

Запорізький національний технічний університет



Радіоелектроніка Інформатика Управління

1(22)'2010

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

Видається з березня 1999 року

Зареєстрований **29 січня 2003 року**
Державним комітетом інформаційної політики,
телебачення та радіомовлення України.

Свідоцтво – серія **КВ № 6904**

Засновник і видавник – *Запорізький національний технічний університет*

Запоріжжя, ЗНТУ
2010

ISSN 1607-3274

Постановами ВАК України №1-05/9 від 08.09.1999 р. та №3-05/7 від 30.06.2004 р. журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (скорочена назва – РІУ), який видається з 1999 року, включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та фізико-математичних наук за спеціальністю «Радіофізика».

Журнал є донором журналу «Telecommunications and Radio Engineering», який видається в США. Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Статті, що публікуються в журналі, реферуються в базах даних та РЖ ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал РІУ міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>), електронна копія журналу розміщена на сайті Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського НАН України у розділі «Наукова періодика України» за адресою: <http://nbuv.gov.ua/portal/>.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – д-р техн. наук Піза Д. М.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Члени редколегії :

д-р фіз.-мат. наук Ахметшин А. М.
д-р техн. наук Волков О. В.
д-р фіз.-мат. наук Горбань О. М.
д-р фіз.-мат. наук Горр Г. В.
д-р техн. наук Гостев В. І.
д-р фіз.-мат. наук Дробахин О. О.
д-р техн. наук Карпуков Л. М.
д-р фіз.-мат. наук Корніч Г. В.

д-р фіз.-мат. наук Матюшин В. М.
д-р фіз.-мат. наук Онуфрієнко В. М.
д-р фіз.-мат. наук Погосов В. В.
д-р техн. наук Потапенко Є. М.
д-р техн. наук Толок В. О.
д-р техн. наук Труфанов І. Д.
д-р фіз.-мат. наук Чумаченко В. П.

Рекомендовано до видання вченою радою Запорізького національного технічного університету, протокол № 2 від 28.09.2009 р.

Рукописи проходять незалежне рецензування з залученням провідних фахівців, за результатами якого редакційна колегія приймає рішення про опублікування

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом
Запорізького національного технічного університету

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ,
редакція журналу «РІУ»

Тел: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ
Факс: (061) 764-21-41
E-mail: rvv@zntu.edu.ua

З М І С Т

РАДІОФІЗИКА	5
<i>Ващенко В. В., Чумаченко В. П.</i> О ВЫБОРЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ БАЗОВОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ Н-ПЛОСКОСТНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ УЗЛОВ.....	5
<i>Самойлик С. С., Бондарев В. П.</i> ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОХОДНОГО РЕЗОНАТОРА НА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ С ЧАСТИЧНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ	15
<i>Логачева Л. М., Куцак С. В., Бондарев В. П.</i> ДИФРАКЦИЯ ВОЛНЫ Н10 В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ НА СКАЧКЕ ИМПЕДАНСА УЗКИХ СТЕНОК	10
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ	21
<i>Гулин С. П., Гулин А. С.</i> ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ РЕЗИСТИВНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СХЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАСЫЩЕНИЯ	21
<i>Петрищев А. А.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ.....	32
<i>Карпуков Л. М., Корольков Р. Ю.</i> МЕТОД СИНТЕЗА МИКРОВОЛНОВЫХ ПОЛОСНО- ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМИ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМИ ШЛЕЙФАМИ.....	27
<i>Фурманова Н. И., Антоненко О. С., Шинкаренко Е. М., Фарафонов О. Ю., Воропай О. Ю.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ХВИЛЬОВИХ ОПОРІВ МІКРОСМУЖКОВИХ СМУГОПРОПУСКАЮЩИХ ФІЛЬТРІВ НА ЗВ'ЯЗАНИХ ЛІНІЯХ З ОТВОРАМИ В ЕКРАНІ ВІД ТОВЩИНИ СМУЖКИ МІКРОСМУЖКОВОЇ ЛІНІЇ.....	34
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	39
<i>Белоус Н. В., Куцевич И. В.</i> МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	39
<i>Киричек Г. Г.</i> КЕРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ НА ВСІХ РІВНЯХ ІЄРАРХІЇ ОТРИМАННЯ ЗНАНЬ	70
<i>Высоцкая Е. В., Довнаръ А. И., Порван А. П.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ СУБЪЕКТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ	45
<i>Кошевой Н. Д., Калашиников Е. Е., Костенко Е. М., Черепашук Г. А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	78
<i>Дубровін В. І., Льовкін В. М.</i> ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОРТФЕЛЯ.....	51
<i>Кудерметов Р. К.</i> ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ.....	82
<i>Евсеев С. П., Король О. Г., Гончарова А. И.</i> ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ АТАК НА ВНУТРИПЛАТЕЖНЫЕ БАНКОВСКИЕ СИСТЕМЫ	56
<i>Невлюдов И. Ш., Шостак Б. А., Бабай О. Н., Юрьева С. В.</i> ДИАГНОСТИКА МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ.....	87
<i>Калекіна Т. Г., Коваленко Т. Н.</i> ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ СТРУКТУРНО- ИНФОРМАЦИОННОЙ СВЯЗНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ.....	66
<i>Рибін О. І., Наталенко С. С., Ніжебецька Ю. Х.</i> ВЛАСТИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ RTF.....	93

<i>Романюк В. В.</i> ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ПЕРШОГО ГРАВЦЯ В ОДНОМУ ПІДКЛАСІ НЕСТРОГО ОПУКЛИХ АНТАГОНІСТИЧНИХ ІГОР 97	<i>Шаховська Н. Б.</i> ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОСТОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГЕБРАІЧНОЇ СИСТЕМИ 102
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ 109	
<i>Bodyanskiy Ye., Dolotov A.</i> ANALOG-DIGITAL SELF-LEARNING FUZZY SPIKING NEURAL NETWORK AND ITS LEARNING ALGORITHM BASED ON 'WINNER-TAKES-MORE' RULE 109	<i>Субботин С. А.</i> МЕТОД СИНТЕЗА НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ 121
<i>Купін А. І.</i> СТРУКТУРА ПРОТОТИПУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ..... 116	
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ 128	
<i>Баркалов А. А., Зеленева И. Я., Гриценко А. А.</i> СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ..... 128	<i>Скрупский С. Ю., Маркин А. Г., Скрупская Л. С.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ РАБОЧИХ СТАНЦИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 141
<i>Дубровин В. И., Колпакова Т. А., Козлов А. В.</i> ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЕКТАМИ..... 134	<i>Юрич М. Ю.</i> АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЯМИ В РАМКАХ GRID..... 144
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ 153	
<i>Гостев В. И.</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИДЕНТИЧНЫХ КОЛОКОЛООБРАЗНЫХ ФУНКЦИЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ 153	<i>Рязанцев О. І., Кардашук В. С.</i> СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ У ВІБРОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ..... 164
<i>Зиновкин В. В., Кулинич Э. М.</i> КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА 158	

РАДИОФИЗИКА
РАДИОФИЗИКА
RADIOPHYSICS

УДК 621.372.8

Ващенко В. В.¹, Чумаченко В. П.²

¹Аспирант Запорозького національного технічного університета

²Д-р физ.-мат. наук, заведуючий кафедрой Запорозького національного технічного університета

О ВЫБОРЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ БАЗОВОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ
ОБЛАСТИ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ H -ПЛОСКОСТНЫХ
ВОЛНОВОДНЫХ УЗЛОВ

Однородно заполненная треугольная область с волноводными плечами рассматривается в качестве гибкого конструктивного блока, который может использоваться при анализе сложных H -плоскостных структур методом обобщенных матриц рассеяния. Для треугольных границ предложена специальная форма представления поля, основывающаяся на методе произведения областей и обеспечивающая хорошую сходимость используемых рядов. Приводятся результаты численных экспериментов, которые подтверждают достоверность и эффективность развитого подхода.

Ключевые слова: волновод, H -плоскостная структура, представление поля, матрица рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Общепринятым подходом при моделировании сложных волноводных структур является их расчленение на автономные базовые блоки с последующим использованием метода обобщенных матриц рассеяния [1–3]. Из-за возможного накопления вычислительных ошибок S -матрицы отдельных блоков должны быть найдены с достаточно высокой точностью, чтобы обеспечить приемлемую точность расчета характеристик цельного многоэлементного объекта. Подход успешно работает, если блоки, возникающие после сегментации, являются простыми и их матрицы рассеяния могут быть успешно получены на основе высокоточных численно-аналитических методов. Ясно, что число таких конструктивных элементов является весьма ограниченным.

Гибким базовым блоком, который позволяет моделировать теоретически произвольные конфигурации,

является блок, построенный на основе треугольной области. Для случая прямоугольного треугольника надежные алгоритмы анализа такого элемента развиты в [4]. В настоящей работе предлагается эффективный подход к расчету характеристик рассеяния треугольного базового блока общего вида. Рассматривается H -плоскостное соединение двух волноводов, чья однородно заполненная соединительная полость (результат сегментации) имеет форму произвольного треугольника. Анализ основывается на специальном представлении поля в полости в виде тригонометрических рядов, которое было предложено в [5] для области с выпукло-многоугольной границей. Первоначальная форма решения затем модифицируется, чтобы улучшить сходимость используемых разложений. Статья является продолжением работы [6], где исследовались возможности несколько иной модели исследуемого узла.

РАЗЛОЖЕНИЕ ПО СИНУСАМ

Рассматриваемая конфигурация показана на рис. 1

Структура однородна вдоль оси z и заполнена кусочно-однородным диэлектриком. Она состоит из трех областей. Области 1 и 2 соответствуют прямоугольным волноводам ширины $2a_1$ и $2a_2$ соответственно. Область 3 заключена между границами раздела сред M_2M_3 , M_3M_1 и проводящей стенкой M_1M_2 . Значения диэлектрической проницаемости в составляющих областях обозначены ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 . Волна TE_{r0} единичной амплитуды возбуждает узел со стороны p -го плеча. Задача состоит в отыскании единственной ненулевой z -компоненты электрического поля $E_z = ue^{i\omega t}$.

Обозначим значения u в областях 1, 2 и 3 через u_1 , u_2 и u_3 . Тогда

$$u_s = \delta_{sp} \sin \frac{r\pi(x_s + a_s)}{2a_s} e^{-\gamma_r^{(s)} y_s} + \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{S}_n^{(s)} \sin \frac{n\pi(x_s + a_s)}{2a_s} e^{\gamma_n^{(s)} y_s}, \quad s = 1, 2, \quad (1)$$

где $\tilde{S}_n^{(s)}$ являются искомыми амплитудными коэффициентами,

$$\gamma_n^{(s)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{2a_s}\right)^2 - k_s^2}, \quad k_s = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_s}, \quad (2)$$

λ – длина волны в свободном пространстве и δ_{sp} – символ Кронекера.

Следуя методу произведения областей [5], запишем величину u_3 в виде суммы некоторых функций, отвечающих отдельным сторонам треугольника и являющихся решениями уравнения Гельмгольца:

$$u_3 = \sum_{l=1}^3 u_3^{(l)}. \quad (3)$$

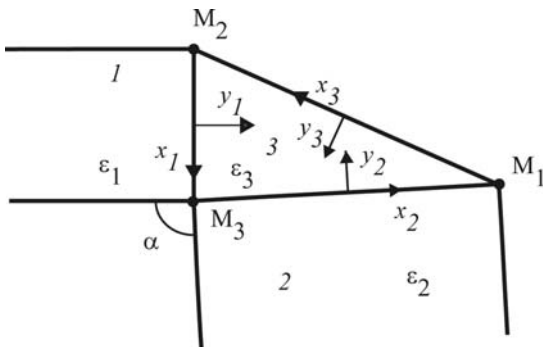


Рис. 1. Геометрия задачи ($M_2M_3 = 2a_1$, $M_3M_1 = 2a_2$, $M_1M_2 = 2a_3$)

Так как функция u в областях, примыкающих к области 3, задана рядами (1) по синусам, то удобно и функции $u_3^{(l)}$ представить в виде синус-разложений:

$$u_3^{(l)} = \sum_{n=1}^{\infty} D_n^{(l)} \sin \frac{n\pi(x_l + a_l)}{2a_l} e^{-\gamma_n^{(3l)} y_l}, \quad (4)$$

где

$$\gamma_n^{(3l)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{2a_l}\right)^2 - k_3^2}, \quad (5)$$

а коэффициенты $D_n^{(l)}$ подлежат определению.

Согласуя тангенциальные составляющие электрического и магнитного полей вдоль плоскостей $y_1 = 0$, $y_2 = 0$ и используя свойство ортогональности тригонометрических функций, мы получим

$$\delta_{sp} \delta_{mr} + \tilde{S}_m^{(s)} = D_m^{(s)} + \sum_{l \neq sn=1}^{\infty} q_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)}, \quad (6)$$

$$-\delta_{sp} \delta_{mr} + \tilde{S}_m^{(s)} = -\frac{\gamma_m^{(3s)}}{\gamma_m^{(s)}} D_m^{(s)} + \sum_{l \neq sn=1}^{\infty} p_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)}, \quad (7)$$

где $s = 1, 2$,

$$q_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{a_s \gamma_m^{(s)}} \int_{-a_s}^{a_s} \left[\sin \frac{n\pi(x_l + a_l)}{2a_l} e^{-\gamma_n^{(3l)} y_l} \right]_{y_s=0} \times \sin \frac{m\pi(x_s + a_s)}{2a_s} dx_s, \quad (8)$$

$$p_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{a_s \gamma_m^{(s)}} \int_{-a_s}^{a_s} \frac{\partial}{\partial y_s} \left[\sin \frac{n\pi(x_l + a_l)}{2a_l} e^{-\gamma_n^{(3l)} y_l} \right]_{y_s=0} \times \sin \frac{m\pi(x_s + a_s)}{2a_s} dx_s. \quad (9)$$

Интегралы (8), (9) легко находятся аналитически.

Комбинируя (6) и (7), получаем

$$D_m^{(s)} + \sum_{l \neq sn=1}^{\infty} d_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} = 2f_m^{(s)} \delta_{sp} \delta_{mr}, \quad s = 1, 2, \quad (10)$$

где

$$f_m^{(s)} = \frac{\gamma_m^{(s)}}{\gamma_m^{(s)} + \gamma_m^{(3s)}}, \quad (11)$$

$$d_{mn}^{(sl)} = f_m^{(s)} [q_{mn}^{(sl)} - q_{mn}^{(3s)}]. \quad (12)$$

Условие идеальной проводимости стенки соединительной полости $u_3|_{y_3=0} = 0$ дает

$$D_m^{(3)} + \sum_{l \neq 3n=1}^{\infty} q_{mn}^{(3l)} D_n^{(l)} = 0, \quad (13)$$

где $q_{mn}^{(3l)}$ определяется формулой (8) при условии $s = 3$.

С помощью уравнений (13) $D_n^{(3)}$ в уравнениях (10) исключаются. Это дает бесконечную систему ли-

нейных алгебраических уравнений по отношению к неизвестным $D_n^{(1)}$ и $D_n^{(2)}$. После решения этой системы методом усечения находим $D_n^{(1)}$ и $D_n^{(2)}$, а затем $D_n^{(3)}$ с помощью (13), $\tilde{S}_n^{(1)}$, $\tilde{S}_n^{(2)}$ с помощью (6), а также элементы матрицы рассеяния, определяемые формулой

$$S_{nr}^{(sp)} = \sqrt{\frac{a_s \gamma_n^{(s)}}{a_p \gamma_r^{(p)}}} \tilde{S}_n^{(s)}. \quad (14)$$

Используя метод обобщенных матриц рассеяния, необходимо согласовывать системы координат в волновых каналах, соединяющих блоки, полученные после сегментации. В связи с этим заметим, что поворот системы координат (x_l, y_l) ($l = 1, 2$) на угол 180° приводит к умножению правой части (14) на $(-1)^{\delta_{sl}(n+1) + \delta_{pl}(r+1)}$.

МОДИФИЦИРОВАННОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПО СИНУСАМ

Функции $u_3^{(l)}$ лишь в сумме представляют электрическое поле. Поэтому каждая из них в отдельности может быть и не равной нулю на концах стороны треугольника, которой она отвечает. Это означает, что нельзя ожидать сходимости в (4) выше чем $D_n^{(l)} = O\left(\frac{1}{n}\right)$ [7]. Чтобы улучшить сходимость рядов (4), выполним следующую модификацию представления (3):

$$u_3 = \sum_{l=1}^3 \left[u_3^{(l)} + D_0^{(l)} e^{ik_3 y_l} \right], \quad (15)$$

где $u_3^{(l)}$ снова определяются формулой (4), а дополнительные неизвестные $D_0^{(l)}$ находятся с помощью точечных граничных условий

$$u_3 = 0 \text{ при } (x_l, y_l) = (c_l, d_l) = M_l, \quad l = \overline{1, 3}, \quad (16)$$

следующих из условия идеальной проводимости стенок и накладываемых в вершинах треугольника M_1 , M_2 и M_3 . Заметим, что хотя величины $u_3^{(l)}$ и коэффициенты $D_n^{(l)}$ теперь имеют иной смысл, мы для удобства последующего изложения сохраняем те же обозначения, что и в предшествующем разделе. Последующая численная проверка подтвердила, что описанное изменение формы представления u_3 вместе с граничными условиями (16) обеспечивают обнуление новых функций $u_3^{(l)}$ в точках $(x_l, y_l) = (\pm a_l, 0)$.

Вместо (6), (7), (10) и (13) мы приходим теперь к уравнениям

$$\delta_{sp} \delta_{mr} + \tilde{S}_m^{(s)} = D_m^{(s)} + \sum_{l \neq sn=1}^{\infty} \sum q_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} + \sum_{l=1}^3 q_{m0}^{(sl)} D_0^{(l)}, \quad (17)$$

$$-\delta_{sp} \delta_{mr} + \tilde{S}_m^{(s)} = -\frac{\gamma_m^{(3s)}}{\gamma_m^{(s)}} D_m^{(s)} + \sum_{l \neq sn=1}^{\infty} \sum p_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} + \sum_{l=1}^3 p_{m0}^{(sl)} D_0^{(l)}, \quad (18)$$

$$D_m^{(s)} + \sum_{l \neq sn=1}^{\infty} \sum d_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} + \sum_{l=1}^3 d_{m0}^{(sl)} D_0^{(l)} = 2f_m^{(s)} \delta_{sp} \delta_{mr}, \quad (19)$$

$$D_m^{(3)} + \sum_{l \neq 3n=1}^{\infty} \sum q_{mn}^{(3l)} D_n^{(l)} + \sum_{l=1}^3 q_{m0}^{(3l)} D_0^{(l)} = 0, \quad (20)$$

где $s = 1, 2$,

$$q_{m0}^{(sl)} = \frac{1}{a_s} \int_{-a_s}^{a_s} e^{ik_3 y_l} \Big|_{y_s=0} \sin \frac{m\pi(x_s + a_s)}{2a_s} dx_s, \quad (21)$$

$$p_{m0}^{(sl)} = \frac{1}{a_s \gamma_m^{(s)}} \int_{-a_s}^{a_s} \frac{\partial}{\partial y_s} e^{ik_3 y_l} \Big|_{y_s=0} \sin \frac{m\pi(x_s + a_s)}{2a_s} dx_s, \quad (22)$$

а другие величины, входящие в уравнения, определяются теми же формулами, что и ранее.

Используя граничные условия (16), получим

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n^{(l)} D_n^{(l)} + \sum_{k=1}^3 t^{(lk)} D_0^{(k)} = 0, \quad l = \overline{1, 3}, \quad (23)$$

где

$$b_n^{(l)} = \sin \frac{n\pi(c_l + a_l)}{2a_l} e^{-\gamma_n^{(3l)} d_l}, \quad (24)$$

$$t^{(lk)} = e^{ik_3 y_k} \Big|_{\substack{x_l = c_l \\ y_l = d_l}}. \quad (25)$$

Исключив с помощью (20) $D_n^{(3)}$ в (19) и (23), приходим к системе уравнений относительно $D_n^{(1)}$, $D_n^{(2)}$ ($n = \overline{1, \infty}$) и $D_0^{(l)}$ ($l = \overline{1, 3}$). Решив эту систему, последовательно определим коэффициенты всех разложений и, наконец, элементы матрицы рассеяния (14).

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Оба варианта были реализованы в виде компьютерных программ, позволяющих находить характеристики рассеяния исследуемого объекта. Ниже представлены результаты, верифицирующие алгоритмы и демонстрирующие их эффективность.

