии объекта тестирования O называется зафиксированный факт выполнения теста с результирующим статусом, набором внутренних атрибутов моделирования, характеризующих ход выполнения сценария:

$$L_i(t) = T_i(t) \times (O(t) \in T_i), \quad L_i(t) = \{s \in (0,1,X), \rho\}, \quad (12)$$

где t – момент времени запуска тестирования; $T_i(t)$ – версия теста с порядковым номером i, а $O(t)$ – версия объекта тестирования, актуальные на момент времени запуска; s – результирующий статус (fail/pass/unknown) запуска; ρ – множество любых атрибутов в виде пар ключ-значение, присвоенных запуску системой моделирования.

Большинство атрибутов транспортирует информацию технического характера, включая версию симулятора, путь к тесту в системе контроля версий, адрес компьютера, выполнявшего тест в вычислительном кластере, данные пользователя, инициировавшего моделирование, длительность тестирования, потребление памяти.

В зависимости от настроек верификационного процесса, в результате запуска индивидуального теста на конкретной версии объекта тестирования может формироваться база данных покрытия $D_i(t)$, содержащая следующую информацию:

– данные о единственном проанализированном тесте T_i;

– данные, касающиеся непосредственно запуска $L_i(t)$;

– структура пространств и субпространств покрытия, соответствующая внутренней иерархии объекта тестирования $O(t)$, включая список блоков, иерархию экземпляров блоков, точки покрытия, входящие в конкретные пространства;

– данные о местоположении извлеченных элементов проекта в исходных файлах HDL-описания – для последующего аннотирования и обратной трассировки;

– данные о зафиксированных значениях счетчиков каждой точки покрытия.

На основе сохраненных в базе покрытия данных в любой момент времени для любого блока без повторного запуска моделирования могут быть подсчитаны показатели покрытия (4) и (5), а также общие кумулятивные показатели (8) и (9).

Разделение вычисления показателей покрытия от процесса измерения позволяет без дорогостоящего повторного моделирования модифицировать такие данные базы, как весы конкретных элементов. Наличие

базы также упрощает вычисление кумулятивных гетерогенных показателей с примененными фильтрами по типу покрытия.

На начальном этапе анализа для каждого запущенного теста формируется индивидуальная база покрытия. В дальнейшем возникает необходимость оценки совокупного покрытия, формируемого всеми имеющимися тестами в наборе. Совокупный анализ предполагает наличие процедур слияния данных покрытия в общие "склеенные" базы. По таким базам данных могут формироваться общие проектные отчеты о покрытии, на основе которых принимаются решения о завершенности верификационного процесса, о необходимости создания дополнительных тестов, об избыточности элементов реализации системы и т.п.

При слиянии баз данных представляется возможным отслеживание влияния на конкретные точки и пространства покрытия индивидуальных тестов. Наличие возможности трассировки между элементами реализации и спецификации и подтверждающими их корректность тестами открывает путь к уменьшению вычислительных затрат за счет исключения избыточных тестов, группирования тестов в наборы, запускаемые с различной частотой, получения точного списка тестов, активизирующих конкретную интересующую часть проектируемой системы.

Также актуальной задачей в цикле регрессионного анализа является выявление изменений в показателях покрытия между различными запусками одного и того же теста. Незапланированное ухудшение показателей покрытия является важным сигналом обратной связи для команды.

4. Процедуры слияния результатов тестирования в единую базу

В зависимости от цели объединения двух и более баз данных покрытия в единую базу различают 3 вида слияния данных покрытия:

темпоральное слияние (temporal merge) – суммирование/сравнение данных покрытия, вытекающих из одного и того же верификационного процесса, примененного к модификациям (версиям) модели тестируемой системы в различные моменты времени жизненного цикла;

пространственное слияние (spatial merge) – объединение результатов одного или нескольких верификационных процессов, примененных к различным подсистемам одной системы с возможностью корректировки иерархии;

гетерогенное слияние (heterogeneous merge) – объединение данных различных верификационных процессов, примененных к одной и той же версии системы.

На практике все 3 вида слияния могут быть инициированы одновременно. В таком случае для совершения процедуры слияния описанные ниже алгоритмы следует применять последовательно.

*Темпоральное слияни*е имеет существенное значение в цикле регрессионного тестирования модели, поскольку по мере эволюции проекта ранее достигнутое покрытие не должно беспричинно уменьшаться. Регулярное сравнение статистики позволяет своевременно выявлять неожиданные колебания в покрытии, вызванные изменениями в реализации и тестах.

Пусть в рамках жизненного цикла проектируемой системы имеется два момента времени t_1 и t_2, для которых совершались запуски одного и того же набора тестов $S = \{O, T_1, ..., T_n\}$ на различных версиях объекта тестирования $O(t_1)$ и $O(t_2)$. В результате моделирования получено два вектора данных о запусках тестирования $L(t_1) = (L_1(t_1), ...L_n(t_1))$ и $L(t_2) = (L_1(t_2), ...L_n(t_2))$, а также два набора баз данных покрытия $D(t_1) = (D_1(t_1), ...D_n(t_1))$ и $D(t_2) = (D_1(t_2), ...D_n(t_2))$ для каждого запущенного теста. Применив к каждой точке покрытия операцию суммирования счетчиков, получим темпоральное слияние данных покрытия:

$$L_i(t_1 + t_2) = \{s_1, s_2, \rho_1, \rho_2\},$$

$$D_i(t_1 + t_2) = D_i(t_1) \cup D_i(t_2),$$

$$\forall P \in O(t_1) \cup O(t_2), C(P) = C^{t1}(P) \vee C^{t2}(P). \quad (13)$$

Отметим, что во всех видах слияния информация о запусках тестов, участвующих в слиянии, никогда не преобразовывается, а лишь накапливается.

Если структура точек покрытия между версиями объекта тестирования отличается, то в результирующей базе будут представлены объединенные списки точек из обеих входных баз покрытия. Это может быть неожиданным для пользователя в случае удаления из проверяемой модели ряда точек покрытия по мере эволюции реализации системы.

Если весы одних и тех же пространств покрытия отличаются между базами, при темпоральном слиянии выбираются максимальные.

Применяя алгоритм (13) ко всем запускам тестового набора, в истории можно получить так называемое "лучшее покрытие" (best coverage) для выявления разницы между статистикой покрытия текущей версии проекта и максимально достигнутой агрегированной статистикой за всю историю. Наличие такой разницы свидетельствует о проигнорированных командой ухудшениях в уровне покрытия верифицируемой системы.

Больший интерес представляет темпоральное сравнение двух запусков набора тестов, составляющее основу регрессионного анализа покрытия (14). Множество всех точек покрытия, для которых вычитание статистики активизации в более позднем запуске из статистики более раннего запуска дает положительное значение счетчика, выявляет регрессию покрытия. Напротив, множество точек покрытия, для которых упомянутое вычитание дает отрицательное значение счетчика, представляет собой прогрессию покрытия:

$$D_i(t_1 - t_2) = D_i(t_1) \setminus D_i(t_2),$$

$$\forall P \in O(t_1) \cap O(t_2), C(P) = \overline{C^{t1}(P)} \vee C^{t1}(P) \wedge C^{t2}(P), \quad (14)$$

Регрессия на конкретной точке покрытия наблюдается при соблюдении условия:

$$C^{t1}(P) \wedge \overline{C^{t2}(P)} = 1. \quad (15)$$

Применение алгоритма (14) для сравнения двух соседствующих по времени запусков способно выявить регрессионные изменения покрытия в момент, близкий к моменту внесения нежелательных изменений в реализацию модели либо в тестовые наборы. В свою очередь, применение (14) для сравнения наиболее позднего запуска с базой "лучшего покрытия" отвечает на вопрос, имеются ли в текущей версии неустраненные регрессии покрытия. Список прогрессий можно получить поменяв порядок запусков-операндов при темпоральном сравнении. Такой список может быть интересным для подтверждения влияния произведенных модификаций на покрытие. Изменения в структуре точек покрытия между запусками не являются ни регрессиями, ни прогрессиями, и игнорируются при темпоральном сравнении.

Пространственное слияние необходимо для обеспечения возможности горизонтального масштабирования верификации. Современные проекты достигают гигантских размеров и способны превысить вычислительные возможности средств автоматизации и компьютерных систем даже при обработке на высоком уровне абстракции. Соответственно, оправдан подход, основанный на декомпозиции тестовых наборов по ключевым подсистемам, верификация которых происходит при помощи отдельных вычислительных ресурсов. Пространственное слияние статистики покрытия позволяет осуществить обратную композицию на уровне результатов.

Пусть имеются текущие версии двух объектов тестирования $O_1(t)$ и $O_2(t)$, которые были протестированы при помощи двух различных тестов T_1 и T_2, в результате чего получены две базы покрытия $D_{O_1}(t)$ и $D_{O_2}(t)$. Предположим, существует больший объект тестирования $O'(t)$, для которого соблюдаются условия $O_1(t) \in O'(t)$ и $O_2(t) \in O'(t)$. В результате пространственного слияния может быть получена база покрытия для объекта $O'(t)$:

$$D_{O_1+O_2}(t) = D_{O_1}(t) \cup D_{O_2}(t),$$

$$S_{O_1} \cap S_{O_2} = \varnothing. \quad (16)$$

С точки зрения рекурсивного покрытия, пространства покрытия верхнего уровня каждой из баз не имеют точек пересечения, поскольку объединяются разные непересекающиеся в пространстве иерархии. Общее рекурсивное покрытие объединенной базы вычисляется следующим образом:

$$C(S^{REC}_{O'}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} C(S_i^{REC-O_1}) \times \Omega_i^{O_1} + \sum_{k=1}^{N_2} C(S_k^{REC-O_2}) \times \Omega_k^{O_2}}{\sum_{i=1}^{N_1} \Omega_i^{O_1} + \sum_{i=1}^{N_2} \Omega_i^{O_2}}, \quad (17)$$

где N_1 и N_2 – количество субпространств на верхнем уровне иерархии первой и второй базы.

При подсчете агрегированного покрытия пространства могут пересекаться, так как каждая из иерархий может содержать внутренние блоки одинакового типа. Слияние агрегированных данных для пересекающихся блоков должно происходить аналогично темпоральному слиянию (13):

$$C(S^{AGGR}_{O'}) = \\ = \Big(\sum_{i=1}^{N_1 - N_{1\cap 2}} C(S_i^{AGGR-O_1}) \times \Omega_i^{O_1} + \\ + \sum_{k=1}^{N_2 - N_{1\cap 2}} C(S_k^{AGGR-O_2}) \times \Omega_k^{O_2} + \\ + \sum_{j=1}^{N_{1\cap 2}} C(S_j^{AGGR-(O_1+O_2)}) \times \Omega_j^{(O_1+O_2)} \Big) / \\ / \Big(\sum_{i=1}^{N_1 - N_{1\cap 2}} \Omega_i^{O_1} + \sum_{i=1}^{N_2 - N_{1\cap 2}} \Omega_i^{O_2} + \sum_{j=1}^{N_{1\cap 2}} \Omega_j^{(O_1+O_2)} \Big), \quad (18)$$

где $N_{1\cap 2}$ – число общих агрегированных блоков между двумя входными базами; $C(S_j^{AGGR-(O_1+O_2)})$ – подсчитанное по алгоритму (13) агрегированное покрытие общих блоков, а $\Omega_j^{(O_1+O_2)}$ – вектор средних арифметических между весами общих блоков в каждой из баз.

Пространственное слияние также допускает коррекцию иерархии, когда в первой базе имеется некоторая надсистема $O'(t)$ с подсистемой $O_1(t)$, а вторая база содержит информацию о другой подсистеме $O_2(t)$, но не содержит сведений о надсистеме. В таком случае алгоритм (17) для рекурсивного покрытия применяется к более низкому уровню пространств покрытия, а затем покрытие верхнего уровня пересчитывается по формуле (4). Коррекция иерархии не оказывает никакого влияния на алгоритм (18) для агрегированного покрытия.

Гетерогенное слияние предполагает объединение данных покрытия разного типа, полученных на одном и том же тесте и объекте тестирования. Если в пространственном слиянии в модель добавляются новые субпространства и точки покрытия одной и той же метри-

ки, представляющие соседствующие иерархии, то при гетерогенном слиянии одна и та же иерархия дополняется “слоями”, соответствующими другим метрикам покрытия.

Простейший подход состоит в тривиальном объединении списков субпространств покрытия разного типа в рамках единых пространств, отражающих структурную иерархию проекта. Если в подвергаемых слиянию базах покрытия не имеется пересечений по типу примененных метрик, такое слияние не влияет на показатели общего рекурсивного и агрегированного покрытия (4) и (5). Изменениям подвергаются только кумулятивные показатели (8) и (9). При наличии пересечений по типу для общих метрик применяется алгоритм (13), характерный для темпорального слияния.

Однако простейший подход не учитывает факторы пересечения семантики различных метрик, состоящие в зависимости одних метрик покрытия от других. При наличии подготовленной структурной информации представляется возможным преобразовывать данные одних метрик покрытия в другие в целях получения более точных оценок кумулятивного покрытия (8) и (9).

Пусть для некоторого теста T, примененного к объекту тестирования $O(t)$, имеются две базы покрытия $D^A(t)$ и $D^B(t)$ для метрик покрытия A и B соответственно. Пусть целью слияния является получение результирующей базы покрытия исключительно с использованием метрики A. Для достижения данной цели необходимо наличие подготовленной структурной информации о зависимостях между счетчиками точек покрытия обеих метрик в виде контекстных функций преобразования F_i:

$$\forall i, 0 < i < N^B, C(P_i^B) = F_i(C(P_1^A),...,C(P_N^A)), N < N^A, \quad (19)$$

где N^A и N^B – количество точек покрытия в объекте тестирования с точки зрения соответствующих метрик, а N – число точек покрытия в метрике A, непосредственно влияющих на значение покрытия точки P_i^B. Тогда данные по метрике B могут быть приведены к метрике A согласно алгоритму (20), основанному на подстановке (19) в общий алгоритм (4):

$$C(S^{B\to A}) = \frac{\sum_{i=1}^{N^B} C(P_i^B)\times w_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i}\times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^{N^B} F_i(C(P_1^A),...,C(P_N^A))\times w_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i}. \quad (20)$$

Конкретная функция преобразования зависит от типа приводимых друг к другу метрик. Однозначные функции преобразования могут быть построены только между ограниченным набором пар метрик. Например, покрытие разветвлений можно выразить через покрытие инструкций либо покрытие термов управляющих выражений. Покрытие переходов в конечных автоматах можно выразить через покрытие разветвлений. Однако, во-первых, такие преобразования существуют не между каждой парой метрик, во-вторых, может не существовать функции, обратной (19), поскольку происходит потеря данных.

Типичные функции (19) представляют собой суммы значений покрытия для подмножеств точек, из чего следует возможность дальнейшей минимизации формулы (20) за счет группировки слагаемых с одинаковыми множителями при подстановке в формулы вычисления кумулятивного покрытия (8) и (9).

После приведения данных от одной метрики к другой следует применить алгоритм (13), автоматически исключающий дупликации. Таким образом, общее покрытие будет обладать более высокой точностью благодаря уменьшению количества эквивалентных точек покрытия между различными метриками.

5. Процедуры ранжирования тестов

Во время осуществления процедур слияния баз покрытия представляется возможным организовать сбор информации о взаимном влиянии между тестами и точками покрытия. На основе данной ассоциативной информации для осуществления дальнейшего анализа эффективности тестового набора должна быть построена специальная табличная функция трассировки $TRACE(P,T) \in \{0,1\}$.

Пусть в проекте имеется пространство покрытия, состоящее из 4 точек $S = \{P_1,...,P_4\}$. Допустим, некоторый тест T_1 покрывает точку P_1, другой тест T_2 – точки P_1 и P_3, а третий тест T_3 – точки P_2, P_3 и P_4. Осуществим слияние баз покрытия, сгенерированных данными тестами, и определим на результирующих данных функцию трассировки:

$$\begin{array}{lll} TRACE(P_1,T_1)=1 & TRACE(P_1,T_2)=1 & TRACE(P_1,T_3)=0 \\ TRACE(P_2,T_1)=0 & TRACE(P_2,T_2)=0 & TRACE(P_2,T_3)=1 \\ TRACE(P_3,T_1)=0 & TRACE(P_3,T_2)=1 & TRACE(P_3,T_3)=1 \\ TRACE(P_4,T_1)=0 & TRACE(P_4,T_2)=0 & TRACE(P_4,T_3)=1 \end{array} \quad (21)$$

Дизъюнкция значений по строкам в функции трассировки определяет покрытие конкретной точки на всем тестовом наборе:

$$C(P_i) = \bigcup_{k=1}^{N_T} TRACE(P_i, T_K), i \in [1, N_P], \quad (22)$$

где N_t – число тестов в базе покрытия; N_p – общее число точек покрытия. Покрытие пространства (3) может быть выражено через функцию трассировки:

$$C(S)=\frac{\sum_{i=1}^{N_P}\left(\bigcup_{k=1}^{N_T}TRACE(P_i,T_K)\right)\times w_i}{\sum_{i=1}^{N_P}w_i}. \quad (23)$$

В примере (21) результирующее покрытие достигает 100%, поскольку значение (22) для каждой точки покрытия равно 1. Однако,несмотря на достижение целевого покрытия, набор тестов является избыточным.

Подсчитаем взвешенную сумму столбцов в функции трассировки для каждого теста и назовем ее рангом теста:

$$R(T_k)=\frac{\sum_{i=1}^{N_P}(TRACE(P_i,T_K)\times w_i)}{\sum_{i=1}^{N_p}w_i}, k\in[1,N_T]. \quad (24)$$

Упорядочим тесты в соответствии с рангом (24):

$$\begin{aligned} R(T_3)&=(0+1+1+1)/4=0.75,\\ R(T_2)&=(1+0+1+0)/4=0.5,\\ R(T_1)&=(1+0+0+0)/4=0.25. \end{aligned} \quad (25)$$

Далее, начиная с двух тестов с наибольшими рангами, сформируем минимальный набор, при котором будет достигнута цель покрытия. На каждом шаге необходимо оценивать, добавляет ли очередной тест что-либо к общему покрытию. Этого можно достигнуть без процедур слияния для каждой пары тестов, используя лишь функцию трассировки. Тесты, представляющие собой, с точки зрения результирующего покрытия, подмножества предыдущих тестов, должны быть исключены. Если на очередном шаге соблюдается критерий (26), очередной тест следует добавить в набор, а в противном случае – исключить:

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_P}\left(\overline{TRACE(P_i,T_{PREV})}\wedge TRACE(P_i,T_{NEXT})\right)\times w_i)}{\sum_{i=1}^{N_p}w_i}>0 \quad (26)$$

где T_{PREV} – агрегация всех уже включенных в результирующий набор тестов; $TRACE(P_i,T_{PREV})$ – дизъюнкция значений функции трассировки на всех включенных в T_{PREV} тестов, а T_{NEXT} – следующий по рангу тест. Применив (26) к текущему примеру, получим, что для обеспечения целевого покрытия достаточно использовать тесты T_3 и T_2.

Точность рангов (24) можно существенно повысить, учитывая нормированное время выполнения теста. Для каждого теста в базе покрытия имеется атрибут длительности выполнения ρ^{DUR}. Обозначим самое меньшее значение длительности из имеющихся данных как ρ_{MIN}^{DUR}. Уточним оценку (24) при помощи атрибута длительности:

$$R(T_k)^{DUR}=R(T_k)\times\frac{\rho^{DUR}}{\rho_{MIN}^{DUR}}=\frac{\sum_{i=1}^{N_P}(TRACE(P_i,T_K)\times w_i)}{\sum_{i=1}^{N_p}w_i}\times\frac{\rho_{MIN}^{DUR}}{\rho^{DUR}}, k\in[1,N_T] \quad (27)$$

Пусть длительность выполнения тестов в рассматриваемом примере имеет значения

$$\rho^{DUR}(T_1)=12,\ \rho^{DUR}(T_2)=38,\ \rho^{DUR}(T_3)=45.$$

Соответственно, находим показатель минимальной длительности $\rho_{MIN}^{DUR}=\rho^{DUR}(T_1)=12$. Пересчитав ранги тестов с учетом длительности выполнения, увидим существенные отличия в результирующем ранжировании (28). Применив алгоритм (26) к новым значениям рангов, получим минимальный набор тестов, достигающих целевого покрытия, который состоит из тестов T_1 и T_2. Общее время выполнения такого набора составит $\rho^{DUR}(T_1)+\rho^{DUR}(T_2)=50$, что существенно эффективней ранее полученного набора без учета длительности выполнения, для которого общее время составит $\rho^{DUR}(T_2)+\rho^{DUR}(T_3)=83$:

$$\begin{aligned} R(T_1)^{DUR}&=R(T_1)\times\frac{\rho^{DUR}(T_1)}{\rho_{MIN}^{DUR}}=0.25\times\frac{12}{12}=0.25,\\ R(T_3)^{DUR}&=R(T_3)\times\frac{\rho^{DUR}(T_3)}{\rho_{MIN}^{DUR}}=0.75\times\frac{12}{45}=0{,}2,\\ R(T_2)^{DUR}&=R(T_2)\times\frac{\rho^{DUR}(T_2)}{\rho_{MIN}^{DUR}}=0.5\times\frac{12}{38}\approx 0{,}15789. \end{aligned} \quad (28)$$

Поскольку длительность фактического выполнения может колебаться в зависимости от компьютерной системы и ее загрузки в конкретный момент времени, для получения еще более точных оценок следует учитывать количество тактов реальной загрузки процессора, либо использовать среднестатистическое время, измеренное на протяжении нескольких запусков.

Описанная процедура ранжирования имеет вычислительную сложность $N\times\log_2(N)$ в типичном случае относительно количества тестов. В худшем случае вычислительная сложность возрастает до порядка N^2, если между тестами не имеется пересечений по покрытию. Данный алгоритм относится к классу “жад-

ных алгоритмов”, поскольку на каждом шаге принимается локальное оптимальное решение. Однако получаемый в результате такого ранжирования набор тестов, в общем случае, не будет оптимальным глобально.

Глобальная оптимальность может быть достигнута алгоритмом итеративного ранжирования за счет больших вычислительных затрат. На первой итерации требуется подсчитать покрытие каждой пары тестов в виде матрицы:

$$\begin{matrix} C(T_1+T_2)=C(T_1)\cup C(T_2) & .. & C(T_i+T_2)=C(T_i)\cup C(T_2) & .. & C(T_N+T_2)=C(T_N)\cup C(T_2) \\ ... & .. & ... & .. & ... \\ C(T_1+T_k)=C(T_1)\cup C(T_k) & .. & C(T_i+T_k)=C(T_i)\cup C(T_k) & .. & C(T_N+T_k)=C(T_N)\cup C(T_k) \\ ... & .. & ... & .. & ... \\ C(T_1+T_N)=C(T_1)\cup C(T_N) & .. & C(T_i+T_N)=C(T_i)\cup C(T_N) & .. & C(T_{N-1}+T_N)=C(T_{N-1})\cup C(T_N) \end{matrix} \quad (29)$$

Далее следует получить матрицу изменений покрытия при слиянии:

$$\forall i,k\in[1,N], \Delta C(T_i+T_k)=C(T_i+T_k)-C(T_i)\,. \quad (30)$$

В том случае, когда для некоторого теста T_k значение всех ячеек $\Delta C(T_i+T_k)$ равно 0, либо ниже заданного пользователем минимального порога, то тест T_k следует исключить из анализа как очевидно избыточный.

Затем следует выбрать в матрице (30) ячейку с наибольшим значением, и объединить данные покрытия тестов, соответствующих конкретному столбцу и строке матрицы при помощи алгоритма (13). В дальнейшем объединение двух тестов будет обрабатываться как единый тест.

Алгоритм следует повторять циклически, удаляя очевидно избыточные тесты на каждом шаге по принципу (30), а затем объединяя группы тестов, дающие наибольший прирост совместного покрытия. По завершению нескольких итераций алгоритма будет получен набор тестов, для которого либо будет достигнут целевой уровень покрытия, либо разницы (30) относительно всех оставшихся тестов будут меньше заданного минимального порога.

Учет длительности времени выполнения тестов также способен улучшить точность итеративного ранжирования. Для этого матрицу (30) следует видоизменить с учетом относительной вычислительной стоимости пары тестов:

$$\forall i,k\in[1,N], \Delta C(T_i+T_k)^{DUR}=$$
$$=(C(T_i+T_k)-C(T_i))\times\frac{\rho^{DUR}(T_i)+\rho^{DUR}(T_k)}{\rho^{DUR}_{MIN}}. \quad (31)$$

Очевидно, после объединения тестов в группу длительность их выполнения следует суммировать для следующих итераций.

Вычислительная сложность итеративного ранжирования оценивается как $N^2\times\log_2(N)$ в типичном случае и N^3 – в худшем случае. Аналогично “жадному” алгоритму ранжирования, худшим случаем является ситуация, когда в покрытии всех тестов не имеется пересечений.

По результатам ранжирования также можно выявить минимальный с точки зрения времени выполнения набор тестов, обладающий максимальным покрытием. Суммарное покрытие данного набора может не достигать целевого покрытия, однако такой набор может быть использован как быстрый набор для частых запусков при небольших изменениях (smoke test). Полный набор тестов в таком случае можно запускать реже, поскольку вероятность появления ошибок, не выявляемых быстрым набором, существенно падает.

6. Выводы

В ходе исследования были решены ключевые поставленные *задачи*:

1. Формально определены критерии удовлетворения тестирования на основе гетерогенной модели покрытия, учитывающей все интересующие автоматические и функциональные метрики с возможностью коррекции влияния наиболее важных факторов при помощи весовых коэффициентов.

2. Создана математическая модель процесса тестирования, описывающая наборы тестов и результаты их запуска с точки зрения влияния на различные метрики покрытия в субпространствах проекта.

3. Разработы процедуры темпорального, пространственного и гетерогенного слияния результатов тестирования, являющиеся основой для алгоритмов ранжирования тестов.

4. Сформулированы два метода ранжирования тестов по соотношению между степенью их влияния на покрытие, достижение уникального покрытия, а также стоимостью вычислительных затрат на их запуск.

Главный *научный результат* исследования состоит в разработке методологии уменьшения избыточности набора регрессионных тестов для функциональной верификации цифровых устройств на основе систематического анализа эффективности каждого теста в формировании уровня кумулятивного гетерогенного покрытия относительно других тестов.

Ключевым *практическим результатом* исследования является выявление тестов, вычислительные затраты на проверку которых не оправданы полезностью получаемой в результате их запуска информацией. При этом полезность тестов оценивается с учетом их влияния одновременно на все применяемые в верификационном процессе метрики покрытия. Путь достижения более эффективного процесса функциональной верификации состоит в формировании набора тестов, требующего как можно меньших вычислительных затрат, при этом обеспечивающего приемлемый для выхода на рынок уровень качества выпускаемого изделия.

Литература: 1. *Rashinkar P.* System-On-A-Chip Verification. Norwell: Kluwer Academic, 2002. 372 p. **2.** *Piziali A.* Functional Verification Coverage Measurement And Analysis. Norwell: Springer, 2004. 213 p. **3.** *Wilcox P.* Professional Verification: A Guide to Advanced Functional Verification. Norwell: Springer, 2004. 191 p. **4.** *Adler Y., Blue D., Conti T., Prewitt R., Ur S.* Evaluating Workloads Using Comparative Functional Coverage. Haifa Verification Conference. 2008. P. 84-98. **5.** *Kwon Y.-S., Kim Y.-I., Kyung C.-M.* Systematic Functional Coverage Metric Synthesis from Hierarchical Temporal Event Relation Graph // Design Automation Conference, 41st Conference on (DAC'04). 2004. C. 45-48. **6.** *Molnar C.* Regression Testing: What to test and When // Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. 2001. Volume: 16 ,Issue: 6. P. 25-30. **7.** *Bailey B.* The Multiple Dimensions of Scalability that Comprise a System Verification Strategy. Mentor Graphics Scalable Verification White Paper. 2004. P. 47-50.

Поступила в редколлегию 14.12.2013

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

Зайченко Сергей Александрович, канд. техн. наук, директор ООО "Алдек-КТС" (Харьков), доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: автоматизированное проектирование и верификация цифровых систем. Увлечения: технологии онлайн-образования. Адрес: Украина, 61045, Харьков, ул. Космическая, 23а, тел. (057)-760-47-25.

Александров Владислав Игоревич, инженер-программист ООО "Алдек-КТС" (Харьков). Научные интересы: автоматизированное проектирование и верификация цифровых систем. Увлечения: футбол. Адрес: Украина, 61045, Харьков, ул. Космическая, 23а, тел. (057)-760-47-25.

Белоус Василий Виталиевич, студент 5 курса ХНУРЭ, факультет компьютерной инженерии и управления, кафедра АПВТ, специальность СКС. Научные интересы: автоматизированное проектирование и верификация цифровых систем. Увлечения: международный туризм. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина 14, тел. (057)-702-13-26.

Березин Никита Петрович, студент 5 курса ХНУРЭ, факультет компьютерной инженерии и управления, кафедра АПВТ, специальность СКС. Научные интересы: автоматизированное проектирование и верификация цифровых систем. Увлечения: методики самоорганизации. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина 14, тел. (057)-702-13-26.

УДК658.512.011:681.326:519.713

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ HDL-МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛАХ

BAGHDADI AMMAR AWNI ABBAS, ХАХАНОВ В.И., ЛИТВИНОВА Е.И., ЗАЙЧЕНКО С.А.

Предлагается технология диагностирования HDL-моделей систем на кристаллах, которая базируется на использовании транзакционного графа. Описывается метод диагностирования, направленный на уменьшение времени обнаружения неисправностей и памяти для хранения диагностической матрицы за счет формирования тернарных отношений между тестом, монитором и функциональным компонентом. Разрабатывается модель цифровой системы в виде транзакционного графа и мультидерева таблиц неисправностей, а также тернарные матрицы активации функциональных компонентов выбранного набора мониторов с помощью тестовых последовательностей. Предлагается метод анализа матрицы активации в целях обнаружения неисправных блоков с заданной глубиной и синтеза логических функций для последующего встроенного аппаратного диагностирования неисправностей.

1. TAB-модель диагностирования неисправных компонентов SoC

Цель исследования – разработка матричной модели TAB (Tests – Assertions – Blocks) и метода диагностирования, позволяющих уменьшить время тестирования и объем памяти для хранения диагностической информации за счет формирования тернарных отношений (тест – монитор – функциональный компонент) в одной таблице.

Задачи исследования: 1) разработка HDL-модели цифровой системы в форме транзакционного графа для диагностирования функциональных блоков с использованием набора ассерций [1-6,15]; 2) разработка метода анализа TAB-матрицы в целях обнаружения минимального набора неисправных блоков [4-7,13]; 3) синтез логических функций для встроенной процедуры диагностирования неисправностей [8-11,14].

Модель тестирования HDL-кода цифровой системы представлена следующими xor-отношениями параметров <тест – функциональность – неисправные блоки B*>:

$$T \oplus B \oplus B^* = 0;$$
$$B^* = T \oplus B = \{T \times A\} \oplus B,$$

которые преобразуются в отношения компонентов TAB-матрицы:

$$M = \{\{T \times A\} \times \{B\}\},$$
$$M_{ij} = (T \times A)_i \oplus B_j.$$

Здесь координаты матрицы равны 1, если пара тест-монитор $(T \times A)_i$ проверяет или активирует неисправности функционального блока $B_j \in B$.

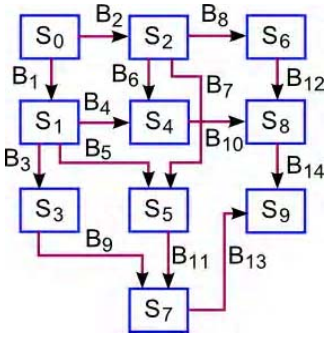
Аналитическая модель верификации с использованием темпоральных ассерций (дополнительная наблюдаемость операторов или линий) ориентирована на достижение заданной глубины диагностирования:

$$\Omega = f(G, A, B, S, T),$$
$$G = (A * B) \times S; S = f(T, B);$$
$$A = \{A_1, A_2, ..., A_i, ..., A_h\};$$
$$B = \{B_1, B_2, ..., B_i, ..., B_n\};$$
$$S = \{S_1, S_2, ..., S_i, ..., S_m\};$$
$$T = \{T_1, T_2, ..., T_i, ..., T_k\}.$$

Здесь $G = (A * B) \times S$ – функциональность, представленная CFT графом (Code-Flow Transaction) (рис. 1); $S = \{S_1, S_2, ..., S_i, ...S_m\}$ - вершины или операторы кода программы при симуляции тестовых сегментов (наборов). Другими словами, граф может рассматриваться как ABC-граф (Assertion Based Coverage Graph). Каждое состояние $S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, ..., S_{ij}, ...S_{ip}\}$ определяется значениями существенных переменных проекта (булевы, регистровые переменные, память). Дуги ориентированного графа представлены множеством программных блоков:

$$B = \{B_1, B_2, ..., B_i, ..., B_n\}; \bigcup_{i=1}^{n} B_i = B; B_i \underset{i \neq j}{\cap} B_j = \varnothing,$$

где ассерции $A_i \in A = \{A_1, A_2, ..., A_i, ..., A_n\}$ могут быть добавлены в каждый блок B_i – последовательность операторов кода, которые определяют состояние вершины графа $S_i = f(T, B_i)$ в зависимости от тестового набора $T = \{T_1, T_2, ..., T_i, ...T_k\}$. Ассерционный монитор, объединяющий ассерции входных дуг $A(S_i) = A_{i1} \vee A_{i2} \vee ... \vee A_{ij} \vee ... \vee A_{iq}$, может быть установлен в каждой вершине.



$$B = (B_1B_3B_9 \vee (B_2B_7 \vee B_1B_5)B_{11})B_{13} \vee$$
$$\vee ((B_1B_4 \vee B_2B_6)B_{10} \vee B_2B_8B_{12})B_{14} =$$
$$= B_1B_3B_9B_{13} \vee B_2B_7B_{11}B_{13} \vee B_1B_5B_{11}B_{13} \vee$$
$$\vee B_1B_4B_{10}B_{14} \vee B_2B_6B_{10}B_{14} \vee B_2B_8B_{12}B_{14}.$$

Рис. 1. Пример ABC-графа HDL-кода

Модель HDL-кода, представленная в виде ABC-графа, описывает не только структуру программного кода, но также тестовые сегменты функционального покрытия, формируемые с использованием программных блоков, входящих в рассматриваемую вершину. Последняя определяет пространство состояний переменных, достигнутое на тесте, и формирует функциональное покрытие состояний переменных, соответствующих рассматриваемой вершине графа $Q = \mathrm{card}S_i^r / \mathrm{card}S_i^p$. В совокупности все вершины графа должны представлять собой полное пространство покрытия состояний переменных программного кода, которое определяет качество теста, равное 100%: $Q = \mathrm{card} \bigcup_{i=1}^{m} S_i^r / \mathrm{card} \bigcup_{i=1}^{m} S_i^p = 1$. Более того, множество ассерций $< A, S >$, существующее в графе, позволяет выполнять мониторинг дуг (покрытие кода) $B = \{B_1, B_2, ..., B_i, ...B_n\}$ и вершин (функциональное покрытие) $S = \{S_1, S_2, ..., S_i, ...S_m\}$. Ассерции на дугах $B_i \in B$ графа предназначены для диагностирования функциональных неисправностей в программных блоках. Ассерции в вершинах графа $S_i \in S$ несут информацию о качестве теста и множестве ассерций в целях их улучшения или дополнения. ABC-граф позволяет: 1) оценивать качество программного кода путем определения диагнозопригодности проекта (diagnosability); 2) минимизировать стоимость генерации тестов, диагностирования и исправления функциональных нарушений за счет использования ассерций; 3) опитимизировать синтез тестов путем покрытия всех дуг и вершин графа минимальным набором активизированных тестовых путей. Например, минимальный тест для приведенного выше ABC-графа содержит шесть сегментов, которые активизируют все имеющиеся дуги и вершины:

$$T = S_0S_1S_3S_7S_9 \vee S_0S_1S_4S_8S_9 \vee S_0S_1S_5S_7S_9 \vee$$
$$\vee S_0S_2S_4S_8S_9 \vee S_0S_2S_5S_7S_9 \vee S_0S_2S_6S_8S_9.$$

В процессе диагностирования тестовые сегменты $T = \{T_1, T_2, ..., T_r, ..., T_k\}$ активизируют транзакционный путь графовой модели, покрывающий все вершины и дуги. Как правило, тестовая модель представлена декартовым произведением $M = T \times A \times B$, которое соответственно имеет размерность $Q = k \times h \times n$. В целях уменьшения количества диагностических данных отдельный монитор или ассерционная точка для визуализации функциональной активизации блоков назначаются каждому тестовому сегменту. Это позволяет уменьшить размерность матрицы до $Q = n \times k$ и сохранить все особенности триады отношений $M =< T \times A \times B >$. Пара «тест – монитор» представляется тремя возможными формами:

$$< T_i \to A_j >, < \{T_i, T_r\} \to A_j >, < \{T_i\} \to \{A_j, A_s\} >.$$

Метод диагностирования функциональных нарушений блоков предусматривает использование предварительно построенной TAB-матрицы (таблицы) $M = [M_{ij}]$, где строка представляет отношение между тестовым сегментом и подмножеством активизируемых блоков

$$T_i \to A_j \approx (M_{i1}, M_{i2}, ..., M_{ij}, ..., M_{in}), M_{ij} = \{0,1\},$$

наблюдаемых монитором A_j. Столбец таблицы описывает отношение между функциональными блоками и тестовыми сегментами относительно монитора $M_j = B_j(T_j, A_j)$.

Для диагностирования неисправных блоков с помощью процедуры тестирования определяется реальный

вектор ассерционной проверки $A^* = (A_1^*, A_2^*, ..., A_i^*, ..., A_n^*)$ на тестовом наборе T путем формирования A_i^*, $f(T_i, B_i)$. Обнаружение неисправных функциональных блоков основывается на xor-операции между реальным вектором ассерционной проверки и столбцом TAB-матрицы $A^* \oplus [M_1(B_1) \vee M_2(B_2) \vee ... \vee M_j(B_j) \vee ... \vee M_n(B_n)]$. Неисправный блок определяется с помощью вектора B_j по минимальному количеству единичных координат:

$$B = \min_{j=\overline{1,n}} [B_j = \sum_{i=1}^{h} (B_{ij} \oplus A_i^*)].$$

В качестве дополнения к модели диагностирования следует описать некоторые важные свойства TAB-матрицы:

$$1)\ M_i = (T_i \times A_j);$$
$$2)\ \bigvee_{i=1}^{m} M_{ij} \to \forall_{j=1}^{n} M_j = 1;$$
$$3)\ M_{ij} \bigoplus_{j=1}^{n} M_{rj} \neq M_{ij};$$
$$4)\ M_{ij} \bigoplus_{i=1}^{k} M_{ir} \neq M_{ij};$$
$$5)\ \log_2 n \leq k \leftrightarrow \log_2 |B| \leq |T|$$
$$6)\ B_j = f(T, A) \to B \oplus T \oplus A = 0.$$

Свойства означают: 1) Каждая строка матрицы представляет собой подмножество декартова произведения теста и монитора. 2) Дизъюнкция всех строк матрицы дает результат в виде вектора, в котором равны 1 все координаты. 3) Все строки матрицы различны, что исключает избыточность теста. 4) Все столбцы матрицы различны, что исключает существование эквивалентных неисправных блоков. 5) Количество строк матрицы должно быть больше двоичного логарифма числа столбцов, что определяет потенциальную диагнозопригодность (диагностируемость) каждого блока. 6) Функция диагноза каждого блока зависит от полного теста и мониторов, которые должны быть минимизированы без ухудшения диагнозопригодности.

Ниже приведены 6 тестовых сегментов, активизирующих пути графа относительно ассерционной точки S9.

$$T = S_0S_1S_3S_7S_9 \vee S_0S_1S_4S_8S_9 \vee S_0S_1S_5S_7S_9 \vee$$
$$\vee S_0S_2S_4S_8S_9 \vee S_0S_2S_5S_7S_9 \vee S_0S_2S_6S_8S_9,$$

при этом достаточно просто выявить все функциональные блоки с возможными нарушениями:

$$B = B_1B_3B_9B_{13} \vee B_2B_7B_{11}B_{13} \vee B_1B_5B_{11}B_{13} \vee$$
$$\vee B_1B_4B_{10}B_{14} \vee B_2B_6B_{10}B_{14} \vee B_2B_8B_{12}B_{14}.$$

Механизм ассерций может быть представлен тремя группами компонентов, которые формируют логические выражения для мониторинга программных и аппаратных блоков HDL кода функциональности, основанные на визуальных точках $\{A_9 \subseteq S_9, A_3 \subseteq S_3, A_6 \subseteq S_6\}$:

$$A_9 = T_1(B_1B_3B_9B_{13}) \vee T_2(B_2B_7B_{11}B_{13}) \vee T_3(B_1B_5B_{11}B_{13}) \vee$$
$$\vee T_4(B_1B_4B_{10}B_{14}) \vee T_5(B_2B_6B_{10}B_{14}) \vee T_6(B_2B_8B_{12}B_{14});$$
$$A_3 = T_1(B_1B_3); A_6 = T_6(B_2B_8).$$

На следующем шаге формируются 6 строк TAB-матрицы $M_{ij}(G_1)$ в виде отношений между тестовыми сегментами и активизируемыми блоками:

$M_{ij}(G_1)$	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}
$T_1 \to S_9$	1	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.
$T_2 \to S_9$	1	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1
$T_3 \to S_9$	1	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	1	.
$T_4 \to S_9$	.	1	.	.	.	1	.	.	.	1	.	.	.	1
$T_5 \to S_9$	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	1	.
$T_6 \to S_9$	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	1
$T_1 \to S_3$	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$T_6 \to S_6$	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.

TAB-матрица путей активизации показывает существование эквивалентных нарушений блоков 3 и 9, 8 и 12 на 6 тестовых сегментах с одной ассерционной точкой в вершине графа 9. Столбцы 3 и 9, 8 и 12 эквивалентны. Для устранения неразличимости двух пар неисправных блоков необходимо создать два дополнительных монитора в узлах S3 и S6 для тестовых сегментов T1 и T6 соответственно. В результате три дополнительные ассерции в узлах $A = (S_9, S_3, S_6)$ позволят различить все неисправные блоки программного HDL-кода. Таким образом, граф позволяет не только синтезировать оптимальный тест, но и определить минимальное количество ассерционных мониторов в узлах графа, необходимое для поиска неисправных блоков с заданной глубиной диагностирования.

Процедура диагностирования с использованием предложенной матрицы определяется следующим выражением на основе векторной xor-операции между реальными восемью ассерционными значениями и столбцом B TAB-матрицы:

$$\{[A_9(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6),$$
$$A_3(T_1), A_6(T_6)] \oplus B_j = 0\} \to$$
$$\to (B_j - \text{failed}).$$

2. Диагнозопригодное проектирование

Диагнозопригодность определяется отношением N_d / N количества обнаруженных неисправных блоков N_d (если нет эквивалентных компонентов или глубина диагностирования равна 1) к общему количеству N HDL-блоков.

Для оценки затрат E на реализацию TAB-матричной модели обнаружения функциональных нарушений можно использовать эффективность пары тест-ассерции для заданной глубины диагностирования. Критерий E функционально зависит от отношения между

идеальным $]\log_2 N[\times N$ и реальным $|T|\times|A|\times N$ объемами необходимой памяти или ресурсов (где $|T|$ – длина теста, $|A|$ – количество ассерций) для соответствующей ТАВ-матрицы и представляет собой относительное значение в интервале от 0 до 1:

$$E = \frac{]\log_2 N[\times N}{|T|\times|A|\times N} = \frac{]\log_2 N[}{|T|\times|A|}.$$

Обобщенный критерий качества диагностирования зависит от затрат E и диагнозопригодности D:

$$Q = E\times D = \frac{]\log_2 N[}{|T|\times|A|}\times\frac{N_d}{N}.$$

Например, качество диагностирования ТАВ-матрицы $M_{ij}(G_1)$ перед и после добавления двух строк равно:

$$Q_1[M(6\times1\times14)] = \frac{]\log_2 14[}{|6|\times|1|}\times\frac{10}{14} = 0{,}47;$$

$$Q_2[M(8\times1\times14)] = \frac{]\log_2 14[}{|8|\times|1|}\times\frac{14}{14} = 0{,}5.$$

Это означает, что размер первой матрицы немного меньше, чем второй, но диагнозопригодность лучше для второго варианта матрицы и в целом она является более предпочтительной. По сравнению с известным решением [12], когда каждая ячейка матрицы содержит все существующие ассерции $|M_{ij}| = |A|$, второй вариант оценивается следующим низким значением:

$$Q_2[M(6\times3\times14)] = \frac{]\log_2 14[}{|6|\times|3|}\times\frac{14}{14} = 0{,}2.$$

Таким образом, ТАВ-матрица, сформированная для выбранной пары тест-ассерция, позволяет получить существенное преимущество с точки зрения сокращения объема памяти в $|A|-1$ раз при одинаковом значении диагнозопригодности.

Диагностическое качество ТАВ-матрицы определяется отношением количества битов, необходимых для идентификации (распознавания) всех блоков $]\log_2 N[$, к реальному количеству битов кода, представленному произведением длины теста на количество ассерций $|T|\times|A|$. Если первая часть E критерия качества Q равна 1 и каждый блок с функциональными нарушениями обнаруживается в области оставшихся компонентов $N_d = N$, то это означает, что тест и ассерции являются оптимальными и обусловливают наилучшее значение критерия качества модели диагностирования Q=1.

Цель анализа АВС-графа – структурная оценка размещения ассерционных мониторов, что позволяет получить максимальную глубину диагностирования неисправных блоков. Диагнозопригодность АВС-графа является функцией, зависящей от количества N_n транзитных не конечных вершин, в которых существуют только две соседних дуги, одна из которых является входящей, другая – исходящей. Такие дуги образуют пути без сходящихся и расходящихся ветвлений (N – общее число дуг в графе):

$$D = \frac{N - N_n}{N}.$$

Оценка N_n определяется количеством необнаруженных или эквивалентных функциональных блоков. Потенциальная установка дополнительных мониторов для улучшения диагностируемости неисправных блоков является недостаточной для транзитных узлов, содержащих N_n. Критерий качества диагностирования АВС-графа имеет вид:

$$Q = E\times D = \frac{]\log_2 N[}{|T|\times|A|}\times\frac{N - N_n}{N}.$$

Последнее выражение определяет некоторые практические правила для синтеза диагнозопригоднго HDL-кода: 1) Тест или testbench должны создавать минимальное количество единичных (одномерных) путей активизации, покрывающих все узлы и дуги АВС-графа. 2) Базовое количество мониторов равно числу конечных вершин графа без исходящих дуг. 3) Дополнительный монитор может быть размещен в каждой не конечной вершине, которая имеет одну входящую и одну исходящую дугу. 4) Параллельные независимые блоки кода должны иметь n мониторов и один параллельный тест, или один интегрированный монитор и n последовательных тестов. 5) Последовательно соединенные блоки имеют один тест активации для последовательного пути и n-1 монитор или n тестов и n мониторов. 6) Узлы графа, которые имеют более одной входной и выходной дуги, определяют хорошие условия для диагностируемости текущего фрагмента с помощью теста активизации одномерного пути без установки дополнительных мониторов. 7) Тестовый набор или testbench должен обеспечить 100% функциональное покрытие для вершин АВС-графа. 8) Критерий качества диагностирования как функция, зависящая от структуры графа, теста и ассерционных мониторов, всегда может быть приведена к близкому к 1 значению. Для этого есть два альтернативных способа. Первый – увеличение количества тестовых сегментов путем активизации новых путей для распознавания эквивалентных неисправных блоков без увеличения числа ассерций, если структура графа программы позволяет потенциальные связи. Второй путь – добавление ассерционных мониторов в транзитных вершинах графа. Возможен также третий – гибридный вариант, основанный на совместном применении двух упомянутых выше способов.

3. Метод многоуровневого диагностирования цифровых систем

На рис. 2 приведена многоуровневая модель мультидерева B, в которой каждой вершине соответствует

компонент цифровой вычислительной системы. Модель описывается трехмерной таблицей (матрицей) активизации функциональных модулей. Выходные дуги позволяют перейти на более низкий уровень детализации в процессе диагностирования, когда замена неисправного блока требует значительных материальных затрат:

$$B = [B_{ij}^{rs}],\ \mathrm{card}B = \sum_{r=1}^{n} \sum_{s=1}^{m_r} \sum_{i=1}^{p_{rs}} \sum_{j=1}^{k_{rs}} B_{ij}^{rs},$$

где n – количество уровней диагностирования в мультидереве; m_r – количество функциональных модулей или компонентов на уровне r; k_{rs} (p_{rs}) – количество компонентов (длина теста) в таблице B^{rs}; $B_{ij}^{rs} = \{0,1\}$ – компонент таблицы активизации, определяемый единичным значением, если неисправная функциональность обнаруживается тестовым сегментом $T_{i\text{-}A_i}$ относительно наблюдаемого монитора A_i. Каждая вершина-таблица имеет некоторое количество исходящих дуг, равное числу функциональных компонентов, представленных матрицей активизации.

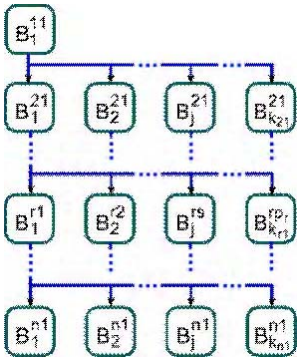


Рис. 2. Диагностическая модель мультидерева

Метод диагностирования неисправных блоков аппаратно-программной (Hardware-Software) HS-системы, основанный на модели мультидерева, позволяет создать универсальный движок в виде алгоритма (рис. 3, блок 6) для обхода ветвей дерева на априорно заданной глубине:

$$B_j^{rs} \oplus A^{rs} = \begin{cases} 0 \to \{B_j^{r+1,s}, R\}; \\ 1 \to \{B_{j+1,}^{rs}, T\}. \end{cases}$$

Здесь векторная xor-операция выполняется между столбцами матрицы и вектором ассерционной (экспериментальной) проверки A^{rs}, который определяется с помощью xor-операции над реальным (m) и модельным (g) откликами функциональности на тестовые наборы: $A_i^{rs} = m_i^{rs} \oplus g_i^{rs}, i = \overline{1, k_{rs}}$. Если все координаты векторной xor-суммы $B_j^{rs} \oplus A^{rs} = 0$ равны нулю, то выполняется одно из следующих действий: переход к матрице активизации более низкого уровня $B_j^{r+1,s}$ или восстановление функционального блока $B = B_j^{rs}$.

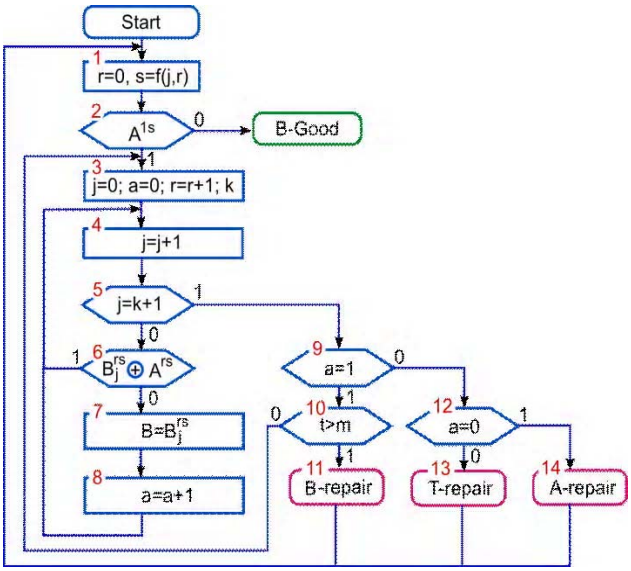


Рис. 3. Движок для обхода диагностического мультидерева

Реализуется один из двух возможных путей анализа в зависимости от того, какой параметр является наиболее важным: 1) время (t>m, блок 10) – выполняется восстановление неисправного блока; 2) материальные затраты (t<m) – осуществляется переход на более низкий уровень для увеличения глубины диагностирования неисправностей, поскольку замена более мелкого блока уменьшает стоимость восстановления. Если, по крайней мере, одна координата результирующего вектора xor-суммы равна единице $B_j^{rs} \oplus A^{rs} = 1$, осуществляется переход к следующему столбцу матрицы. Если все координаты ассерционного вектора равны нулю $A^{1s} = 0$, это свидетельствует о том, что HS-система находится в исправном состоянии. Если все векторные суммы при обработке столбца TAB-матрицы не равны нулю $B_j^{rs} \oplus A^{rs} \neq 0$, значит тест, сгенерированный для выявления неисправностей данного компонента функциональности, должен быть скорректирован. Если более, чем одна векторная сумма, полученная при обработке столбца TAB-матрицы, равна нулю $B_j^{rs} \oplus A^{rs} = 0$, это означает, что механизм ассерций, созданный для диагностирования данного компонента функциональности на представленном тесте, должен быть дополнен ассерционными мониторами. Таким образом, TAB-движок имеет четыре конечных вершины, одна из которых B-good соответствует успешному завершению тестирования. Другие три вершины свидетельствуют о получении промежуточного результата процесса тестирования, который необходимо учитывать для увеличения качества тестирования и глубины диагностирования путем формирования дополнительных ассерций и/или генерации дополнительных тестовых сегментов.