Обозначим через N_1 число членов в последовательностях $\tilde{S}_n^{(1)}$ и $D_n^{(1)}$ после их усечения, через N_2 – то же самое для $\tilde{S}_n^{(2)}$ и $D_n^{(2)}$, через N_3 – то же для $D_n^{(3)}$. Пусть $S = |S_{11}^{(11)}|^2 + |S_{11}^{(21)}|^2$ и $K = |S_{11}^{(11)} \tilde{S}_{11}^{12} + S_{11}^{(21)} \tilde{S}_{11}^{22}|$

Таблица 1

N	$ S_{11}^{11} $	$ S_{11}^{*11} $	S	S^*	K	K^*
2	0,2150	0,2228	1,0328	1,2358	0,0630	0,1479
3	0,2340	0,2398	1,0028	1,0056	0,0061	0,0278
4	0,2320	0,2201	1,0035	1,0413	0,0048	0,0159
8	0,2308	0,2204	1,0004	1,0178	0,0006	0,0076
16	0,2304	0,2262	1,0000	1,0105	0,0001	0,0051
32	0,2303	0,2274	1,0000	1,0067	0,0000	0,0035
64	0,2302	0,2284	1,0000	1,0043	0,0000	0,0025
128	0,2302	0,2290	1,0000	1,0027	0,0000	0,0016
256	0,2302	0,2295	1,0000	1,0017	0,0000	0,0011

(черта обозначает комплексное сопряжение) для случая модифицированного алгоритма, а S^* и K^* – это те же суммы, отвечающие разложениям по синусам без дополнительных членов. Табл. 1 иллюстрирует свойства сходимости алгоритмов на примере частной конфигурации при $2a_1/\lambda = 0,65$, $a_2/a_1 = 1,2$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, $\epsilon_3 = 2$ и $\alpha = 120^\circ$. Для удобства представления данных N_1 , N_2 и N_3 выбраны одинаковыми и равными N . Видно, что с ростом N расчетные данные, полученные с помощью модифицированного алгоритма, стабилизируются значительно быстрее. Результаты, характеризующие унитарность матрицы рассеяния, подтверждают достоверность произведенных расчетов. Полученные значения S , S^* и K , K^* сходятся к нужным значениям 1 и 0.

Рис. 2 представляет поведение $D_n^{(1)}$ при увеличении n для тех же значений геометрических и частотного параметров. Зависимости для $D_n^{(2)}$ и $D_n^{(3)}$ ка-

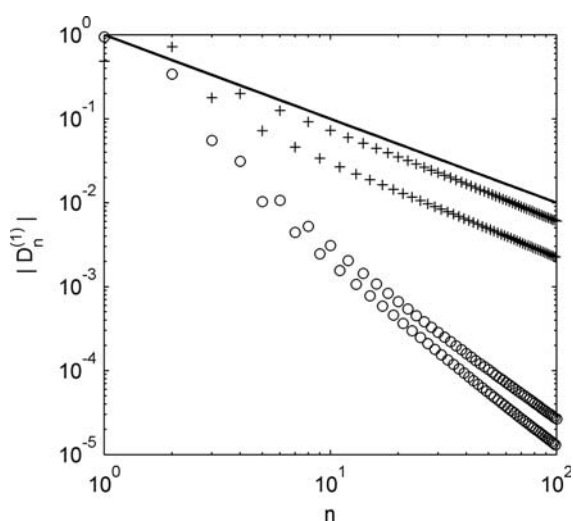


Рис. 2. Зависимость $D_n^{(1)}$ от n при $2_1a/\lambda = 0,65$, $a_2/a_1 = 1,2$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, $\epsilon_3 = 2$ и $\alpha = 120^\circ$:

крестики – разложения по синусам; кружки – модифицированный алгоритм; сплошная линия – $y = 1/n$

чественно имеют такой же характер. Видно, что описанная модификация разложения действительно значительно улучшает сходимость рядов (4). Ее эффективность подтверждается также и для других значений параметров структуры.

С целью дальнейшего тестирования модифицированного алгоритма была рассмотрена хорошо изученная H -плоскостная задача дифракции H_{m0} -волн на наклонной границе раздела сред в прямоугольном волноводе (рис. 3)

Ее решения находились методом обобщенных матриц рассеяния. При этом вычленились два базовых блока с треугольными областями 3 и 4, связанных между собой перпендикулярным границе раздела сред волноводом нулевой длины, который предполагался заполненным диэлектриком. Табл. 2 представляет зависимости рассчитанных элементов матрицы рассеяния узла, приведенного на рис. 3, от

Таблица 2

N	$ S_{11}^{11} $	$\arg S_{11}^{11}$	$ S_{21}^{21} $	$\arg S_{21}^{21}$
2	0,2704	1,8345	0,9364	-2,7479
3	0,2512	1,6303	0,9378	-2,6998
4	0,2537	1,6446	0,9369	-2,7008
8	0,2558	1,6387	0,9363	-2,6985
16	0,2562	1,6385	0,9363	-2,6981
32	0,2562	1,6385	0,9363	-2,6980
64	0,2562	1,6385	0,9363	-2,6980

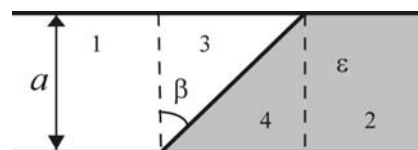


Рис. 3. Наклонная граница раздела сред

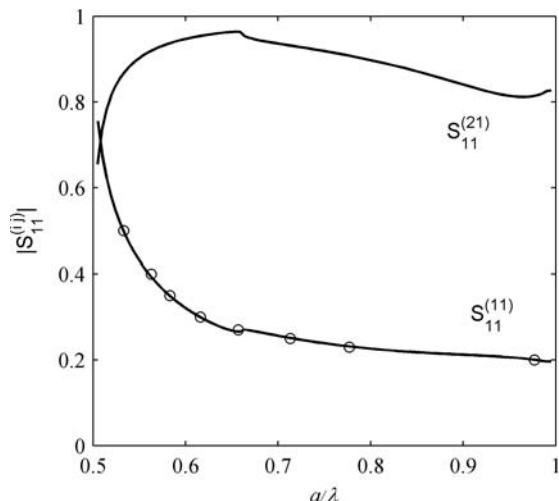


Рис. 4. Зависимости $|S_{11}^{(11)}|$ и $|S_{11}^{(21)}|$ от a/λ для наклонной границы раздела сред при $\varepsilon = 2, 3$ и $\beta = 30^\circ$:

сплошные линии – этот метод, кружки – данные из [8]

порядка усечения N при $\varepsilon = 2, 3$, $\beta = 30^\circ$ и $a/\lambda = 0, 7$. Число N определяется так же, как и в случае табл. 1, и является общим для обоих блоков. Как видно, скорость стабилизации результатов является весьма высокой.

На рис. 4 приведены рассчитанные частотные зависимости для $|S_{11}^{(11)}|$ и $|S_{11}^{(21)}|$, а также данные, взятые из [8]. Видно, что они хорошо согласуются. Те же зависимости были получены и с помощью алгоритма, описанного в [9]. Данные совпали с графической степенью точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача определения характеристик рассеяния двухлучевого H -плоскостного волноводного соединения с нагруженной произвольно-треугольной соединительной полостью. Для поля внутри полости предложено тригонометрическое разложение специального вида, основывающееся на методе произведения областей. Эта форма представления решения обеспечивает хорошую сходимость вычислительного алгоритма и позволяет выполнить аналитически все математические процедуры, вовлеченные в процесс алгебраизации. Практическая применимость модели и ее эффективность подтверждены решением тестовых задач. Из процесса решения задачи ясно, что подобный подход реализуем и в случаях, когда к треугольной области присоединены не два, а один или три волновых канала. Исследованная структура может быть использована в качестве гибкого базового блока при моделировании весьма сложных H -

плоскостных структур с кусочно-линейными граничными поверхностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mumtaz P.* Аналитические методы теории волноводов / Р. Митра, С. Ли. – М.: Мир, 1974. – 324 с.
2. *Arnt F.* Automated design of waveguide components using mode-matching/numerical EM building-blocks in optimization-oriented CAD frameworks – State-of-the-art and recent advances / Arnt F., Beyer R., Reiter J. M., Sieverding T. and Wolf T. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1997. – Vol. 45, May. – P. 747–760.
3. *Chumachenko V. P.* Numerical analysis of Complicated Waveguide Circuits on the Basis of Generalized Scattering Matrices and Domain Product Technique / V. P. Chumachenko and V. P. Pyankov // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – Vol. 48, Feb. – P. 305–308.
4. *Шестопалов В. П.* Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции / В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 296 с.
5. *Chumachenko V. P.* Efficient field representation for polygonal region / Chumachenko V. P. // Electronics letters. – 2001. – Vol. 37, No. 19. – P. 1164–1165.
6. *Vashchenko V. V.* S-matrix of a two-port waveguide junction with triangular connecting cavity / V. V. Vashchenko and V. P. Chumachenko // Proceedings of 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Odesa, Ukraine, June 29 – July 2, 2008). – P. 158–160.
7. *Толстов Г. П.* Ряды Фурье / Г. П. Толстов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
8. *Кириленко А. А.* Дифракция волн на наклонной границе раздела диэлектрических сред в прямоугольном волноводе / А. А. Кириленко, Л. А. Рудь // Радиотехника и электроника. – 1977. – Т. 22, № 10. – С. 2057–2067.
9. *Ващенко В. В.* Решение методом произведения областей H -плоскостной задачи дифракции волн на наклонной границе раздела диэлектрических сред в прямоугольном волноводе / В. В. Ващенко, В. П. Чумаченко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – № 1. – 2007. – С. 5–9.

Надійшла 07.09.2009

Ващенко В. В., Чумаченко В. П.

ПРО ВИБІР ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПОЛЯ ДЛЯ БАЗОВОЇ ТРИКУТНОЇ ОБЛАСТІ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛЮВАННЯ H -ПЛОЩИННИХ ХВИЛЕВОДНИХ БЛОКІВ

Однорідно заповнена трикутна область з приєднаними хвилеводами розглядається як гнучкий конструктивний блок, який може застосовуватись при аналізі складних H -площинних структур методом узагальнених матриць розсіювання. Для трикутних границь запропонована спеціальна форма зображення поля, що ґрунтується на методі добутку областей і забезпечує хорошу збіжність використуваних рядів. Наводяться результати чисельних експериментів, які підтверджують вірогідність та ефективність розвинутого підходу.

Ключові слова: хвилевод, H -площинна структура, зображення поля, матриця розсіювання.

Vashchenko V. V., Chumachenko V. P.

ON FIELD REPRESENTATION FOR A TRIANGULAR BUILDING BLOCK WHEN MODELING H -PLANE WAVEGUIDE STRUCTURES

A homogeneously filled triangular region with waveguide arms is considered as a possible building block when analy-

zing complicated H -plane structures by means of generalized scattering matrices. For triangular boundaries, a specific field representation is proposed. It is based on the domain-product technique and ensures a good convergence of the used series.

Numerical examples demonstrating reliability and efficiency of the approach are presented.

Key words: waveguide, H -plane structure, scattering, field representation, scattering matrix.

УДК 621.372.81

Логачева Л. М.¹, Куцак С. В.², Бондарев В. П.³

¹Старший преподаватель Запорожского национального технического университета

²Аспирант Запорожского национального технического университета

³Канд. физ.-мат. наук, доцент Запорожского национального технического университета

ДИФРАКЦИЯ ВОЛНЫ H_{10} В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ НА СКАЧКЕ ИМПЕДАНСА УЗКИХ СТЕНОК

На основе проекционного метода дается строгое решение задачи дифракции основной волны H_{10} на стыке регулярного и нерегулярного (узкие стенки образованы вторичными волноводами) прямоугольных волноводов. На основе численных результатов приводятся и анализируются зависимости дифракционных характеристик системы от ее параметров.

Ключевые слова: дифракция, импедансные стенки, проекционный метод, прямоугольный волновод.

ВВЕДЕНИЕ

Связь волноводов через отверстия различной формы широко используется при создании сложных волноводных узлов техники СВЧ. Примером такого соединения волноводов различного сечения через отверстия связи может быть поглощающий фильтр гармоник, описанный в [1, 2]. Расчет электрических характеристик такого фильтра весьма затруднен ввиду большого числа вспомогательных волноводов и отверстий связи. Это обстоятельство вызывает необходимость создания расчетной модели, которая позволила бы провести анализ факторов, влияющих на параметры такого рода структур. Известные до настоящего времени методы расчета поглощающих фильтров основаны на применении элементов теории цепей [2], а представленные результаты выполнены в одномодовом приближении.

В представленной работе приводится решение дисперсионного уравнения для нерегулярного волновода с импедансными узкими стенками, которое позволяет в многомодовом приближении решить задачу дифракции основной волны на скачке импеданса узких стенок. В качестве математического аппарата используется импедансный метод, развитый в работах [3, 4] и успешно применяемый для решения широкого класса задач дифракции и распространения радиоволн [5, 6]. Использование эквивалентных граничных условий импедансного типа дает возможность

заменить последовательность ответвляющихся по узкой стенке вторичных волноводов гладкой поверхностью, на которой задано граничное условие Щукина – Леонтовича, и при этом исключить из рассмотрения поле в боковых волноводах. В общем случае введенный поверхностный импеданс является комплексной величиной, что позволяет учесть потери в поглощающем фильтре.

Решение задачи дифракции проводится методом частичных областей с привлечением проекционного метода, который успешно применяется при решении самых разнообразных волноводных задач [7, 8]. Используемый нами вариант проекционного метода аналогичен развитому в работе [9], поскольку и в данном случае в качестве базисных функций, в отличие от других вариантов метода, используется полная система ортогональных функций, адекватных рассматриваемой задаче.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Рассмотрим прямоугольный волновод с идеально проводящими широкими стенками и узкими стенками, представляющими собой импеданс конечной длины l . Введем прямоугольную систему координат, начало которой совпадает с одной из вершин прямоугольника рис. 1.

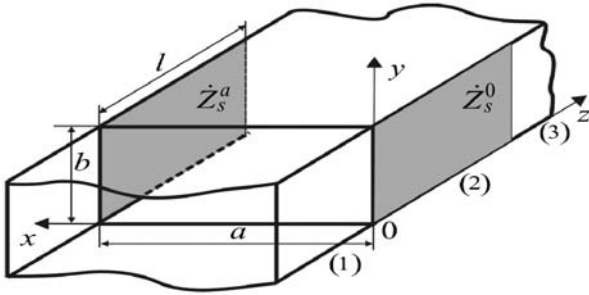


Рис. 1. Волновод с импедансными узкими стенками

Примем следующие обозначения: a – размер широкой стенки основного волновода, b – размер узкой стенки основного волновода. Считаем, что на вход волновода падает основной тип волны H_{10} .

Первоначально задача сводится к записи дисперсионного уравнения, которое позволит определить спектр возбуждаемых волн в прямоугольном волноводе с узкими импедансными стенками. Полученный набор собственных поперечных чисел и функций позволит решить дифракционную задачу и проанализировать значения коэффициентов отражения и прохождения.

Для определения постоянных распространения запишем решение уравнения Гельмгольца для данной системы (зависимость от времени в виде множителя $e^{j\omega t}$ опускается):

$$E_y = A \sin \gamma x + B \cos \gamma x, \quad (1)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega \mu_0} (\gamma A \cos \gamma x - \gamma B \sin \gamma x), \quad (2)$$

где $\gamma = \sqrt{k^2 - \beta^2}$ – поперечное волновое число; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства; β – продольное волновое число; λ – длина волны в свободном пространстве; ω – частота волны в свободном пространстве; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; A, B – постоянные коэффициенты.

Учитывая граничное условие Шукина – Леонтовича на узких импедансных стенках:

$$[\vec{n}, \vec{E}] = \dot{Z}_s [\vec{n}, \vec{H}], \quad (3)$$

где \vec{n} – нормаль, направленная вглубь импедансной стенки; \dot{Z}_s – в общем случае комплексный импеданс стенок, получим систему двух однородных уравнений:

$$\begin{cases} B = -j \dot{Z}_s^0 \frac{\gamma A}{\omega \mu_0}; \\ A \sin \gamma a + B \cos \gamma a = \frac{j \dot{Z}_s^a \gamma}{\omega \mu_0} (A \cos \gamma a - B \sin \gamma a), \end{cases} \quad (4)$$

где \dot{Z}_s^0, \dot{Z}_s^a – значения поверхностного импеданса при $x = 0$ и $x = a$, соответственно.

Исключив из системы (4) постоянные коэффициенты, приходим к дисперсионному уравнению вида

$$\tilde{\gamma} (\tilde{Z}_s^0 + \tilde{Z}_s^a) \cos \gamma a + j (1 + \tilde{\gamma}^2 \tilde{Z}_s^0 \tilde{Z}_s^a) \sin \gamma a = 0, \quad (5)$$

где используется следующая нормировка: $\tilde{\gamma} = \frac{\gamma}{k}$,

$\tilde{Z}_s^0 = \frac{\dot{Z}_s^0}{Z_0}, \tilde{Z}_s^a = \frac{\dot{Z}_s^a}{Z_0}; Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ – сопротивление свободного пространства.

Решение уравнения (5) позволяет определить набор поперечных собственных чисел γ_m в нерегулярном волноводе и соответствующие им продольные волновые числа

$$\beta_m = \sqrt{k^2 - \gamma_m^2},$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ – номер корня.

Из системы (4) определяются собственные поперечные функции нерегулярного волновода, которые, с точностью до постоянного множителя, можно записать в виде

$$\Phi_m(x) = \sin \gamma x - j \tilde{Z}_s^0 \tilde{\gamma} \cos \gamma x. \quad (6)$$

2. СИСТЕМА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЛНОВОДА

Предположим, что на границу раздела ($Z = 0$) в положительном направлении оси Z со стороны регулярного волновода падает волна H_{10} с компонентой

$$E_y = E_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\Gamma_1 z}, \quad (7)$$

где E_0 – амплитуда падающей волны; $\Gamma_1 = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}$ – продольное волновое число падающей волны.

Составляющие поля в различных областях волновода (рис. 1) можно записать в виде:

$$E_y^{(1)} = E_y + \sum_{m=1}^{\infty} R_m \sin \frac{m\pi x}{a} e^{j\Gamma_m z}, \quad (z \leq 0); \quad (8)$$

$$E_y^{(2)} = \sum_{m=1}^{\infty} (A_m^+ e^{-j\beta_m z} + A_m^- e^{j\beta_m(z-l)}) \Phi_m(x), \quad (0 \leq z \leq l); \quad (9)$$

$$E_y^{(3)} = \sum_{m=1}^{\infty} T_m \sin \frac{m\pi x}{a} e^{-j\Gamma_m(z-l)}, \quad (z \leq l); \quad (10)$$

где $\Gamma_m = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}$ – продольное волновое число в регулярном волноводе; β_m – продольное волновое

число в нерегулярном волноводе; R_m, T_m, A_m^-, A_m^+ – постоянные коэффициенты.

Индексы (1), (2) и (3) обозначают соответствующие области волновода на рис. 1.

Для компоненты H_x имеем следующее представление поля:

$$H_x^{(1)} = H_x + \frac{1}{\omega\mu_0} \sum_{m=1}^{\infty} \Gamma_m R_m \sin \frac{m\pi x}{a} e^{j\Gamma_m z}, \quad (z \leq 0); \quad (11)$$

$$H_x^{(2)} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta_m}{\omega\mu_0} (A_m^- e^{j\beta_m(z-l)} - A_m^+ e^{-j\beta_m z}) \Phi_m(x), \quad (0 \leq z \leq l); \quad (12)$$

$$H_x^{(3)} = -\frac{1}{\omega\mu_0} \sum_{m=1}^{\infty} \Gamma_m T_m \sin \frac{m\pi x}{a} e^{-j\Gamma_m(z-l)}, \quad (z \leq l). \quad (13)$$

Последовательность коэффициентов R_m и T_m подлжит определению.

Используя условие сшивания полей на границах раздела ($z = 0$ и $z = l$) регулярного и нерегулярного волноводов, приходим к следующим системам функциональных уравнений относительно искоемых коэффициентов R_m, T_m, A_m^-, A_m^+ :

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} \left(R_m \sin \frac{m\pi x}{a} - (A_m^+ + A_m^- e^{-j\beta_m l}) \Phi_m(x) \right) = -E_0 \sin \frac{\pi x}{a}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} \left(R_m \Gamma_m \sin \frac{m\pi x}{a} + (A_m^+ + A_m^- e^{-j\beta_m l}) \beta_m \Phi_m(x) \right) = E_0 \Gamma_1 \sin \frac{\pi x}{a}, \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} \left((A_m^+ e^{-j\beta_m l} + A_m^-) \Phi_m(x) - T_m \sin \frac{m\pi x}{a} \right) = 0; \\ \sum_{m=1}^{\infty} \left((A_m^- + A_m^+ e^{-j\beta_m l}) \cdot \beta_m \Phi_m(x) + T_m \Gamma_m \sin \frac{m\pi x}{a} \right) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Заметим, что входящие в системы (14) и (15) координатные функции $\sin \frac{m\pi x}{a}$ образуют на интервале $[0, a]$ ортогональную систему, и для нее справедливо следующее соотношение:

$$\int_0^a \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n x}{a} dx = \frac{a}{2} \delta_{mn}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (16)$$

где δ_{mn} – символ Кронекера.