Таким образом, граф, приведенный на рис. 2, позволяет реализовать эффективную инфраструктуру сервисного обслуживания для сложных технических систем. Преимуществом ТАВ-движка, инвариантного к уровням иерархии, является простота подготовки и представления диагностической информации в виде минимизированной таблицы активизации функционального блока на тестовых сегментах.

Технологическая модель инфраструктуры встроенного тестирования, диагностирования и восстановления неисправных блоков (рис. 4) включает три компонента: 1. Тестирование блоков (Unit Under Test – UUT) с использованием эталонной модели (Model Under Test – MUT) для генерации вектора ассерционной проверки (assertion response vector) m_a, размер которого соответствует количеству тестовых наборов. 2. Поиск неисправных блоков на основе анализа ТАВ-матрицы. 3. Восстановление неисправных блоков путем замены их на исправные компоненты из имеющегося резерва.

Процесс-модель встроенного сервисного обслуживания функционирует в реальном времени и позволяет поддерживать работоспособное состояние HS-системы без непосредственного участия человека. Предложенный алгоритм или ТАВ-движок для анализа ТАВ-матрицы, а также введенный критерий качества диагностирования позволяют решать задачи квази-оптимального покрытия программных и аппаратных блоков тестами и ассерциями. Модель, представленная на рис. 4, позволяет обеспечить эффективное сервисное обслуживание сложных HS-систем.

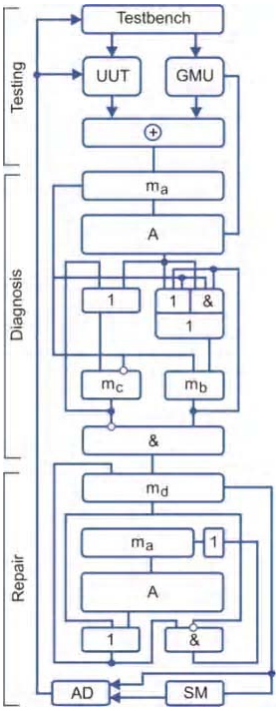


Рис. 4. Модель встроенного тестирования HS-компонентов

Выигрыш во времени получается за счет введения в проект дополнительной инфраструктуры (рис. 5), которая позволяет выполнять выборочное тестирование и диагностирование, а также перепрограммирование отдельных модулей неисправных блоков.

На рис. 5 представлены следующие блоки: Testbench – тесты для функциональных блоков; FC – функциональное тестовое покрытие; F – функциональные блоки; DI – диагностическая информация в виде таблиц неисправностей блоков; DT – методы и средства диагностирования; DA – результаты анализа диагностической информации; FB – неисправные функциональные модули; Repairing – восстановление функциональных модулей. Ячейка граничного сканирования, представленная на рис. 6, обеспечивает сервисное обслуживание одного функционального модуля.

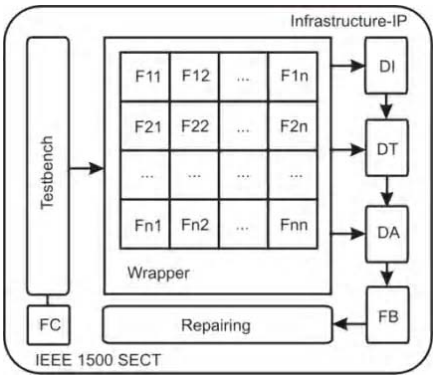


Рис. 5. Инфраструктура для тестирования вычислительных систем

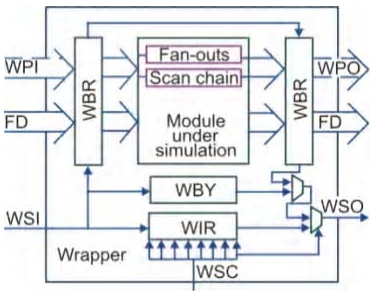


Рис. 6. Ячейка граничного сканирования

4. Пример решения задачи диагностирования

Для иллюстрации эффективности предложенной модели и метода ниже используется функциональность в виде трех модулей цифрового фильтра Добеши [11].

В качестве второго контрольного примера практического использования предложенной модели активизации и xor-метода анализа ТАВ-матрицы для поиска неисправных блоков далее представлен синтез диагностической матрицы для графа основного фильтра (рис. 7).

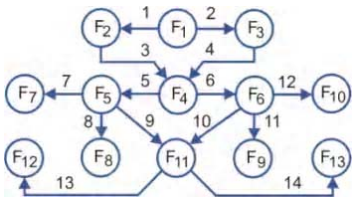


Рис. 7. Транзакционный граф main-TL

Граф связан с диагностической ТАВ-матрицей, в которой имеется 6 активизационных тестовых сегментов и 8 ассерций:

M_{ij}(TL)	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}
T_1 H F_7	1	.	1	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.
T_2 H F_8	.	1	.	1	1	.	.	1	.	.	.	.	.	.
T_3 H F_9	1	.	1	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.
T_4 H F_{10}	.	1	.	1	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.
T_5 H F_{12}	1	.	1	.	1	.	.	.	1	.	.	.	1	.
T_6 H F_{13}	.	1	.	1	.	1	.	.	.	1	.	.	.	1
T_1 H F_2	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
T_2 H F_3	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Система диагностических функций для аппаратной имплементации части инфраструктуры сервисного обслуживания, соответствующая строкам или мониторам:

$$F_7(T_1) = B_1^1 B_3^1 B_5^1 B_7^1;$$
$$F_8(T_2) = B_2^1 B_4^1 B_5^1 B_8^1;$$
$$F_9(T_3) = B_{11}^1 B_6^1 B_1^1 B_3^1;$$
$$F_{10}(T_4) = B_4^1 B_5^1 B_6^1 B_{12}^1;$$
$$F_{12}(T_5) = B_1^1 B_3^1 B_5^1 B_9^1 B_{13}^1;$$
$$F_{13}(T_6) = B_2^1 B_4^1 B_6^1 B_{10}^1 B_{14}^1;$$
$$F_2(T_1) = B_1^1; F_3(T_2) = B_2^1.$$

Синтез диагностической матрицы для одного модуля дискретного косинусного преобразования из библиотеки Xilinx в виде функционального покрытия показан в листинге 1.

Листинг 1. Фрагмент функционального покрытия

```
c0: coverpoint xin
{
bins minus_big={[128:235]};
bins minus_sm={[236:255]};
bins plus_big={[21:127]};
bins plus_sm={[1:20]};
bins zero={0};
}
c1: coverpoint dct_2d
{
bins minus_big={[128:235]};
bins minus_sm={[236:255]};
bins plus_big={[21:127]};
bins plus_sm={[1:20]};
bins zero={0};
bins zero2=(0=>0);
}
endgroup
```

Разработаны также остальные 12 модулей транзакционного графа, активизационные ТАВ-матрицы и логические функции для тестирования и обнаружения неисправностей в модуле дискретного косинусного преобразования. Фрагмент механизма мониторов приведен на листинге 2.

Листинг 2. Фрагмент кода механизма мониторов

```
sequence first( reg[7:0] a, reg[7:0]b);
 reg[7:0] d;
 (!RST,d=a)
##7 (b==d);
 endsequence
property f(a,b);
 @(posedge CLK)
 // disable iff(RST||$isunknown(a)) first(a,b);
!RST |=> first(a,b);
endproperty
odin:assert property (f(xin,xa7_in))
 // $display("Very good");
else $error("The end, xin =%b,xa7_in=%b", $past(xin, 7),xa7_in);
```

Тестирование дискретного косинусного преобразования в среде Riviera фирмы Aldec позволило обнаружить некорректности в семи строках HDL-модели:

```
//add_sub1a <= xa7_reg + xa0_reg;//
```

Последующая корректировка кода позволила получить следующий фрагмент (листинг 3).

Листинг 3. Скорректирванный фрагмент кода

```
add_sub1a <= ({xa7_reg[8],xa7_reg} + {xa0_reg[8],xa0_reg});
add_sub2a <= ({xa6_reg[8],xa6_reg} +{xa1_reg[8],xa1_reg});
add_sub3a <= ({xa5_reg[8],xa5_reg} +{xa2_reg[8],xa2_reg});
add_sub4a <= ({xa4_reg[8],xa4_reg} + {xa3_reg[8],xa3_reg});
end
else if (toggleA == 1'b0)
begin
add_sub1a <= ({xa7_reg[8],xa7_reg} - {xa0_reg[8],xa0_reg});
add_sub2a <= ({xa6_reg[8],xa6_reg} - {xa1_reg[8],xa1_reg});
add_sub3a <= ({xa5_reg[8],xa5_reg} - {xa2_reg[8],xa2_reg});
add_sub4a <= ({xa4_reg[8],xa4_reg} - {xa3_reg[8],xa3_reg});
```

Практическая имплементация моделей и методов верификации интегрирована в среду моделирования Riviera фирмы Aldec Inc (рис. 8). Новые ассерции и модули диагностирования, добавленные в систему, улучшают существующий процесс верификации, что позволяет на 15% сократить время разработки цифрового продукта.

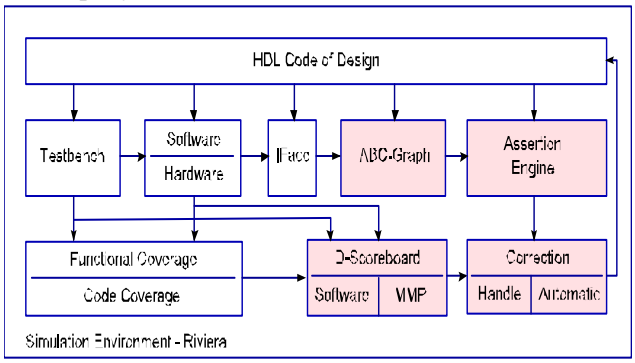


Рис. 8. Имплементация результатов в систему Riviera

Применение ассерций дает возможность уменьшить длину testbench и значительно сократить (x3) время проектирования (рис. 9), которое является наиболее затратным. Механизм ассерций позволяет увеличить глубину диагностирования функциональных нарушений в программных блоках до уровня 10-20 операторов HDL-кода.

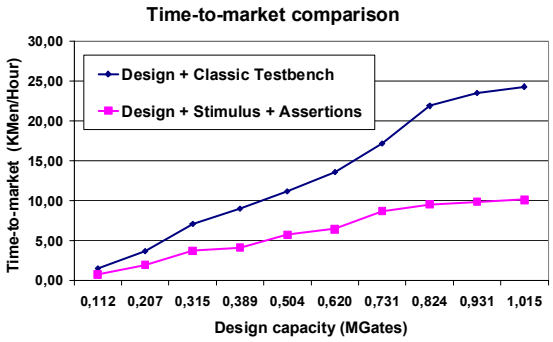


Рис. 9. Сравнительный анализ методов верификации

Благодаря взаимодействию средств моделирования и механизма ассерций, автоматически размещенных внутри HDL-кода, появляется доступ средств диагностирования к значениям всех внутренних сигналов. Это позволяет быстро определить местоположение и тип функционального нарушения, а также сократить время обнаружения ошибок при использовании методологии проектирования сверху вниз. Применение ассерций для 50 реальных проектов (от 5000 до 5 миллионов вентилей) позволило получить сотни специализированных решений, включенных в библиотеку верификационных шаблонов VTL, которые являются обобщением наиболее популярных на рынке EDA (Electronic Design Automation) ограничений темпоральной верификации для широкого класса цифровых продуктов. Программная реализация предложенной системы анализа ассерций и диагностирования HDL-кода является частью многофункциональной интегрированной среды Aldec Riviera для моделирования и верификации HDL-моделей.

Высокая производительность и технологичность сочетания системы анализа ассерций и HDL-симулятора компании Aldec в значительной степени достигается за счет интеграции с внутренними компонентами симулятора, в том числе компиляторами HDL-языков. Обработка результатов системы анализа ассерций обеспечивается набором визуальных средств системы Riviera, позволяющих облегчить диагностирование и устранение функциональных нарушений. Модель анализа ассерций может быть имплементирована также в аппаратные средства с определенными ограничениями на подмножество поддерживаемых языковых структур. Продукты Riviera, включая компоненты темпоральной верификации ассерций, которые позволяют улучшить качество проекта на 3-5%, в настоящее время занимают лидирующие позиции на мировом IT-рынке с количеством системных инсталляций 5000 в год в 200 компаниях и университетах более чем 20 стран мира.

5. Выводы

1. Представлены инфраструктура и технологии анализа цифровых систем. Предложенные модель транзакционного графа и метод диагностирования цифровых систем на кристаллах ориентированы на значительное уменьшение времени обнаружения неисправных блоков и памяти для хранения компактной диагностической матрицы, описывающей тернарные отношения в формате: монитор-ориентированные тест-сегменты, и предназначены для обнаружения неисправностей функциональных компонентов программно-аппаратных систем.

2. Введен новый критерий качества диагностирования, представляющий собой функцию, которая зависит от структуры графа, тестов и ассерционных мониторов. Для улучшения качества диагностирования существуют два альтернативных пути: увеличение набора тестовых сегментов для распознавания эквивалентных неисправных блоков или добавление ассерционных мониторов на транзитных вершинах активизационного графа HDL-кода. Предложенный критерий позволяет принять правильное решение.

3. Усовершенстован TAB-движок или алгоритм обнаружения функциональных нарушений в программном или аппаратном обеспечении. Он отличается от аналогов использованием xor-операции, что позволяет повысить производительность диагностирования одиночных и кратных неисправных блоков за счет параллельного анализа TAB-матрицы, применения граничного сканирования на основе стандарта IEEE 1500, а также векторных операций and, or, xor.

4. Разработаны модель диагностирования функциональности системы на кристалле в виде мультидерева и метод обхода дерева, имплементированный в движок для обнаружения неисправных блоков с заданной глубиной. Модель и метод позволяют существенно увеличить производительность программного и аппаратного обеспечения инфраструктуры IP.

5. Тестовая верификация метода диагностирования выполнена на трех реальных примерах, представленных компонентами SoC фильтра косинусного преобразования, который показал состоятельность результатов по уменьшению времени обнаружения неисправностей и памяти для хранения диагностической информации, а также увеличения глубины диагностирования цифрового модуля.

Литература: 1. *Основы* технической диагностики / Под. ред. П.П.Пархоменко. М.: Энергия, 1976. 460с. **2.** *Пархоменко П.П., Согомонян Е.С.* Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / Под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия. 1981. 320 с. **3.** *Инфраструктура* мозгоподобных вычислительных процессов / М.Ф. Бондаренко, О.А. Гузь, В.И. Хаханов, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко. Харьков: Новое Слово. 2010. 160 с. **4.** *Проектирование* и верификация цифровых систем на кристаллах / В.И. Хаханов, И.В. Хаханова, Е.И. Литвинова, О.А. Гузь. Харьков: Новое слово. 2010. 528с. **5.** *Семенец В.В., Хаханова И.В., Хаханов В.И.* Проектирование цифровых систем с использованием языка VHDL. Харьков: ХНУРЭ. 2003. 492 с. **6.** *Хаханов В.И., Хаханова И.В.* VHDL+Verilog = синтез за минуты. Харьков: ХНУРЭ. 2006. 264с. **7.** *IEEE* Standard for Reduced-Pin and Enhanced-Functionality Test Access Port and Boundary-Scan Architecture IEEE Std 1149.7-2009. **8.** *Da Silva F., McLaurin T., Waayers T.* The Core Test Wrapper Handbook. Rationale and Application of IEEE Std. 1500™. Springer. 2006. XXIX. 276 p. **9.** *Marinissen E.J., Yervant Zorian.* Guest Editors' Introduction: The Status of IEEE Std 1500.IEEE Design & Test of Computers. 2009. No26(1). P.6-7. **10.** *Benso A., Di Carlo S., Prinetto P., Zorian Y.* IEEE Standard 1500 Compliance Verification for Embedded Cores // IEEE Trans. VLSI Syst. 2008. No 16(4). P. 397-407. **11.** *Hahanov V.I., Litvinova E.I., Chumachenko S.V., and Guz O.A.* Logic associative computer. Electronic simulation. 2011. No 1. 3.73-83. **12.** *Ngene Christopher Umerah, Hahanov V.* A diagnostic model for detecting functional violation in HDL-code of SoC // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium. Sevastopol, Ukraine. 19-20 September, 2011. P. 299-302. **13.** *Ubar R., Kostin S., Raik J.* Block-Level Fault Model-Free Debug and Diagnosis in Digital Systems // DSD '09. 12th Euromicro Conference. 2009. P. 229-232. **14.** *Benabboud Y., Bosio A., Girard P., Pravossoudovitch S., Virazel A., Bouzaida L., Izaute I.* A case study on logic diagnosis for System-on-Chip // Quality of Electronic Design. 2009. P. 253-259. **15.** *Datta K., Das P.P.* Assertion based verification using HDVL // Proceedings 17th International Conference VLSI Design. 2004. P. 319-325.

Поступила в редколлегию 14.11.2013

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

Baghdadi Ammar Awni Abbas (Baghdad University), аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем и сетей, кубитные методы анализа и диагностирования цифровых устройств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Хаханов Владимир Иванович, декан факультета КИУ ХНУРЭ, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Литвинова Евгения Ивановна, д-р. техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: автоматизация диагностирования и встроенный ремонт компонентов цифровых систем в пакете кристаллов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-421. E-mail: kiu@kture.kharkov.ua.

Зайченко Сергей Александрович, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ, директор компании ТзОВ «Aldec-KTC». Научные интересы: системы автоматизированного проектирования, моделирования и верификации цифровых систем на кристаллах. Увлечения: литература, музыка, футбол. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (097)-367-62-93. E-mail: sergeiz@aldec.com

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

УДК 621.327:681.5

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧИСЕЛ СО ВСТРОЕННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ СТЕГАНОСИСТЕМ

БАРАННИК В.В., БЕКИРОВ А.Э., ХАХАНОВА А.В.

Обосновывается необходимость повышения информационной безопасности в системах специального назначения на основе методов стеганографии. Анализируются недостатки существующих систем непосредственного стеганографического встраивания. Для улучшения характеристик существующих алгоритмов непосредственного встраивания вводится функционал от числа со встроенной информацией. Формулируются требования к синтезированному функционалу от числа со встроенной информацией. Для соответствия требованиям визуальной устойчивости числа со встроенной информацией, устойчивости к трансформированию и атакам сформулированы свойства, которыми должен обладать синтезированный функционал от числа со встроенной информацией.

1. Введение

Одним из возможных вариантов реализации оперативного обмена информацией в автоматизированных системах управления специального назначения (АСУ СН) в интересах Министерства Обороны является система видеоконференцсвязи. Применение такого вида связи имеет преимущества, обусловленные сокращением времени обмена информацией между абонентами, обеспечением возможности передачи дополнительной информации в каналах передачи видеоданных и сокращением времени, необходимым для управления и принятия решения. В то же время существует необходимость повышения безопасности информационных ресурсов АСУ СН. Такая необходимость обусловлена появлением у противника большого количества информационно-технических средств для проведения атак, а также использованием зарубежных технологий для организации обработки и передачи данных.

Одним из возможных способов повышения стойкости систем специального назначения является применение методов цифровой стеганографии встраивания информации в изображение-контейнер. Применение таких алгоритмов дает возможность избежать прямых атак на закрытую информацию, поскольку злоумышленнику не известно, присутствует ли она в информационном потоке и если да, то что является ее цифровым носителем.

Наиболее распространенными стеганографическими методами являются алгоритмы непосредственного встраивания информации в пространственно-временные элементы представления изображений. В связи с этим наиболее актуальным научно-прикладным исследованием является нахождение новых подходов для разработки альтернативных стеганографических алгоритмов непосредственного встраивания.

Возможным решением проблемы улучшения показателей визуальной устойчивости стеганограммы, а также стойкости к трансформации и атакам является разработка некоторого преобразования для элемента с встроенными данными. Наряду с решением задачи повышения информационной безопасности такое преобразование также должно обеспечить компактное представление стеганограммы. Отсюда *цель исследований* состоит в разработке функционала от числа со встроенными данными и формулировке требований к такому функциональному преобразованию и его свойствам.

2.Основная часть

Для решения задач скрытого встраивания данных методы непосредственного встраивания имеют ряд преимуществ. В сравнении с методами косвенного встраивания алгоритмы непосредственного встраивания характеризуются:

– простотой реализации алгоритма;

– большим объемом встраиваемых данных $w_{встр}$;

– небольшими значениями временных затрат на реализацию встраивания и извлечения, при которых время встраивания $\tau_{(W_{встр})пр}$ и время изъятия $\tau_{(W_{встр})обр}$ являются наименьшими;

– отсутствием необходимости предварительной обработки изображения-контейнера и скрываемого сообщения.

Непосредственное встраивание секретного сообщения может осуществляться как в пространственно-временную, так и в частную область изображения-контейнера (ИК). Как правило, такое встраивание проводится в отдельный элемент текущего представления ИК (рисунок), точнее в отдельные биты элемента. В данном случае элемент представляет собой двоичное позиционное число A_2 с основанием, равным двум, т.е. $A_2 = [A]_2$.

Процесс непосредственного встраивания фактически представляет собой замену одного бита исходного элемента-контейнера на бит скрываемого сообщения с использованием некоторого функционала φ_2, условия или правила.

В существующих стегнаографических методах наиболее проработанные подходы основываются на встраивании информации в наименее значимый младший (НМЗ) бит. В связи с этим рассмотрим характеристики таких стеганосистем.

Метод встраивания в наименее значащий бит осуществляет замену младшего бита a_n двоичного позиционного числа A_2 на бит b_ξ встраиваемого сообщения B. Это описывается следующим выражением:

$$a'_n = b_\xi,\ A'_2 = \{a_1, a_2, a_{n-1}, a'_n\},$$

где A'_2 – число, содержащее встроенный бит a'_n скрываемого сообщения; b_ξ – ξ-й элемент, встраиваемой двоичной последовательности $B = \{b_1;...;b_\xi;...;b_\nu\}$, $a'_i \in [0;1]$; $b_\xi \in [0;1]$, $i = \overline{1,\nu}$; $\xi = \overline{1,\nu}$.

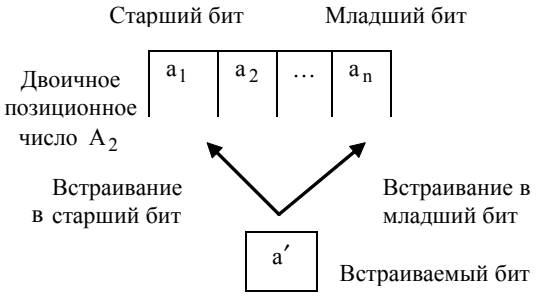


Схема встраивания бита СС в элемент текущего представления ИК

Такой подход для встраивания скрываемой информации характеризуется тем, что количественная метрика $\varepsilon(A;A')$, указывающая на степень отличия между значением элемента A исходного изображения до встраивания информации (изображение-контейнер) и значением A' этого же элемента изображения со встроенной информацией (стеганограммой) будет наименьшей: $\varepsilon(A;A') \to 0$.

В то же время данный принцип встраивания отличается низкой устойчивостью стеганограммы относительно трансформирующих и атакующих воздействий. В этом случае вероятность $P_{из}$ того, что элемент b_ξ скрываемого сообщения будет изъят без ошибок, стремится к нулю, т.е.

$$P_{из}(b'_\xi = b_\xi) \to 0$$

или соответственно вероятность $\overline{P}_{из}$ того, что элемент b_ξ скрываемого сообщения изъят с ошибкой, будет наибольшей $P_{из}(b'_\xi \neq b_\xi) \to 1$.

Здесь b'_ξ – значение ξ-го элемента скрываемого сообщения, который изымается при наличии трансформирующего или атакующего воздействия; $(b'_\xi = b_\xi)$ – событие, состоящее в том, что значения b_ξ элемента скрываемого сообщения до атаки и полученного b'_ξ после атаки будут равными; $(b'_\xi \neq b_\xi)$ – событие, состоящее в том, что значения элемента скрываемого сообщения до атаки b_ξ и полученного после атаки b'_ξ будут неравными.

Наоборот, метод встраивания элемента скрываемого сообщения в старший бит исходного числа A_2, т.е.

$$A'_2 = \{a'_1, a_2, a_n\};\quad a'_1 := b_\xi,$$

повышает стойкость встроенных данных к трансформации и атакам. Тогда вероятность $P_{из}$ того, что элемент b_ξ скрываемого сообщения изъят без ошибок, будет наибольшей, т.е. $P_{из}(b'_\xi = b_\xi) \to 1$.

Здесь A'_2 – число-стеганограмма, содержащее встроенный бит a'_1 скрываемого сообщения; b_ξ – ξ-й элемент встраиваемой двоичной последовательности $B_2 = \{b_1;...;b_\xi;...;b_\nu\}$, $a'_i \in [0;1]$; $b_\xi \in [0;1]$; $i = \overline{1,\nu}$; $\xi = \overline{1,\nu}$; b'_ξ – элемент сообщения, изъятый при наличии атакующего воздействия.

Однако такое встраивание вносит существенные искажения с позиции визуального восприятия изображения-контейнера. Здесь значение количественной метрики $\varepsilon(A;A')$ будет наибольшей, т.е. $\varepsilon(A;A') \to \max$.

При встраивании бита СС в старший бит исходного числа наблюдается стойкость встроенных данных при значительных визуальных искажениях, и наоборот, встраивание СС в младший бит характеризуется низкой стойкостью встроенных данных при минимальных визуальных искажениях.

Для устранения выявленных недостатков, т.е. обеспечения визуальной устойчивости стеганограммы предлагается синтезировать функционал $f(A')$ от ***числа*** со встроенной информацией. Такой функционал должен обеспечить следующие требования:

1) Компактное представление стеганограммы C, полученной после функционального преобразования $f(A')$, т.е. $C = f(A')$. Здесь требуется обеспечить выполнение условия, когда объем $W(C)$ сжатого представления после функционального преобразования не будет превышать объем $W(A)$ сжатого представления той же последовательности A до функционального преобразования, т.е. будет выполняться условие: $W(C) \le W(A)$.

2) Взаимооднозначность прямого $f(A')$ и обратного $f^{(-1)}(C)$ преобразований. В этом случае должен существовать обратный функционал $f^{(-1)}(C)$, позволяющий авторизированному пользователю получить скрываемое сообщение без потери информации, т.е. количественная метрика $\delta(B'_2;B_2)$, указывающая на степень отличия между исходным сообщением B_2 и изъятым на приемной стороне сообщением B'_2, будет принимать нулевое значение $\delta(B'_2;B_2) = 0$.