Условие (16) легко позволяет трансформировать системы функциональных уравнений (14)–(15) в бесконечную систему линейных неоднородных алгебраических уравнений второго рода:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} (R_m \delta_{mn} - (A_m^+ + A_m^- e^{-j\beta_m l}) F_{nm}) = -E_0 \delta_{n1}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} (R_m \Gamma_m \delta_{mn} + (A_m^+ - A_m^- e^{-j\beta_m l}) \beta_m F_{nm}) = E_0 \Gamma_1 \delta_{n1}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} (T_m \delta_{mn} - (A_m^+ e^{-j\beta_m l} + A_m^-) F_{nm}) = 0; \\ \sum_{m=1}^{\infty} (T_m \Gamma_m \delta_{mn} + (A_m^- - A_m^+ e^{-j\beta_m l}) \beta_m F_{nm}) = 0, \end{cases} \quad (17)$$

где $F_{nm} = \frac{2}{a} \int_0^a \Phi_m(x) \sin \frac{\pi n x}{a} dx, n = 1, 2, 3, \dots$

Складывая поочередно второе уравнение с четвертым и первое с третьим в системе (17), получим:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} ((R_m + T_m) \cdot \Gamma_m \cdot \delta_{mn} + (A_m^+ + A_m^-)(1 - e^{-j\beta_m l}) \beta_m F_{nm}) = E_0 \Gamma_1 \delta_{n1}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} ((R_m + T_m) \cdot \delta_{mn} - (A_m^+ + A_m^-)(1 + e^{-j\beta_m l}) \cdot F_{nm}) = -E_0 \delta_{n1}. \end{cases} \quad (18)$$

Отнимая поочередно от первого уравнения третье и от второго уравнения четвертое в системе (17), получим:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} ((R_m - T_m) \cdot \delta_{mn} + (A_m^- + A_m^+)(1 - e^{-j\beta_m l}) \cdot F_{nm}) = -E_0 \delta_{n1}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} ((R_m - T_m) \cdot \Gamma_m \cdot \delta_{mn} - (A_m^- - A_m^+)(1 + e^{-j\beta_m l}) \beta_m F_{nm}) = E_0 \Gamma_1 \delta_{n1}. \end{cases} \quad (19)$$

Введя обозначения

$$\begin{cases} R_m + T_m = x_m; \\ R_m - T_m = y_m, \end{cases} \quad \begin{cases} A_m^+ + A_m^- = C_m; \\ A_m^- - A_m^+ = D_m, \end{cases} \quad \begin{cases} 1 - e^{-j\beta_m l} = t_m; \\ 1 + e^{-j\beta_m l} = g_m, \end{cases}$$

получим следующие системы:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} (x_m \Gamma_m \delta_{mn} + C_m t_m \beta_m F_{nm}) = E_0 \Gamma_1 \delta_{n1}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} (x_m \delta_{mn} - C_m g_m F_{nm}) = -E_0 \delta_{n1}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} (y_m \delta_{mn} + D_m t_m F_{nm}) = -E_0 \delta_{n1}; \\ \sum_{m=1}^{\infty} (y_m \Gamma_m \delta_{mn} - D_m g_m \beta_m F_{nm}) = E_0 \Gamma_1 \delta_{n1}, \end{cases} \quad (21)$$

которые, после исключения коэффициентов x_m и y_m , сводятся к системам уравнений относительно коэффициентов C_m и D_m :

$$\sum_{m=1}^{\infty} C_m [g_m \Gamma_n + t_m \beta_m] \cdot F_{nm} = 2E_0 \Gamma_n \delta_{n1}, \quad (n = 1, 2, 3 \dots), \quad (22)$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} D_m [\Gamma_n t_m + \beta_m g_m] \cdot F_{nm} = -2E_0 \Gamma_n \delta_{n1}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (23)$$

Коэффициенты R_n и T_n определяются из следующих выражений:

$$R_n = \sum_{m=1}^{\infty} (A_m^+ + A_m^- e^{-j\beta_m l}) F_{nm} - E_0 \delta_{n1}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (24)$$

$$T_n = \sum_{m=1}^{\infty} (A_m^+ e^{-j\beta_m l} + A_m^-) F_{nm}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (25)$$

Очевидно, что матричные элементы и свободные члены систем уравнений (20) и (21) удовлетворяют условию квадратичной сходимости, так что решение последних может быть получено с любой степенью точности методом редукции [6], причем это решение единственно.

3. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Системы уравнений (20) и (21) исследовались при различных параметрах волновода: a/λ , l/a , \tilde{Z}_s^0 , \tilde{Z}_s^a . Устойчивость решения и сходимости алгоритма приводятся в табл. 1. Результаты приводятся для симметричной структуры при $\tilde{Z}_s^0 = j$, $\tilde{Z}_s^a = j$. Для оценки сходимости решения рассматриваются три значения порядка редукции $N = 3, 9, 12$.

Приведенные данные свидетельствуют о быстрой сходимости алгоритма для симметричной структуры. В случае несимметричной структуры сходимость ухудшается из-за появления четных типов волн. Некоторые результаты численного анализа исследуемой структуры изображены на рис. 2–5.

Ввиду того, что исследуемая система симметрична, в волноводе будут распространяться только нечетные моды.

Анализ численных результатов для модуля коэффициента прохождения $|T|$ основной волны H_{10} (рис. 2) показывает, что в случае индуктивного реактивного импеданса ($\tilde{Z}_s = 2j$) значение модуля коэффициента прохождения незначительно изменяется с ростом частоты. При емкостном импедансе ($\tilde{Z}_s = -2j$) с ростом

Таблица 1. Зависимость модуля коэффициента прохождения от порядка редукции

Параметры системы		Модуль коэффициента прохождения		
l/a	a/λ	$N = 3$	$N = 9$	$N = 12$
5	0,8	0,9999787	0,9997871	0,9997194
	1,2	0,9999977	0,9999955	0,9999906
10	0,8	0,9984375	0,999542	0,9996289
	1,2	0,9994745	0,9995616	0,9995853

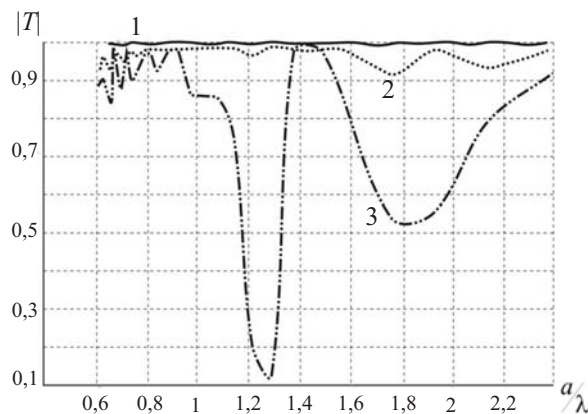


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента прохождения $|T|$ волны H_{10} от отношения a/λ

при параметрах $l/a = 10$ и $\tilde{Z}_s^0 = \tilde{Z}_s^a = \tilde{Z}_s$:

кривая 1 для $\tilde{Z}_s = 0,05j$; 2 – для $\tilde{Z}_s = 2j$; 3 – для $\tilde{Z}_s = -2j$

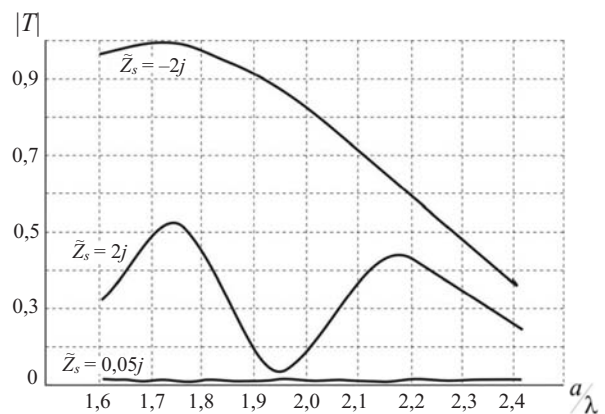


Рис. 3. Модуль коэффициента прохождения волны H_{30}

при параметрах $l/a = 10$ и $\tilde{Z}_s^0 = \tilde{Z}_s^a = \tilde{Z}_s$

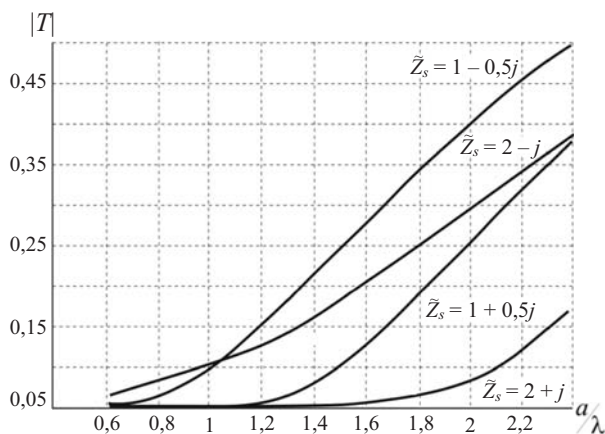


Рис. 4. Модуль коэффициента прохождения волны H_{10} при параметрах $l/a = 10$ и $\tilde{Z}_s^0 = \tilde{Z}_s^a = \tilde{Z}_s$

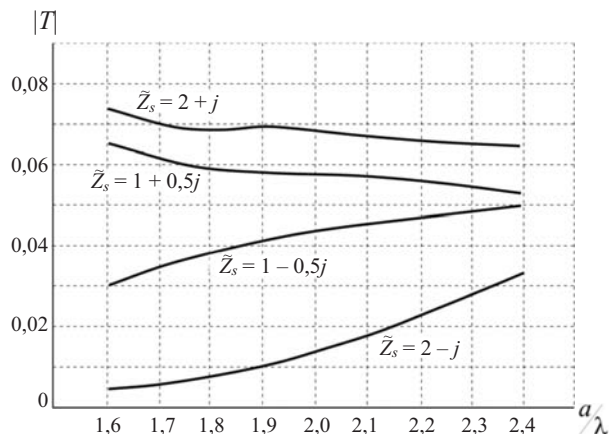


Рис. 5. Модуль коэффициента прохождения волны H_{30} при параметрах $l/a = 10$ и $\tilde{Z}_s^0 = \tilde{Z}_s^a = \tilde{Z}_s$

частоты наблюдаются резонансные явления, которые связаны с перераспределением энергии между гармониками внутри нерегулярной части волновода. При импедансе $\tilde{Z}_s = 0,05j$ модуль коэффициента прохождения практически равен 1, что приближает данную структуру к регулярному волноводу (идеальные стенки) и подтверждает правильность математической модели.

На рис. 3 приводятся зависимости модуля коэффициента прохождения волны H_{30} от a/λ . Анализ зависимостей рис. 3 показывает, что при малых значениях поверхностного импеданса модуль коэффициента прохождения имеет относительно небольшие значения и практически не резонирует с ростом частоты. При $\tilde{Z}_s^0 = \tilde{Z}_s^a = 2j$ наблюдаются резонансные явления, что при данном значении реактивности импеданса свидетельствует о влиянии высших типов волн. Максимальные значения модуля коэффициента прохождения волны H_{30} при $\tilde{Z}_s^0 = \tilde{Z}_s^a = -2j$ свидетельствует об интенсивной трансформации волны H_{10} в волну H_{30} .

На рис. 4 представлены модули коэффициента прохождения $|T|$ основной волны H_{10} в случае, когда активная часть поверхностного импеданса не равняется нулю (узкие стенки с потерями). Анализ характеристик показывает, что с ростом частоты коэффициент прохождения также растет. Это связано со слабой трансформацией основной волны в высшие типы волн. Следует также отметить, что в случае индуктивной реактивности комплексного импеданса в диапазоне $a/\lambda = 0,6 \div 1,2$ модуль коэффициента прохождения имеет постоянное минимальное значение.

На рис. 5 представлена зависимость модуля коэффициента прохождения $|T|$ от a/λ для волны H_{30} . Из рисунка видно, что на величину коэффициента прохождения существенное влияние оказывает тип реактивности. При индуктивном характере \tilde{Z}_s модуль коэффициента прохождения $|T|$ с увеличением a/λ превышает модуль коэффициента прохождения $|T|$ при емкостной реактивности.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе методом шивания получено решение для задачи дифракции основной волны H_{10} на стыке регулярного и нерегулярного волновода. В рассмотренном варианте проекционного метода в качестве базисных функций использовались собственные функции регулярного и нерегулярного волноводов. Численное решение полученного дисперсионного уравнения позволило определить значения поперечных чисел и постоянных распространения нерегулярного волновода.

Приведенные характеристики коэффициента прохождения свидетельствуют о весомом вкладе высших типов волн в энергию поля системы, что подтверждает адекватность рассмотрения многомодового режима для такого рода структур.

В свою очередь, представленная импедансная модель поглощающего фильтра дает возможность анализировать различные апертуры вспомогательных волноводов и на основе моделирования провести оптимизацию характеристик фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольман В. И. Фильтр поглощающего типа на высоком уровне мощности / В. И. Вольман, Л. М. Логачева // Радиотехника. – 1979. – Т. 34, № 1. – С. 25–28.

2. Матей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д. Л. Матей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс ; [пер. с англ. под ред. Л. В. Алексеева]. – М.: Связь, 1972. – Т. 2. – 495 с.
3. Марков Г. Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г. Т. Марков, А. Ф. Чаплин. – М. ; Л. : Энергия, 1967. – 367 с.
4. Миллер М. А. Исследование понятия поверхностного импеданса в теории поверхностных волн (обзор) / М. А. Миллер, В. И. Таланов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1961. – Т. 4, № 5. – С. 795–830.
5. Арсеньев Е. М. Поверхностные волны над трапециевидно гофрированной поверхностью / Е. М. Арсеньев, В. А. Калошин // Журнал радиоэлектроники. – 2008. – № 4. – С. 127–135.
6. Горобец Н. Н. Приближенное решение дисперсионного уравнения для цилиндрического волновода с импедансными границами / Н. Н. Горобец, А. П. Удовенко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 2. – С. 172–177.
7. Петрова Ю. Ю. Решение уравнения Гельмгольца в многосвязных волноводных областях: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.01.03 / Петрова Юлия Юрьевна. – М., 2006. – 114 с.
8. Моденов В. П. Проекционные методы в теории волноводов / В. П. Моденов // Радиотехника и электроника (Россия). – 2005. – Т. 50, № 2. – С. 203–207.
9. Богданов Ф. Г. Дифракция волны H_{10} на симметричных диэлектрических стержнях конечной длины / Ф. Г. Богданов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1983. – Т. 26, № 2. – С. 246–250.

Надійшла 02.06.2009
Після доробки 03.09.2009

Логачова Л. М., Куцак С. В., Бондарев В. П.
ДИФРАКЦІЯ ХВИЛІ H_{10} В ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ НА СТРИБКУ ІМПЕДАНСА ВУЗЬКИХ СТИНОК

На основі проєкційного методу дається строге рішення задачі дифракції основної хвилі H_{10} на стику регулярного і нерегулярного (вузькі стінки утворені вторинними хвилеводами) прямокутних хвилеводів. На основі чисельних результатів приводяться та аналізуються залежності дифракційних характеристик системи від її параметрів.

Ключові слова: дифракція, імпедансні стінки, проєкційний метод, прямокутний хвилевід.

Logacheva L. M., Kutsak S. V., Bondaryev V. P.
 H_{10} WAVE DIFFRACTION IN A RECTANGULAR WAVEGUIDE BY NARROW WALLS IMPEDANCE BUMP

Rigorous solution of the principal H_{10} wave diffraction problem at the joint of regular and non-regular (narrow walls are formed by secondary waveguides) rectangular waveguides has been obtained using the method of projection matching. On the basis of numerical results the dependence of the system diffraction characteristics on its parameters is determined and analyzed.

Key words: diffraction, impedance walls, method of projection matching, rectangular waveguide.

УДК 621.372.81

Самойлик С. С.¹, Бондарев В. П.²

¹Аспирант Запорозького національного технічного університета
²Канд. физ.-мат. наук, доцент Запорозького національного технічного університета

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОХОДНОГО РЕЗОНАТОРА НА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ С ЧАСТИЧНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Расчет параметров проходного прямоугольного резонатора с частичным диэлектрическим заполнением при сильной связи выполнен методом частичных пересекающихся областей с использованием интегральных уравнений макроскопической электродинамики. Этот метод позволяет учитывать как параметры каждого из диэлектриков, такие как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь вещества, из которого изготовлена неоднородность, так и его геометрическую форму и место расположения в резонаторе. Проведенный численный анализ позволил вычислить мощности, поглощенные неоднородностями, амплитуды прошедшей через структуру и отраженной волн в зависимости от параметров сложного диэлектрического заполнения.

Ключевые слова: проходной резонатор, коэффициент отражения, коэффициент прохождения.

ВВЕДЕНИЕ

Моделированию процессов, происходящих в СВЧ резонаторах, заполненных диэлектрическим материалом, посвящены исследования [1, 2]. Обзор работ показывает, что для детального анализа наблюдаемых явлений недостаточно экспериментальных исследова-

ний, а необходимо математическое моделирование этих процессов. Одной из серьезных проблем при разработке таких устройств является трудность формирования заданных распределений поля в диэлектрическом материале, помещенном в резонатор. Наиболее предпочтительным является аналитическое решение

задач СВЧ нагрева, которое удобно для нахождения зависимости распределения температуры от параметров среды и характеристик системы возбуждения электромагнитного поля и их оптимизации. Например, в работе [3] получено аналитическое решение задачи определения температурного поля и глубины проникновения электрического поля при нормальном падении электромагнитной волны на плоский диэлектрик с малыми потерями, заполняющий полупространство.

При моделировании электромагнитных и тепловых полей в СВЧ резонаторах открытого типа и, особенно, в резонаторах закрытого типа применяются, как правило, такие численные методы решения системы уравнений Максвелла, как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), либо метод частичных областей (МЧО). Недостаток методов МКР и МКЭ заключается в необходимости использования больших объемов памяти и времени счета на ЭВМ. Метод МКР также обладает одним очень серьезным недостатком, связанным с трудностью учета криволинейных границ диэлектрического материала. Метод частичных областей (МЧО) широко применяется при решении многих электродинамических задач, в том числе задач расчета резонаторных электродинамических структур и волноводных трансформаторов. В МЧО исследуемая область разбивается на подобласти, затем в каждой подобласти электромагнитное поле раскладывается в ряд, как правило, по собственным функциям подобластей. Наложение граничных условий и использование свойств ортогональности собственных функций приводят к матричному уравнению относительно неизвестных коэффициентов разложения. В настоящее время существует много модификаций МЧО, отличающихся способами разбиения электродинамических структур на частичные области и сшивания полей на границах раздела.

В данной работе расчет параметров проходного прямоугольного резонатора с частичным диэлектрическим заполнением при сильной связи решается методом частичных пересекающихся областей с использованием интегральных уравнений макроскопической электродинамики [4, 5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

В качестве математической модели выбран проходной резонатор с сильной связью, содержащий диэлектрическое заполнение с заданными значениями комплексной диэлектрической проницаемости (рис. 1).

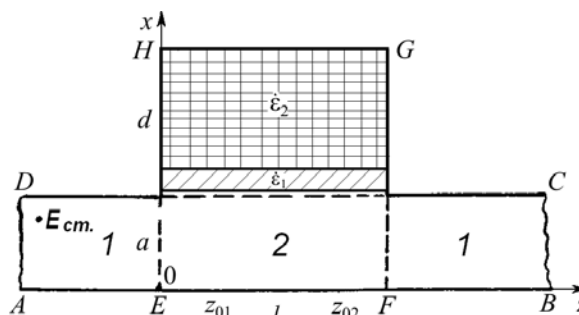


Рис. 1. Резонатор с диэлектрическим заполнением

Разобьем всю область определения электромагнитного поля на две пересекающиеся области (области пересечения обозначены пунктирной линией):

$$1\text{-я область } ABCD \begin{cases} -\infty < z < +\infty; \\ 0 \leq x \leq a, \end{cases}$$

$$2\text{-я область } EFGH \begin{cases} 0 \leq z \leq 1; \\ (резонансная область) \quad 0 \leq x \leq a + d. \end{cases}$$

Будем считать, что на входе данной конструкции вдоль положительного направления оси z распространяется волна TE_{10} . Область резонатора (вторая область) заполнена веществом с комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и отделена от основного волновода диэлектрической пластиной с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Предположим, что основной волновод заполнен средой со скалярными проницаемостями ϵ_0 и μ_0 и имеет идеально проводящую поверхность.

Электрическое поле запишем через E_y составляющую.

Воспользовавшись второй теоремой Грина и учитывая вторичные волны, переизлученные диэлектриками, а также граничные условия Дирихле, для первой и второй областей можно составить следующую систему интегральных уравнений:

$$E^I(x, y) = E_{cr}(x, z) - \int_0^l E^{II}(x', z') \frac{\partial G^I(x, z; x', z')}{\partial x'} dz' \Big|_{x'=a}, \quad (1)$$

$$E^{II}(x, y) = \int_0^a E^I(x', z') \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \int_0^a E^I(x', z') \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + \sum_{i=1}^k (k^2 + \text{graddiv}) \times \int_{V_i} G^{II}(x, z; x', z') (\epsilon_i - 1) E^{II}(x', z') dV'. \quad (2)$$

Электромагнитное поле в резонансной области определим из интегрального уравнения для $E^{II}(x, y)$:

$$\begin{aligned}
 E^{\text{II}}(x, y) = & \int_0^a \left(E_{\text{cr}}(x', z') - \int_0^l E^{\text{II}}(x'', z'') \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \Big|_{x''=a} \right) \times \\
 & \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \\
 & - \int_0^a \left(E_{\text{cr}}(x', z') - \int_0^l E^{\text{II}}(x'', z'') \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \Big|_{x''=a} \right) \times \\
 & \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + \\
 & \times \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \Big|_{x''=a} \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \\
 & - \int_0^a \left(E_{\text{cr}}(x', z') - \int_0^l E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \times \right. \\
 & \left. \times \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \Big|_{x''=a} \right) \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + \\
 & + \sum_{i=1}^k (k^2 + \text{graddiv}) \int_{V_i} G^{\text{II}}(x, z; x', z') (\epsilon_i - 1) E^{\text{II}}(x', z') dV'. \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $G^{\text{I}}(x, z; x', z')$, $G^{\text{II}}(x, z; x', z')$ – функция Грина для первой и второй области, соответственно.

Для первой области функция Грина имеет вид:

$$\begin{aligned}
 G^{\text{I}}(x, z; x', z') = & \\
 = \sum_s \frac{1}{i\gamma_s a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s |z-z'|}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Для второй области:

$$\begin{aligned}
 G^{\text{II}}(x, z; x', z') = & \\
 = - \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times \\
 \times \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z'\right), \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $\gamma_s = \sqrt{k^2 - \left(\frac{s\pi}{a}\right)^2}$; $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – волновое число.

Уравнение (3) является интегральным уравнением Фредгольма второго рода с вырожденным ядром. Решение этого уравнения будем искать в виде разложения по собственным функциям второй области

$$E^{\text{II}}(x, z) = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z\right), \quad (6)$$

а сторонний источник представим следующим образом:

$$E_{\text{cr}}(x, z) = E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) \cdot e^{-i\gamma_s z}.$$

Подставим в уравнение (2) выражение (6), получим:

$$E^{\text{II}}(x, y) = \int_0^a \left(E_{\text{cr}}(x', z') - \int_0^l \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \Big|_{x''=a} \right) \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \\
 - \int_0^a \left(E_{\text{cr}}(x', z') - \int_0^l \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \times \right. \\
 \left. \times \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \Big|_{x''=a} \right) \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + \\
 + \sum_{i=1}^k (k^2 + \text{graddiv}) \int_{V_i} G^{\text{II}}(x, z; x', z') (\epsilon_i - 1) E^{\text{II}}(x', z') dV'. \quad (7)$$

Вычислив интегралы, входящие в (7), и введя следующие обозначения, получим систему неоднородных линейных уравнений [6]:

$$\begin{aligned}
 E^{\text{II}}(x, z) = \sum_m \sum_n E_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) = & \\
 = - \sum_{m, n} E_0 B 1_{mn} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) + & \\
 + \sum_{m, n, \alpha, \beta, s} E_{\alpha\beta} B 1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) (-1)^s \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \times & \\
 \times I_{ms} I_{\beta s}^1 \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) + & \\
 + \sum_{m, n} (-1)^n E_0 B 1_{mn} e^{-i\gamma_s l} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) - & \\
 - \sum_{m, n, \alpha, \beta, s} E_{\alpha\beta} \cdot B 1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) (-1)^{s+n} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \times & \\
 \times I_{ms} I_{\beta s}^2 \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) - & \\
 - \sum_{i, m, n, \alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \cdot B 2_{mn} \cdot A_{i, mn, \alpha\beta} \cdot k^2 (\epsilon_i - 1) \times & \\
 \times \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right), \quad (8)
 \end{aligned}$$

где введены следующие обозначения:

$$B 1_{mn} = \frac{4}{(a+d)l} \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right) / \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2,$$

$$B 2_{mn} = B 1_{mn} / \left(\frac{n\pi}{l}\right),$$

$$I_{ms} = \int_0^a \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) dx' =$$

$$= \frac{\frac{s\pi}{a} (-1)^{s+1} \sin\left(\frac{m\pi a}{a+d}\right)}{\left(\frac{s\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2},$$

$$I_{\beta s}^1 = \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \cdot e^{-i\gamma_s z''} dz'' = \frac{[1 + (-1)^{\beta+1} e^{-\gamma_s l}] \frac{\beta\pi}{l}}{\left(\frac{\beta\pi}{l}\right)^2 + (\gamma_s)^2},$$

$$I_{\beta s}^2 = \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \cdot e^{-ij_s(l-z'')} dz'' = (-1)^{\beta+1} I_{\beta s}^1,$$

$A_{i, mn, \alpha\beta}$ – коэффициенты, отвечающие за геометрию i -го диэлектрика.

Решая полученную систему численным методом с использованием ЭВМ, найдем амплитуды напряженности поля во второй области.

Подставив выражение (6) с определенными амплитудами напряженности электрического поля в выражение (1), получим:

$$E^l(x, z) = E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \cdot e^{-\gamma_s z} - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \times \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}x'\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z'\right) \frac{\partial G^l(x, z; x', z')}{\partial x'} dz' \Bigg|_{x'=a}. \quad (9)$$

Выражение для прошедшей волны $z > z'$ принимает вид:

$$E^{+l}(x, z) = E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{-\gamma_s z} - \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \frac{1}{\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \times \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \frac{[1 + (-1)^{\beta+1} e^{-\gamma_s l}] \frac{\beta\pi}{l}}{\left(\frac{\beta\pi}{l}\right)^2 + (\gamma_s)^2} \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{-\gamma_s z}.$$

Выражение для отраженной волны $z < z'$ запишет-ся в виде:

$$E^{-l}(x, z) = -\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \frac{1}{\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \times \frac{[1 + (-1)^{\beta+1} e^{-\gamma_s l}] \frac{\beta\pi}{l}}{\left(\frac{\beta\pi}{l}\right)^2 + (\gamma_s)^2} \cdot \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{\gamma_s z}.$$

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По значениям амплитуд напряженности полей рассчитаны коэффициенты прохождения и отражения, а также мощность излучения из резонансной области отраженной (P_R) и прошедшей (P_T) волны, мощность потерь в диэлектриках (P_{dN}). Мощность потерь в диэлектрике определяется выражением [7]:

$$P_{dN} = \frac{\omega}{2} \epsilon'' \epsilon_0 \int_{V_N} |\vec{E}|^2 dV, \quad (10)$$

где ϵ'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости; ω_p – частота излучения; N – номер диэлектрической неоднородности ($N = 1, 2$).

Мощность потерь в N -й неоднородности, с учетом (6) и (10), будет определяться выражениями:

$$P_{dN} = \frac{\omega}{2} \epsilon'' \int_{V_1} |\vec{E}|^2 dV = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' \int_{h_1^{(N)} 0}^{h_2^{(N)} b} \int_{l_1^{(N)}}^{l_2^{(N)}} |E_y|^2 dx dy dz = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' \int_{h_1^{(N)} 0}^{h_2^{(N)} b} \int_{l_1^{(N)}}^{l_2^{(N)}} \left| \sum_{\alpha\beta=1}^{\infty} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z\right) \right|^2 dx dy dz.$$

После преобразований и операций интегрирования получим окончательные выражения для мощности потерь в каждой из диэлектрических неоднородностей:

$$P_{dN} = \frac{b}{2} \omega \epsilon'' \epsilon_0 \sum_{\alpha, \beta=1}^{\infty} \sum_{m, n=1}^{\infty} E_{\alpha\beta} E_{mn} I_{m\alpha}^{(N)} \cdot J_{n\beta}^{(N)}. \quad (11)$$

Коэффициенты $I_{m\alpha}^{(N)}$, $J_{n\beta}^{(N)}$ соответственно равны:

$$I_{m\alpha}^{(N)} = \frac{a}{2\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{(m-\alpha)\pi}{a}h_2^{(N)}\right) \sin\left(\frac{(m+\alpha)\pi}{a}h_2^{(N)}\right)}{(m-\alpha)(m+\alpha)} - \frac{\sin\left(\frac{(m-\alpha)\pi}{a}h_1^{(N)}\right) \sin\left(\frac{(m+\alpha)\pi}{a}h_1^{(N)}\right)}{(m-\alpha)(m+\alpha)} \right],$$

$$J_{n\beta}^{(N)} = \frac{l}{2\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{(n-\beta)\pi}{l}l_2^{(N)}\right) \sin\left(\frac{(n+\beta)\pi}{l}l_2^{(N)}\right)}{(n-\beta)(n+\beta)} - \frac{\sin\left(\frac{(n-\beta)\pi}{l}l_1^{(N)}\right) \sin\left(\frac{(n+\beta)\pi}{l}l_1^{(N)}\right)}{(n-\beta)(n+\beta)} \right].$$

Графики зависимости прошедшей, отраженной и поглощенной в диэлектрике мощности от длины волны представлены на рис. 2.

При этом были выбраны следующие параметры диэлектрического заполнения: жидкость внутри резонатора $\epsilon_2 = 10$, $\text{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-2}$, отделенная от волновода кварцевой диэлектрической пластиной ($\epsilon_1 = 3,8$, $\text{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-4}$) с толщиной $0,1 \cdot a$; геометрические размеры волновода 23×10 мм; толщина резонаторной области $d = 0,5a$.

На графике рис. 2 можно выделить три области, в которых коэффициент прохождения минимальный; соответственно в интервале частот 0,68...0,7, 0,74...0,77, 0,85...0,87 следует помещать диэлектрики, чтобы они поглощали максимальное количество

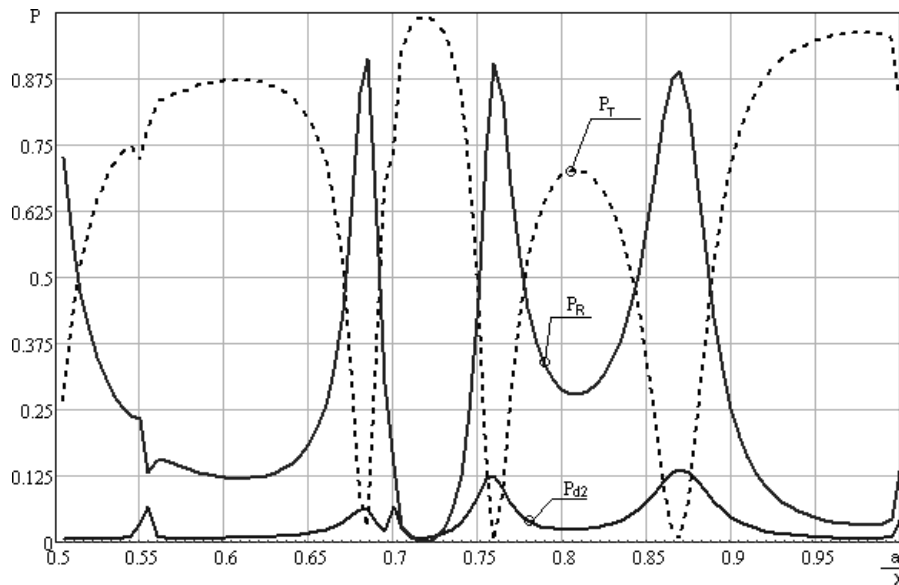


Рис. 2. Зависимость прошедшей, отраженной и поглощенной в диэлектрике мощности от длины волны

энергии. Соответственно, именно в этих областях будет происходить наиболее эффективный нагрев неоднородностей в резонансной области.

ВЫВОДЫ

Расчет проходного резонатора с диэлектрическими неоднородностями проведен с использованием строгой электродинамической модели. В работе в широком диапазоне частот рассчитаны зависимости прошедшей, отраженной и поглощенной в диэлектрике мощности. Показано, что в данной структуре возможно как явление резонанса (коэффициент отражения по мощности максимален), так и явление антирезонанса (коэффициент прохождения по мощности близок к единице). На частотах резонанса наблюдается максимальное поглощение энергии диэлектриком. Эффективность рассмотренного метода интегральных уравнений обуславливает перспективу его применения для расчета более сложных волноводных трансформаторов, содержащих произвольное число диэлектрических неоднородностей различной геометрической формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев А. М.* Математическое моделирование взаимодействия СВЧ излучения с влагосодержащими плоскими слоистыми средами. Ч. 1. / А. М. Афанасьев, В. В. Подгорный, Б. Н. Сиплиный, В. В. Яцышен // Изв. вузов. Электротехника. – 2001. – № 2. – С. 14–21.
2. *Степанов В. В.* Оптимизация равномерного распределения СВЧ энергии в частично заполненном резонаторе / Степанов В. В. // Материалы 10-й Международной Крымской конференции [«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»], (Украина, Крым, Севастополь, 11–15 сентября, 2000). – Севастополь : Севастопольский национальный технический университет, 2000. – С. 596.
3. *Рикенглаз Л. Э.* К теории распространения СВЧ электромагнитных полей в диэлектриках с малыми потерями // Журнал технической физики. – 1974. – Т. 44. – С. 1125.
4. *Хижняк Н. А.* Интегральные уравнения макроскопической электродинамики / Хижняк Н. А. – К. : Наукова думка, 1986. – 279 с.
5. *Прохода И. Г.* Метод частично пересекающихся областей для исследования волноводно-резонаторных систем сложной формы. / И. Г. Прохода, В. П. Чумаченко // Изв. вузов. Радиофизика. – 1973. – Т. XVI, № 10. – С. 1578–1582.
6. *Samoylyk S. S.* Complex frequencies of the rectangular resonator with the arbitrary number of the dielectric heterogeneities / S. S. Samoylyk, V. P. Bondaryev // Proceedings of 6th International Conference [«Antenna Theory and Techniques »], (Ukraine, the Crimea, Sevastopol, September 17–21, 2007). – Sevastopol : Sevastopol National Technical University, 2007. – P. 152–154.
7. *Капилевич Б. Ю.* Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры : [справочник] / Б. Ю. Капилевич, Е. Р. Требехин. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с.
8. *Kalesinskas V.* Analysis of Electromagnetic Waves Scattering by a Finite Size Dielectric and Metal Cylinder in a Rectangular Waveguide / A. Konstantinov, V. Shugurov // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1998. – Vol. 19, № 12. – P. 1773–1781.
9. *Melezhik P. N.* Open Resonators with Conducting Cylindrical Inserts. 1. Two-Dimensional Model / V. S. Miroshnichenko, Ye. B. Senkevich // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2005. – Vol. 48, № 7. – P. 529–536.
10. *Shakhbazov S. Yu.* Measurement of the distribution of the temperature field of materials in microwave resonators of complex shape / M. V. Nefedov, V. E. Nikishin, D. A. Loik, A. O. Nikishev // Measurement Techniques. – 2008. – Vol. 51, № 6. – P. 671–674.

Надійшла 28.05.2009
Після доробки 31.08.2009

Самойлик С. С., Бондарев В. П.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОХІДНОГО ПРЯМОКУТНОГО РЕЗОНАТОРА НА ПРЯМОКУТНИХ ХВИЛЕВОДАХ ІЗ ЧАСТКОВИМ ДІЕЛЕКТРИЧНИМ ЗАПОВНЕННЯМ

Розрахунок параметрів прохідного прямокутного резонатора з частковим діелектричним заповненням при сильному зв'язку виконується методом часткових пересічних областей і використанням інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки. Цей метод дозволяє враховувати як параметри кожного з діелектриків, такі як діелектрична проникність і тангенс кута втрат речовини, з якого виготовлена неоднорідність, так і його геометричну форму й місце розташування в резонаторі. Проведений чисельний аналіз дозволив обчислити потужність, поглинену неоднорідностями, амплітуди відбитої хвилі та хвилі, що пройшла крізь структуру, залежно від параметрів складного діелектричного заповнення.

Ключові слова: прохідний резонатор, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт проходження.

Samoylyk S. S., Bondaryev V. P.

ENERGY PARAMETERS OF TRANSMISSION RESONATOR BASED ON RECTANGULAR WAVEGUIDES PARTIALLY FILLED WITH DIELECTRIC

Parameters of a rectangular transmission resonator partially filled with dielectric and having strong coupling are calculated by the method of partially intersecting fields using integral equations of macroscopic electrodynamics. This method permits to consider the parameters of each dielectric such as permittivity and a tangent of loss angle of the obstacle material, as well as its geometrical shape and location in the resonator. The numerical analysis permitted to calculate power absorbed by the obstacles and the reflected and transmitted wave amplitude depending on the parameters of the complex dielectric filling material.

Key words: transmission resonator, reflection coefficient, transmission coefficient.

**РАДИОЕЛЕКТРОНИКА
ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ**

**РАДИОЕЛЕКТРОНИКА
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

**RADIO ELECTRONICS
AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 621.375.4:543.42+621.515

Гулин С. П.¹, Гулин А. С.²

¹Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

²Аспирант Запорожского национального технического университета

**ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ РЕЗИСТИВНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СХЕМНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО
ДИНАМИЧЕСКОГО НАСЫЩЕНИЯ**

На основе концепции управляемого динамического насыщения (КУДН) предложены алгоритмы характеристики резистивных нелинейных схемных элементов (НСЭ). Инкрементальные соотношения «вход – выход» НСЭ представляют собой гипергеометрические ряды Гаусса, полученные с помощью функции динамического насыщения (ФДН). Эти соотношения позволяют унифицировать алгоритм формирования математической модели конвергентной нелинейной инерционной системы (НИС) в терминах функциональных рядов Вольтерры – Гаусса (ФРВГ) и рассчитать спектральные характеристики ее отклика на многочастотное воздействие.

Ключевые слова: характеристика, резистивные нелинейные элементы, концепция, управляемое динамическое насыщение, аппроксимация, функциональные ряды Вольтерры – Гаусса, отклик, многочастотное воздействие.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Практическое применение математического аппарата функциональных рядов Вольтерры и их модификаций (ФРВ) в нелинейной радиоэлектронике происходит в двух основных направлениях, отличающихся степенью формализации и точностью описания нелинейных инерционных процессов – на структурном уровне и на уровне принципиальных схем [1–5].

На схемотехническом уровне степень формализации и адекватность описания НИС определяется уровнем детализации и точности математических моделей НСЭ, от которых, в свою очередь, зависит

порядок и сложность системы описывающих уравнений. Для решения подобных систем уравнений применяются уже имеющиеся и разрабатываются новые специализированные машинные комплексы анализа, использующие апробированный арсенал моделей схемных компонентов [1, 2].

Совершенствование полупроводниковых и МДП-технологий, появление и развитие нанотехнологий, повлекшее за собой появление новых НСЭ и функциональных модулей (ФМ), обусловили актуальность разработки обобщенных алгоритмов их характеристики, обеспечивающих более эффективные алгоритмы формирования математической модели НИС

в терминах ФРВ. Свидетельство тому – количество публикаций, посвященных исследованиям нелинейных объектов и связанных с данной тематикой, например [2–4].

Несмотря на функциональное многообразие существующих и перспективных НСЭ и ФМ, их математическое соотношение «вход – выход» можно обобщить на уровне оператора $Y(t) = F[x(t)]$, характеризующего процессы преобразования информационных сигналов с учетом действия помех, где $x(t)$, $Y(t)$ – воздействие и отклик, соответственно.

В существующих программах схемотехнического анализа, использующих аппарат ФРВ, НСЭ требуют представления формальными степенными рядами, что сопровождается существенными аппаратными и временными затратами как при формировании математической модели НИС в виде системы описывающих уравнений, так и в процессе ее решения [2–4].

Кроме того, подобный подход при анализе установившихся и переходных режимов НИС методами функциональных рядов не всегда является оправданным, поскольку «колебательная» аппроксимация «гладких» характеристик НСЭ, работающих при воздействии сигналов с широким динамическим диапазоном, приводит к накоплению интегральной ошибки в оценке их состояния [6]. Поэтому характеристики большинства НСЭ, входящих в математические модели активных схемных компонентов и представленных в виде укороченных целостепенных рядов, лишь приближенно отражают физические эффекты в полупроводниковых материалах, строгое описание которых обычно требует привлечения трансцендентных и специальных функций. Тем более что трансцендентный характер зависимостей параметров большинства известных активных и пассивных НСЭ от приложенных напряжений и протекающих токов (например, вольт-фарадные – для барьерной емкости

p - n -перехода, ВАХ полевых транзисторов и т. д.) подтвержден эмпирически [1–7].