3) Возможность осуществлять обратное преобразование (реконструкцию) по биполярному принципу. Биполярность заключается в том, что для функционала $f(A')$ существует два варианта обратного преобразования. Первый вариант является стандартным. Он используется неавторизированным пользователем (злоумышленником), а восстановление изображения

осуществляется для стандартных условий $\Psi^{(1)}$, необходимых для достоверной реконструкции элементов изображения-контейнера (позиционного числа)

$$A(1)'' = f^{(-1)}(C;\Psi^{(1)}).$$

Для такого варианта должно обеспечиваться отсутствие визуальных искажений в реконструируемом изображении, что задается условием, при котором значение количественной метрики $\varepsilon(A;A(1)'')$ будет наименьшим:

$$\varepsilon(A;A(1)'') \to 0, \text{ где } A(1)'' = f^{(-1)}(C;\Psi^{(1)}),$$

и блокирование возможности успешного стеганоанализа и изъятия сообщения. Условия блокирования изъятия встроенного сообщения задается следующим соотношением:

$$\delta(B_2'';B_2) \to \max ,$$

здесь B_2'' – скрываемое сообщение, полученное при декодировании неавторизированным пользователем.

Второй вариант, наоборот, существует для авторизированного пользователя. Здесь обратное функциональное преобразование осуществляется с использованием ключа $\Psi^{(2)}$ или по определенному условию, известному авторизированным пользователям, так что $\Psi^{(2)} \neq \Psi^{(1)}$, т.е. $A(2)'' = f^{(-1)}(C;\Psi^{(2)})$.

В процессе этого формируется число-стеганограмма $A(2)''$, так чтобы выполнялись следующие условия:

– обеспечивалось безошибочное изъятие по известному оператору $\varphi^{(-1)}$ (оператору выборки элемента) встраиваемого элемента b_ξ' скрываемого сообщения, т.е.

$$b_\xi' = \varphi^{(-1)}(A(2)'') \text{ и } \delta(B_2';B_2) = 0;$$

– метрика $\varepsilon(A;A(2)'')$, указывающая на степень отличия между числом A, составленным для исходного изображения до встраивания информации (изображение-контейнер) и числом $A(2)''$, соответствующим изображению со встроенной информацией (стеганограммой), принимала наименьшее значение, т.е.

$$\varepsilon(A;A(2)'') \to 0.$$

Процесс изъятия элемента b_ξ' скрываемого сообщения B' описывается соотношением

$$b_\xi' = \varphi^{(-1)}(f^{(-1)}(C)).$$

Здесь $\varphi^{(-1)}$ – оператор изъятия.

Формула, которая описывает реконструкцию числа $A(2)''$ на приемной стороне по известной стеганограмме и ключевой информации, имеет вид:

$$A(2)'' = f^{(-1)}(C;\ \Psi^{(2)}).$$

При изъятии встроенной информации авторизированным пользователем количественная метрика $\delta(B_2';B_2)$, указывающая на степень отличия между исходным встраиваемым сообщением B и изъятым на приемной стороне сообщением B', будет принимать нулевое значение: $\delta(B_2';B_2) = 0$.

4) Функциональное преобразование должно быть инвариантным к атакующим воздействиям (ошибки в канале связи, пережатие ДКП с квантованием). Должна обеспечиваться устойчивость скрываемого сообщения, т.е. возможность его достоверного (целостного) изъятия в случае последующего сжатия, проведения атак и воздействия ошибок канала связи.

Далее обоснуем свойства функционалов, которыми они должны обладать для соответствия требованиям относительно устойчивости процесса скрытия сообщений.

Для соответствия требованиям визуальной устойчивости стеганочисла A', устойчивости к трансформированию и атакам синтезированный функционал $f(A')$ должен обладать следующими свойствами:

1) Формирование стеганограммы C с использованием стеганообразующего функционала должно осуществляться по интегральному принципу в два этапа. На первом этапе как результат применения функционала $f(A')$ к стеганочислу A' формируется кодовое значение N, содержащее информацию об элементах числа A', т.е. $N = f(A')$.

На основе сформированного значения N на втором этапе строится результирующее кодовое представление C стеганограммы $C_2 = \varphi_c(N)$.

Здесь φ_c – оператор, обеспечивающий построение двоичного кода C_2 для кодового значения N. В этом случае получим

$$C_2 = \{c_1;...;c_q;...;c_Q\},\ \ c_q \in \{0;1\},$$

где Q – количество бит на представления стеганограммы C_2.

2) Количественная метрика $\varepsilon(A(1)'';A(2)'')$, указывающая на степень отличия числа $A(1)''$, восстановленного при стандартных условиях $\Psi^{(1)}$ неавторизированным пользователем

$$A(1)'' = f^{(-1)}(C;\Psi^{(1)}),$$

и числа $A(2)''$, реконструированного авторизированным пользователем с использованием ключа $\Psi^{(2)}$

$$A(2)'' = f^{(-1)}(C;\Psi^{(2)}),$$

не должна превышать значения порога визуальной незначимости μ, т.е. $\varepsilon \in 0..\mu$.

3) Стеганограмма C должна содержать сведения о векторе служебной информации $\Psi^{(1)}$, при наличии

которой возможна реконструкция элементов $A(1)''$ изображения контейнера при отсутствии информации о наличии встроенного сообщения:

$$C_2 = \varphi_c(N, \Psi^{(1)}), \quad A(1)'' = f^{(-1)}(C; \Psi^{(1)}).$$

4) Извлечение элемента b'_ξ скрываемого сообщения B'_2 противником при имеющейся у него информации о наличии встраивания возможно только при известном ключе $\Psi^{(2)}$ (ключевой информации).

Такая ключевая информация может представлять собой условия, с учетом которых происходило встраивание скрываемого сообщения, или же принимать значение некоторого симметричного ключа $\Psi^{(2)}$, известного на приемной и передающей стороне. Выражение, описывающее выполнение обратного функционала, будет иметь вид $A(2)'' = f^{(-1)}(C; \Psi^{(2)})$.

5) Служебная составляющая $\Psi^{(1)}$ должна иметь определяющее значение при формировании кодограммы таким образом, чтобы безошибочная реконструкция исходного изображения $A(1)''$ для неавторизированного пользователя достигалась только при наличии полных сведений о векторе служебных данных, т.е. если $\Psi^{(1)'} \neq \Psi^{(1)}$, то

$$C'_2 = \varphi_c(N, \Psi^{(1)'}) \text{ и } A(1)'' \neq f^{(-1)}(C; \Psi^{(1)'}),$$

где $C_2 \neq C'_2$. Здесь C'_2 – значение двоичного кодового слова, восстановленного в результате использования вектора $\Psi^{(1)'}$ служебных данных, декодированных с ошибкой.

6) В результате применения функционала $f(A')$ должно формироваться компактное представление стеганограммы C. Другими словами, в процессе стеганографического преобразования ликвидируется избыточность.

3. Выводы

1. Предложен подход для повышения информационной безопасности систем специального назначения с использованием систем стеганографического встраивания.

2. Проведен анализ недостатков непосредственного встраивания на различные позиции пространственно-временного представления изображения-контейнера. Для устранения выявленных недостатков обоснована необходимость применения функционального преобразования от числа со встроенной информацией. Сформулированы требования к синтезированному функционалу.

3. Определена система свойств, которыми должен обладать синтезированный функционал для соответствия требованиям визуальной устойчивости к трансформированию и атакам.

Научная новизна. Для устранения недостатков существующих стеганографических систем непосредственного встраивания впервые предложено использование функционального преобразования числа со встроенной информацией. Сформулированы требования к функционалу и система свойств для функционального преобразования.

Литература: 1. *Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В.* Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс, 2002. 272 с. **2.** *Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю.* Компьютерная стеганография. Теория и практика. К.: МК-Пресс, 2006. 288с. **3.** *Тарасов Д.О., Мельник А.С., Голобородько М.М.* Класифікація та аналіз безкоштовних програмних засобів стеганографії // Інформаційні системи та мережі. Вісник НУ "Львівська політехніка" № 673. Львів. 2010. С. 365-374.

Поступила в редколлегию 05.11.2013

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.

Бекиров Али Энверович, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

Хаханова Анна Владимировна, канд.техн. наук, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: обработка информации в инфокоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326.

УДК378.147

ОПТИМІЗАЦІЯ РАСТРОВИХ WEB-ЗОБРАЖЕНЬ

БОНДАРЕНКО М.А.

Проводиться експериментальна підготовка графіки для Web-сторінок за використанням програм Macromedia. На основі аналізу отриманих результатів розробляються рекомендації щодо вибору оптимального типу файлу та параметрів зображення залежно від його властивостей та призначення. Проводиться перевірка ефективності використання цієї розробки.

Вступ. Володіння інформаційними технологіями надалі стає невід'ємною частиною професійної культури спеціаліста в будь-якій галузі. Особливе значення в цьому процесі набувають Інтернет-технології розробки Web-сайтів, дизайн яких складається з графічних елементів.

Основний зміст. Сутність оптимізації зображень полягає в зменшенні розміру графічного файла за рахунок «відкидання» частини графічних даних. При цьому якість зображення знижується. Оптимізації підлягають тільки два формата – GIF та JPEG [2]. Оптимізація формату GIF полягає в зменшенні кількості кольорів, які використовуються у зображенні. Для формату JPEG основним параметром оптимізації є так звана «якість». В редакторі Macromedia Fireworks параметри оптимізації задаються за допомогою панелі Optimize (рис. 1).

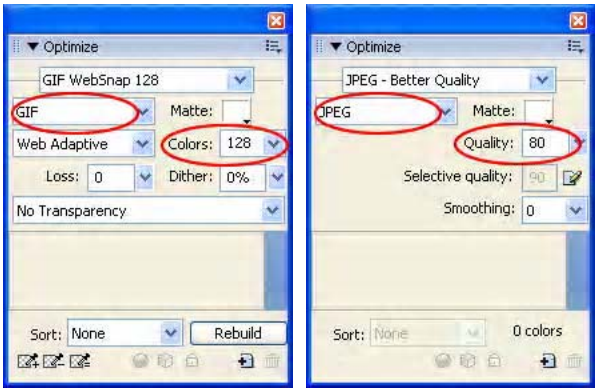


Рис. 1. Панель Optimize в Macromedia Fireworks

Параметри Matte (матовість) та Dither (зглажування) суттєво не впливають на оптимізацію і тому в роботі їх вплив не розглядається.

Порівняємо розміри та якість зображення при визначених параметрах оптимізації для окремих форматів графічних файлів.

Оптимізація растрованих векторних зображень. Для цього експерименту як початкове було вибрано векторне зображення в форматі WMF з колекції графічних зображень Microsoft Clip Gallery (рис. 2). Розмір зображення – 310x286 пікселів, розмір файлу – 33,9 Кбайт.

Рис. 2. Початкове зображення у форматі WMF

Це зображення було відкрито у редакторі Macromedia Fireworks, збережено у форматі PNG та експортовано у формати GIF та JPEG з різними параметрами оптимізації. Разом з цим проводилася суб'єктивна оцінка якості оптимізованого зображення у порівнянні з початковим. Також фіксувалися розміри оптимізованих графічних файлів. Результати цього експерименту представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати оптимізації векторного зображення у формат GIF. Розмір початкового PNG-файлу – 149 Кбайт

Кількість кольорів	Розмір GIF-файлу (Кбайт)	Зменшення розміру у порівнянні з початковим (разів)	Оцінка якості зображення у порівнянні з початковим
256	24,5	6,08	Початкове
128	21,9	6,80	Початкове
64	18,8	7,93	Майже початкове
32	15,5	9,61	Прийнятне
16	12,3	12,11	Задовільне
8	9,5	15,68	Незадовільне
4	5,5	27,09	Погане
2	3	49,67	Неприйнятне

Як видно з цієї таблиці, незадовільна якість з'являється при зменшенні палітри кольорів до 8. При цьому деякі кольори суттєво змінилися (рис. 3).

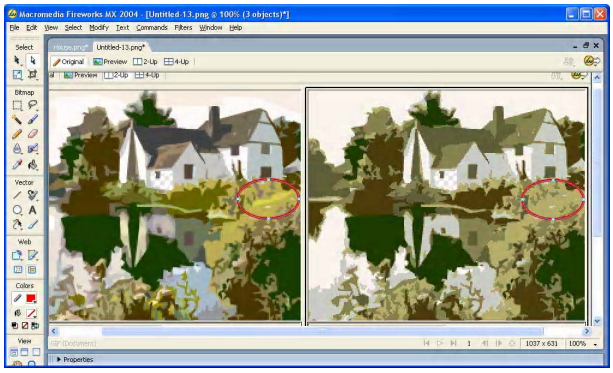


Рис. 3. Втрата кольорів при оптимізації (8 кольорів)

З графіка зміни розміру GIF-файлу в результаті оптимізації видно, що він змінюється майже лінійно (рис. 4).

Рис. 4. Графік зміни розміру GIF-файлу

Таким чином, для данного зображення оптимальним буде вибір 32 кольорів (прийнятна якість), що дає зменшення розміру файлу в 9,61 разу. Аналогічно були отримані дані по оптимізації JPEG-файлу (табл. 2).

Таблиця 2

Результати оптимізації векторного зображення у формат JPEG. Розмір початкового PNG-файлу – 149 Кбайт

Значення параметра якості	Розмір JPEG-файлу (Кбайт)	Зменшення розміру у порівнянні з початковим (разів)	Оцінка якості зображення у порівнянні з початковим
100	81,9	1,82	початкове
90	33,9	4,40	початкове
80	21	7,10	початкове
70	15,6	9,55	початкове
60	13,1	11,37	майже початкове
50	9,9	15,05	прийнятне
40	8,4	17,74	задовільне
30	4,37	34,10	незадовільне
20	3,15	47,30	незадовільне
10	2,6	57,31	неприйнятне

Як видно з цієї таблиці, незадовільна якість з'являється при зменшенні параметра якості до 30. При цьому зображення втрачає чіткість і стає «розмитим» (рис. 5).

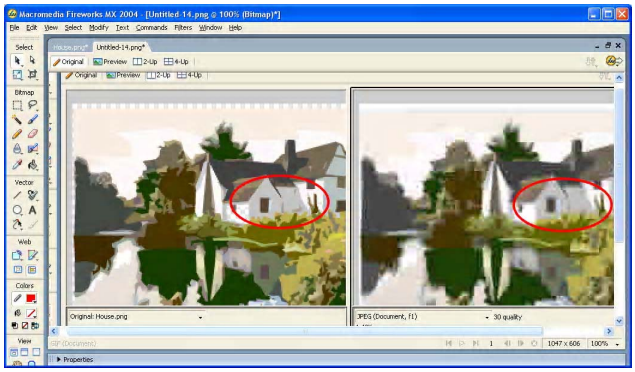


Рис. 5. Втрата чіткості при оптимізації (якість = 30)

З графіка зміни розміру JPEG-файлу в результаті оптимізації видно, що він більш схожий на гіперболу (рис. 6).

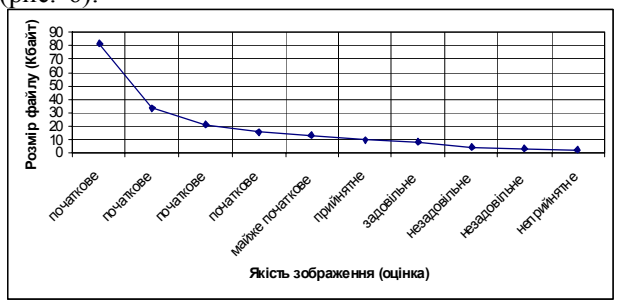


Рис. 6. Графік зміни розміру JPEG-файла

Таким чином, для даного зображення оптимальним буде вибір значення параметра якості в межах 50–60 (майже початкова якість), що дає зменшення розміру файлу в 11–15 разів.

Для порівняння оптимізації файлів у форматах GIF та JPEG розглянемо зведену таблицю даних оптимізації за показниками якості оптимізованого зображення (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняння оптимізації файлів у форматах GIF та JPEG

Оцінка якості	GIF		JPEG		Формат меншого файла
	Кількість кольорів	Розмір файлу (Кбайт)	Параметр якості	Розмір файлу (Кбайт)	
Початкове	256	24,5	100	81,9	GIF
Початкове	128	21,9	70	15,6	JPEG
Майже початкове	64	18,8	60	13,1	JPEG
Прийнятне	32	15,5	50	9,9	JPEG

З цієї таблиці можна зробити висновок, що *в плані оптимізації растрованих векторних зображень формат JPEG має переваги перед форматом GIF*, оскільки забезпечує менший розмір оптимізованого файлу при однаковій якості. Для проведення експерементів з оптимізації растрових зображень було вибрано початкове зображення у форматі JPEG. Розмір зображення – 1536 x 2048 пікселів, глибина кольору – 24 біт. Розмір файлу – 892,8 Кбайт (рис. 7).

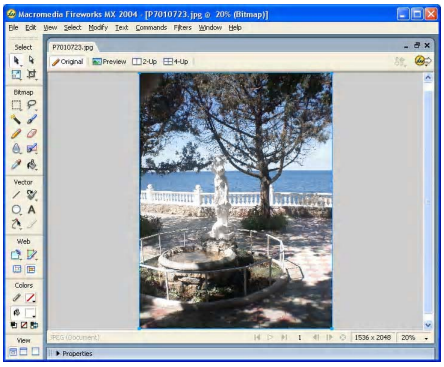


Рис. 7. Початкове растрове зображення у форматі JPEG

Результати оптимізації в форматі GIF представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Розмір початкового JPEG-файлу – 892,8 Кбайт

Кількість кольорів	Розмір GIF-файлу (Кбайт)	Зменьшення розміру у порівнянні з початковим (разів)	Оцінка якості зображення у порівнянні з початковим
256	1650	0,54	початкове
128	1340	0,67	початкове
64	1040	0,86	майже початкове
32	800	1,12	прийнятне
16	575	1,55	незадовільне
8	382	2,34	погане
4	218	4,10	неприйнятне
2	100	8,93	неприйнятне

Як видно з цієї таблиці, незадовільна якість з'являється при зменшені палітри кольорів до 16. При цьому деякі кольори суттєво змінилися (рис. 8).

З цієї таблиці також видно, що експорт початкового файлу JPEG в формат GIF приводить до *збільшення* розміру файлу (до 32 кольорів). Тому в даному випадку можна говорити про оптимізацію при зменшенні палітри кольорів до 32, коли GIF-файл має 800 Кбайт проти 892,8 Кбайт у JPEG.

З графіка зміни розміру GIF-файлу в результаті оптимізації видно, що він у растрових зображень залишається майже лінійним (рис. 9).

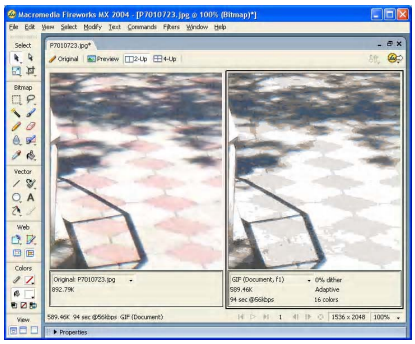


Рис. 8. Втрата кольорів при оптимізації GIF-файлу (16 кольорів)

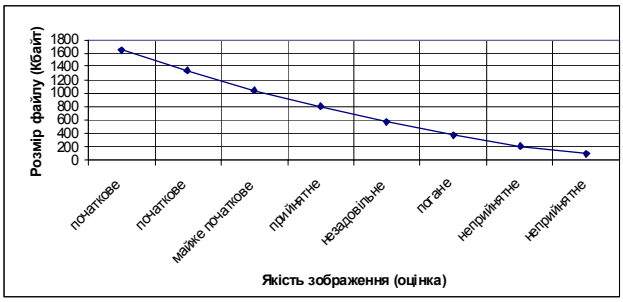


Рис. 9. Графік зміни розміру GIF-файлу

Аналогічно були отримані дані з оптимізації JPEG-файлу (табл. 5).

Таблиця 5

Результати оптимізації растрового зображення у формат JPEG. Розмір початкового JPEG -файлу – 892,8 Кбайт

Значення параметра якості	Розмір JPEG-файлу (Кбайт)	Зменшення розміру у порівнянні з початковим (разів)	Оцінка якості зображення у порівнянні з початковим
100	892,8	1,00	Початкове
90	983	0,91	Початкове
80	750	1,19	Початкове
70	567	1,57	Початкове
60	442	2,02	Майже початкове
50	327	2,73	Прийнятне
40	273	3,27	Прийнятне
30	134	6,66	Задовільне
20	95,4	9,36	Незадовільне
10	76,2	11,72	Неприйнятне

Як видно з табл. 5, незадовільна якість з'являється при зменшенні параметра якості до 20. При цьому зображення втрачає чіткість і стає «розмитим» (рис. 10).

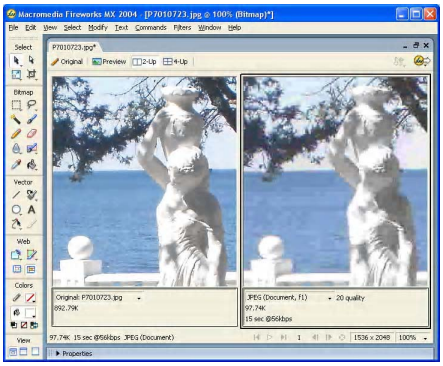


Рис. 10. Втрата чіткості при оптимізації (якість = 20)

Тут маємо несподіваний результат – при параметрі якості 90 розмір файлу не зменшився (як очікувалось), а *збільшився* (від 892,8 Кбайт до 983).

Пояснення цьому знайшлося на панелі оптимізації, де показано, що початкове зображення, яке має якість 100, насправді має якість 86 (рис. 11).

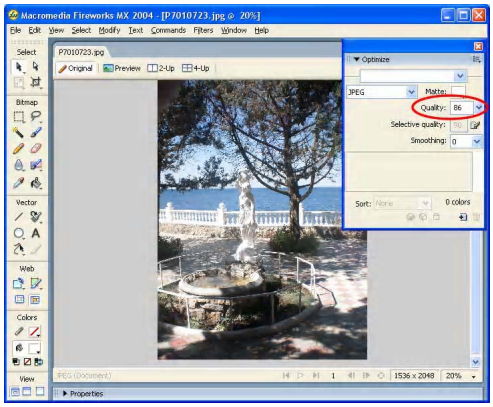


Рис. 11. Значення параметра якості початкового зображення

Тому збільшення якості до 90 привело до збільшення розміру файлу. Звідси можна зробити висновок, що алгоритм оптимізації зображення *було закладено в цифрову фотокамеру*. Перевірка показала, що розмір файлу до такої оптимізації складає 1860 Кбайт. З урахуванням цієї поправки маємо графік зміни розміру JPEG-файлу при оптимізації растрового зображення (рис. 12).

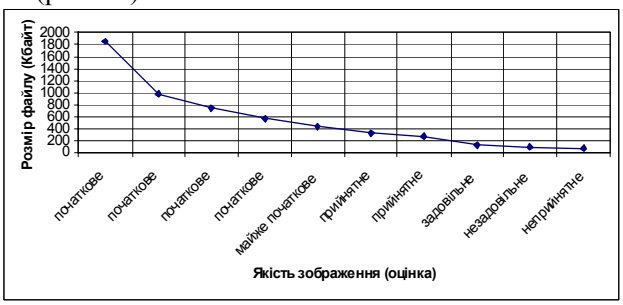


Рис. 12. Графік зміни розміру JPEG-файла при оптимізації растрового зображення

Для даного зображення оптимальним буде вибір значення параметра якості в межах 50–60 (майже початкова або прийнятна якість), що дає зменшення розміру файлу в 4–5,5 рази. Розглянемо зведену таблицю даних форматів GIF та JPEG (табл. 6).

Таблиця 6

Порівняння оптимізації файлів форматів GIF та JPEG для растрового зображення

Оцінка якості	GIF		JPEG		Формат меншого файла
	Кількість кольорів	Розмір файлу (Кбайт)	Параметр якості	Розмір файлу (Кбайт)	
Початкове	256	1650	100	1860	GIF
Початкове	128	1340	70	983	JPEG
Майже початкове	64	1040	60	750	JPEG
Прийнятне	32	800	50	567	JPEG

З табл. 6 можна зробити висновок, що *в плані оптимізації растрових зображень великого розміру формат JPEG має переваги перед форматом GIF*, оскільки забезпечує менший розмір оптимізованого файлу при однаковій якості зображення (крім початкового). Це пояснюється тим, що формат GIF має значно меншу фіксовану частину, ніж формат JPEG.

За результатами експерементів цієї групи можна зробити висновок, що *при застосуванні оптимізації перевагу має формат JPEG*, особливо у випадках растрових зображень великого розміру. Таким чином, графіка для Web-сторінок має бути збережена в одному з трьох форматів – PNG, GIF, JPEG. Це дає гарантію того, що зображення буде відображатися у будь-якому браузері [2]. Формат GIF доцільно використовувати для зображень з невеликою кількістю кольорів (до 256). Наприклад – текст, логотипи, ілюстрації з чіткими краями, зображення з прозорими ділянками, баннери. Формат JPEG доцільно використовувати переважно для фотографій з великою кількістю кольорів. Зображення в цьому форматі, на відміну від формату GIF, не можуть мати прозорих ділянок. Формат PNG є розвитком формату GIF. Його доцільно використовувати для збереження повнокольорових зображень з глибиною кольорів до 48 біт на піксель і чорно-білих зображень з глибиною кольорів до 16 біт на піксель. Рекомендації по вибору графічного формату наведено в табл. 7.

Але, незважаючи на наведені загальні характеристики графічних форматів для Web, вибрати оптимальний формат для конкретного зображення найчастіше можна тільки експериментальним шляхом. При цьому основною метою є досягнення гарної якості зображення при мінімальному розмірі файлу.

Наукова новизна. Використання запропонованої розробки дозволяє провести оптимізацію GIF та JPEG файлів. В плані оптимізації растрованих векторних зображень формат JPEG має переваги перед форматом GIF, оскільки забезпечує менший розмір оптимізованого файлу при однаковій якості.

Формат GIF доцільно використовувати для зображень з невеликою кількістю кольорів (до 256). Формат JPEG доцільно використовувати переважно для фотографій з великою кількістю кольорів. Формат PNG є розвитком формату GIF. Його доцільно використовувати для збереження повнокольорових зображень з глибиною кольорів до 48 біт на піксель і чорно-білих зображень з глибиною кольорів до 16 біт на піксель. Цей формат дозволяє для кожної крапки зображення задавати ступінь прозорості від нульової до 100% [2].