В известных автору работах, например [1–6, 8], модели реальных ФМ содержат НСЭ, характеристики которых описываются более сложными, в том числе и специальными функциями различных видов. Подобное разнообразие функций создает серьезные трудности при формировании общей математической модели НИС и усложняет оценку сходимости функционального ряда, описывающего отклик системы на сложные виды сигналов.

В последние годы при характеристике НСЭ и ФМ наметились направления, связанные с применением новых видов «гладких» функций аппроксимации: полиэкспоненциальных [6] и функций динамического насыщения (ФДН) [7–9]. В работах [7, 9] сформулированы требования к оператору $F[x(t)]$, которым удовлетворяют ФДН, реализующие принцип управляемого динамического насыщения. Авторам не известны работы, в которых бы задача характеристики произвольного НСЭ решалась на основе ФДН и концепции управляемого динамического насыщения (КУДН). Данная работа – результат естественного обобщения метода решения аналогичной задачи [8] применительно к характеристике конвергентных резистивных НСЭ с произвольным типом управления для анализа НИС с помощью ЭВМ.

РЕШЕНИЕ

НИС, соответствующая широкому классу микроэлектронных устройств, может быть представлена в виде линейного инерционного $2n$ -полюсника, на выходных зажимах которого расположены (в общем случае инерционные) НСЭ (рис. 1). При этом каждый из НСЭ представлен в виде параллельного соединения элементов высшего порядка, необходимость и целесообразность введения и использования которых доказана в ряде работ, например [5].

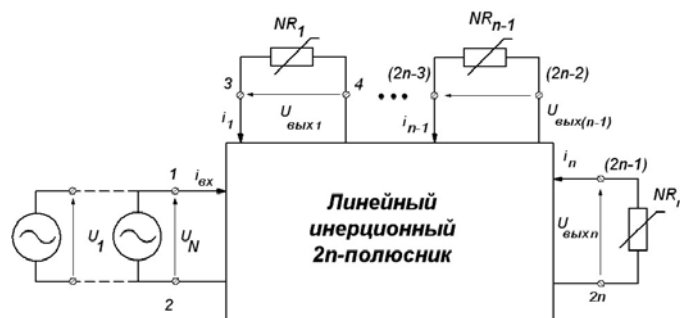


Рис. 1. НИС, представленная линейным инерционным $2n$ -полюсником и НСЭ:

U_1, \dots, U_N – амплитуды гармонических компонент воздействия;

$U_{\text{вых}j}, I_{\text{вых}j}$ – амплитуды напряжения и тока отклика на j -выходе, $j = \overline{1, (n-1)}$

В данной работе параллельное соединение нелинейных элементов порядка $k = \overline{2, \infty}$ будем называть инкрементальной частью соответствующего НСЭ, поскольку характеристика каждой ее составляющей предполагает использование рекуррентных алгоритмов и процедур.

Отклик $y(t)$ j -го выхода рассматриваемой НИС, согласно [1], представим суммой первых N членов функционального ряда Вольтерры $y_k[x(t)]$, $k = \overline{1, N}$ в области его сходимости

$$y(t) = \sum_{k=1}^N y_k[x(t)], \quad (1)$$

каждый из которых является функционалом k -го порядка воздействия

$$\begin{aligned} X_{\text{вх}}(t) &= X_0 + \sum_{i=1}^N X_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi_i) = \\ &= X_0 \cdot \left[1 + \sum_{i=0}^N \bar{X}_i \cdot \cos(\omega_i t + \phi_i) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $X_0 = \text{const}$ – смещение; X_i , ω_i , φ_i – амплитуда, круговая частота и начальная фаза i -й компоненты воздействия, $i = \overline{1, N}$; $\bar{X}_i = X_i/X_0$. Предполагается, что частоты ω_i несоизмеримы между собой и образуют монотонно-возрастающий лексикографический ряд $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N$ [8]. В дальнейших выкладках для НСЭ, управляемых напряжением, в (2) « X » заменяется « U », а для НСЭ с токовым типом управления « X » заменяется « I ».

Рассмотрим на основе КУДН алгоритмы характеристики резистивных НСЭ различных типов управления, входящих в НИС рис. 1. Для этого учтем, что функционал k -го порядка переменных $\tau_i (i = 1, \dots, k)$ в (1) может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} y_k[x(t)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_k(\tau_{\overline{1,k}}) \cdot \prod_{i=1}^k x(t - \tau_i) \cdot d\tau_i, \\ i &= \overline{1, k}; \tau_{\overline{1,k}} = \tau_1, \dots, \tau_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где ядро k -го порядка $h_k(\tau_{\overline{1,k}})$ – нелинейная импульсная реакция, преобразование Фурье k -го порядка которой является нелинейной передаточной функцией (НПФ) k -го порядка

$$H_k(\xi_{\overline{1,k}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_k(\tau_{\overline{1,k}}) \cdot \prod_{i=1}^k \exp(-j\xi_i) \cdot d\tau_i, \quad (4)$$

которая, согласно [1], связана с $h_k(\tau_{\overline{1,k}})$ обратным k -мерным преобразованием Фурье; $\xi_{\overline{1,k}} = \xi_1, \dots, \xi_k$ – переменные преобразования Фурье.

Согласно [1], с учетом соотношений (1)–(4), после соответствующих преобразований выражение, опре-

деляющее спектр установившегося отклика рассматриваемой НИС в терминах математического аппарата ФРВ, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} Y(f) &= \sum_{k=1}^N Y_k(f) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{2^k} H_k(\pm f_{\overline{1,k}}) \cdot \delta \left[f + \sum_{l=1}^k (\pm f_l) \right] \times \\ &\times \prod_{i=1}^k U_i \cdot \exp[j \cdot (\pm \phi_i)]. \end{aligned} \quad (5)$$

При формировании математической модели НИС на основе КУДН соотношения, определяющие НПФ, будут содержать коэффициенты разложения характеристик резистивных НСЭ в гипергеометрические ряды Гаусса, соответствующие виду аппроксимирующей ФДН [8, 9].

Покажем это на примерах характеристики НСЭ, характеристики которых приведены на рис. 2.

Как известно [5], НСЭ резистивного типа является двухвыводным элементом, который характеризуется кривой зависимости в ампер-вольтовой системе координат. В зависимости от вида этой кривой различают нелинейные резисторы трех видов: управляемый напряжением, управляемый током, управляемый напряжением и током (мощностью) (рис.2, а–в).

Для описания соотношений «вход – выход» перечисленных типов НСЭ воспользуемся трансцендентной ФДН [8] вида

$$F[x(t)] = F_0 + A \cdot \{1 + [B/x(t)]^p\}^{-1/S}, \quad (6)$$

где F_0 , S , p , A , B – параметры, которые при описании резистивных НСЭ будут иметь подстрочные индексы: R , r – для резистора, G , g – для проводимости.

Первым рассмотрим алгоритм характеристики резистивного НСЭ, управляемого напряжением (рис. 2, а). Ток, текущий через подобный резистор, определяется соотношением $i_G(t) = G[u(t)]$, где $G[\cdot]$ – однозначный функционал с нулевой памятью.

Пусть рабочая точка резистора характеризуется равенствами: $i_G(t) = i_0$, $e_G(t) = U_0$, а его установившийся режим – соотношениями: $i_G(t) - i_0 = i_g(t)$,

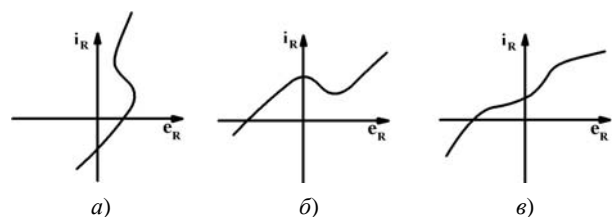


Рис. 2. Характеристики нелинейного резистивного элемента:

а – управляемого напряжением; б – управляемого током; в – управляемого напряжением и током

$e_G(t) - U_0 = e_g(t)$, где $e_g(t)$, $i_g(t) = G[e_g(t)]$ – инкрементальные значения управляющего напряжения и тока. Для малых воздействий нелинейный резистор моделируется проводимостью $g_0 = \text{const}$, которая при расчете НПФ включается в ассоциативный линейный инерционный $2n$ -полюсник.

Отклик нелинейного резистора на воздействие $e_G(t)$ вида (2) с помощью ФДН (6) описывается следующим образом:

$$i_G(t) = G[e_G(t)] = A_G \cdot (1 + a_{0G}^{-1} \cdot \tilde{q}_G^{-p_G})^{-1/S_G}, \quad (7)$$

где $a_{0G} = [U_0/B_G]^{p_G}$; $\tilde{q}_G = 1 + z_G$, $z_G = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^N [\ddot{U}_i \cdot e^{j \cdot \omega_i \cdot t} + \ddot{U}_i \cdot e^{-j \cdot \omega_i \cdot t}]$.

Поскольку, согласно [8, 9], параметр p_G – произвольное действительное число, удовлетворяющее неравенству $\tilde{q}_G^{-p_G} < 1$, то бином $(1 + a_{0G}^{-1} \cdot \tilde{q}_G^{-p_G})^{-1/S_G}$ при $|a_{0G}^{-1}| \leq 1$ принимает вид

$$(1 + a_{0G}^{-1} \cdot \tilde{q}_G^{-p_G})^{-1/S_G} = {}_2F_1(S_G^{-1}; b; b; -a_{0G}^{-1} \cdot \tilde{q}_G^{-p_G}), \quad (8)$$

где ${}_2F_1(S_G^{-1}; b; b; -a_{0G}^{-1} \cdot \tilde{q}_G^{-p_G}) = \sum_{k=0}^{\infty} (S_G^{-1})_k \cdot (-1)^k \times \times (k! \cdot a_{0G}^k)^{-1} \cdot \tilde{q}_G^{-p_G \cdot k}$ – вырожденная гипергеометрическая функция Гаусса; $(S_G^{-1})_k = \Gamma(S_G^{-1} + k) / \Gamma(S_G^{-1})$ – факториальная функция, $(S_G^{-1})_0 = 1$; $\Gamma(S_G^{-1})$ – гамма-функция Эйлера ($S_G^{-1} > 0$) [10]. При этом величина линейной проводимости $g_0 = A_G \cdot (1 + a_{0G}^{-1})^{-1/S_G} / U_0$ определяется при $z_G = 0$.

Для определения соотношения «вход – выход» инкрементальной составляющей рассматриваемой нелинейной проводимости необходимо выполнить соответствующие преобразования.

Результат возведения в степень $(-p_G \cdot k)$ бинома $\tilde{q}_G = (1 + z_G)$, согласно [10], имеет вид

$$(1 + z_G)^{-p_G \cdot k} = {}_2F_1(p_G \cdot k; b; b; -z_G), \quad (9)$$

где ${}_2F_1(p_G \cdot k; b; b; -z_G) = \sum_{h=0}^{\infty} (p_G \cdot k)_h \cdot (-1)^h \cdot (h!) \cdot z_G^h$ – гипергеометрическая функция Гаусса; $(p_G \cdot k)_h = \Gamma(p_G \cdot k + h) / \Gamma(p_G \cdot k)$ – факториальная функция, $(p_G \cdot k)_0 = 1$, $\Gamma(p_G \cdot k)$ – гамма-функция Эйлера, $0 < z_G < 1$.

Вводя параметр $\gamma_G = 1/S_G$ и используя (8) и (9), представим (7) следующим образом:

$$i_G(t) = g_0 \cdot U_0 + A_G \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{(\gamma_G)_k \cdot (p_G \cdot k)_h \cdot (-1)^{h+k}}{k! \cdot a_{0G}^k \cdot h! \cdot 2^h} \times \times \left[\sum_{i=1}^N (\ddot{U}_i \cdot e^{j \cdot \omega_i \cdot t} + \ddot{U}_i \cdot e^{-j \cdot \omega_i \cdot t}) \right]^h. \quad (10)$$

Применяя формулу бинома Ньютона к содержанию квадратной скобки (10), получаем соотношение «вход – выход» инкрементального нелинейного резистора рассматриваемого типа

$$i_g(t) = A_G \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{(\gamma_G)_k \cdot (p_G \cdot k)_h \cdot (-1)^{h+k}}{k! \cdot a_{0G}^k \cdot h! \cdot 2^h} \times \times \sum_{s=0}^h \binom{h}{s} \cdot \left[\sum_{i=1}^N \ddot{U}_i \cdot e^{j \cdot \omega_i \cdot t} \right]^s \cdot \left[\sum_{i=1}^N \ddot{U}_i \cdot e^{-j \cdot \omega_i \cdot t} \right]^{h-s} \quad (11)$$

Используя, согласно [8], формулу мультиномиального разложения для преобразования выражений в квадратных скобках (1), получаем

$$i_G(t) = A_G \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{(\gamma_G)_k \cdot (p_G \cdot k)_h \cdot (-1)^{h+k}}{k! \cdot a_{0G}^k \cdot 2^h} \times \times \sum_{s=0}^h \sum_{q_1=0}^s \dots \sum_{q_N=0}^{h-s} \sum_{r_1=0}^{h-s} \dots \sum_{r_N=0}^{h-s} \prod_{i=1}^N \frac{\ddot{U}_i^{q_i} \cdot \ddot{U}_i^{r_i}}{q_i! \cdot r_i!} \cdot e^{j \cdot \left(\sum_{i=1}^N n_i \omega_i \right) \cdot t} \quad (12)$$

где $\{q_i\}$ и $\{r_i\}$ ($i = \overline{1, N}$) – множество всевозможных разбиений целых чисел s и $(h-s)$ на N неотрицательных целых чисел и нулей, соответственно.

Если определить g_i как меньшее из чисел q_i и r_i , то большее из них определится суммой $g_i + |n_i|$, где $n_i = q_i - r_i$. Для положительной частотной полуоси введем вспомогательные переменные $n = \sum_{i=1}^N |n_i|$,

$\beta = \sum_{i=1}^N g_i$, где неравенства $n_i \geq 0$ соответствуют круговым частотам компонент с амплитудами \ddot{U}_i , а неравенства $n_i < 0$ – круговым частотам компонент с амплитудами \ddot{U}_i .

В соотношении (12) и далее по тексту индекс k соответствует порядку функционала отклика (1). Под переменной n следует понимать порядок комбинационного колебания (КК) отклика на воздействие (2), а под переменной h – текущий порядок нелинейности.

В работе [8] было показано: во-первых, что образование КК с положительно определенными частотами в анализируемой НИС возможно лишь тогда, когда k, h, n, β являются числами одинаковой четности, а во-вторых, для указанных величин справедливо равенство

$$h = n + 2\beta. \quad (13)$$

Применяя результаты работы [8] с учетом (13) и известных факториальных соотношений [8, 10], получаем

$$(g_i + |n_i|)! = |n_i|! \cdot (|n_i| + 1)_{g_i}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} p_G \cdot k \cdot (p_G \cdot k - 1) \cdot \dots \cdot (p_G \cdot k - n - 2 \cdot \beta + 1) = \\ = (-1)^n \cdot 2^{2\beta} \cdot (-p_G \cdot k)_n \cdot [(n - p_G \cdot k)/2]_{\beta} \times \\ \times [(n - p_G \cdot k + 1)/2]_{\beta}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $(p_G \cdot k)_m = p_G \cdot k \cdot (p_G \cdot k + 1) \cdot \dots \cdot (p_G \cdot k + m - 1)$ – символ Похгаммера, а $(p_G \cdot k)_m = 1$ при $m \leq 0$. Учитывая выражения (13)–(15), получаем формулу отклика $i_g(t)$ инкрементальной нелинейной резистивной проводимости

$$\begin{aligned} i_g(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{G;k,n} \cdot \sum_{\beta=1}^{\infty} \left(\frac{n - p_G \cdot k}{2}\right)_{\beta} \cdot \left(\frac{n - p_G \cdot k + 1}{2}\right)_{\beta} \times \\ \times \sum_{g_1=0}^{\beta} \sum_{g_2=0}^{\beta} \dots \sum_{g_N=0}^{\beta} \prod_{i=1}^N \frac{\dot{U}_i^{g_i} \cdot \ddot{U}_i^{g_i + |n_i|}}{g_i! \cdot |n_i|! \cdot (|n_i| + 1)_{g_i}} \cdot e^{\left[j \cdot \left(\sum_{i=1}^N n_i \omega_i \right) \cdot t \right]}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $A_{G;k,n} = A_G \cdot (\gamma_G)_k \cdot (-p_G \cdot k)_n \cdot (-1)^k / (k! \cdot a_{0G}^k \cdot 2^n)$.

Тогда число положительно определенных частот КК отклика рассматриваемого нелинейного резистора на воздействие (2), согласно [1], определяется числом разбиений величины $\beta = 0, 5 \cdot (k - n)$ на N неотрицательных слагаемых, которое равно $Q = C_{0,5 \cdot (k-n) + N - 1}^{N-1}$. Это позволяет изменить порядок суммирования в правой части (16) следующим образом:

$$i_g(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^{\infty} A_{G;k,n,\beta} \cdot z_{U;\beta} \cdot \exp \left[j \cdot \left(\sum_{i=1}^N n_i \cdot \omega_i \right) \cdot t \right], \quad (17)$$

где величины $A_{G;k,n,\beta} = A_{G;k,n} \cdot [(n - p_G \cdot k)/2]_{\beta} \times [(n - p_G \cdot k + 1)/2]_{\beta}$ не зависят от амплитуд, частот и фаз гармонических компонент (2); $z_{U;\beta} =$

$= \sum_{g_1=0}^{\beta} \sum_{g_2=0}^{\beta} \dots \sum_{g_N=0}^{\beta} \prod_{i=1}^N \frac{\dot{U}_i^{g_i} \cdot \ddot{U}_i^{g_i + |n_i|}}{g_i! \cdot |n_i|! \cdot (|n_i| + 1)_{g_i}}$ – амплитуды напряжений КК отклика данного НСЭ.

В частотной области Y -координатного базиса изображение отклика рассматриваемой нелинейности на воздействие (2) получается суммированием результатов прямого преобразования Фурье k -го порядка слагаемых правой части (17), $k = \overline{1, \infty}$

$$i_g(f) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^{\infty} A_{G;k,n,\beta} \cdot z_{U;\beta} \cdot \delta \left(f \pm \sum_{i=1}^N n_i \cdot \omega_i \right). \quad (18)$$

Величины $A_{G;k,n,\beta}$ являются членами Y -матрицы ассоциированного линейного инерционного $2n$ -полюсника (рис. 1), которая рассчитывается при опре-

делении величин НПФ методом нелинейных токов [1, 4] на частотах КК воздействия (2).

Алгоритм характеристики нелинейного резистора, управляемого током (рис. 2, б), аналогичен алгоритму характеристики нелинейного резистора, управляемого напряжением.

Пусть ток, текущий через резистор, управляемый током, будет определяться формулой $i_R(t) = R[i_R(t)]$, где $R[\cdot]$ – однозначный функционал с нулевой памятью. Тогда рабочая точка этого резистора характеризуется равенствами: $i_R(t) = I_0$, $e_G(t) = U_0$, а установившийся режим – соотношениями: $i_R(t) - I_0 = i_r(t)$, $e_R(t) - U_0 = e_r(t)$, где $i_r(t)$, $e_r(t)$ – инкрементальные значения управляющего тока и напряжения. При этом для малых воздействий нелинейный резистор моделируется сопротивлением $r_0 = \text{const}$.

В Z -координатном базисе отклик рассматриваемого нелинейного резистора на воздействие вида (2) описывается с помощью ФДН (6) следующим образом:

$$e_R(t) = R[i_R(t)] = A_R \cdot (1 + a_{0R}^{-1} \cdot \tilde{q}_R^{-p_R})^{-1/S_R}, \quad (19)$$

где $a_{0R} = [I_0/B_R]^{p_R}$; $\tilde{q}_R = 1 + z_R$, $z_R = \frac{1}{2} \times$

$\times \sum_{i=1}^N [\dot{I}_i \cdot e^{j \cdot \omega_i \cdot t} + \ddot{I}_i \cdot e^{-j \cdot \omega_i \cdot t}]$; \dot{I}_i , \ddot{I}_i – амплитуды комплексной и комплексно-сопряженной составляющих i -й компоненты воздействия. При $z_R = 0$ величина линейного сопротивления определяется равенством $r_0 = A_R \cdot (1 + a_{0R}^{-1})^{-1/S_R} / I_0$.