Таблиця 7

Загальні рекомендації по вибору графічного формату для Web

Параметри зображення		Рекомендований формат	Приклади
Розмір	невеликий	GIF	Текст, логотипи, баннери, векторні рисунки, фонове зображення, що повторюється
	великий	JPEG	Фотографії, фонове зображення
Кількість кольорів	до 256	GIF	Текст, логотипи, баннери, векторні рисунки
	велика	JPEG	Фотографії
	дуже велика	PNG	Високоякісні фотографії
Прозорі ділянки	є	GIF, PNG	Текст, логотипи, баннери, векторні рисунки, фотографії
	немає	GIF, JPEG	Фотографії
Ділянки з чіткими краями	є	GIF, PNG	Текст, логотипи, баннери, векторні рисунки
	немає	JPEG	Фотографії
Анімація	є	GIF	Баннери
	немає	GIF, JPEG	Текст, логотипи, баннери, векторні рисунки, фотографії

Надійшла до редколегії 11.12.2013

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

Література. 1. *Бондаренко М. А.* Web-дизайн і презентація інтелектуальної діяльності: МОНУ. Х.: ФОП Лібуркіна Л. М., 2010. 424 с. **2.** *Бондаренко М.А., Савченко О.О.* Утворення та застосування Web-графіки для об'єктно-орієнтованих систем // Збірник «Новий колегіум», ХНУРЕ, 2014, 8 с.

Бондаренко Микола Андрійович, канд. техн. наук, професор, Українська інженерно-педагогична Академія. Наукові інтереси: інформаційні технології та проектування технічних систем. Адреса: Україна, 61000, Харків, вул. Клочківська, 195 г, кв., 44, тел. 7 19 50 01.

УДК 004.42

ХМАРА МОНІТОРИНГУ І УПРАВЛІННЯ ЗДОРОВ'ЯМ ТА ЗДОРОВИМ СПОСОБОМ ЖИТТЯ

НЕЧИПОРЕНКО Ю. Л., РИЖОВ А. О.

Пропонується модель системи моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя з застосуванням хмарного сервісу. Наводиться сценарій роботи хмарного сервісу для моделі пацієнта як одного з можливих сценаріїв, перелік програмних продуктів та апаратних засобів підтримки роботи хмари.

В даний час привабливою є системна інтеграція медичних інформаційних систем (МІС), електронних засобів лабораторної діагностики, інформаційних систем аптеки (ІСА), консультативних засобів інтелектуальної обробки медичних даних, медичних експертних систем (МЕС), електронних медичних карт (ЕМК), електронних журналів здоров'я (ЕЖЗ), освітнього програмного забезпечення в хмарний сервіс моніторингу та управління для оптимального on-line управління здоров'ям і здоровим способом життя людини з метою вирішення медичних, соціальних, гуманітарних, економічних та інших проблем.

Мета дослідження – створення якомога більш розвинених сервісів (функцій і/або даних) для підтримки здоров'я і здорового способу життя людини, підвищення якості та надійності медичних, освітніх та інших послуг шляхом створення та об'єднання інфраструктури, що включає МІС, ІСА, ЕМК, ЕЖЗ. Це дає користувачеві можливість зберігати, систематизувати і спільно використовувати інформацію, яка має відношення до охорони здоров'я, у формі служб мережі Інтернет.

Об'єкт дослідження - інформаційна система підтримки здоров'я людини з хмарними сервісами, що включає МІС, ІСА, ЕМК, ЕЖЗ, електронних засобів лабораторної діагностики, консультативних засобів інтелектуальної обробки медичних даних, освітнього програмного забезпечення.

Предмет дослідження – джерела та потоки інформації про здоров'я та здоровий спосіб життя людини, сучасні програмно-апаратні системи моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя людини на основі застосування персональних, корпоративних і хмарних сервісів в Інтернет.

Методи дослідження - системний, структурно-функціональний підхід, вивчення джерел, спостереження, порівняння, аналіз, узагальнення.

Сутність дослідження - створення та впровадження інфраструктури підтримки здоров'я людини на основі хмарної інфраструктури шляхом інтеграції МІС Запорізького державного медичного університету (ЗДМУ), МІС Енергодарського інституту державного та муніципального управління ім. Р. Г. Хеноха "Класичного приватного університету" (ЕІДМУ "КПУ"), електронних засобів лабораторної діагностики, ІСА, персональних ЕМК і ЕЖЗ, консультативних засобів інтелектуальної обробки медичних даних, системи дистанційного навчання (СДН) moodle в цілях підвищення якості та надійності медичних, освітніх та інших послуг, спрямованих на задоволення потреб людини в отриманні допомоги для здоров'я і здорового способу життя (рис. 1).

Модель системи. Пропонована система моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя відрізняється від існуючих структурною інтеграцією взаємопов'язаних компонентів: 1) Існуючі МІС, засоби лабораторної діагностики, ІСА; консультативні засоби інтелектуальної обробки медичних даних, освітнє програмне забезпечення. 2) Розроблені персональні ЕМК [1, 2] і ЕЖЗ. 3) новий хмарний сервіс моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя. В табл. 1 наведено точки зору на хмарну інформаційну систему медичного призначення та сервіси, які мають отримувати її користувачі.

Наукова новизна проекту визначається системною інтеграцією хмари моніторингу та управління, МІС поліклініки ЗДМУ, МІС ЕІДМУ "КПУ", АРМ спеціаліста фізичної реабілітації "Валеологія", персональних ЕМК і ЕЖЗ користувачів хмарного сервісу, сховища спільних даних хмарного сервісу, що дає можливість спільно використовувати наявні в хмарі сервіси, передавати інформацію від одного постачальника сервісу/сервісів до іншого, застосовувати консультативні засоби інтелектуальної обробки медичних даних [3, 4], освітнє програмне забезпечення використовуючи хмарний сервіс і сховище спільних даних як сполучні між системами, які не можуть обмінюватися інформацією безпосередньо.

Можливості розгортання. Наразі все більшого поширення набувають служби "хмарних" обчислень, сервіс "Програмне забезпечення як послуга" (SaaS) [5-8]. Для цілей проекту застосовано змішаний підхід, при якому можливе використання програмних продуктів і інтернет-служб. Такий підхід дозволяє використовувати переваги локально розгорнених функцій і даних, а також можливості зовнішніх спільно використовуваних служб. При цьому підході зберігається можливість встановлювати оптимальний баланс між ними з точки зору контенту і варіантів застосування, для чого можуть бути використані засоби для переміщення кордону між локальними системами і системою, розміщеною в Інтернеті.

Такий змішаний підхід є доречним, враховуючи, що запити користувачів, вимоги до апаратних і програмних засобів з плином часу істотно змінюються.

При реалізації змішаного підходу застосовується централізоване сховище даних і механізм для отримання даних від локальних вузлів, що входять в хмару, за запитом.

Одним з основних переваг змішаного підходу є те, що "централізованість" або "розподіленість" може лежати в широкому діапазоні і її можна змінювати з часом, у міру зміни ситуації.

Розгортання центрального сховища і реалізація механізму запиту даних з локальних вузлів (навіть якщо спочатку один з варіантів використовуватися не буде) є кращим варіантом, оскільки надалі буде досить складно розширити впроваджену централізовану модель і забезпечити можливість запиту додаткових даних "в міру необхідності"; не менше складно буде забезпечити централізоване зберігання деяких найбільш затребуваних даних в розподіленій моделі.

Змішана модель допускає використання ЕМК, що зберігається на сервері МІС, а також персональних ЕМК і персональних ЕЖЗ, які знаходяться у власному розпорядженні користувачів хмарного сервісу.

Підхід, розглянутий вище, може бути застосований в різних комбінаціях у змішаних архітектурах, якщо необхідно буде реалізувати складні сценарії, залежно від зміни масштабів і топології системи.

Поєднання елементів централізованого та розподіленого підходу, описаного вище, має на увазі присвоєння статусу "домашнього" вузла кожній юридичній і/або фізичній особі, при цьому "домашній" вузол виступає як центральне сховище всіх даних, що відносяться до цієї особи. У даному випадку комплекс локальних вузлів нижнього рангу представляє собою розподілений "центральний" репозиторій; при цьому кожен локальний вузол зберігає інформацію про свій власний "контингент" і може надавати її в міру необхідності.

Як варіант: для того щоб закласти можливість масштабування хмари з метою використовувати його на декількох рівнях, наприклад локальному, регіональному, державному (а на даний момент хмара спроектовано тільки для локального рівня) доцільно покласти деякі функції регіонального рівня на ЗДМУ, з тим, щоб у перспективі можна було добудовувати систему "вгору".

Підстави для дослідження. Проект орієнтований на надання сервісів для лікувально-профілактичних установ України та установ, що надають послуги веденню здорового способу життя. Стає все більш проблематичним використання персональних комп'ютерів без часткового або повного їх відображення або синхронізації на хмарах Інтернету. Залучення хмарних технологій дає можливість вирішувати проблему віддаленого доступу до особистих даних і сервісів персонального комп'ютера при переміщенні користувачів у просторі. Економічний чинник неефективного використання придбаних додатків, розміщених в гаджетах і персональних комп'ютерах, змушує користувача відмовлятися від їх купівлі на користь майже безкоштовної оренди сервісів на хмарах.

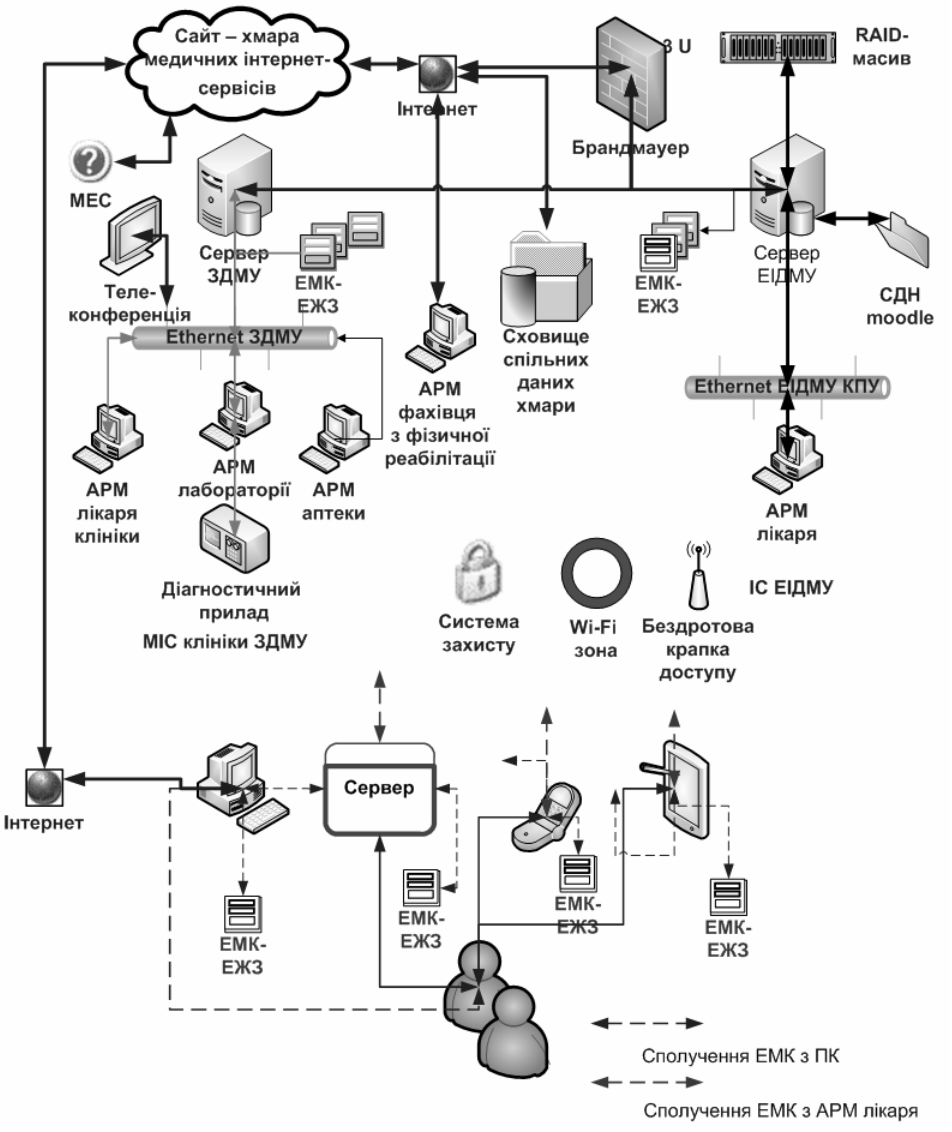


Рис. 1. Модель гетерогенного розподіленого середовища-хмари для моніторингу та управлінням підтримкою здоров'я та здорового способу життя

Таблиця 1

Точки зору на хмарну інформаційну систему медичного призначення та сервіси, які мають отримувати її користувачі

[redacted]

Наразі є наявними окремі компоненти для створення інфраструктури: електронні медичні картки, медичні інформаційні системи, фінансова доступність для населення програмних і апаратних засобів ЕМК (ЕЖЗ), консультативні засоби інтелектуальної обробки медичних даних, освітнє програмне забезпечення системи дистанційного навчання moodle, доступність хмарних обчислювальних технологій; зростання комп'ютерної, мобільної та Інтернет-грамотності населення. Існує розуміння з боку держави про необхідність створення та використання хмарного сервісу для надання медичної допомоги і підтримки здорового способу життя населення.

Сценарії роботи хмарного сервісу. Можливі кілька варіантів сценаріїв роботи хмарного сервісу: як протокол прийому пацієнта лікарем, як модель пацієнта, як комбінована або "посередницька" модель. Розглянемо модель пацієнта як першу версію системи. Наведемо можливий сценарій моделі пацієнта.

1. Клієнт проходить реєстрацію на хмарному сервісі моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя.

У ході реєстрації кожна фізична і юридична особа має прийняти "Угоду про збереження конфіденційності Сторін".

2. Сервіс пропонує клієнту створити свій персональний кабінет здоров'я-сховище даних.

3. Клієнт на хмарному сервісі заносить свої дані в електронну медичну карту, яка відповідає формі, встановленій МОЗ України.

4. Сервіс відкриває клієнту можливість користування послугами: медична енциклопедія; довідник захворювань; довідник лікарських засобів; періодичне тестування про стан здоров'я за допомогою медичних експертних систем; подача тривожних сигналів і нагадувань; участь в телеконференціях навчального характеру; користування системою дистанційного навчання moodle тощо.

5. Медичний заклад А проводить реєстрацію на хмарному сервісі своїх підрозділів (реєстратура, діагностичні лабораторії і т.д.) і лікарів-фахівців. Сервіс відкриває закладу та його персоналу, в тому числі лікарям загальної практики-сімейної медицини, можливість користування медичною енциклопедією, довідником захворювань, довідником лікарських засобів, консультативними медичними експертними системами, участі в телеконференціях навчального характеру тощо.

6. Медичний заклад Б проводить реєстрацію на хмарному сервісі своїх підрозділів і лікарів –фахівців і отримує можливість користуватися послугами, аналогічними п. 5.

7. При необхідності звернення клієнта в медичний заклад А клієнт відкриває доступ цьому медичному закладу до своєї ЕМК, до певної частини інформації про свій стан здоров'я.

8. Медичний заклад А запитує та отримує обрану інформацію про здоров'я конкретного клієнта від "хмарного" вузла електронної охорони здоров'я. При наявності дозволу клієнта інформація може бути збережена в локальній мережі медичного закладу А.

9. Результати взаємодії клієнта з медичним закладом А (скарги на здоров'я, лабораторна діагностика, діагноз захворювання, призначення тощо) завантажуються в ЕМК клієнта у відповідному форматі через вузол інтеграції (сховище спільних даних хмари), використовуючи відкриті протоколи.

10. При необхідності звернення клієнта в медичний заклад Б клієнт відкриває доступ цьому медичному закладу до своєї ЕМК, до певної частини інформації про свій стан здоров'я.

11. Медичний заклад Б запитує та отримує обрану інформацію про здоров'я конкретного клієнта від "хмарного" вузла електронної охорони здоров'я. При наявності дозволу клієнта інформація може бути збережена в локальній мережі медичного закладу Б.

12. При необхідності проведення консиліуму і наявності відповідного технічного та програмного забезпечення в медичних закладах А і Б для проведення консиліуму в режимі телеконференції хмарний сервіс за згодою клієнта відкриває цим медзакладам доступ до його ЕМК, до певної частини інформації про його стан здоров'я на період проведення телеконференції.

На рис. 2 наведено фрагмент загального сценарію роботи хмари.

В табл. 2 наведено перелік програмних продуктів для підтримки роботи хмари.

Програмне забезпечення АРМ реєстратури (як приклад вимог до інших програмних продуктів):

1. Операційна система MS Windows XP + ServicePack 2 і вище.

2. Встановлений пакет Microsoft Installer 3.0 і вище.

3. Встановлений пакет Microsoft.Net Framework 3.5.

4. Офісний додаток MS Office 2009 і вище (для роботи з вивантаження в Excel).

5. АРМ "Реєстратура" - модуль МІС клініки, що забезпечує об'єктивізацію факту першого контакту пацієнта з медичним закладом первинної медичної санітарної допомоги (ПМСД) і дозволяє створити в рамках МІС систему персоніфікованого обліку пацієнтів.

Перелік апаратних засобів підтримки роботи хмари наведено в табл. 3.

Апаратне забезпечення АРМ реєстратури (як приклад вимог також і до апаратного забезпечення інших користувачів хмарного сервісу):

процесор: Intel Core i7 930 Bloomfield;

оперативна пам'ять (ОЗУ): 3 х 2 Гб DDR III;

монітор: Samsung F2380 – 3;

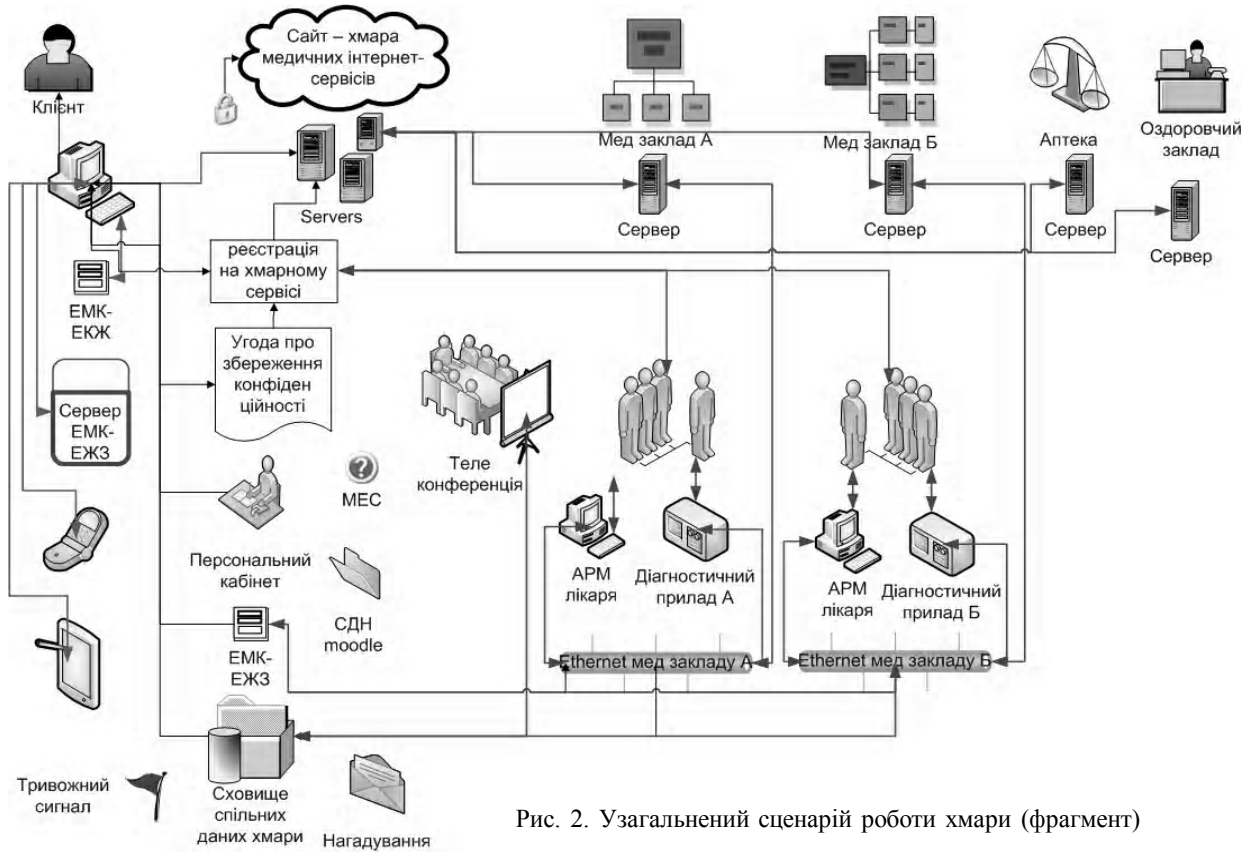


Рис. 2. Узагальнений сценарій роботи хмари (фрагмент)

Таблиця 2

Програмні продукти для підтримки роботи хмари

Програмні продукти	Користувачі				
	пацієнт	ЕІДМУ "КПУ"	клініка ЗДМУ	фахівець фіз реабілітації	аптека
ЕМК персональна	+	+			
сервер ЕМК	+	+			
ЕМК як компонент МІС	+	+	+	+	
АРМ реєстратури	+	+	+		
АРМ терапевта		+	+		
АРМ сімейного лікаря		+	+	+	
БД	+	+	+	+	+
Веб-браузер	+	+	+	+	+
Сайт	+	+	+	+	+
ЕЖЗ персональна	+	+		+	
Сховище спільних даних хмари	+	+	+	+	+
RAID-масив		+	+		
брандмауер		+			
Консультативні засоби інтелектуальної обробки медичних даних	+	+	+	+	
Система дистанційного навчання moodle		+	+		
Засоби дистанційного навчання та телеконсультацій			+		
Медичні телеконференції			+		
Медична енциклопедія; довідник захворювань; довідник лікарських засобів; система дистанційного навчання moodle	+	+	+	+	+
Медичні експертні системи для періодичного тестування про стан здоров'я	+				
Подача тривожних сигналів і нагадувань	+				

Таблиця 3

Апаратна підтримка роботи хмари

Обладнання	Користувачі				
	пацієнт	ЕІДМУ "КПУ"	клініка ЗДМУ	фахівець фіз реабілітації	аптека
ПК	+	+	+	+	+
Сервер ЕМК + ЕЖЗ	+	+		+	
Локальна мережа		+	+		
Сервер мережі		+	+		
Сервер веб	+	+	+	+	+
Роутер Wi-Fi		+	+		
Діагностичне обладнання			+	+	
Планшет	+	+	+	+	
Смартфон	+	+	+	+	

материнська плата: PGT Deluxe Asus Socket 1366;

DVD і CDROM дисководи : TSST corp CDDVDW TS – T633A;

дискові пристрої: Sata 2 500Gb 16Mb Cache Samsung F1;

клавіатура і миша: стандартні клавіатура і миша USB;

звукові та відео-пристрої: ATI Asus Radeon 5850 1Gb DDR5;

мережеві адаптери: Marvell Yukon 88E8057 PCI-E Gigabit Ethernet Controller;

друкуючі пристрої: МФУ Xerox WorkCentre 7775;

мережеві вимоги: з'єднання з мережею Інтернет постійним підключенням швидкістю не менше 512 Кб/с (ADSL).

Отримані результати. Запропоновано модель системи моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя, яка відрізняється від існуючих структурною інтеграцією взаємопов'язаних компонентів: 1) існуючих МІС, засобів лабораторної діагностики, ІСА; консультативних засобів інтелектуальної обробки медичних даних, освітнього програмного забезпечення; 2) розроблених персональних ЕМК і ЕЖЗ; 3) нового хмарного сервісу моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя. Наведено сценарій роботи хмарного сервісу для моделі пацієнта як одного з можливих сценаріїв, перелік програмних продуктів та апаратних засобів підтримки роботи хмари.

Висновок. Створення та впровадження інфраструктури підтримки здоров'я людини на основі хмарної інфраструктури в цілях підвищення якості та надійності медичних, освітніх та інших послуг, спрямованих на задоволення потреб людини в отриманні допомоги для здоров'я і здорового способу життя в даний час є привабливими. Для цілей проекту застосовано змішаний підхід, при якому можливе використання програмних продуктів і інтернет-служб. Наявні можливості розгортання хмарного сервісу.

Практичне значення роботи. Запропонована модель, сценарій роботи можуть бути застосовані при проектуванні хмарного сервісу.

Подальший розвиток системи може здійснюватись в напрямку деталізації моделі щодо користувачів хмарного сервісу та сценарію їх роботи – сімейного лікаря, діагностичної лабораторії тощо. Має бути більш детальним аналіз можливостей варіантів сценаріїв роботи хмарного сервісу: як протокол прийому пацієнта лікарем, як модель пацієнта, як комбінована або "посередницька" модель.

Література: **1.** *Нечипоренко Ю. Л.* Системи підтримки електронних медичних карток // Запорожский медицинский журнал. 2013. №1. С. 103-105. **2.** *Нечипоренко Ю. Л.* Інтерфейс електронної медичної картки на мобільному пристрої // Медична інформатика та інженерія. 2012. №4. **3.** *Грибова В. В., Клещев А. С., Крылов Д. А.* и др. Облачная платформа для разработки и управления интеллектуальными системами. OSTIS-2011 (Open Semantic Technologies for Intelligent Systems). 10 с. **4.** *Грибова В.В., Клещев А.С., Шалфеева Е.А.* Системы управления интеллектуальными интернет-приложениями. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010. 31 с. **5.** Облачные вычисления – Википедия. 2014. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Облачные вычисления. **6.** *Концер Т.* "Облачные" вычисления: всё как сервис // PC Week/RE/. №32 (638). 2008. http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=112879. **7.** *SAAS* платформы – обзор на LiveBusiness. 2010. Режим доступа: http://www.livebusiness.ru/tags/SAAS_platformy. **8.** *Романов М.* Основные компоненты cloud computing. Режим доступу: http://blogs.msdn.com/jmeier/archive/2010/02/11/software-as-a-service-saas-platform-as-a-service-paas-and-infrastructure-as-a-service-iaas.aspx

Надійшла до редколегії 19.02.2014

Рецензент: д-р физ.-мат.наук Корніч Г. В.

Нечипоренко Юрій Леонідович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри програмування та інформаційних технологій, Енергодарський інститут державного та муніципального управління ім. Р. Г.Хеноха "Класичного приватного університету". Наукові інтереси: ПЗ для медичних інформаційних систем, фотоперетворювачі. Хоббі: гірський туризм, баскетбол, фото. Адреса: Україна, 71503, м. Енергодар Запорізької обл., вул. Комсомольська, 3а; тел./факс (06139) 33235, e-mail: humaniver.pro@gmail.com

Рижов Олексій Анатолійович, д-р фармацевтичних наук, доцент, завідувач кафедри медичної та фармацевтичної інформатики Запорізького державного медичного університету. Адреса: Україна, 69035, Запоріжжя, пр. Маяковського, 26.

УДК519.7

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ВЫБОРА И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., ПОДДУБНЫЙ А.В.

Показывается принципиальная возможность использования методов эволюционной оптимизации в системах управления деятельностью предприятия. Исследуются возможности использования различных подходов к формированию исходного множества альтернатив, созданию алгоритмических и программных средств, обеспечивающих применение современных информатизационных технологий в управлении различными сферами деятельности предприятия.

1. Введение

В условиях рыночных отношений предприятие является сложной производственно-экономической системой с многогранной деятельностью, ключевым звеном экономики. Главная цель создания и функционирования предприятия – получение максимально возможной прибыли за счет реализации потребителям производимой продукции (выполненных работ, оказанных услуг), на основе которой удовлетворяются социальные и экономические запросы владельцев средств производства и работающих.

Качественным показателем деятельности предприятия является отлаженная система управления затратами (себестоимостью), основанная на данных управленческого учёта и увязанная с системой бюджетирования. Управление производством на современном промышленном предприятии является сложной, многокритериальной трудноформализуемой задачей, которая требует автоматизации и выработки новых подходов к ее решению. Сегодня в процессе оптимизации параметров деятельности предприятия как сложной системы применяются природные механизмы принятия решений; интенсивно разрабатывается такое научное направление как природные вычисления, объединяющее в себе математические методы, к которым можно отнести генетические алгоритмы, эволюционное программирование, нейросетевые вычисления, ДНК-вычисления, клеточные автоматы, муравьиные алгоритмы и прочие алгоритмы роевого интеллекта.

В настоящее время наиболее известным представителем эволюционных алгоритмов является генетический алгоритм, полученный в процессе имитации и синтеза свойств живой природы в искусственных системах. Цель генетического алгоритма при решении задачи оптимизации – нахождение лучшего возможного, но не гарантированного оптимального решения. Для реализации генетического алгоритма необходимо найти подходящую структуру данных для представления решений. В постановке задачи поиска оптимума вариант этой структуры должен содержать информацию о некоторой точке в пространстве решений.

2. Анализ методов исследования

Цель работы – решение многокритериальной задачи управления производством на современном промышленном предприятии методом эволюционной оптимизации.

Главной особенностью предлагаемого в статье метода является отход от традиционной схемы «размножения», которая используется в большинстве реализованных генетических алгоритмах и повторяющих классическую схему, предложенную Голландом [1].

Классическая схема предполагает ограничение численности потомков через использование вероятности кроссинговера. Такая модель придаёт численности потомков вероятностный характер. Мы предлагаем отстраниться от вероятности кроссинговера и использовать детерминированное количество брачных пар в каждом поколении, учитывая, что каждая пара даёт два потомка. Эта процедура делает процесс поиска более управляемым и предсказуемым с учетом вычислительных затрат.

Наш метод применял два типа кроссинговеров: одно- и двухточечный в качестве генетических операторов получения новых генотипов «потомков», используя генетическую информацию родителей. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что даже для простых функций нельзя говорить о преимуществе того или иного оператора. Более того, показано, что использование механизма недетерминированного выбора кроссинговера для каждой конкретной брачной пары оказывается более эффективным, чем детерминированный подход, так как априорно сложно определить, какой из двух операторов лучше подходит под каждый конкретный ландшафт приспособленности. Цель использования недетерминированного выбора заключалась в том, чтобы сгладить различия двух подходов и улучшить показатели среднего ожидаемого результата. Для всех тестовых функций наш выбор подтвердился, более того, в ряде случаев применение недетерминированного механизма в выборе кроссинговера дало лучшие результаты, чем подход с фиксированным набором пар.

Сущность исследования. Основным аппаратом для разработки системы производственного планирования был выбран метод многокритериальной оптимизации.

При обобщении таких свойств как приспособляемость к изменениям среды, естественный отбор и наследование потомками наиболее «ценных» свойств своих родителей получаем алгоритм, с помощью которого можно улучшить работу поисковых систем, оптимизировать работу нефтяных трубопроводов, распределение инструментов в производственных цехах.

Поиск оптимального решения похож на эволюцию популяции индивидов, которые представлены набором хромосом. В этой эволюции действуют три механизма, представленные на рисунке.

Схема генетического алгоритма

Детальнее распишем упомянутые механизмы.

После создания начальной популяции (начальной базы знаний) проводится отбор сильнейших наборов пар хромосом, которым соответствуют наиболее оптимальные решения. Далее проводится скрещивание для получения новых индивидов путем смешивания хромосомных наборов отобранных индивидов. Четвертый этап – мутации – преобразование хромосомы и недетерминированное изменение одного или нескольких генов (зачастую – одного). Основное применение алгоритма муравьиных колоний лежит в области комбинаторной оптимизации.

Суть данного метода заключается в анализе и моделировании поведения колонии муравьёв, которые ищут путь к источнику пищи. Связь между муравьями осуществляется за счет феромона, при этом феромонные тропы представляют собой некоторую «коллективную память» муравьев.

При этом вероятность включения отдельного отрезка пути в маршрут отдельного муравья пропорциональна количеству феромона на этой тропе, а количество откладываемого феромона пропорционально длине маршрута. Чем короче маршрут, тем больше феромона будет отложено на его пути, а значит, большее количество муравьёв будет добавлять его в схему собственного маршрута. Еди использовать только положительную обратную связь, то это приводит к преждевременной сходимости – большинство муравьёв двигается по локально оптимальному маршруту.

Этой ситуации можно избежать, моделируя отрицательную обратную связь в виде испарения феромона. При этом стоит учитывать, что если маркер испаряется быстро, то это приводит к потере памяти всей колонии и забыванию «хороших» решений. С другой стороны, большее время испарения может привести к получению устойчивого локального оптимального решения.

Наиболее популярное применение генетического алгоритма – оптимизация многопараметрических функций. Реальные задачи формируются как поиск оптимума сложной функции, которая зависит от выходных параметров. Преимущество генетического алгоритма состоит в недетерминированности и способности манипулировать одновременно многими параметрами. В одних случаях мы получаем точное решение функции, в других – решением считается любое значение, лучшее от некоторой заданной величины. Из множества качественных показателей для оценки скрещивания выделены следующие критерии [2].

Величина прибыли, получаемой предприятием:

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \max, \qquad (1)$$

где x_j – множество видов продукции, которое выпускает предприятие.

Минимизация себестоимости:

$$\sum_{i=1}^{n} c_i * x_i \to \min . \qquad (2)$$

Минимизация производственного времени:

$$\sum_{i=1}^{5} T_i * x_i \to \min . \qquad (3)$$

Показатель качества выпускаемой продукции:

$$\sum_{i=1}^{5} k_i * x_i \to \max . \qquad (4)$$

Так, задача планирования маршрута прокладки сетей трубопроводного транспорта включает в себя необходимость поиска оптимальной по критерию минимальности затрат (или, например, максимизации прибыли), последовательности объединения территорий городов и других населенных пунктов с учетом ограничительных условий, определяемых показателем спроса в каждом из них и характеристиками труб.

В данном случае задача исследования может быть сформулирована таким образом: определить оптимальный план $X^{(0)}$ производства продукции, удовлетворяющий указанным критериям.

Производственные ресурсы $B_T=(b_1, b_2,\ldots, b_m)$ – лимит на выпуск продукции различных видов. С учетом норм затрат ресурсов на единицу каждого типа продукции эти ограничения можно записать в следующем виде:

$$AX < B^T , \qquad (5)$$

$$X \geq 0, \qquad (6)$$

где $A = \{a_{ij}\}$, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$ – матрица норм затрат ресурсов на единицу каждого типа продукции.

Выражения (5), (6) описывают условия, которые необходимо учесть в планировании годовой производственной программы. Исходные данные обычно представляются в виде матрицы $A = | a_{ij} |_{mn}$. Строкам этой матрицы соответствуют все виды ресурсов, а компоненты вектора B являются ограничениями ви-

дов ресурсов или объёмов производства, которые установлены для годовой производственной программы предприятия. Выражение (6) представляет собой обычное условие неотрицательности, что вытекает из условия задачи.

Общая постановка задачи заключается в том, что необходимо определить вектор $X^{(0)}$, который обеспечивает компромисс между величиной прибыли (1), валовым объемом и минимальной себестоимостью (2), а также удовлетворяет ограничению минимизации производственного времени (5), (6).

Одно из возможных решений заключается в том, что вначале находится три оптимальных вектора производства $x^{(i)}$, каждый из которых соответствует одному из локальных критериев (5), (6). Затем определяется выпуклая линейная комбинация, которая представляет собой компромиссную (оптимальную) программу относительно указанных критериев:

$$X^{(0)} = vx^{(1)} + v_2 x^{(2)} + v_3 x^{(3)}, \qquad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{3} v_i = 1, v_i \geq 0. \qquad (8)$$

3. Исследование и расчёт многокритериальной модели

Исходя из выбранных для исследования основных показателей качества, общая математическая модель задачи является многокритериальной, требующей для её разрешения различных оптимизационных методов.

Максимизация прибыли. Задача расчета показателей качества продукции относится к задачам линейной оптимизации. Общий вид:

$$\sum_{i=1}^{S} (P_i - c_i) * X_i \to \max. \qquad (9)$$

Эту задачу обычно решают как задачу линейного программирования, например, симплекс-методом [3]. Его идея заключается в последовательном продвижении по базисам опорных планов до получения оптимального решения или доказательства неразрешимости задачи. При этом значение целевой функции увеличивается.

Минимизация себестоимости. Одна из целей состоит в том, чтобы себестоимость товара была минимальной и при этом никак не влияла на производство товара. Себестоимость представляет собой суммарные затраты на производство и реализацию продукции.

Минимизация производственного времени. Подобная минимизация может быть достигнута только при уменьшении продолжительности выполнения частных процессов, которые образуют производственный цикл в целом. Следовательно, для получения желаемого результата необходимо сокращать продолжительность выполнения каких-либо из этих процессов, выбирая их по определенному критерию.

Определение валового объема выпускаемой продукции. Необходимо следить за балансом между запасами и излишками на складах. Для решения этой задачи с использованием оптимизационных методов в качестве общей математической модели используется следующая:

$$\sum_{i=1}^{5} X_i \to \max. \qquad (10)$$

Для достижения поставленной цели необходимо найти оптимальное решение для каждой функции [4]. При этом вместо традиционных методов оптимизации, таких как методы эволюционной оптимизации и математическое программирование, будем использовать генетический муравьиный алгоритм:

1. Основа поведения муравьев – самоорганизация. Её принцип состоит в достижении глобальной цели в результате низкоуровневого взаимодействия элементов системы. Система использует только локальную информацию, при этом исключая любое централизованное управление и обращение к внешнему образу системы.

В начальный момент времени в функции базы знаний находится определенное количество муравьев, которое равно числу кластеров. При этом каждый муравей имеет строгую принадлежность к тому кластеру, из которого он начал своё движение. Его принадлежность кластеру проявляется в том, что муравей более восприимчив к феромону, оставленному муравьями из «своего» кластера. В нашей доменной области это можно представить так:

$$F_1 x = \sum_{j=1}^{n} C_j^{(1)} X_j \to \max, \qquad (11)$$

где X_j – множество видов продукции, которое выпускает предприятие.

2. При переходе из одной функции в другую муравей оставляет на пересечении, которое соединяет эти функции, определенное количество феромона. Чтобы избежать зацикливания движения муравьев, используется испарение феромона:

$$\sum_{i=1}^{5} k_i * x_i \to \max. \qquad (12)$$

Так, муравьиный алгоритм применяется на двух этапах анализа знаний системы. Сначала он запускается на многомерной модели базы знаний, после чего на основании его работы делаются первоначальные выводы. Далее модель упрощается: удаляются некоторые нерелевантные связи между функциями, а отдельные функции синтезируются в общие более крупные и структурные единицы, а структура знаний проецируется на двумерное пространство. После этого алгоритм запускается на упрощенной модели знаний. В результате смены поколений вырабатывается такое решение поставленной задачи, которое уже нельзя дальше улучшить.

4. Поиск оптимального компромиссного решения

После решения локальных задач оптимизации устанавливается мера оценки, которая указывает отклонение значений целевых функций при выборе единичного оптимального вектора производства от оптимальных значений остальных целевых функций [5].

Используется матричный метод решения, а скалярная характеристика считается по формуле:

$$A = \| a_{ij} \|_{mn} = \left| \frac{F_j(x_j) - F_i(x_i)}{F_j(x_j)} \right|, (i, j = 1,3), \quad (13)$$

где F_j – значение локальной функции цели j-й задачи, вычисленной в результате подстановки решения первой задачи. Значение a_{ij} характеризует «качество» оптимальной производственной программы относительно F_j и представляет собой модуль потерь относительно этого показателя, если выполняется программа действий x_i вместо x_j.

5. Выводы

При разработке проектов комплексных систем перед проектировщиком возникает проблема принятия решений при наличии одновременно нескольких критериев качества. Поэтому разработка методов принятия решений в таких условиях (большинство задач проектирования) остается одной из самых востребованных задач в организационном управлении производством.

Теория принятия решений как наука предполагает различные средства моделирования целенаправленной деятельности. Существующие и развивающиеся подходы проникают в новые области автоматизированного управления, а полученные результаты позволяют не только рационально расходовать ограниченные ресурсы, но и развивают наши представления о возможностях изучаемых доменных областей. Была предложена типовая математическая модель исследуемой задачи.

Исследованы методы оптимизации в задачах принятия решений по различным критериям в системах организационного управления деятельностью предприятия.

В результате исследования построена математическая модель производства с технико-экономическими и экологическими ограничениями, выбран метод решения модели. Эффективность муравьиных алгоритмов сравнима с эффективностью общих эвристических методов, а в ряде случаев – и с проблемно-ориентированными методами. Наилучшие результаты муравьиные алгоритмы показывают для задач с большими размерностями областей поиска.

Принцип решения полученной модели наиболее соответствует традиционным методам теории оптимизации. Метод решения разработанной математической модели основан на использовании методов теории принятия решений и генетического алгоритма. Он легко реализуется программно и позволяет найти оптимальное решение – один из вариантов решения проблемы, имеющий наилучшую оценку. По окончании применения разработанного нечеткого алгоритма муравьиных колоний для конкретной задачи прокладки нефтяного трубопровода, позволяющего учитывать неопределенность и нечеткость спроса на продукцию в населенных пунктах, увеличивается эффективность деятельности предприятия (максимизация прибыли и/или минимизация затрат).

Результатом применения предположенных методов является нахождение оптимальных по задаваемым критериям показателей деятельности предприятия.

Литература: 1. *Гвоздинский А.Н.* Методы аналитической обработки данных / А.Н. Гвоздинский, Е.Г. Климко. Радиоэлектроника и информатика. 2003. №4. С.111-114. **2.** *Гвоздинский А.Н.* Применение методов эволюционной оптимизации для решения задач производственного планирования / АСУ и приборы автоматики. 2011. №154. С. 97-102. **3.** *Бондаренко М.Ф.* Оптимізаційні задачі в системах прийняття рішень: підручник / М.Ф. Бондаренко, А.М. Гвоздинський. Харків: ХТУРЕ, 1998. 219 с. **4.** *Поддубный А.В.* Выбор решений в системах искусственного интеллекта методами эволюционной оптимизации / Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке. 2013. №6. С. 330-331.

Поступила в редколлегию 23.11.2013

Рецензент: д-р техн.наук, проф. Куземин А.Я.

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Академика Ляпунова, 7, кв.9, тел. 702-38-23.

Поддубный Александр Викторович, студент группы КН-10-5 кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: методы принятия решения в системах искусственного интеллекта. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14. тел. 093-948-19-44.

УДК519.7

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МАРКЕТИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., РУДНЕВ В.К.

Исследуется проблема выбора решения в задачах оптимизации плана товарооборота, разрабатываются и предлагаются для него математические модели и методы решения. Анализируется результат, полученный при помощи модели, делаются соответствующие выводы. Рассматриваются положительные и отрицательные стороны данного подхода и приводятся соответствующие рекомендации для улучшения. Рассматриваются также возможности использования эволюционных методов для решения исследуемой задачи.

1. Введение

Каждый человек ежедневно принимает решения и ему несложно это делать, если вариантов решения немного. Но когда речь идет о заводах и предприятиях, где необходимо, например из тысячи различных вариантов решений выбрать один, который будет самым оптимальным, человек может сделать ошибку. Было разработано множество алгоритмов, помогающих принимать решения, оценивать и сравнивать различные варианты решений в таких областях как распределение производственной программы, оптимизация плана товарооборота и т.д. В данное время исследуется проблема принятия решения в маркетинговой деятельности предприятия на примере задачи оптимизации плана товарооборота. Товарооборотом называют объем продажи товаров и оказания услуг в денежном выражении за определенный период времени. Также было разработано оптимальный план товарооборота путем составления для него математической модели и ее решения.

Известно, что товарооборот является важнейшим показателем не только для торгующей организации, но и для национальной экономики. Во внутрифирменном значении этот показатель отражает успех организации, спрос покупателей на реализуемые товары.

Сам анализ товарооборота позволяет оценить соответствие имеющихся товаров спросу населения для принятия мер по оптимизации структуры товарооборота, увеличению объемов реализации, ускорению товарооборота, ритмичности и равномерности продаж. Товарооборот продукции отечественного производства отражает уровень ее востребованности на рынках. В этом смысле торговля является двигателем промышленности. И поэтому оптимизация плана товарооборота – одна из главных задач в экономике, от которой зависят очень многие показатели.

Поиски оптимальных решений привели к созданию специальных математических методов и уже в XVIII веке были заложены математические основы оптимизации (вариационное исчисление, численные методы и др.). Однако до второй половины XX века методы оптимизации во многих областях науки и техники применялись очень редко, поскольку практическое использование математических методов оптимизации требовало огромной вычислительной работы, которую без ЭВМ реализовать было крайне трудно, а в ряде случаев – невозможно.

При постановке задачи оптимизации предполагается существование конкурирующих свойств процесса, например:

количество продукции – расход сырья;

количество продукции – качество продукции.

Выбор компромиссного варианта для указанных свойств и представляет собой процедуру решения оптимизационной задачи.

Обычно оптимизируемая величина связана с экономичностью работы рассматриваемого объекта (аппарат, цех, завод). Оптимизируемый вариант работы объекта должен оцениваться какой-то количественной мерой – критерием оптимальности.

В зависимости от постановки любая из задач оптимизации может решаться различными методами, и наоборот – любой метод может применяться для решения многих задач. Методы оптимизации могут быть:

– скалярными (оптимизация проводится по одному критерию);

– векторными (оптимизация проводится по многим критериям);

–поисковыми (включают методы регулярного и методы случайного поиска);

–аналитическими (методы дифференциального исчисления, методы вариационного исчисления);

–вычислительными (основаны на математическом программировании, которое может быть линейным, нелинейным, дискретным, динамическим, стохастическим, эвристическим);

– теоретико-вероятностными;

– теоретико-игровыми.

В последние время особую актуальность приобрели эволюционные методы оптимизации, позволяющие достаточно точно с использованием современных информационных технологий найти решение задачи. Исследованные и предложенные принципы оптимизации в данной работе имеют научную инновацию и практическое значение. Результаты были опробованы в системах принятия оптимальных решений с использованием многих критериев.

2. Формулировка задачи и построение математической модели

Целью работы является исследование методов выбора и принятия решения, анализ их возможностей, а также рассмотрение конкретного примера оптимизации плана товарооборота. В качестве основного инструмента для разработки системы принятия решения в системах оптимизации плана товарооборота использовались методы многокритериальной и эволюционной оптимизации [1].

В рассматриваемой работе задача оптимизации товарооборота рассматривается как многокритериальная оптимизационная задача с применением ряда локальных примеров, характеризующих качество производственного процесса. Рассмотрим основные из них.

1.Величина прибыли, получаемой предприятием, определяется с помощью соотношения:

$$F_1(X) = \sum_{j=1}^{n} C_j^{(1)} X_j \longrightarrow \max, X_j \in Q = \{1,2...n\}, \quad (1)$$

где Q – множество ассортимента продукции, выпускаемой предприятием.

2.Показатель качества выпускаемой продукции задается соотношением:

$$F_2(X) = \sum_{i=1}^{S} P_i * X_i \longrightarrow \max. \quad (2)$$

Для конкретного примера значение функции цели примет вид:

$$F_2(X) = 10x_1 + 12x_2 + 8x_3 + 16x_4 + 11x_5 \longrightarrow \max.$$

3. Минимизация себестоимости:

$$F_3(X) = \sum_{i=1}^{S} C_i * X_i \longrightarrow \min. \quad (3)$$

4. Минимизация производственного времени:

$$F_4(X) = \sum_{i=1}^{S} T_i * X_i \longrightarrow \min. \quad (4)$$

Таким образом, задача исследования может быть сформулирована следующим образом.

Определить оптимальный план $X^{(0)} \in Q$ производства продукции, удовлетворяющий указанным критериям (1) – (4).

Ограничениями на выпуск продукции различных видов служат производственные ресурсы $b_1, b_2, \ldots b_m$. С учетом норм затрат ресурсов на единицу каждого типа продукции указанные ограничения можно записать в виде:

$$AB \le B^T. \quad (5)$$

$$x \ge 0; \quad (6)$$

$$B^T = \{b_1, b_2, ..., b_m\}, \quad (7)$$

$A=\{a_{ij}\}$, i=1, m, j=1, n-матрица норм затрат ресурсов на единицу каждого типа продукции.

Выражение (4) описывает условия, которые необходимо учесть в годовой производственной программе. Строкам матрицы А соответствуют все виды ресурсов (группы машин, запасы материалов), рассматриваемые в задачах. Соответствующим строкам матрицы А компоненты вектора В указывают ограничения видов ресурсов или объёмов производства, которые установлены для годовой производственной программы предприятия. Неравенство (5) представляет собой обычные условия неотрицательности, вытекающие из смысла задачи.

Общая постановка задачи формулируется следующим образом: требуется определить вектор $X^{(0)}$, обеспечивающий компромисс между величиной прибыли (1), валовым объемом (2) и минимальной себестоимостью (3), который удовлетворяет ограничениям минимизации производственного времени (4).

Один из возможных методов решения состоит в том, что вначале находится три оптимальных вектора производства $x^{(i)}$, i=1;4, каждый из которых соответствует одному из локальных критериев (1) – (4). Затем определяется выпуклая линейная комбинация $X^{(0)}$, представляющая собой оптимальную (компромиссную) программу относительно указанных критериев:

$$X^{(0)} = v_1 x^{(1)} + v_2 x^{(2)} + v_3 x^{(3)}; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{3} v_1 = 1, v \ge 0. \quad (9)$$

Для решения задачи такого типа, с учетом всех особенностей поставленной задачи, строим математическую модель, используя (5), где x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – количество единиц изделий вида T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 соответственно. На основе этого составим целевую функцию:

$$P(X) = 40x_1 + 15x_2 + 10x_3 + 35x_4 + 70x_5 \longrightarrow \max$$

при условиях:

$$19x_1 + 13x_2 + 8x_3 + 5x_4 + 11x_5 < 6000000;$$

$$75x_1 + 70x_2 + 25x_3 + 40x_4 + 35x_5 < 400000;$$

$$15x_1 + 21x_2 + 15x_3 + 10x_4 + 10x_5 < 900000;$$

$$85x_1 + 115x_2 + 140x_3 + 60x_4 + 68x_5 < 600000;$$

$$100x_1 + 75x_2 + 85x_3 + 25x_4 + 75x_5 < 300000;$$

$$x_1 > 600,\ x_3 > 750,\ x_4 > 500,\ 0 \ge x \ge 1.5;$$

т.е. у нас имеются ограничения по двум параметрам: по объему ресурсов (нельзя использовать больше ресурсов, чем у нас есть) и по минимальному плану товарооборота по той группе товаров (вероятно, что при меньшем товарообороте мы понесем убытки).

Если решать задачу «вручную», то необходимо привести систему ограничений к каноничному виду, т.е. представить в виде уравнений:

$$19x_1+13x_2+8x_3+5x_4+11x_5+x_6=6000000;$$

$$75x_1+70x_2+25x_3+40x_4+35x_5+x_7=400000;$$

$$15x_1+21x_2+15x_3+10x_4+10x_5+x_8=900000;$$

$$85x_1+115x_2+140x_3+60x_4+68x_5+x_9=600000;$$

$$100x_1+75x_2+85x_3+25x_4+75x_5+x_{10}=300000;$$

$$x_1\text{-}x_{11}=600,\ x_3\text{-}x_{12}=750,\ x_4\text{-}x_{13}=500,\ 0\geq x\geq 1.13;$$

Для решения этой задачи воспользуемся симплекс-методом [2]. По этой системе составляем симплекс-таблицу и решаем ее. Но в силу того, что наша модель будет рассчитана с помощью программной реализации, систему ограничений в каноническом виде и симплекс-таблицу строить не надо, так как программа их построит сама.

3. Анализ используемых методов решения

Для анализа результатов исследуемой задачи воспользуемся методами эволюционной и методами многокритериальной оптимизации [3].

Методы многокритериальной оптимизации. Поиск оптимального взаимодействия производится с помощью принципов решения многокритериальных задач. Критерии задачи не однородны, так как часть критериев оптимизации стремится к минимальному значению, а один – к максимальному. Приведенные критерии оптимизации находятся в существенном экономическом противоречии, так как с сокращением сроков поставки товара от производителя к потребителю возрастают транспортно-заготовительные издержки и затраты организации, связанные с хранением.

В качестве критериев оптимизации принимаются три параметра. Критерий оптимизации издержек:

$$F_1(X)=\sum_{i-1}^{N}\sum_{j=1}^{N}c_{i,j}*x_{i,j}\longrightarrow\min. \qquad (10)$$

Критерий оптимизации сроков поставок:

$$F_2(X)=\sum_{i-1}^{N}\sum_{j=1}^{N}t_{i,j}*x_{i,j}\longrightarrow\min. \qquad (11)$$

Критерий оптимизации коэффициентов загрузки:

$$F_3(X)=\sum_{i-1}^{N}\sum_{j=1}^{N}k_{i,j}*x_{i,j}\longrightarrow\min. \qquad (12)$$

В общем случае при взаимодействии элементов в рамках одного технологического процесса, а также при движении продукции по каналам распределения необходимо учитывать следующие основные критерии:

1. Снижение затрат на товародвижение.
2. Сокращение затрат времени на доставку продукции.
3. Учет загрузки складского хозяйства и транспорта.

В статье используется многокритериальная модель, которая учитывает перечисленные выше критерии. Рассматривается вертикальная интеграция без вступления в какие-либо альянсы. Взаимодействие начинается лишь при условии, что оно выгодно финальному звену – торговой компании. На практике отдельные звенья товаропроводящей сети имеют свои интересы, однако в критериях или ограничениях они не учитывались, так как рассматривается движение сквозного материального потока.

Методы эволюционной оптимизации:

1.Максимизация прибыли.

Расчет показателей качества продукции относится к задачам линейной оптимизации. В общем виде ее можно записать так:

$$F_1(X)=\sum_{i=1}^{S}(P_i-C_i)*X_i\longrightarrow\max. \qquad (13)$$

Эту задачу обычно решают симплекс-методом [2].