По аналогии с предыдущим случаем, получаем формулу изображения отклика инкрементального нелинейного резистора, управляемого током $i_r(t)$, в Z -координатном базисе во временной и частотной областях, соответственно:

$$e_r(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^{\infty} A_{R;k,n,\beta} \cdot z_{I;\beta} \cdot \exp \left[j \cdot \left(\sum_{i=1}^N n_i \cdot \omega_i \right) \right], \quad (20)$$

$$e_r(f) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^{\infty} A_{R;k,n,\beta} \cdot z_{I;\beta} \cdot \delta \left(f \pm \sum_{i=1}^N n_i \cdot \omega_i \right), \quad (21)$$

где величины $A_{R;k,n,\beta} = A_{R;k,n} \cdot [(n - p_R \cdot k)/2]_{\beta} \times [(n - p_R \cdot k + 1)/2]_{\beta}$, $A_{R;k,n} = A_R \cdot (\gamma_R)_k \cdot (-p_R \cdot k)_n \times (-1)^k / (k! \cdot a_{0R}^k \cdot 2^n)$ не зависят от амплитуд, частот и фаз гармонических компонент воздействия (2);

$z_{I;\beta} = \sum_{g_1=0}^{\beta} \dots \sum_{g_N=0}^{\beta} \prod_{i=1}^N \frac{\dot{I}_i^{g_i + |n_i|} \cdot \ddot{I}_i^{g_i}}{g_i! \cdot |n_i|! \cdot (|n_i| + 1)_{g_i}}$ – амплитуды

токов КК отклика рассматриваемого НСЭ. Величины $A_{R;k,n,\beta}$ являются членами Z -матрицы ассоциированного линейного инерционного $2n$ -полюсника,

которая рассчитывается при определении НПФ методом генераторов искажений [1] на частотах КК воздействия (2).

Поскольку объектом исследования являются конвергентные нелинейные системы, то соотношения «вход – выход» НСЭ, входящих в них, должны удовлетворять условию монотонности. Выполнение этого условия позволяет гарантировать существование и единственность однозначных инверсий соотношений «вход – выход» резистивных НСЭ всех трех типов управления для режимов малой нелинейности. Для характеристики нелинейного резистора, управляемого мощностью (рис. 2, в), необходимо использовать соотношения (18) и (21). В этом случае одновременные инверсии этих выражений являются взаимно однозначными и единственными.

В заключение отметим, что общее выражение для установившегося отклика на любом из выходов анализируемой НИС (рис. 1) в частотной области в соответствии с соотношением (6) и учетом соотношений (18), полученных на основе КУДН, в Y -координатном базисе будет представлять собой ФРВГ следующего вида:

$$i_G(f) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{\beta=0}^{\infty} (-1)^{h+k+n} \cdot \frac{1}{2^{k-2\beta}} \cdot H_{k,\beta}(\pm f_{1,k}) \times \\ \times \sum_{g_1=0}^{\beta} \dots \sum_{g_N=0}^{\beta} \prod_{i=1}^N \frac{\dot{U}_i^{g_i+|n_i|} \cdot \ddot{U}_i^{g_i}}{g_i! \cdot |n_i|! \cdot (|n_i|+1)_{g_i}} \times \\ \times \delta\left(f \pm \sum_{i=1}^N n_i \cdot f_i\right), \quad (22)$$

где величины $A_{G;k,n,\beta}$ соотношений вида (18) входят в НПФ $H_{k,h}(\pm f_{1,k})$, соответствующую порядку инкрементальной эквивалентной схемы НИС. Выражение вида (22) позволяет рассчитать любую составляющую спектра установившегося отклика НИС на многочастотное воздействие на том ее выходе, на котором расположен резистивный НСЭ.

Предложенный метод характеристики резистивных нелинейных элементов на основе ККДН в терминах математического аппарата ФРВГ может быть применен и для инерционных НСЭ, и для нелинейных управляемых источников с различным типом управления. Однако рассмотрение указанных вопросов, учитывая ограниченный объем статьи, является предметом отдельной публикации.

ВЫВОДЫ

1. Предложены алгоритмы характеристики НСЭ резистивного типа, ориентированные на машинный анализ режимов НИС, на основе КУДН.

2. Инкрементальные соотношения «вход – выход» резистивных НСЭ любого типа управления, полученные на основе КУДН, характеризуются высокой степенью подобия, что позволяет унифицировать алгоритм формирования математической модели исследуемых НИС в терминах функциональных рядов Вольтерры – Гаусса.

3. Применение ФДН для описания соотношений «вход – выход» резистивных НСЭ по сравнению с традиционным представлением в виде целостепенных рядов дает ощутимый выигрыш в отношении используемого объема памяти. Если предположить, что каждый из M резистивных НСЭ, которые входят в эквивалентную схему моделируемой НИС, характеризуется m -й степенью нелинейности, то объем памяти, необходимый для описания резистивных НСЭ на основе предлагаемых алгоритмов характеристики, составит величину, в $m/5$ (или в $m/3$) раз меньшую по сравнению с традиционным их описанием, в зависимости от вида ФДН [7, 9]. Полученный выигрыш становится особенно ощутимым при моделировании НИС на базе ФМ, имеющих высокую степень интеграции.

4. Вид функциональной зависимости «вход – выход» конвергентного резистивного НСЭ существенно не влияет на математическую форму ее представления в терминах КУДН, поскольку ФДН обладают высокими адаптивными свойствами.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР № ДБО3916 «Дослідження алгоритмів обробки сигналів в умовах інтенсивної протидії з урахуванням неідеальності каналів передачі та приймання».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богданович Б. М. Методы нелинейных функционалов в теории электрической связи // Б. М. Богданович, Л. А. Черкас, Е. В. Задедюрин, Ю. М. Вувуникян. – М. : Радио и связь, 1990. – 280 с.
2. Бибииков Ю. Н. Локальные проблемы теории многочастотных нелинейных колебаний / Ю. Н. Бибииков. – СПб. : Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та, 2003. – 169 с.
3. Владимиров В. И. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем // В. И. Владимиров, В. П. Лихачев, В. М. Шляхин. – М. : Радиотехника, 2004. – 384 с.
4. Гаврилов Л. П. Нелинейные цепи в программах схемотехнического моделирования / Л. П. Гаврилов. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 367 с.
5. Данилов Л. В. Теория нелинейных электрических цепей // Л. В. Данилов, П. Н. Магханов, Е. С. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.: ил.
6. Мошнина Е. Н. Методы аппроксимации нелинейных характеристик радиоустройств / Е. Н. Мошнина, В. В. Ромашов, Е. А. Шуненкова (Е. А. Жиганова), О. В. Перцева // Радиотехника, телевидение и связь. Межвузовский сборник научных трудов, посвященный 110-летию В. К. Зворыкина. – Муром : МИВЛГУ, 1999. – С. 77–80.

7. Шустов М. А. Приборы, методы и среды регистрации и обработки информации на основе бистабильных и промежуточных состояний [Электронный ресурс] : дис. доктора техн. наук : 01.04.01 : защищена 14.06.07 : утв. 18.01.08 / Шустов Михаил Анатольевич. – М. : РГБ, 2007. – 286 с.: илл. – Режим доступа: <http://diss.rsi.ru/07/0806/070806026.pdf>. – Загл. с экрана.
8. Гулин С. П. Анализ спектра отклика нелинейности, представленной функцией динамического насыщения, при многочастотном воздействии / С. П. Гулин. – Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2008. – № 1. – С. 31–37.
9. Гулин С. П. Расчет спектра отклика нелинейности, представленной логарифмической функцией динамического насыщения, при многочастотном воздействии // С. П. Гулин, А. С. Гулин. – Радиотехника. – 2009. – № 159. – С. 373–376.
10. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации : перевод с англ. / Ю. Люк. – М. : Мир, 1980. – 608 с.

Надійшла 19.08.2009
Після доробки 15.09.2009

Гулін С. П., Гулін О. С.

ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ РЕЗИСТИВНИХ НЕЛІНІЙНИХ СХЕМНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ КЕРОВАНОГО ДИНАМІЧНОГО НАСИЧЕННЯ

На основі концепції керованого динамічного насичення (ККДН) запропоновано алгоритми характеристики резистивних нелінійних схемних елементів (НСЕ). Інкрементальні співвідношення «вхід – вихід» НСЕ являють собою гіпергеометричні ряди Гаусса, отримані за допомогою функції

динамічного насичення (ФДН). Ці співвідношення дозволяють уніфікувати алгоритм формування математичної моделі конвергентної нелінійної інерційної системи (НІС) в термінах функціональних рядів Вольтерри – Гаусса (ФРВГ) і розрахувати спектральні характеристики її відгуку на багаточастотну дію.

Ключові слова: характеристика, резистивні нелінійні елементи, концепція, кероване динамічне насичення, апроксимація, функціональні ряди Вольтерри – Гаусса, відгук, багаточастотна дія.

Gulin S. P., Gulin A. S.

CHARACTERIZATION OF RESISTIVE NONLINEAR CIRCUIT ELEMENTS OF RADIO AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS ON THE BASIS OF THE CONTROLLED DYNAMIC SATURATION CONCEPT

Algorithms of resistive nonlinear circuit elements (NSE) characterization are proposed based on the concept of controlled dynamic saturation. Incremental ratios «input – output» of NSE are hypergeometric Gauss series achieved using the dynamic saturation function (DSF). These ratios permit to unify the algorithm of convergent nonlinear inertial system (NIS) mathematical model formation in terms of Volterra – Gauss functional series and to calculate spectral characteristics of its response to multifrequency influence.

Key words: characterization, resistive nonlinear, concept, controlled dynamic saturation, approximation, Volterra – Gauss functional series, response, multifrequency influence.

УДК 621.372.852

Карпуков Л. М.¹, Корольков Р. Ю.²

¹Д-р техн. наук, заведуючий кафедрой Запорожского национального технического университета

²Старший преподаватель Запорожского национального технического университета

МЕТОД СИНТЕЗА МИКРОВОЛНОВЫХ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМИ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМИ ШЛЕЙФАМИ

Введена функция фильтрации для полосно-пропускающих фильтров с симметричной структурой, составленной из четвертьволновых отрезков линий и короткозамкнутых шлейфов. Разработан метод получения по функции фильтрации полиномиальных зависимостей для числителей и знаменателя параметров рассеяния фильтра. Предложен способ нахождения волновых сопротивлений звеньев фильтра по его параметрам рассеяния. Приведен пример расчета фильтра по методике, реализующей предложенные соотношения.

Ключевые слова: волновое сопротивление, короткозамкнутый шлейф, полосно-пропускающий фильтр, симметричная структура, фильтр-прототип, четвертьволновой отрезок линии.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост требований к качеству характеристик микроволновых фильтров определяет необходимость совершенствования существующих и разработки новых методов их проектирования. Традиционная методика проектирования микроволновых

фильтров основывается на теории синтеза цепей с сосредоточенными параметрами [1, 2]. Согласно этой методике вначале производится расчет низкочастотного фильтра-прототипа на элементах с сосредоточенными постоянными. Затем с помощью частотного преобразования, введенного Ричардсоном [1]

для цепей с распределенными параметрами, составленными из соразмерных отрезков линий передачи, осуществляется переход от частотной характеристики фильтра-прототипа к характеристике проектируемого микроволнового фильтра. Заключительным этапом традиционного проектирования является физическая реализация структуры фильтра, требующая введения так называемых единичных элементов [1]. Единичные элементы являются избыточными в электрическом смысле, поскольку они должны обеспечивать соединение между собой резонаторов фильтра, не оказывая влияния на его амплитудную характеристику. Единичные элементы выполняются в виде четвертьволновых отрезков линий передачи, следовательно, удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям только на центральной частоте. Поэтому традиционный метод проектирования микроволновых фильтров является по своей сути приближенным, а также не оптимальным, так как единичные элементы не участвуют в формировании частотных характеристик. Другое направление в теории проектирования микроволновых фильтров основывается на использовании цифровых фильтров в качестве прототипов [3, 4]. Процесс проектирования в этом случае состоит из двух этапов. На первом этапе в результате решения задачи аппроксимации заданной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра составляется передаточная функция цифрового фильтра-прототипа в z -области. На втором этапе по выбранной структуре фильтра определяются параметры его звеньев путем численного решения оптимизационной задачи, обеспечивающей наилучшее совпадение передаточных функций фильтра-прототипа и синтезируемого микроволнового фильтра. Развиваются также исследования по разработке методов оптимизации, обеспечивающих нахождение параметров элементов структуры микроволнового фильтра путем прямого решения задачи аппроксимации заданной формы АЧХ [5, 6].

Метод, предлагаемый в настоящей работе, не требует предварительного расчета фильтра-прототипа и решения трудоемких оптимизационных задач. Метод разработан для синтеза полосно-пропускающих микроволновых фильтров, имеющих симметричную структуру, составленную из резонаторов в виде четвертьволновых короткозамкнутых шлейфов, соединенных четвертьволновыми отрезками линий передачи. Предлагаемая процедура синтеза включает в себя следующие этапы: составление функции фильтрации, обеспечивающей заданную форму АЧХ фильтра; нахождение по функции фильтрации пара-

метров рассеяния фильтра, удовлетворяющих условию физической реализуемости; определение волновых сопротивлений шлейфов и отрезков линий по параметрам рассеяния фильтра.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И ФУНКЦИИ ФИЛЬТРАЦИИ

Структуры рассматриваемых фильтров состояются из звеньев в виде отрезков линий передачи и короткозамкнутых шлейфов, изображенных на рис. 1.

Представим характеристики звена фильтра следующим образом [7]:

$$M = \begin{bmatrix} A & -A_{11} \\ A_{11} & -B \end{bmatrix}, \quad A_{21}^2 = A_{11}^2 - AB. \quad (1)$$

Коэффициенты в этих формулах связаны с параметрами рассеяния:

$$S_{11} = \frac{A_{11}}{B}, \quad S_{21} = \frac{A_{21}}{B}, \quad A = \frac{A_{11}^2 - A_{21}^2}{B}.$$

Характеристики каскадного соединения n звеньев вычисляются перемножением характеристик их звеньев [7]:

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} \hat{A} & -\hat{A}_{11} \\ \hat{A}_{11} & -\hat{B} \end{bmatrix} = \prod_{k=1}^n \begin{bmatrix} A_k & -A_{11k} \\ A_{11k} & -B_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\hat{A}_{21} = (-1)^{n-1} \prod_{k=1}^n A_{21k}. \quad (3)$$

Для отрезка линии формулы (1) записываются в виде:

$$M_L = \begin{bmatrix} \Gamma_L^2 - z & -\Gamma_L(1-z) \\ \Gamma_L(1-z) & \Gamma_L^2 z - 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{21L} = (1 - \Gamma_L^2) \sqrt{z}. \quad (4)$$

Для короткозамкнутого шлейфа:

$$M_S = \begin{bmatrix} 2(z - \Gamma_S) & (1 - \Gamma_S)(1 + z) \\ (\Gamma_S - 1)(1 + z) & 2(\Gamma_S z - 1) \end{bmatrix},$$

$$A_{21S} = (1 + \Gamma_S)(1 - z). \quad (5)$$

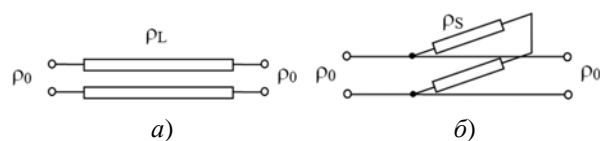


Рис. 1. Элементная база моделирования фильтров: а – отрезок линии передачи; б – короткозамкнутый шлейф

Здесь $\Gamma_L = (\rho - \rho_0)/(\rho + \rho_0)$ – коэффициент отражения от сочленения линий с волновыми сопротивлениями ρ и ρ_0 ; $\Gamma_S = (1 + 3\Gamma_L)/(3 + \Gamma_L)$; ρ_0 – волновое сопротивление нагрузки, ρ – волновое сопротивление отрезка линии или шлейфа; $z = e^{-2j\theta}$, $\theta = 2\pi L/\lambda$, L – длина отрезка линии или шлейфа, λ – длина волны, $j = \sqrt{-1}$.

Представим коэффициенты передачи и отражения фильтра по мощности выражением [1]:

$$|\hat{S}_{21}(\theta)|^2 = \frac{|\hat{A}_{21}(\theta)|^2}{|\hat{A}_{11}(\theta)|^2 + |\hat{A}_{21}(\theta)|^2} = \frac{1}{1 + F^2(\theta)}, \quad (6)$$

$$|\hat{S}_{11}(\theta)|^2 = 1 - |\hat{S}_{21}(\theta)|^2 = \frac{F^2(\theta)}{1 + F^2(\theta)}, \quad (7)$$

где $F(\theta) = |\hat{A}_{11}(\theta)|/|\hat{A}_{21}(\theta)|$ – функция фильтрации.

Для матрицы рассеяния фильтра с симметричной структурой выполняется условие [1]:

$$\frac{\hat{A}_{11}(\theta)}{\hat{A}_{21}(\theta)} = jF(\theta), \quad (8)$$

где $F(\theta)$ – вещественная функция.

Для фильтра, составленного из p отрезков линий и $q = p - 1$ шлейфов, функция фильтрации приобретает, с учетом соотношений (4), (5), следующий вид:

$$F(\theta) = -j \frac{C_n \prod_{k=1}^{p+q} (e^{-j2\theta} - \alpha_k)}{\prod_{k=1}^p (1 - \Gamma_{L_k}^2) \prod_{k=1}^q (1 + \Gamma_{S_k}) e^{-j p \theta} (1 - e^{-j2\theta})^q}, \quad (9)$$

где C_n – коэффициент полинома при старшей степени переменной $z = e^{-2j\theta}$ в числителе этой функции.

Вещественность функции $F(\theta)$ определяет условия, налагаемые на корни α_k числителя. Вещественные корни принимают значения ± 1 , комплексные корни образуют комплексно-сопряженные пары с модулем, равным 1. Количество корней со значением 1 равно $q - 1$. С учетом этих условий функция (9) запишется в виде:

– при p четном

$$F(\theta) = \frac{\gamma_1 \cos(\theta) \prod_{k=1}^r [\cos(\theta)^2 - \beta_k]}{\sqrt{1 - \cos(\theta)^2}}, \quad r = \frac{p}{2}; \quad (10)$$

– при p нечетном

$$F(\theta) = \frac{\gamma_2 \prod_{k=1}^r [\cos(\theta)^2 - \beta_k]}{\sqrt{1 - \cos(\theta)^2}}, \quad r = \frac{p+1}{2}. \quad (11)$$

Здесь γ_1, γ_2 – коэффициенты пропорциональности, $\beta_k = (1 + \text{Re}(\alpha_k))/2$, $\text{Re}(\alpha_k)$ – реальная часть k -й пары комплексно-сопряженных корней.

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА ФИЛЬТРА

Синтез фильтра при выбранном числе шлейфов и отрезков линий начинается с формирования желаемой формы функции фильтрации, описываемой соотношениями (10) или (11). Например, для получения Чебышевской характеристики затухания фильтра достаточно к функциям (10), (11), записанным в виде

$$F(\theta) = \frac{\sum_{k=0}^r C_k \cos(\theta)^{2k}}{W(\theta)}, \quad (12)$$

применить 2-й полиномиальный алгоритм Ремеза.

Здесь $W(\theta) = \sqrt{1 - \cos(\theta)^2}$ или $W(\theta) = \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{1 - \cos(\theta)^2}}$ –

весовые функции.

По найденной функции фильтрации, в соответствии с (6), (8), составляется квадрат модуля знаменателя $|\hat{B}(\theta)|^2$ параметров рассеяния фильтра. Затем вычисляются корни η_k полученного таким образом полинома по переменной $\cos(\theta)^2$ с последующим переходом к корням $\xi_k = \pm \sqrt{\eta_k} \pm \sqrt{\eta_k - 1}$ полинома по переменной $z = e^{-2j\theta}$. Для физической реализуемости параметров рассеяния к функции $\hat{B}(z)$ относим корни, удовлетворяющие условию

$$|\xi_k| \geq 1. \quad (13)$$

Оставшиеся корни относим к функции $\hat{A}(z)$.

Для составления функций $\hat{A}_{11}(z), \hat{A}_{21}(z)$, соответствующих числителю и знаменателю функции фильтрации (12), эта функция представляется в виде (10) или (11). Затем для получения функции фильтрации в форме (9) выполняется переход к корням $\alpha_k = -(1 - 2\beta_k) \pm \sqrt{(1 - 2\beta_k)^2 - 1}$ по переменной $z = e^{-2j\theta}$, после чего числитель и знаменатель дополняются общими сомножителями вида $e^{-j p \theta}, (e^{-j2\theta} - 1)^{q-1}$.

Заключительным этапом синтеза является выделение из матрицы $\hat{M}(z)$ фильтра матриц отдельных звеньев с определением их параметров в виде коэффициентов отражения Γ_L, Γ_S .

Расчет коэффициентов Γ_L, Γ_S производится по значениям коэффициентов отражения $\hat{S}_{11}(0)$ исходного и промежуточных соединений при $z = 0$.

Для отрезка линии, включенного в начале и конце соединения

$$\Gamma_L = \hat{S}_{11}(0). \quad (14)$$

Для шлейфа и отрезка линии, включенного в начале и конце соединения, по выбранному Γ_L находим

$$\Gamma_S = \frac{2\hat{S}_{11}(0) + \hat{S}_{11}(0)\Gamma_L + 1}{\hat{S}_{11}(0)\Gamma_L + 2\Gamma_L + 1}. \quad (15)$$

После нахождения коэффициентов Γ_L, Γ_S матрица $\hat{M}(z)$ исходного и промежуточных соединений умножается слева и справа на матрицы, обратные (4), (5).

На последнем шаге выделения матриц звеньев для случая, когда остается один шлейф:

$$\Gamma_S = 2\hat{S}_{11}(0) + 1. \quad (16)$$

В случае, когда остается два шлейфа, соединенных отрезком линии, определяется вначале Γ_L :

$$\Gamma_{L_{1,2}} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \hat{S}_{11}^2(-1)}}{\hat{S}_{11}(-1)}, \quad (17)$$

где $\hat{S}_{11}(-1)$ коэффициент отражения соединения при $z = -1$. Затем по (15) вычисляется Γ_S . В (17) берется значение Γ_L , по модулю меньшее единицы.

ПРИМЕР СИНТЕЗА ФИЛЬТРА

Пусть фильтр состоит из $p = 5$ отрезков линий и $q = 4$ шлейфов, как показано на рис. 2.

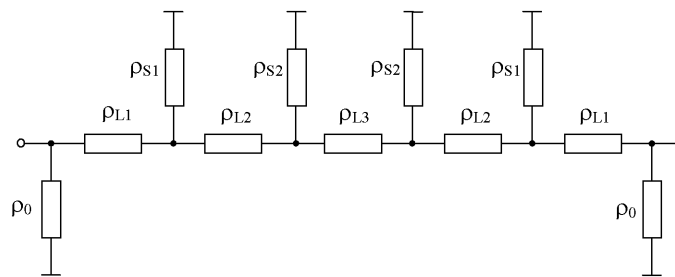


Рис. 2. Структура фильтра

При выбранной структуре фильтра функция фильтрации Чебышевского типа, полученная с использованием 2-го полиномиального алгоритма Ремеза для уровня пульсаций не более 0,025 дБ в полосе пропускания $\Delta\theta = 1,35$, имеет следующий вид:

$$F(\theta) = \frac{34,2[\cos(\theta)^2 - 0,0281] \cdot [\cos(\theta)^2 - 0,2050] \cdot [\cos(\theta)^2 - 0,3616]}{\sqrt{1 - \cos(\theta)^2}}.$$

По функции фильтрации составлены числители и знаменатель параметров рассеяния фильтра:

$$\hat{A}_{21} = e^{-j5\theta}(1 - e^{-j2\theta})^4,$$

$$\hat{A}_{11} = \frac{-34,2}{2^5}(e^{-j2\theta} - 1)^3 \prod_{k=0}^5 (e^{-j2\theta} - \alpha_k),$$

$$\hat{B} = \frac{-34,2}{2^5} \sqrt{\zeta}(e^{-j2\theta} - 1)^3 \prod_{k=0}^5 (e^{-j2\theta} - \xi_k), \quad \zeta = \prod_{k=0}^5 1/\xi_k,$$

где $\alpha = -0,9437 + j0,3308; -0,9437 - j0,3308; -0,59 + j0,8074; -0,59 - j0,8074; -0,2769 + j0,9609; -0,2769 - j0,9609; \xi = -1,935 + j0,7645; -1,935 - j0,7645; -0,861 + j1,5615; -0,861 - j1,5615; -0,0658 + j1,2559; -0,0658 - j1,2559$.

По параметрам рассеяния для волнового сопротивления $\rho_0 = 50$ Ом на входе и выходе фильтра

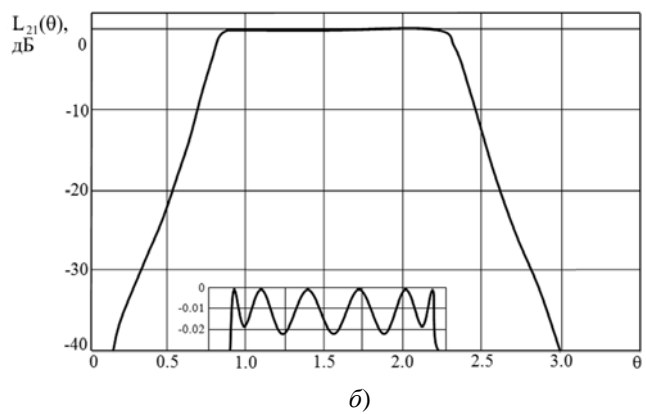
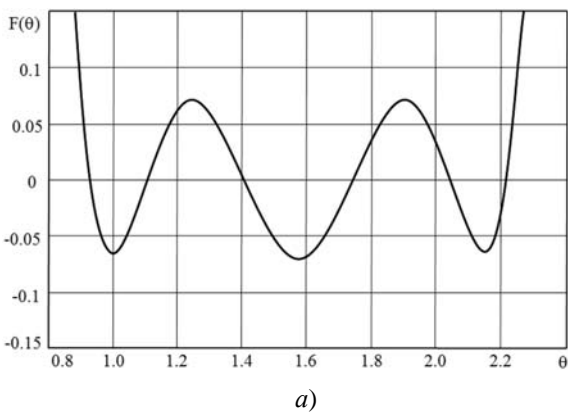


Рис. 3. Функция фильтрации (а) и рабочее затухание (б) фильтра

определены волновые сопротивления отрезков линий и шлейфов: $\rho_{L_1} = 32,35$; $\rho_{S_1} = 27,63$; $\rho_{L_2} = 19,98$; $\rho_{S_2} = 20,44$; $\rho_{L_3} = 17,76$ (Ом).

На рис. 3, а приведена рассчитанная функция фильтрации, а на рис. 3, б построена зависимость рабочего затухания $L_{21}(\theta) = 20 \lg(|\hat{A}_{21}(\theta)/\hat{B}(\theta)|)$ синтезированного фильтра.

Представленный пример синтеза фильтра иллюстрирует простоту и эффективность разработанного метода. В отличие от прямых оптимизационных методов решения задач аппроксимации [5, 6] предлагаемый метод обеспечивает однозначное решение задачи синтеза при минимальных вычислительных затратах. Метод не требует составления фильтра-прототипа, а также применения трудоемкой и неоднозначной оптимизационной процедуры, связанной с реализацией фильтра по заданной передаточной функции [3, 4]. Дополнительное достоинство метода состоит в возможности варьирования значениями волнового сопротивления отрезков линий или шлейфов для обеспечения конструктивной реализуемости фильтра.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод синтеза позволяет получать оптимальные характеристики полосно-пропускающих фильтров, реализуемых на четвертьволновых отрезках линий и короткозамкнутых шлейфах. Особенности метода являются: использование оригинальной функции фильтрации, определяемой структурой проектируемого фильтра; оперирование исключительно с полиномиальными зависимостями числителя и знаменателя параметров рассеяния; простая и эффективная процедура выделения звеньев фильтра и расчета их параметров.

Представленный метод синтеза и полученные соотношения могут быть адаптированы к расчету фильтров различного типа, например, они могут быть использованы при разработки фильтров-прототипов для микроволновых фильтров, реализуемых на отрезках связанных линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hong Jia-Sheng*. Microstrip filters for RF. Microwave applications / Hong Jia-Sheng, Lancaster M. J. – New York : John Wiley, 2001. – 476 p.
2. *Macchiarella G*. Design Techniques for Dual-Passband Filters / G. Macchiarella, S. Tamiazzo // IEEE Trans.

3. *Chih-Ming Tsai*. Planar Filter Design With Fully Controllable Second Passband / Chih-Ming Tsai, Hong-Ming Lee, Chin-Chuan Tsai // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – Vol. 53, No. 11. – P. 3265–3271.
4. *Lin-Chuan Tsai*. Dual-Band Band-Pass Filters Using Equal-length Coupled-Serial-Shunted Lines and Z-Transform Technique / Lin-Chuan Tsai, Ching-Wen Hsue // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2004. – Vol. 52, No. 4. – P. 1111–1117.
5. *Ming-Iu Lai*. Compact Microstrip Dual-Band Bandpass Filters Design Using Genetic-Algorithm Techniques / Ming-Iu Lai, Shyh-Kang Jeng // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2006. – Vol. 54, No. 1. – P. 160–167.
6. *Белов Ю. И.* Использование генетического алгоритма для синтеза пассивных микрополосковых устройств / Ю. И. Белов, А. А. Морозов, С. Д. Ханов // Microwave & Telecommunication Technology: 16th Int. Crimean Conference (CriMiCo'2006), 11–15 сент. 2006 г. : тез. докл. – Севастополь, 2006. – С. 537–538.
7. *Карпуков Л. М.* Метод расчета микроволновых ступенчатых фильтров на соразмерных отрезках линий / Л. М. Карпуков, Р. Ю. Корольков // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2008. – № 1. – С. 13–16.

Надійшла 28.08.2009
Після доробки 07.09.2009

Карпуков Л. М., Корольков Р. Ю.

МЕТОД СИНТЕЗУ МІКРОХВИЛЬОВИХ СМУГО-ПРОПУСКАЮЧИХ ФІЛЬТРІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМИ ЧВЕРТЬХВИЛЬОВИМИ ШЛЕЙФАМИ

Введено функцію фільтрації для смуго-пропускаючих фільтрів з симетричною структурою, складеною з чвертьхвильових відрізків ліній і короткозамкнених шлейфів. Розроблено метод отримання по функції фільтрації поліноміальних залежностей для чисельників і знаменника параметрів розсіяння фільтра. Запропоновано спосіб знаходження хвильових опорів ланок фільтра за його параметрами розсіяння. Наведено приклад розрахунку фільтра за методикою, що реалізує запропоновані співвідношення.

Ключові слова: короткозамкнений шлейф, смуго-пропускаючий фільтр, симетрична структура, фільтр-прототип, хвильовий опір, чвертьхвильовий відрізок лінії.

Karpukov L. M., Korolkov R. Y.

METHOD OF SYNTHESIS OF MICROWAVE PASS-BAND FILTERS WITH SHORTED QUARTER-WAVE STUBS

The function of filtration is entered for pass-band filters with a symmetric structure, composed of quarter-wave sections of lines and shorted stubs. The method of determination of polynomial dependences for numerators and denominator of filter dispersion parameters is developed. The method of filter sections wave resistance calculation by its scattering parameters is proposed. The example of filter calculation by the procedure realizing the proposed relationships is described.

Key words: wave resistance, shorted stub, pass-band filter, symmetric structure, filter-prototype, quarter-wave section of line.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ

Уточнена методика измерений выходного сопротивления источников сигналов для диапазона частот до 10 МГц.

Ключевые слова: источники сигналов, выходное сопротивление, схема измерений, методика измерений, расчетные формулы.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных параметров радиоэлектронных устройств является выходной импеданс $Z_{\text{вых}}$, значение которого определяет условие передачи сигналов между отдельными устройствами.

Кроме того, при измерениях энергетических параметров сигналов значение выходного импеданса устройств генерации и обработки сигналов определяет погрешность взаимодействия средства измерений и объекта измерений [1, 2].

Измерения выходного импеданса пассивных устройств осуществляются через прямые измерения и не представляют особого труда. Иначе обстоит дело с измерениями выходного импеданса активных устройств, на выходе которых генерируются или формируются сигналы. В этом случае приходится прибегать к косвенным измерениям.

По одной из методик [3] выходное сопротивление источников синусоидальных сигналов определяют по схемам рис. 1 при разных значениях нагрузки R_d и вычисляют по соотношению:

$$R_{\text{вых}} = R_d \frac{U_1 - U_2}{U_2} = R_d \frac{1 - n}{n}, \quad (1)$$

где $n = U_2/U_1$; U_1 – напряжение выходного сигнала при нагрузке $R_d = \infty$, т. е. без дополнительной нагрузки; U_2 – напряжение выходного сигнала при подключении дополнительного резистора сопротивлением R_d .

Значение резистора R_d выбирается таким образом, чтобы изменение показаний вольтметра при подключении резистора составило не менее 10 %.

По другой методике [4] к выходу источника сигнала подключают резистор сопротивлением R_{d1} и фиксируют показания вольтметра U_1 . Затем подключают резистор сопротивлением $R_{d2} = R_{d1}/2$ и фиксируют показания вольтметра U_2 . После чего значение выходного сопротивления вычисляют по выражению:

$$R_{\text{вых}} = R_{d1} \frac{U_1 - U_2}{2U_2 - U_1} = R_{d1} \frac{1 - n}{2n - 1}. \quad (2)$$

При этом подключаемые резисторы R_{d1} и R_{d2} следует выбирать таким образом, чтобы не перегрузить исследуемую схему и не вывести ее из строя.

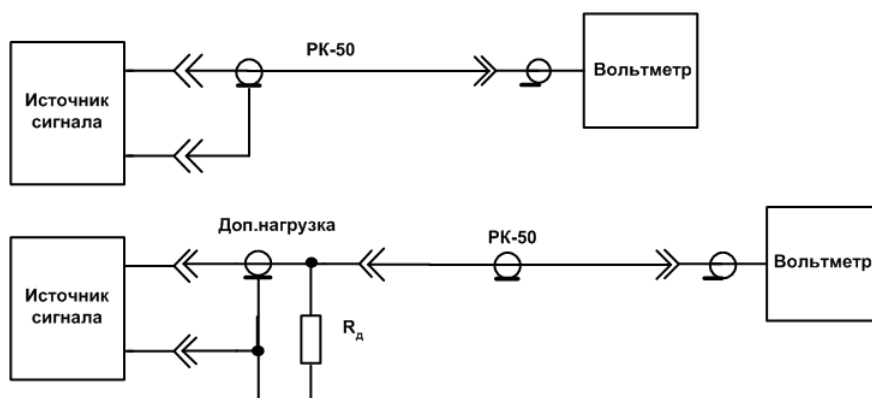


Рис. 1. Схемы измерения выходного сопротивления

Результаты моделирования показывают, что при использовании соотношений (1) и (2) приемлемая погрешность измерений соответствует выполнению условий $f_c \leq 1$ МГц, $R_{\text{вых}} f_c \leq 10^8$ Ом·Гц, где f_c – частота сигнала.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

В упомянутых методиках не учитываются параметры входной цепи вольтметра $R_{\text{вх}}, C_{\text{вх}}$, а также параметры радиочастотного кабеля, что обуславливает значительную погрешность измерений выходного сопротивления в более широком диапазоне частот как устройств, формирующих сигналы синусоидальной формы, так и устройств, генерирующих сигналы с формой, значительно отличающейся от гармонической.

Схема, эквивалентная схеме измерений рис. 1, в диапазоне частот до 10 МГц, когда радиочастотный кабель, нагруженный на высокое входное сопротивление вольтметра $Z_{\text{вх}}$, может быть заменен емкостью $C_{\text{каб}}$ порядка 100 пФ/м, представлена на рис. 2.

Из данной схемы следует, что до подключения дополнительного резистора R_d показания вольтметра действующего напряжения при условии, что сигнал на выходе схемы – гармонический, а выходное сопротивление – чисто активное, будут равны

$$U_{d1} = \frac{E\Gamma}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R_{\text{вых}}^2}}, \tag{3}$$

где $C = C_{\text{каб}} + C_{\text{вх}}$.

После подключения резистора R_d показания вольтметра будут соответствовать значению:

$$U_{d2} = \frac{E\Gamma}{\sqrt{(1 + R_{\text{вых}}/R_d)^2 + \omega^2 C^2 R_{\text{вых}}^2}}. \tag{4}$$

Решая данные уравнения относительно $R_{\text{вых}}$, получим

$$R_{\text{вых}} = R_d \frac{-n^2 + \sqrt{n^2 - a^2(n^2 - 1)^2}}{n^2 + a^2(n^2 - 1)^2}, \tag{5}$$

где $a = 2\pi f C R_d$.

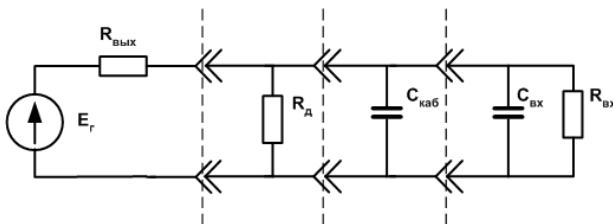


Рис. 2. Эквивалентная схема измерений выходного сопротивления

Результаты моделирования показывают, что если выходное сопротивление источников гармонических сигналов можно полагать чисто активным и выполняются условия $R_{\text{вых}} f_c \leq 10^9$ Ом·Гц и $f_c \leq 10$ МГц, погрешность измерений $R_{\text{вых}}$ по выражению (5) не превысит долей процента, в то время как при использовании соотношения (1) погрешность измерений превышает 25 %.

При измерении выходного сопротивления источников сигналов сложных форм при частотах более 1 МГц следует учитывать, что радиочастотный кабель с волновым сопротивлением Z_0 в рассогласованном режиме ($Z_{\text{вх}} \neq Z_0$) может значительно исказить сигнал. На рис. 3 представлены осциллограммы исходного сигнала частотой 10 МГц и сигнала на входе вольтметра для кабеля длиной $l = 0,8$ м при $R_{\text{вых}} = 10$ Ом; $C_{\text{вх}} = 30$ пФ; $Z_0 = 50$ Ом. При этом результаты измерений напряжений U_1 и U_2 вольтметром действующего напряжения будут содержать значительные погрешности, приводящие к неверным результатам измерений выходного сопротивления.

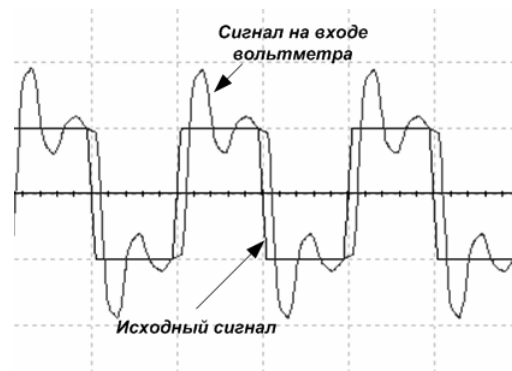


Рис. 3. Искажения сигнала частотой 10 МГц при рассогласовании линии передачи

Поэтому для измерений выходного сопротивления источников сигналов сложных форм в схему измерений рис. 1 вместо обычного вольтметра необходимо подключать селективный вольтметр или анализатор спектра с настройкой на частоту первой гармоники сигнала.

ВЫВОДЫ

Данная методика косвенных измерений выходного сопротивления источников сигналов любых форм позволяет значительно уменьшить погрешность измерений в диапазоне частот до 10 МГц за счет учета параметров соединительного кабеля и входной цепи вольтметра.

В діапазоні частот вище 10 МГц радіочастотний кабель не можна розглядати як концентровану ємність, а необхідно розглядати як лінію з розподіленими параметрами і для виконання правильних вимірювань в більш широкому діапазоні частот вирішувати аналогічну задачу з урахуванням розподіленого характеру лінії передачі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. Нормативно-технические документы. – М. : Стандарты, 1988. – 152 с.
2. *Петрищев А. А.* К выбору нормируемых метрологических характеристик вольтметров действующего напряжения / А. А. Петрищев // *Радиоэлектроника, информатика, управління.* – 1999. – № 1. – С. 27–30.
3. *Collinson A.* Measuring Input and Output Impedance [Электронный ресурс] / Andy Collinson. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.zen22142.zen.co.uk/Theory/inzoz.htm>. – Загл. с экрана.

4. ОСТ 45.9096. Стыки цифровых каналов и групповых трактов первичной сети взаимозвязанной сети связи Российской Федерации. Методы испытаний основных параметров. – Введ. 19970101. – М. : ЦНИИС, 2006. – 16 с.

Надійшла 01.09.2009
Після доробки 18.09.2009

Петрищев О. О.

ВИМІРЮВАННЯ ВИХІДНОГО ОПОРУ ДЖЕРЕЛ СИГНАЛІВ

Уточнено методику вимірювань вихідного опору джерел сигналів для діапазону частот до 10 МГц.

Ключові слова: джерела сигналів, вихідний опір, схема вимірювань, методика вимірювань, розрахункові формули.

Petrishchev A. A.

MEASUREMENT OF SIGNAL SOURCES OUTPUT RESISTANCE

The signal sources output resistance measurement technique is improved for the range of frequencies up to 10 MHz.

Key words: signal sources, output resistance, metering circuit, measurement technique, calculation formulae.