Идея симплекс-метода состоит в последовательном продвижении по базисам опорных планов вплоть до получения оптимального решения или доказательства неразрешимости задачи. При этом значение целевой функции должно увеличиваться.

2.Определение валового объема выпускаемой продукции.

Для решения этой задачи с использованием генетического алгоритма в качестве общей математической модели применяют формулу:

$$F_2(X)=\sum_{i=1}^{S}P_i*X_i\longrightarrow\max. \qquad (14)$$

Для конкретных значений функция цели примет вид:

$$F_2(X)=10x_1+12x_2+8x_3+16x_4+11x_5\longrightarrow\max.$$

3. Минимизация себестоимости, которая имеет общий вид:

$$F_3(X)=\sum_{i=1}^{S}C_i*X_i\longrightarrow\min. \qquad (15)$$

Запишем эту функцию с конкретными значениями:

$$F_3(X)=3x_1+4x_2+4x_3+2x_4+x_5\longrightarrow\min.$$

4. Минимизация производственного времени:

$$F_4(X)=\sum_{i=1}^{S}T_i*X_i\longrightarrow\max, \qquad (16)$$

или в численном виде:

$$F_4(X)=2x_1+2x_2+x_3+x_4+3x_5\longrightarrow\max.$$

Чтобы достичь поставленной задачи, мы должны найти оптимальное решение для каждой функции цели. Для этого будем использовать вместо традиционных

методов оптимизации, таких как математическое программирование, методы эволюционной оптимизации.

Остановимся на применении генетических алгоритмов следующих видов.

Для решения задачи, представленной моделями (1) – (2), используем генетический алгоритм типа метода муравьиных колоний [3].

Основу поведения муравьев составляет самоорганизация, механизмы которой обеспечивают теоретически оптимальное поведение. Принципы его состоят в достижении системой некоторой глобальной цели в результате низкоуровневого взаимодействия ее элементов.

Муравьиный алгоритм применяется следующим образом: в начальный момент времени, в который входит эта функция базы знаний, находится количество муравьев, равное числу кластеров, куда входит эта функция. При этом каждый муравей имеет строгую принадлежность тому кластеру, из которого он начал свое движение. Принадлежность кластеру проявляется в том, что муравей более восприимчив к феромону, оставленному муравьями из «своего» кластера:

$$F_1(X) = \sum_{j=1}^{n} C_j^{(1)} X_j \longrightarrow \max, X_j \in Q = \{1,2...n\}, \quad (17)$$

где Q – множество видов продукции, выпускаемых предприятием.

Для конкретных значений функция цели примет вид:

$$F_2(X) = 10x_1 + 12x_2 + 8x_3 + 16x_4 + 113x_5 \longrightarrow \max .$$

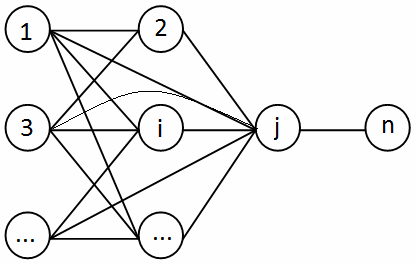
Муравьиный алгоритм применяется на двух этапах анализа знаний системы. Вначале он запускается на пространственной (многомерной) модели базы, после чего на основании его работы делаются первоначальные выводы. Затем модель упрощается: удаляются некоторые связи между функциями, отдельные функции объединяются в более крупные структурные единицы, структура знаний отображается на двумерное пространство. После этого 1 алгоритм запускается на упрощенной плоской модели знаний.

Для решения задач, представленных моделями (3) – (4), воспользуемся генетическими алгоритмами (ГА) [4]. Оптимизировать работу нефтяных трубопроводов; распределять инструменты в металлообрабатывающих цехах; осуществлять оптимизации – основная область применения ГА. Генетические алгоритмы имитируют процесс естественного отбора в природе. Для решения задачи, более оптимальной с точки зрения некоторого критерия, все решения описываются набором чисел или величин нечисловой природы. Поиск оптимального решения похож на эволюцию популяции и видов, которые представлены наборами их хромосом. В этой эволюции действия механизма, представленного на рисунке, можно выделить следующие элементы:

– отбор сильнейших наборов хромосом, которым соответствуют наиболее оптимальные решения;

- скрещивание – получение новых индивидов при помощи смешивания хромосом наборов отобранных индивидов;

- мутации – преобразование хромосомы, случайное изменение одного или нескольких генов (чаще – одного).



Графическое представление взаимодействия элементов

В результате смены поколений вырабатывается такое решение поставленной задачи, которое уже нельзя дальше улучшать.

Для рассмотрения данной задачи используем минимизацию себестоимости:

$$\sum_{i=1}^{S} C_i * X_i \longrightarrow \min .$$

4. Выводы

Изучена задача по оптимизации плана товарооборота в системах принятия решений. Детально проработана типичная модель этого вида задач. Рассмотрена детерминированная задача. Построена модель оптимального плана товарооборота. Для решения применялся симплекс-метод с искусственным базисом.

Можно сказать, что линейное программирование применимо для построения математических моделей тех процессов, в основу которых положена гипотеза линейного представления реального мира: экономических задач, задач управления и планирования, оптимального размещения оборудования и пр. Симплекс-метод линейного программирования отлично подошел для решения задачи оптимизации товарооборота в маркетинговой деятельности предприятия.

Результатом проведенных исследований является решение оптимизационной задачи при планировании товарооборота с применением различных методов эволюционной и многокритериальной оптимизации, а также использование генетических алгоритмов в управлении запасами.

Результатом применения предложенных методов является нахождение оптимальных показателей в системах принятия решений при планировании товарооборота в маркетинговой деятельности предприятия.

Литература: 1. *Гвоздинський А.М.* Методи оптимізації в системах прийняття рішень: навч. посібник / А.М. Гвоздинський, Н.А. Якімова, В.О. Губін. Харків : ХНУРЕ, 2006. 327 с. **2.** *Бондаренко М.Ф.* Оптимізаційні задачі в системах прийняття рішень: підручник / М.Ф. Бондаренко, А.М. Гвоздинський. Харків: ХТУРЕ, 1998. 216 с. **3.** *Гвоздинский*

А.Н. Применение генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач / А.Н. Гвоздинский, Е.Г. Климно // Харьков: Радиоэлектроника и информатика. 2001. №2. С.109-113. **4.** *Гвоздинский А.Н.* Применение методов эволюционной оптимизации для решения задач производственного планирования / А.Н. Гвоздинский, В.А. Малышкин, С.В. Ткачев // АСУ и приборы автоматики. 2011. №154. С. 97-102.

Поступила в редколлегию 27.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Куземин А.Я.

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Академика Ляпунова, 7, кв.9, тел. 702-38-23.

Руднев Вячеслав Константинович, студент группы КН-10-5 кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: методы принятия решения в системах искусственного интеллекта. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Ленина, 19, кв.80, тел. (093)-764-32-24.

УДК519.7

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

ГВОЗДИНСКИЙ А.Н., КОЗЛОВА А.Е.

Предлагается подход к решению проблем управления запасами, основанный на эволюционных методах, возникающих при поиске рационального плана раскроя. Демонстрируется возможность сравнительно легкой адаптации алгоритма к различным вариантам постановки задачи. В качестве объектов исследования рассматриваются системы интеллектуального анализа данных и объекты производственной деятельности предприятий и фирм различного назначения. Рассматривается задача управления запасами в системах производственного планирования на примере задачи оптимального раскроя ресурсов.

1. Введение

В данной работе приводится формальная постановка задачи, на решение которой изначально был направлен первый генетический алгоритм (ГА), и общая схема работы самого алгоритма. Описываются составляющие ГА и их назначение. Для решения конкретной задачи разработчик, исследователь может сконструировать свою конкретную схему работы генетического алгоритма из его составляющих. При этом разработчик руководствуется особенностями предметной области, формализации задачи, структурой используемых данных, возможно, даже результатами тестирования других схем ГА. Разумеется, в строении всех таких алгоритмов есть общие элементы и последовательность действий, которые являются основой генетических алгоритмов и отличают их от многих других. Данная статья посвящена опыту конструирования конкретных вариантов ГА.

2. Анализ методов эволюционной оптимизации

Средства эволюционной оптимизации включают следующие методы: нейронные сети, деревья решений, генетические алгоритмы, а также их комбинации [1].

Нейронные сети относят к классу нелинейных адаптивных систем, строением они условно напоминают нервную ткань из нейронов. Это набор связанных друг с другом узлов, получающих входные данные, которые осуществляют их обработку и вырабатывают на выходе определенный результат. На узлы нижнего слоя подаются значения входных параметров, на их основе производятся вычисления, необходимые для принятия решений, прогнозирования развития ситуации и т.д. Эти значения рассматривают как сигналы, которые передаются в вышележащий слой, усиливаясь или ослабляясь в зависимости от числовых значений (весов), приписываемых межнейронным связям. На выходе нейрона самого верхнего слоя вырабатывается значение, которое рассматривается как ответ, реакция всей сети на введенные начальные значения. Так как каждый элемент нейронной сети частично изолирован от своих соседей, у таких алгоритмов имеется возможность для распараллеливания вычислений. Нейроны сети обрабатывают входные данные, для которых известны и значения входных параметров, и правильные ответы на них. Обучение состоит в подборе весов межнейронных связей, которые обеспечивают наибольшую близость ответов сети к известным правильным ответам. После обучения на имеющихся данных сеть готова к работе и может быть использована для построения прогнозов поведения объекта в будущем. Нейронные сети используются для решения задач прогнозирования, классификации или управления.

Достоинство – сети могут аппроксимировать любую непрерывную функцию, нет необходимости заранее принимать какие-либо предположения относительно модели. Исследуемые данные могут быть неполными или зашумленными. Удобны при работе с нелинейными зависимостями.

Недостаток – необходимость иметь большой объем обучающей выборки. Окончательное решение зависит от начальных установок сети. Данные должны быть обязательно преобразованы к числовому виду. Полученная модель не объясняет обнаруженные знания.

Деревья решений используют разбиение данных на группы на основе значений переменных. В результате получается иерархическая структура операторов «Если..., то...», которая имеет вид дерева. Для классификации объекта или ситуации нужно ответить на вопросы, стоящие в узлах этого дерева, начиная от его корня. Если ответ положительный, переходят к правому узлу следующего уровня, если отрицательный – к левому узлу и т.д. Заканчивая ответы, доходят до одного из конечных узлов, где указывается, к какому

классу надо отнести рассматриваемый объект. Деревья решений предназначены для решения задач классификации и поэтому весьма ограничено применяются в области финансов и бизнеса.

Достоинство – простое и понятное представление признаков для пользователей. В качестве целевой переменной используются как измеряемые, так и неизмеряемые признаки – это расширяет область применения метода.

Недостаток – проблема значимости. Данные могут разбиваться на множество частных случаев, возникает "кустистость" дерева, которое не может давать статистически обоснованных ответов. Полезные результаты получают только в случае независимых признаков.

Генетические алгоритмы на данный момент являются наиболее известным представителем эволюционных методов оптимизации. Они содержат все основные генетические операции. ГА получены в процессе обобщения и имитации в искусственных системах свойств живой природы:

– приспосабливаемость к изменениям среды;

– естественный отбор;

– наследование потомками наиболее «ценных» свойств родителей.

С помощью ГА можно улучшать работу поисковых систем, которые требуют обработки больших массивов информации; оптимизировать работу нефтяных трубопроводов; распределять инструменты в металлообрабатывающих цехах; осуществлять оптимизацию профилей балок в строительстве. Решение задач комбинаторной оптимизации является одной из основных областей применения ГА. Генетические алгоритмы имитируют процесс естественного отбора в природе. Для нахождения более оптимального критерия все решения описываются набором чисел или величин нечисловой природы. Поиск оптимального решения похож на эволюцию популяции индивидов, которые представлены наборами их хромосом. В этой эволюции действуют три механизма:

– отбор сильнейших наборов хромосом, которым соответствуют наиболее оптимальные решения;

– скрещивание – получение новых индивидов при помощи смешивания хромосомных наборов отобранных индивидов;

– мутации – преобразование хромосомы, случайное изменение одного или несколько генов (чаще – одного).

Наиболее популярное приложение генетического алгоритма – оптимизация многопараметрических функций. Реальные задачи формируются как поиск оптимального значения сложной функции, зависящей от некоторых n – входных параметров. Сила ГА – в способности манипулировать одновременно многими параметрами. В одних случаях получено точное решение функции, в других - решением считается любое значение, лучшее некоторой заданной величины.

Чтобы реализовать генетический алгоритм, надо сначала выбрать структуру для представления этих решений. Структура данных ГА состоит из одной или большего количества хромосом. После проведенных в ходе применения ГА операций осуществляем декодирование и получаем подмножество значений, которые соответствуют субоптимальному решению задачи. Генетический алгоритм оптимизации является множественно-вероятностным, т.е. он позволяет находить множество значений, которые примерно соответствуют искомому условию. Это существенно для решения задач с неявно выраженными максимумами или минимумами.

Существует множество модификаций генетического алгоритма, которые отличаются методами отбора, скрещивания, хромосомной кодировки. Традиционный (основной) ГА работает с двоичной строкой определенной длины, использует следующие свойства:

– на каждом поколении реализуется отбор пропорционально функции приспособленности;

– одноточечный кроссовер (скрещивание);

– мутация.

Как метод оптимизации ГА обладает внутренним параллелизмом: различные существенные комбинации генов отыскиваются параллельным образом, одновременно для всех комбинаций. Чем меньше комбинация, тем легче ее определить. В связи с тем, что алгоритм в процессе поиска использует некоторую кодировку значений, а не сами значения, он эффективно может применяться для решения задач дискретной оптимизации, которые могут быть определены как на числовых, так и на конечных множествах произвольной природы. Так как в качестве информации об оптимизируемой функции для работы алгоритма используются лишь значения в рассматриваемых точках пространства поиска, то данный алгоритм применим к широкому классу функций. Генетический алгоритм успешно справляется с поставленной задачей даже там, где не существует общеизвестных алгоритмов решения или высока степень априорной неопределенности.

Достоинство – метод удобен для решения различных задач комбинаторики и оптимизации, предпочтителен больше как инструмент научного исследования.

Недостаток – возможность эффективно сформулировать задачу, определить критерий отбора хромосом, и сама процедура отбора является эвристической и под силу только специалисту. Постановка задачи в терминах не дает возможности проанализировать статистическую значимость получаемого с их помощью решения.

3. Формулировка задачи и построение математической модели

Для построения математической модели за основу возьмем один из методов интеллектуального анализа данных – генетические алгоритмы, и на их базе будем решать поставленную задачу.

Целью работы является исследование деятельности предприятия, составление математической модели задачи в классе экстремальных задач и определение на основе решения оптимальной стратегии работы фирмы на определенный срок, а также анализ возможных колебаний затрат и цен реализации, которые не приведут к изменению стратегии.

Формально, *генетический алгоритм* – это любой алгоритм поиска приближенного решения поставленной задачи, построенный по *схеме генетического алгоритма.*

Шаг 0. Создать случайную начальную популяцию $\{S_k(0)\}$.

Шаг 1. Вычислить приспособленность $f(S_k)$ каждой особи (S_k) популяции $\{S_k(t)\}$.

Шаг 2. Производя отбор особей из $\{S_k(t)\}$ в соответствии с их приспособленностями $f(S_k)$ и применяя генетические операторы (скрещивания и мутации) к отобранным особям для получения потомства, сформировать популяцию следующего поколения $\{S_k(t+1)\}$.

Шаг 3. Повторять шаги 1, 2 для $t = 0,1,2,...$ до тех пор, пока не выполнится некоторое условие окончания эволюционного поиска (прекращается рост максимальной приспособленности в популяции, число поколений t достигает заданного предела).

Возможны различные варианты генетического алгоритма, которые отличаются по схемам отбора особей из текущего поколения в новое, операторам скрещивания и мутации хромосом особей, по форме представления хромосом. Традиционный вид генетического алгоритма базируется на следующей частной схеме:

– цепочки символов в хромосомах бинарные (символы S_{kj} принимают значения 0 либо 1), длина цепочек постоянна (N = const);

– метод отбора – пропорционально-вероятностный;

– скрещивания производятся по схеме одноточечного.

Рассмотрим распределение ресурсов на примере решения задачи оптимального раскроя [2].

На заготовочный участок радиоцеха поступили листы фольгированного гетинакса размером $l_1 x l_2$ мм. Его необходимо разрезать на заготовки для печатных плат: $П_1$ размером $l_3 x l_4$ мм, $П_2$ – $l_5 x l_6$ мм, $П_3$ – $l_7 x l_8$ мм, $П_4$ – $l_9 * l_{10}$ мм, необходимость в которых $П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$ единиц соответственно.

Построить модель, на ее основании составить экстремальную задачу, решение которой дает минимальное количество разрезанных выходных листов. Найти решение задачи в условиях минимизации отходов раскроя. Предусмотреть возможность максимизации количества комплектов печатных плат при условии выполнения комплектности $П_1:П_2:П_3:П_4==k_1:k_2:k_3:k_4$ (таблица).

Параметры	Значение
l_1	136
l_2	158
l_3	92
l_4	36
l_5	51
l_6	88
l_7	46
l_8	40
l_9	50
l_{10}	50
$П_1$	270
$П_2$	200
$П_3$	310
$П_4$	90
Компетентность	3:2:1:5

Исходные данные: $l_1 x l_2$, $П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$, k_1, k_2, k_3, k_4.

Используемые переменные: $П_i = a_i$ – необходимое количество заготовок i-го типа; C_j – отход при раскрое единиц исходного материала j-м способом; $j = \overline{1,m}$ – количество вариантов раскроя; a_{ij} – количество заготовок i-го типа $(i = \overline{1,4})$, полученных при раскрое единицы исходного материала j-м вариантом; i – вид заготовки; q – количество изделий ($П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$); a – количество разрезанных листов; K – количество типов листов, поступающих на раскрой $(K = 1)$; l_i – компетентность-количество заготовок i-го вида в одном комплекте; x_j –количество единиц исходного материала, который раскраивается j-м вариантом;

4. Формализация исследуемой задачи

Сформируем ограничения для данной задачи:

$$\sum_{j=1}^{m} x_j = a, \qquad (1)$$

$$x_j \geq 0, j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{m} a_{ij} x_j = \Pi_i . \quad (3)$$

Функция цели имеет вид:

$$F(x) = \sum_{j=1}^{m} x_j \to \min , \quad (4)$$

$$F(x) = a \to \min . \quad (5)$$

Функция цели имеет вид:

$$\sum_{j=1}^{n} C_j x_j \to \min . \quad (6)$$

Необходимо предусмотреть возможность максимизации количества комплектов печатных плат при условии выполнения комплектности $\Pi_1:\Pi_2:\Pi_3:\Pi_4= =k_1:k_2:k_3:k_4$.

Функция цели имеет вид:

$$F(x) = X \to \max , \quad (7)$$

где $X = \frac{1}{\Pi_1 k_1}(\sum_{j=1}^{m} a_{j1} x_j)$.

А ограничения (3) примут следующий вид:

$$\sum_{j=1}^{p} a_{j1} x_j = \Pi_1 k_1 X , \quad \sum_{j=1}^{p} a_{j2} x_j = \Pi_2 k_2 X ,$$
$$\sum_{j=1}^{p} a_{j3} x_j = \Pi_3 k_3 X , \quad \sum_{j=1}^{p} a_{j4} x_j = \Pi_4 k_4 X . \quad (8)$$

5. Алгоритмы решения исследуемых задач

Для начала рассмотрим решение данной задачи на основе методов линейного программирования [3].

Алгоритм симплекс-метода разделяют на два этапа нахождения: начального опорного плана задачи и оптимального плана, или установление факта неограниченности целевой функции на множены планов задачи.

Алгоритм симплекс-метода применяется лишь для канонической формы задач, поэтому задачу в других формах нужно изображать также в канонической форме.

Общая постановка задачи линейного программирования – определить величины $x_j \geq 0, j = \overline{1, n}$, которые максимизируют линейную форму

$$Z = \sum_{j=1}^{n} C_j x_j \to \max \quad (9)$$

при условиях существования ограничений вида

$$AX \leq B , \quad (10)$$

$$A = \| a_{ij} \|_{mn}, X = \| x_1, x_2, ..., x_n \|, B = \| b_1, b_2, ..., b_m \|.$$

Симплекс-метод применяется лишь для канонической формы задачи линейного программирования, поэтому, чтобы начать решение с помощью симплекс-метода, необходимо превратить систему неравенств в эквивалентную систему уравнений путем введения новых неотъемлемых переменных $x_{n+1}, x_{n+2}, ..., x_{n+m}$. Вследствие этого система приобретает вид:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ...a_{1n}x_n + x_{n+1} = b_1 ,$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + ...a_{2n}x_n + x_{n+1} = b_2 ,$$
$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (11)$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + ...a_{mn}x_n + x_{n+1} = b_m .$$

Анализ методов традиционной оптимизации показывает, что имеется ряд недостатков, связанных с ограничением на размерность задач. Поэтому предлагается использовать генетические алгоритмы для решения совместной задачи.

Требуется подобрать алгоритм, с помощью которого можно эффективно решить задачу. Был выбран генетический алгоритм по следующим причинам:

во-первых, задача раскроя любого вида является ОТ-полной;

во-вторых, время получения решения для заказчиков предполагается порядка десятки секунд для размерности 100, это достаточно высокие требования ко времени;

Для реализации ГА особью предлагается считать любое размещение заданных предметов на полосе, удовлетворяющее условию задачи. Пусть все предметы некоторым образом пронумерованы. Тогда пусть хромосома — это перечисление всех номеров предметов в некотором порядке, отражающем их размещение. Физический внешний вид особи, конкретные координаты размещения предметов на полосе можно получить, выложив предметы на полосу в порядке их перечисления в хромосоме по правилам переработки — декодирования. Эти правила называются процедурой декодирования, или декодером. Различные декодеры могут работать по разной схеме, но суть одна — выложить предметы на полосу согласно некоторому правилу в порядке, указанном в хромосоме. Правила являются эвристическими и содержательно строятся так, чтобы размещение было по возможности плотным.

В качестве критерия оптимизации, критерия оценки пригодности особи в поставленных задачах рассматривается длина полосы, занятая размещением предметов.

Пустоты учитываются и нумеруются, начиная с числа, на единицу большего количества предметов, но со знаком минус. Декодер, работающий с такой структурой данных, называется блочным. Размещение представлено в виде совокупности кортежей (блоков): (1., 2., ...)x, где j = 1,2,...

А именно: (1; 2) x_1, (3; 4; -9; 2) x_2, (3; 5; 6) x_3, (7; -10; 5; 6) x_4, (7; 8; 6) x_5, (-11) x_6. Длина занятой части полосы $M = \hat{x}$. Одна из особенностей блочного декодера в том, что размещая очередной предмет, он сначала проверяет все образовавшиеся ранее пустоты, подойдут ли они по размеру, для достижения большей плотности размещения (рис.1).

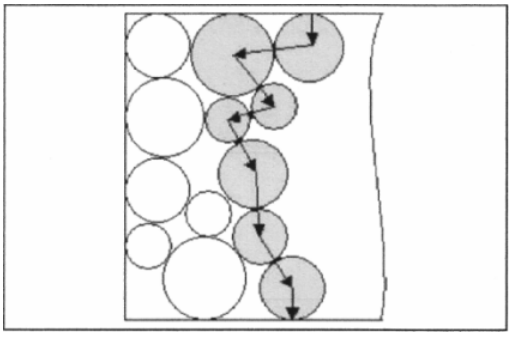


Рис. 1. Схема края размещения

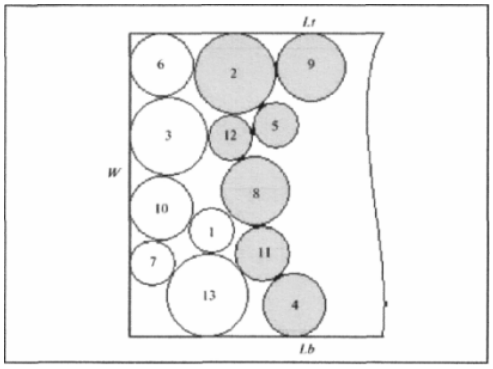


Рис. 2. Формальная запись края размещения

Для лучшего описания понятия края упаковки можно провести физическую аналогию. Пусть торец полосы W – дно двумерного стакана, нальем в него воду. Все хотя бы частично намокшие предметы – это край полосы (рис.2).

При помощи специальной структуры данных краевой декодер хранит информацию о крае текущего размещения и располагает каждый следующий предмет вплотную к краю, минимизируя общую занятую предметами длину полосы.

Для решения задачи предлагается модификация генетического алгоритма, использующая процедуру декодирования как параметр. Сам генетический алгоритм (т.е. схема его работы, смена поколений), структура хромосомы, операторы мутации, скрещивания, селекции не чувствительны к геометрии размещаемых предметов. Например, оператор мутации случайным образом переставляет два номера предметов в хромосоме. Оператор скрещивания двух хромосом порождает двух потомков. Начальный участок дочерней хромосомы совпадает со случайным участком хромосомы одного родителя, а конец состоит из оставшихся предметов, перечисленных в том порядке, в котором они следуют в хромосоме другого из родителей.

Например, оператор скрещивания (для случайных параметров p = 3, q = 4) для родителей S_{p1} = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) и S_{p1} = (4, 7, 9,1, 2, 5, 3, 8, 6) порождает потомка S_{c1} = (3, 4, 5, 6, 7, 9, 2, 8) и для тех же родителей (для удобства понимания по-другому записанных) S_{p2} = (4, 7, 9,1, 5, 3, 8, 6) и S_{p2} = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) – потомка S_{c2} = (9, 1, 2, 5, 3, 4, 6, 7, 8). Оператор мутации (для случайных параметров a = 2, b = 7) исходную особь S = (9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1) преобразует в особь вида S_m = (9,3, 7, 6, 5,4, 8, 2, 1).

Генетический алгоритм показал, что оценочная полиномиальная сложность алгоритма и относительно невысокие времена работы программы не зависят от типа задачи. В то же время оценочная сложность блочного декодера пропорциональна квадрату размерности задачи (числу предметов), а краевого — линейно зависит от размерности.

Разработанный алгоритм ориентирован на расширение и модификацию. Смена декодера позволяет решать задачу раскроя полубесконечной полосы как на прямоугольные, так и на круглые предметы. Предположительно, если воспользоваться таким эвристическим приемом, как годограф Хэкманна, в качестве декодера, то тот же алгоритм возможно использовать для раскроя полубесконечной полосы на предметы нерегулярной формы.

Обе изначально поставленные задачи раскроя предполагают размещение предметов не на полубесконечной полосе, как обсуждалось при формализации задач, а на наборе прямоугольных листов. Данный алгоритм был модифицирован и для решения задач раскроя в таких, действительно прикладных, а не абстрактных постановках.

В реальном производстве, например, металлургическом, все листы имеют одинаковую ширину. Это выгодное обстоятельство дает возможность не рассматривать набор отдельных листов, а условно разбить на них непрерывную полосу. Предложено оставить в математической постановке задачи полубесконечную полосу, но добавить ограничение: предметы не должны пересекать границы между листами.

При модификации алгоритма остались неизменными все генетические операторы и сама схема работы генетического алгоритма.

6. Выводы

Исследованы проблемы и существующие методы управления запасами на предприятиях, разработана модель объекта управления и процессов управления. Выявлены наиболее значимые, с точки зрения повышения эффективности, процессы принятия решений в

системе управления запасами. Исследованы методики поддержки принятия решений в процессах управления поступлением, хранением ресурсов, основанных на предложенной модели расчета затрат. Разработана методика принятия решений в целях оптимизации системы управления запасами материально-технических ресурсов, используемых на предприятиях. Проведен анализ эффективности разработанной методики управления запасами;

Научная новизна исследования заключается в обосновании экономического механизма управления запасами материально-технических ресурсов и разработке методического обеспечения процесса принятия решений по оптимизации объемов запасов.

Основными результатами исследования являются: обоснование места, роли и рациональной структуры запасов в системе планирования сбытовой деятельности предприятия в современных условиях; разработка концептуальных подходов к решению оптимизационных задач в области управления запасами материально-технических ресурсов, использующих инструментарий анализа и процесса принятия решений; определение факторов стратегии управления запасами, основанных на различных параметрах системы закупок, таких как периодичность заказа, постоянная партия объема пополнения заказа, уровень восполнения запаса. Предложена методика анализа состояния запасов, основанная на анализе изменения структуры и объема затрат предприятия, позволяющая контролировать состояние запасов в реальном режиме времени.

Практическая значимость определена возможностью применения разработанной методики в области управления запасами на малых предприятиях, использующих в производственном процессе не значительное количество материальных ресурсов, как по номенклатуре, так и по объему. Разработанные теоретические и методические положения доведены до практических моделей и алгоритмов, в результате чего появляется возможность дать количественное обоснование размеров партий заказов, закупок и продаж, повышается достоверность расчетов.

Литература: 1. *Гвоздинский А.Н.* Методы аналитической обработки информации / А.Н. Гвоздинский, Е.Г. Климко // Радиоэлектроника и информатика. 2000. №4. С.111-112. **2.** *Гвоздинский А.Н.* Принципы и методы оптимизации в современных организационных системах управления // Х: Бионика интеллекта, 2013. №2(81). С.66-70. **3.** *Гвоздинський А.М.* Методи оптимізації в системах прийняття рішень // Х: ХНУРЕ, 2006. С.327.

Поступила в редколлегию 23.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Куземин А.Я.

Гвоздинский Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: оптимизация процедур принятия решений в сложных системах управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Академика Ляпунова, 7, кв.9, тел. 702-38-23.

Козлова Алина Евгеньевна, студентка группы КН-10-4 кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: методы принятия решения в системах искусственного интеллекта. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Героев Сталинграда, кв.47, тел. (050)-61-30-071.

РЕФЕРАТИ

УДК 536.245

Розрахунок та моделювання температурного режиму в гелієвому середовищі / А.А. Бєляєв, Олександр О. Луханін, Олексій О. Луханін, Є.О. Споров, Д.В. Федорченко, М.А. Хажмурадов // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 3-8.

З використанням пакету програм SolidWorks з модулем SolidWorks Flow Simulation проведено розрахунок процесу нагрівання гелієвого середовища в поляризаторі нейтронів та моделювання розподілення температури й потоків газу в оптичній камері. Показано, що для потужності лазерного випромінювання до 15 Вт необхідна корекція температури вхідного потоку гарячого повітря 0,5°С/Вт. Визначено швидкості конвективних потоків газу в оптичному середовищі при однорідному та односторонньому поглинанні різної потужності світла лазерного випромінювання парами рубідію. При тривалому часі релаксації ядерної поляризації гелію конвективні потоки гелію вносять помітний внесок в швидкість росту поляризації ядер гелію та досягнення нею максимальної величини по всьому об'єму гелієвого середовища.

Табл. 1. Іл. 9. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 536.331

Чисельне моделювання високолокального НВЧ теплового впливу в технології модифікації напівпровідникових тонкоплівкових структур / Ю.О. Гордієнко, М.І. Пятайкіна, С.Ю. Ларкін, О.В. Поліщук, О.М. Проказа, М.І. Сліпченко // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 8-13.

Досліджено особливості застосування мікрохвильового випромінювання для високолокального нагріву, відпалу та перелегування напівпровідникових шаруватих структур. Запропоновано варіант НВЧ модифікатора на основі конусного коаксіального зонду. Досліджено вплив електрофізичних та теплових параметрів об'єкта на розподіл тепловиділення та температури в структурі "плівка на підкладці". Представлена кінетика наростання температури на поверхні плівки для різних параметрів матеріалу.

Іл. 9. Бібліогр.: 11 назв.

УДК 621.372

Мікрохвильовий зонд на основі компенсованого нерегулярного закритичного хвилеводу / І.М. Бондаренко, О.В. Галіч // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 14-17.

Досліджено можливості створення мікрохвильових зондових структур на основі нерегулярних закритичних хвилеводів з вставками, які компенсують закритичність. Методом чисельного моделювання досліджені характеристики ряду можливих конфігурацій мікрохвильових зондів на основі прямокутного нерегулярного закритичного хвильоводу з заповненням, що компенсує.

Іл.10. Бібліогр.: 7 назв.

ABSTRACTS

УДК 536.245

Calculation and simulation of the temperature regime in the ^{3}He pumping cell / A.A. Belyaev, Oleksandr O. Lukhanin, Olexiy O. Lukhanin, E.O. Sporov, D.V. Fedorchenko, M.A. Khazhmuradov // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 3-8.

With use of the software package of SolidWorks with the SolidWorks Flow Simulation module we carried out numerical calculation of helium cell heating process in neutrons polarizer and did modeling of temperature and gas streams distribution in the optical pumping chamber. It is shown that the laser pumping power up to 15 W required temperature correction of hot incoming stream air over 0.5єC / W. It was determined the rates of convective gas flows in the optical ^{3}He glass cell during uniform or unilateral of laser light power by rubidium vapor absorption. At long relaxation times of the helium nuclear polarization, convective flows of helium, makes significantly contribution in to the helium nuclei polarization rate growth and polarization reach its maximum value over the entire volume of the helium cell.

Tab. 1. Fig. 9. Ref.: 6 items.

UDC 536.331

Numerical simulation high local microwave heat influence in the technology modification of thin-film semiconductor structures / Ya.E. Gordienko, M.I. Pyataikina, S.Yu. Larkin, A.V. Polischyk, A.M. Prokaza, N.I. Slipchenko // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 8-13.

In the article we indicated specifics of application microwave radiation for high local heating, annealing and doping semiconductor layer structures. We propose release microwave modificator based on a conical probe. We explored influence electrophysical and thermal parameters of object on distribution heat generation and temperature in structure "film on support". Kinetic of increase temperature on surface film for different parameters material was offered.

Fig.9. Ref.: 11 items.

UDC 621.372

Microwave probe on the basis of offset of irregular with the area cutoff waveguide / I.N. Bondarenko, A.V. Galich // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 14-17.

The conducted research for the creation of a microwave probe structures based on the irregular with the area cutoff waveguides with compensating inserts are carried out. Numerical simulation investigated the characteristics of a number of possible configurations of microwave probes on the basis of irregular rectangular waveguide with a compensating filling.

Fig. 10. Ref.: 7 items.

УДК 615.47:616-074

Оптимізація конструкції СВЧ резонаторних датчиків в приладах діагностики гіпертонічних станах / А.Н. Бородкіна, Ю.Е. Гордієнко, М.І. Слипченко // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 17-21.

Проводиться аналіз конструкцій СВЧ резонаторних датчиків в цілях їх оптимізації для отримання найбільш повної інформації про комплексне значенні діелектричної проникності в діапазоні частот релаксації вільної води в біооб'єктах. Аналіз проводиться з використанням результатів розв'язання рівнянь Максвелла для циліндричних областей. Визначаються можливості вдосконалення конструкцій датчиків, що дозволяють при збереженні точності вимірів істотно зменшити обсяги клінічних проб.

Іл. 5. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 621.397

Обчислення координат інфрачервоних спалахів на об'єкті для оцінки його місцезнаходження/ М.А. Ільїн // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 21-24.

Розглянуто метод і алгоритм, який дозволяє уникнути проблеми з перекриттям одного маркера іншим, заснований на ідентифікаційної області маркера.Такий метод дозволяє значно збільшити кількість маркерів у телевізійних системах для збільшення точності реконструкції координат, а також збільшити швидкість обчислення для можливості системі працювати в реальному часі.

Іл. 4. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 338.984:519.6

Застосування методів аналізу ієрархій при виборі засобів телекомунікацій з урахуванням сукупності показників якості/ В.М. Безрук, Ю.В. Скорик // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 25-28.

Розглянуто теоретичні та практичні аспекти порівняльного аналізу і вибору кращого варіанту системи з урахуванням сукупності показників якості на основі методу аналізу ієрархій. Наведено деякі приклади задач аналізу і вибору засобів телекомунікацій.

Табл. 9. Іл. 1. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 681.5; 535.32

Універсальний програмно-апаратний комплекс для автоматизації експериментальних установок / І.В. Коленов // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 29-34.

Розглянута проблема автоматизації лабораторного експерименту, з якою стикається практично кожен експериментатор. Розроблено універсальний комплекс, який складається з трьох основних блоків: інтерфейс шагових двигунів, система збору даних, програмна частина цифрової обробки даних сигналу та клієнтське ПО на ПК. Для зменшення впливу сторонніх шумів на вимірюваний сигнал реалізовано програмний синхронний детектор, який дозволяє вимірювати сигнал з похибкою не більше 1% з співвідношення сигнал/шум -10дБ. Розроблений програмно-апаратний комплекс дозволяє автоматизувати лабораторний експеримент з мінімальними втратами часу, сил та коштів.

Іл. 7. Бібліогр.: 13 назв.

UDC 615.47:616-074

Optimization of Structure of SHF Resonator Sensor for Diagnosis of Hypertensive States / A.N. Borodkina, Yu. E. Gordienko, M.I. Clipchenko / Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 17-21.

In the research paper the analysis of structures of SHF resonator sensors is made in order to optimize to get the fullest information about complex value dielectric penetration in relaxation frequencies of free water in bioobjects. The analysis is made using solving Maxwell equations for cylinder areas. Possibilities of improvements of sensor constructs are explored, which lead to keep accuracy of measurements and reduce number of clinical tests.

Fig. 5. Ref.: 9 items.

UDC 621.397

Calculating the coordinates of infrared light flashes on background illumination / M.A. Ilyin // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 21-24.

In this paper the method and algorithm which avoids problems with overlapping one another marker, based on the identification field marker. This method can significantly increase the number of markers in television systems to increase the accuracy of reconstruction of the coordinates, as well as increase the speed of calculation, to allow the system to operate in real time.

Fig. 4. Ref.: 5 items.

UDC 338.984:519.6

Application of hierarchy analysis method of choice of means for their total telecommunication quality indices / V. M. Bezryk, Y.V. Skoryk // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 25-28.

The paper discusses the theoretical and practical aspects of the comparative analysis and selection of a preferred embodiment of the system taking into account the totality of quality indicators based on the method of analysis of hierarchies. Some examples of problems of analysis and the choice of means of telecommunications.

Tab. 9. Fig. 1. Ref.: 9 items.

UDC 681.5; 535.32

Multipurpose hardware-software complex for experimental installation automation / I.V. Kolenov // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 29-34.

This paper is devoted to the problem of experiment automation which almost each researcher faces. Complex composed of three main blocks: interface for stepper motors, measuring system and software part for data processing and creation of user interface have been designed. For noise reduction a software synchronous demodulator, which provides signal detection with less then 1% error, was developed. Designed system allows efficiently automate laboratory experiment win minimum loss of time and money.

Fig. 7. Ref.: 13 items.

УДК 519.7

Дослідження інтелектуальних методів розв'язання оптимізаційних задач транспортного типу / А.М. Гвоздинський, М.Ю. Обізна // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 35-39.

На основі аналізу оптимізаційних задач взагалі та класу транспортних задач зокрема, зроблений огляд сучасного стану проблеми оптимізації перевезень, а також проаналізовані існуючі алгоритми знаходження оптимального плану перевезень. Також розроблений новий еволюційний метод на базі генетичних алгоритмів, що дозволяє швидше знаходити рішення, а отже може використовуватися на значно більших обсягах даних, а також не потребує значних розрахункових потужностей.

Табл. 1. Бібліогр.:5 назв.

УДК 519.7

Дослідження інтелектуальних методів вибору рішень в системах виробничого планування підприємства / А.М. Гвоздинський, А.Ю. Литвиновський // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 39-44.

Дослідження розглядає шляхи збільшення ефективности процесу регресійного тестування під час функціональної верифікації моделей цифрових приладів за рахунок аналізу корисності індивідуальних тестів з точки зору метрик покриття. Пропонуються процедури виявлення повністю надлишкових або мало ефективних тестів для їх подальшого виключення зі складу або інтеллектуального ранжування.

Табл. 2. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 519.86

Застосування адаптивних моделей для прогнозування рівня доходів малого підприємства / О.Г.Климко, Ю.М. Черниш // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 44-47.

Розглянуто застосування апарату адаптивного моделювання в якості економіко-математичного моделювання економічних показників діяльності малого підприємства. Виконано аналіз динаміки показників за допомогою моделі динамічної регресії та моделі Брауна.

Табл. 5. Іл. 2. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 519.86

Економіко-математичне моделювання основних економічних показників діяльності ПАТ «Укртелеком» / С.А. Щербініна, І.В. Геращенко // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 47-50.

Побудовано моделі множинної лінійної регресії доходу й собівартості наданих послуг у вигляді функціональних залежностей від окремих економічних показників. На їх основі визначено прогнозні значення доходу й собівартості реалізованої продукції на майбутній період для ефективного планування діяльності підприємства.

Табл. 3. Іл. 6. Бібліогр.:8 назв.

UDC 519.7

Evolutional approach to the optimization problems of transport type solving/ A.N. Gvozdinskiy, M.Y. Obizna // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 35-39.

On the basis of the optimization problem analysis an observation of the modern optimization of transportation situations has been made. Present methods of optimization are observed and a new one is created. The new method is based on the evolutional approach and on genetic algorithms which allows to find an optimal solution much faster and thus can be applied on higher data level. Also the created algorithm has lower hardware requirements so it's economically sound.

Tab. 1. Ref.: 5 items.

UDC 519.7

Research of intelligent methods of choice-making in manufacturing systems planning of enterprise / A.M. Gvozdinskiy, A.J. Lytvynovskyy// Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 39-44.

This paper analyzes ways to increase the efficiency of regression testing process within functional verification of digital designs, which are based on coverage impact of individual tests. The research proposes procedures to detect completely redundant tests or inefficient tests that can further be excluded from the suites or ranked accordingly in intellectual manner.

Tab. 2. Ref.: 5 items.

UDC 519.86

Using of adaptive models to predict the income level in small business / H. Klymko, Yu. Chernysh // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 44-47.

The application of adaptive simulation apparatus was considered in the article in order to model economic indexes using in small business. Dynamics of economic indexes was analyzed using model of dynamic regression and model of Brown.

Tab. 5. Fig. 2. Ref.: 5 items.

UDC 519.86

Economic-mathematical modeling of the main economic indicators's activity PJC "ukrtelekom" / S. Shcherbinina, I. Heraschenko // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 47-50.

A model of multiple linear regression of income and the cost of services provided in the form of functional dependencies on certain economic indicators. Based on them, predicted values of income and cost of sales for the next period for the effective planning of the company.

Tab. 3. Fig. 6. Ref.: 8 items.

УДК 81.324: 519.613

Методи ранжування тестів для моделей цифрових систем за гетерогенними метриками покриття /С.А. Зайченко, В.І. Александров, В.В. Білоус, Н.П. Березін // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 51-60.

Розглянуто шляхи збільшення ефективности процесу регресійного тестування під час функціональної верифікації моделей цифрових приладів за рахунок аналізу корисності індивідуальних тестів з точки зору метрик покриття. Запропоновано процедури виявлення повністю надлишкових або мало ефективних тестів для їх подальшого виключення зі складу або інтеллектуального ранжування.

Бібліогр.: 7 назв.

УДК 658.512.011:681.326:519.713

Діагностування HDL-моделей систем на кристалах / Baghdadi Ammar Awni Abbas (Baghdad University), В.І.Хаханов, Є.І. Литвинова, С.О. Зайченко // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 60-68.

Запропоновано технологію діагностування HDL-моделей систем на кристалах, що базується на використанні транзакційного графа. Описано метод діагностування, спрямований на зменшення часу виявлення несправностей і пам'яті для зберігання діагностичної матриці за рахунок формування тернарних відносин між тестом, монітором і функціональним компонентом. Розроблено модель цифрової системи у вигляді транзакційного графа і мультидерева таблиць несправностей, а також тернарні матриці активації функціональних компонентів обраного набору моніторів за допомогою тестових послідовностей. Запропоновано метод аналізу матриці активації для виявлення несправних блоків із заданою глибиною та синтезу логічних функцій для подальшого вбудованого апаратного діагностування несправностей.

Іл. 9. Бібліогр.: 15 назв.

УДК 621.327:681.5

Метод функціонального перетворення чисел з вбудованою інформацією для стеганосистем/ В.В. Бараннік, А.Е. Бекіров, Г.В. Хаханова // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 69-72.

Обґрунтовується необхідність підвищення інформаційної безпеки в системах спеціального призначення на основі методів стеганографії. Проводиться аналіз недоліків існуючих систем безпосереднього стеганографічного вбудовування. Для покращення характеристик існуючих алгоритмів безпосереднього вбудовування вводиться функціонал від числа з вбудованою інформацією. Формулюються вимоги до синтезованого функціоналу від числа з вбудованою інформацією. Для відповідності вимогам візуальної стійкості числа з вбудованою інформацією, стійкості до трансформування і атак сформульовані властивості, якими повинен володіти синтезований функціонал від числа з вбудованою інформацією.

Іл. 1. Бібліогр.: 3 назви.

UDC 681.324: 519,613

Ranking method tests for models of digital systems across heterogeneous metrics coverage/ S.A.Zaichenko, V.I. Alexandrov, V.V. Belousov, N.P. Berezin // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 51-60.

This paper analyzes ways to increase the efficiency of regression testing process within functional verification of digital designs, which are based on coverage impact of individual tests. The research proposes procedures to detect completely redundant tests or inefficient tests that can further be excluded from the suites or ranked accordingly in intellectual manner.

Ref.: 7 items.

UDC 658.512.011:681.326:519.713

Diagnosis of systems-on-chip HDL-models / Baghdadi Ammar Awni Abbas (Baghdad University), V.I. Hahanov , E.I. Litvinova, S.A. Zaychenko // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 60-68.

This article describes technology for diagnosis SoC HDL-models, based on transaction graph. Diagnosis method is focused to decrease the time of fault detection and memory for storage of diagnosis matrix by means of forming ternary relations between test, monitor, and functional component. The following problems are solved: creation of digital system model in the form of transaction graph and multi-tree of fault detection tables, as well as ternary matrices for activating functional components of the selected set of monitors by using test patterns. Development of a method for analysis the activation matrix to detect the faulty blocks with given depth and synthesis logic functions for subsequent embedded hardware fault diagnosis.

Fig. 9. Ref.: 15 items.

УДК 621.327:681.5

The functional number conversion with embedded information. / V. Barannik, A. Bekirov, A. Hahanova // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 69-72.

Reasons for need for increasing of information security in special systems on the basis of steganography methods are carried out. The analysis of existing systems shortcomings of direct steganografic embedding is carried out. For improving of existing algorithms characteristics of direct embedding the functionality from number with embedded information is entered. Requirements to the synthesized functionality from number with embedding information are formulated. For compliance to visual stability requirements o of number with embedded information, resistance to transformation and attacks is formulated properties which the synthesized functionality from number with embedded information shall possess.

Fig. 1. Ref.: 3 items.

УДК 378.147

Оптимізація растрових Web-зображень / М.А. Бондаренко // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 73-76.

Графіка для Web-сторінок має бути збережена в одному з трьох форматів – PNG, GIF, JPEG. Це дає гарантію того, що зображення буде відображатися у будь-якому браузері. Вибір формату з метою мінімізації розміру файлу пов'язано з певними параметрами зображення. Формат GIF доцільно використовувати для зображень з невеликою кількістю кольорів (до 256). Наприклад – текст, логотипи, ілюстрації з чіткими краями, зображення з прозорими ділянками, баннери. Формат JPEG доцільно використовувати переважно для фотографій з великою кількістю кольорів. Зображення в цьому форматі, на відміну від формату GIF, не можуть мати прозорих ділянок. Формат PNG є розвитком формату GIF.

Табл. 7. Іл. 12. Бібліогр.: 2 назви.

УДК 004.42

Хмара моніторингу і управління здоров'ям та здоровим способом життя / Ю. Л. Нечипоренко, А. О. Рижов // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 77-82.

Запропоновано модель системи моніторингу та управління здоров'ям і здоровим способом життя з застосуванням хмарного сервісу. Наведено сценарій роботи хмарного сервісу для моделі пацієнта як одного з можливих сценаріїв, перелік програмних продуктів та апаратних засобів підтримки роботи хмари.

Табл. 3. Іл. 2. Бібліогр.: 8 назв.

УДК 519.7

Застосування оптимізаційних методів у задачах вибору та прийняття рішень у виробничій діяльності / А.М. Гвоздинський, О.В. Піддубний // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 83-86.

Представлено принципіальну можливість використання методів еволюційної оптимізації у системах управління діяльністю підприємства, досліджено можливості використання різноманітних підходів до формування вихідної множини альтернатив. Розроблено математичну модель виробництва з техніко-економічними обмеженнями.

Іл.1. Бібліогр.: 4 назви.

УДК 519.7

Дослідження методів оптимізації в системах прийняття рішень в маркетинговій діяльності підприємства / А.М. Гвоздинський, В.К. Руднєв // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 87-91.

Запропоновано метод знаходження оптимального плану товарообігу шляхом постановки задачі, формування математичної моделі та застосування декількох методів її розв'язання, також проаналізовано результат, отриманий за допомогою моделі, зроблені відповідні висновки. Визначені позитивні й негативні сторони цього підходу, наведені відповідні рекомендації для поліпшення.

Іл.1. Бібліогр.: 4 назви.

UDC 378.147

Optimization of raster Web-images /M.A. Bondarenko // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 73-76.

Graphic arts for Web-сторінок must be stored in one of three formats – PNG, GIF, JPEG. It gives the guarantee of that an image will be represented in any браузері. The choice of format with the purpose of minimization of filesize is related to the certain parameters of image. It is expedient to utillize the format of GIF for images with the two-bit of colors (to 256). For example is a phototypograph logotypes, illustrations with clear edges, image with transparent areas, баннери. It is expedient to utillize the format of JPEG mainly for pictures with plenty of colors. Images in this format, unlike the format of GIF, can not have transparent areas. A format of PNG is development of format of GIF. It is expedient to utillize him for the maintainance of the fullcoloured images with the depth of colors to 48 bats on a pixel and чорно-білих images with the depth of colors to 16 bats on a pixel.

Tab. 7. Fig. 12. Ref.: 2 items.

UDC 004.42

Cloud monitoring and management of health and healthy lifestyle / Y. L. Nechiporenko, A. O. Ryzhov, V. I. Hahanov // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 77-82.

A model system for monitoring and management of health and healthy lifestyles with the use of cloud services. Shows the script works cloud service model of the patient as one of the possible scenarios for software and hardware to support the work of the cloud.

Tab. 3. Fig. 2. Ref.: 8 items.

UDC 519.7

The use of optimization methods in tasks of choice and decision-making in production activities / A.M. Gvozdinskiy, O.V. Piddubnyi // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 83-86.

This work shows the possibility of using the evolutionary optimization methods in business management systems. Also it was explored possibilities of using different approaches to the formation of the original set of alternatives.

Fig.1.Ref. 4 items.

UDC 519.7

Research methods for optimization in decision-making systems in the marketing activity of the company / A.M. Gvozdinskiy, V.K.Rudniev // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 87-91.

This work proposes a method to find the optimal plan turnover, by setting objectives, forming a mathematical model and use several methods to solve it, to analyze the results obtained using the model made by appropriate conclusions. Were identified positive and negative aspects of this approach are given appropriate recommendations for improvement.

Fig.1. Ref.:4 items.

УДК 519.7

Дослідження методів еволюційної оптимізації в задачах організаційного управління виробництвом / А.М. Гвоздинський, А.Є. Козлова // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 91-96.

Процеси прийняття рішень загалом та задачі управління запасами зокрема мають важливе значення для сучасних організацій. Вони є одним з найбільш поширених класів задач дослідження операцій. Існує безліч методів для вирішення задач такого типу, але одними з пріоритетних є методи інтелектуального аналізу данних.У роботі розглянуто створення математичної моделі таких задач.

Табл. 1. Іл. 2. Бібліогр.: 3 назви.

UDC 519.7

Study methods of evolutionary optimization in the tasks of the organizing production management/A.N. Gvozdinskiy, A.E. Kozlova // Radioelektronika i informatika. 2013. № 4. P. 91-96.

Decision making processes in general and the problem of inventory management in particular are important for modern organizations. They are one of the most common classes of problems of operations research. There are many methods for these tasks, but one of the main methods are Data Mining.The paper was considered creating mathematical models of such problems.

Tab. 1. Fig. 2. Ref.: 7 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

УДК519.713

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 раздельно нумеруются, при наличии более одного рисунка (таблицы), арабскими цифрами. Рисунок содержит подрисуночную центрированную подпись под иллюстрацией (вне рисунка), как показано на рис. 1.

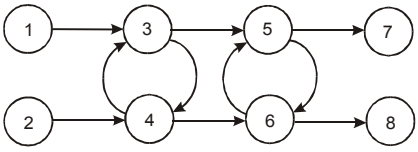


Рис. 1. Граф с контурами

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. Рекомендуемая высота формульных кеглей: переменная – 10 пунктов, индекс – 8, над- и подиндекс – 8, основной (индексный) математический символ – 12(10):

$$F_{i+i} = \sum_{i=1}^{b^k} F_j^i - \prod_{j=1}^{1+h^2} P_{R\,j+i} + F^{j-1} + X^{\sum n^k} . \quad (1)$$

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 рекомендуется 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. Іл. 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 № 4 от 27.12.2013)

Підписано до друку 27.12.2013. Формат 60×84 1/8.

Умов. друк. арк. 10,8 . Зам. № б/н . Тираж 300 прим. Ціна договірна.

Віддруковано у СПД ФО Степанов В.В.

61168, Харків, Акад. Павлова, 311.