УДК 621.372.852.001.11

Фурманова Н. І.¹, Антоненко О. С.², Шинкаренко Е. М.³, Фарафонов О. Ю.⁴, Воропай О. Ю.⁵

¹Аспірант Запорізького національного технічного університету

²Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

³Старший викладач Запорізького національного технічного університету

⁴Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

⁵Старший викладач Запорізького національного технічного університету

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ХВИЛЬОВИХ ОПОРІВ МІКРОСМУЖКОВИХ СМУГОПРОПУСКАЮЧИХ ФІЛЬТРІВ НА ЗВ'ЯЗАНИХ ЛІНІЯХ З ОТВОРАМИ В ЕКРАНІ ВІД ТОВЩИНИ СМУЖКИ МІКРОСМУЖКОВОЇ ЛІНІЇ

Виконано синтез смугопр пропускаючих фільтрів (СПФ) на зв'язаних мікросмужкових лініях різної товщини з отворами в екрані. Проаналізовано вплив товщини смужки мікросмужкової лінії на хвильові опори СПФ. За результатами розрахунків побудовано номограму, завдяки якій спрощується процес проектування СПФ на мікросмужкових лініях з отворами в екрані. Представлена номограма наочно показує залежність хвильових опорів фільтра з отвором в екрануючому шарі від товщини смужки.

Ключові слова: синтез фільтрів, мікросмужкові лінії, екрануючий шар, хвильовий опір фільтра.

Фільтри на паралельних зв'язаних мікросмужкових лініях часто використовуються як компоненти в мікрохвильових інтегрованих ланцюгах завдяки їхній відносно простій конструкції та універсальності. Проте, при їх реалізації у традиційному вигляді на одношарових підкладках у мікросмужковій технології такі фільтри мають два істотних недоліки. По-перше, існування паразитної смуги пропускання на частоті $2f_0$ (f_0 – центральна частота фільтра) [1–3].

Друга проблема пов'язана з труднощами виробництва широкосмужкових фільтрів у зв'язку зі слабким зв'язком між смужками в традиційних структурах. У літературі пропонується досить багато способів поліпшення позасмужкових властивостей фільтрів. В цілому, більшість способів придушення небажаної смуги пропускання в цих фільтрах, описаних в літературі, можна розділити на дві групи: перші базуються на використанні підбору зосередженого на-

© Фурманова Н. І., Антоненко О. С., Шинкаренко Е. М., Фарафонов О. Ю., Воропай О. Ю., 2010

вантаження, введенні додаткових зосереджених або розподілених крайових ємностей, другі ґрунтуються на створенні модифікованих структур із властивими рівними модальними фазовими швидкостями. Останні пропозиції, що враховують складність реалізації при комбінації цих підходів, пропонують використання безперервно змінюваних (нерівномірних) зв'язаних ліній передачі або хвилястих зв'язаних мікросмужкових ліній. Також можливі зовсім інші підходи, наприклад, додаткове введення нулів, обумовлене додатково зв'язаними ємностями, використання двовимірних (2-D) підкладок з фотонною шириною забороненої зони, а також періодична (синусоїдальна) модуляція ширини зв'язаних ліній [1, 2].

У статті [4] пропонується мікросмужкова реалізація фільтрів Чебишева на пов'язаних схемах. Перевагами таких фільтрів є їх відносно просте виробництво, мала вага і здатність отримувати додаткові нулі функції полінома.

У роботі [5] розглянуто фільтри на відрізках зв'язаних ліній і чвертьхвильових резонаторах. Пропонується проектування фільтрів на напівзосереджених колах диференційним і загальним методами, завдяки чому можна мінімізувати рівень шуму.

У статті [6] пропонуються компланарні хвилепровідні мікросмужкові СПФ з ємнісними зв'язками на портах вводу/виводу і шпильковими резонаторами. Завдяки цьому покращуються загороджуючі властивості фільтра таким чином, що уникаються декілька небажаних смуг пропускання.

У роботі [7] виноситься наступна пропозиція: використовувати модифіковану структуру, що поєднує в собі добре відому мікросмужкову лінію і центровану щілину в екрануючому шарі (рис. 1). Ширина щілини може бути відкоректована так, щоб настроїти парні і непарні фазові швидкості для усунення паразитних смуг пропускання. Як додаткова перевага, така структура забезпечує тісний зв'язок (у порівнянні з традиційними мікросмужковими лініями), отже, послаблює вимоги до фізичних розмірів ширини і товщини, коли необхідний сильний зв'язок.

У роботі [8] виконано синтез фільтрів з отворами в екрануючому шарі і проведено порівняння синтезованих фільтрів з результатами електродинамічного моделювання та з характеристиками фільтрів без отворів у екрані. Однак при виконанні розрахунків параметрів фільтрів на зв'язаних мікросмужкових лініях з отворами в екрані не була врахована товщина смужки мікросмужкової лінії (МСЛ).

Метою даної роботи є аналіз впливу товщини смужки мікросмужкової лінії на параметри СПФ та отримання номограми, що відображає залежність

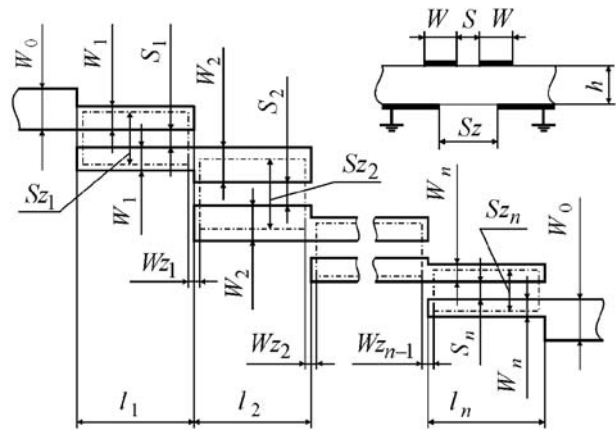


Рис. 1. Топологія фільтра на зв'язаних лініях з отворами в екрані:

- W_i – ширини зв'язаних ліній фільтра; S_i – зазори між зв'язаними лініями; l_i – довжини ланок фільтра; Sz_i – ширина отвору в екрані;
- Wz_i – ширина металізованих ділянок між сусідніми отворами,
- h – товщина діелектричної підкладки

хвильових опорів СПФ на мікросмужкових лініях з отворами в екрануючому шарі від товщини смужки МСЛ і спрощує процес їх проектування.

1. СИНТЕЗ ТОПОЛОГІЇ ЗА ЗАДАНИМИ ХВИЛЬОВИМИ ОПОРАМИ

Вихідними параметрами для розрахунку топології фільтрів на зв'язаних лініях є: рівність $\epsilon_{эф,е}, \epsilon_{эф,оо}$ – ефективних діелектричних проникностей для парного та непарного типів хвиль, $Z_{ое}, Z_{оо}$ – хвильові опори для парного та непарного типів хвиль для кожної ланки фільтра.

У роботі [8] виконано розрахунки для смугопропускаючих фільтрів з апроксимацією Батерворта, що складаються з двох однакових ланок, реалізованих на підкладці з діелектричною проникністю $\epsilon_r = 10$ і товщиною $h = 0,635$ мм. При цьому товщина металізації у розрахунках не враховувалася.

Взявши за основу для подальших розрахунків результати [8], наведені у табл. 1, у даній роботі проведено моделювання СПФ на основі МСЛ з товщинами мікросмужки, рівними 5, 10, 18, 35 і 50 мкм.

Таблиця 1. Хвильові опори і розміри ланок СПФ

№ фільтра	1	2	3	4
Параметри				
$Z_{ое}, \text{Ом}$	77,6718	67,9402	61,8723	93,7350
$Z_{оо}, \text{Ом}$	38,0372	39,9143	42,0550	37,6831
$W_i, \text{мм}$	0,855	0,900	1,222	0,587
$S_i, \text{мм}$	0,456	0,625	1,239	0,212
$Sz_i, \text{мм}$	2,138	2,044	3,161	1,559
$l_i, \text{мм}$	15,6	15,25	15,488	15,48

2. МОДЕЛЮВАННЯ СМУГОПРОПУСКАЮЧИХ ФІЛЬТРІВ НА МІКРОСМУЖКОВИХ ЛІНІЯХ З ВРАХУВАННЯМ ТОВЩИНИ СМУЖКИ МСЛ

Для моделювання і аналізу СПФ на мікросмужкових зв'язаних лініях з отвором в екрануючому шарі використано програму AWR Microwave Office, у якій побудовано конструкції фільтрів і отримано АЧХ фільтрів із різними товщинами смужки мікросмужкових ліній.

Алгоритм побудови номограми залежності хвильових опорів фільтра від товщини смужки МСЛ такий:

1. Побудова в AWR Microwave Office традиційного фільтра з розмірами, розрахованими за традиційною методикою [9].
2. Побудова в AWR Microwave Office фільтрів з отвором в екрані за даними табл. 1, з різною товщиною смужки мікросмужкової лінії.
3. Запуск симулятора.
4. Отримання АЧХ традиційного фільтра і фільтрів з отворами в екрануючому шарі на одному графіку.

5. Аналіз графіків.

6. Оптимізація АЧХ традиційного фільтра до АЧХ фільтра з отвором в екрані і нульовою товщиною смужки мікросмужкової лінії. Визначення розмірів МСЛ і хвильових опорів СПФ після оптимізації.

7. Аналіз зміни геометричних розмірів і хвильових опорів традиційного СПФ після оптимізації.

8. Визначення величини поправки, обумовленої особливостями програми AWR Microwave Office.

9. Оптимізація АЧХ фільтра з нульовою товщиною смужки МСЛ до АЧХ фільтрів з отворами в екрануючому шарі і товщиною смужки МСЛ 5, 10, 18, 35 і 50 мкм відповідно.

10. Визначення хвильових опорів модифікованої структури.

11. Перенесення отриманих даних на графік з урахуванням поправки, визначеної в п. 8.

12. Повторення п.п. 9–11 для кожної структури фільтра.

13. З'єднання відповідних точок на графіку; отримання номограми.

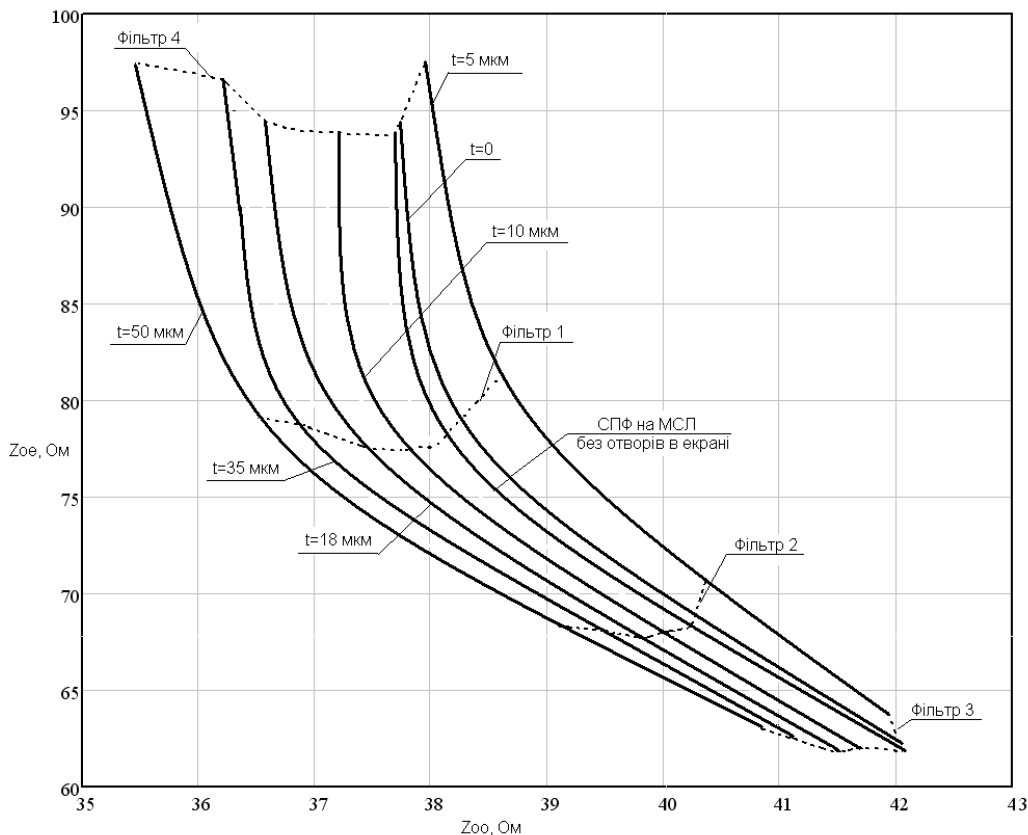


Рис. 2. Номограма залежності хвильових опорів смугопропускаючого фільтра від товщини смужки мікросмужкової лінії:

фільтр i – хвильові опори фільтрів 1, 2, 3 і 4, розміри МСЛ яких наведені в табл. 2; t – товщина смужки МСЛ

Таблиця 2. Хвильові опори СПФ з отвором в екрануючому шарі з різними товщинами смужки мікросмужкової лінії

№ фільтра	Параметри	Фільтр з нульовою товщиною смужки МСЛ	Товщина смужки МСЛ, мкм				
			5	10	18	35	50
1	Z_{oe} , Ом	77,672	81,078	77,431	77,738	78,694	79,099
	Z_{oo} , Ом	38,037	38,563	37,669	37,18	37,179	36,517
2	Z_{oe} , Ом	67,940	70,719	68,778	68,02	69,728	69,989
	Z_{oo} , Ом	39,914	40,359	40,255	40,003	39,836	39,761
3	Z_{oe} , Ом	61,872	63,876	62,124	62,054	62,992	63,281
	Z_{oo} , Ом	42,055	41,929	41,671	41,253	41,172	40,941
4	Z_{oe} , Ом	93,735	97,411	93,916	94,485	96,528	97,535
	Z_{oo} , Ом	37,683	37,944	36,873	36,527	36,305	35,449

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження виконано для 4 СПФ з апроксимацією Батерворта на зв'язаних мікросмужкових лініях з отвором в екрануючому шарі.

В табл. 2 наведено результати розрахунку хвильових опорів для парного і непарного типів хвиль для фільтрів з товщиною смужки МСЛ 5, 10, 18, 35 і 50 мкм.

На рис. 2 показано номограму, побудовану за вищенаведеним алгоритмом.

Як видно з рис. 2, введення щілини у топологію екрануючого шару фільтра змінює параметри фільтра.

За допомогою отриманої номограми можна спростити процес проектування смугопрускаючих фільтрів з отворами в екрануючому шарі за заданими вихідними характеристиками. Для цього необхідно знайти на номограмі точку, яка відповідає заданому значенню хвильових опорів, що синтезовані за умови нульової товщини смужки, знайти відповідну точку на кривій, що позначає необхідну товщину смужки МСЛ, та визначити поправку на хвильові опори.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано вплив товщини смужки мікросмужкової лінії на хвильові опори СПФ. За результатами розрахунків побудовано номограму, за допомогою якої спрощується процес проектування СПФ на мікросмужкових лініях. Зображена номограма наочно показує залежність хвильових опорів фільтра від товщини смужки.

Напрямок подальших досліджень пов'язаний з дослідженням впливу введення незаземлених провідників в отвір в екрануючому шарі уздовж кожної ланки фільтра на параметри СПФ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. F.-R. Yang, K.-P. Ma, Y. Qian, T. Itoh. A uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure and its application

- for microwave circuits // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 1999. – Vol. 47, No. 8. – P. 1509–514.
2. T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. Hernandez, M. Bacaicoa, D. Benito, M. J. Garde, M. Sorolla, M. Guglielmi. New microstrip wiggly-line filters with spurious passband suppression // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, No. 9. – P. 1593–1598.
3. Roberts P. P., Town G. E. Design of microwave filters by inverse scattering // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 1995. – Vol. 43, No. 4. – P. 739–743.
4. Ching-Ku Liao, Pei-Ling Chi, and Chi-Yang Chang. Microstrip Realization of Generalized Chebyshev Filters With Box-Like Coupling Schemes // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2007. – Vol. 55, No. 1. – P. 147–153.
5. Chung-Hwa Wu, Chi-Hsueh Wang, Chun Hsiung Chen. Novel balanced coupled-line bandpass filters with common-mode noise suppression // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2007. – Vol. 55, No. 4. – P. 287–295.
6. Chi-Hsueh Wang, Pu-Hua Deng, Chun Hsiung Chen. Coplanar-waveguide-fed microstrip bandpass filters with capacitively broadside-coupled structures for multiple spurious suppression // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2007. – Vol. 55, No. 4. – P. 768–775.
7. M. del Castillo Velazquez-Ahumada, J. Martel, F. Medina. Parallel coupled microstrip filters with ground-plane aperture for spurious band suppression and enhanced coupling // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2004. – Vol. 52, No. 3. – P. 1082–1086.
8. А.Ю. Фарафонов, А.Ю. Воронай, Л.М. Карпуков, С.Н. Романенко. Синтез микрополосковых полосовых фильтров на связанных линиях с отверстиями в экране // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2008. – № 2. – С. 35–42.
9. Проектирование интегральных устройств СВЧ: справочник / Ю. Г. Ефремов, В. В. Книн, Б. Д. Солганик и др. – К.: Техніка, 1990. – 159 с.

Надійшла 27.05.2009
Після доробки 24.06.2009

Фурманова Н. И., Антоненко А. С., Шинкаренко Э. Н., Фарафонов А. Ю., Воронай А. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВОЛНОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ФИЛЬТРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПОЛОСОПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ С ОТВЕРСТИЯМИ В ЭКРАНЕ ОТ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСКИ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Выполнен синтез полосопропускающих фильтров (ППФ) на связанных микрополосковых линиях различной толщины с отверстиями в экране. Проанализировано влияние толщины микрополосковой линии на волновые сопротивления ППФ. По результатам расчетов построена номограмма, благодаря которой упрощается процесс про-

ектирования ППФ на микрополосковых линиях с отверстиями в экране. Представленная номограмма наглядно отражает зависимость волновых сопротивлений фильтров с отверстием в экранирующем слое от толщины полоска.

Ключевые слова: синтез фильтров, микрополосковые линии, экранирующий слой, волновое сопротивление фильтра.

Furmanova N. I., Antonenko O. S., Shinkarenko E. M., Farafonov O. Y., Voropay O. Y.

RESEARCH OF DEPENDENCE OF IMPEDANCES OF FILTERS WITH THE HOLES IN SCREEN FROM THE MICROSTRIP LINE THICKNESS

The synthesis of the band-pass filters on the coupled microstrip lines of different thickness with the holes in screen are accomplished. Influence of microstrip line thickness on impedances is analysed. On results calculations a nomogram is built which a planning process of the band-pass filters with the holes in screen is simplified due to. The presented nomogram evidently reflects dependence of impedances of filters with the holes in screen on thickness strip.

Key words: synthesis of filters, microstrip lines, ground plane, filter impedance.

**МАТЕМАТИЧНЕ
ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**MATHEMATICAL
AND COMPUTER MODELLING**

УДК 004.81:159.953

Белоус Н. В.¹, Куцевич И. В.²

¹*Канд. техн. наук, профессор Харьковского национального университета радиозлектроники*

²*Аспирант Харьковского национального университета радиозлектроники*

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

В статье описывается модель адаптивного контроля знаний и рассматриваются основные стадии процесса контроля знаний. В статье приведена концепция обучения и контроля знаний испытуемого при использовании различных форм тестовых заданий. Предлагается модифицированная система обучения и оценивания знаний для каждой из форм тестовых заданий. Показаны преимущества использования предложенных методов. На основе описанной модели разработана система компьютерного контроля знаний, которая в настоящее время апробируется в Харьковском национальном университете радиозлектроники для тестирования студентов по различным дисциплинам.

Ключевые слова: адаптивное обучение, контроль знаний, тестирование, тестовое задание, вероятность угадывания, дифференцирующая способность, трудность заданий.

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивное обучение – это способ организации учебного процесса с учетом индивидуального уровня подготовки учащегося до начала обучения или в процессе обучения. Одной из форм адаптивного обучения является тестирование. Адаптивный тест представляется как вариант автоматизированной системы тестирования, в которой заранее известны параметры трудности и дифференцирующей способности каждого задания. Эта система создана в виде компьютерного банка заданий, упорядоченных в соответствии с интересующими характеристиками заданий. Для того, чтобы выбрать задание конкретному студенту, таким образом индивидуализировав процесс обучения и оценивания, строится индивидуальный график каждого из них, представляющий функциональную зависимость трудности текущего

вопроса от правильности ответа студента на предыдущий вопрос [1].

В настоящее время в области образования широкое распространение получили автоматизированные средства обучения, ориентированные на автономное управление образовательным процессом и способные обрабатывать информацию, поступающую из различных источников: баз данных, хранилищ аудио, видео и мультимедиа и т. д. [2]. Такие системы являются технологической основой создаваемых информационных систем.

Проектирование адаптивных обучающих систем с самого начала страдало от того факта, что методология создания основного программного обеспечения не разрабатывалась специально для обучения и не обладала всеми необходимыми атрибутами для поддержки адаптивного обучения.

Проведенний аналіз адаптивних навчаючих систем (ATC, CALAT, ELM-ART, TeachLab, Interbook, PROUST, LISP-Tutor і пр.) виявив ряд недоліків. Основним недоліком є обмежене кількість типів завдань [3–5]. Не во всіх системах реалізовані навіть основні форми тестових завдань.

Цілью роботи є побудова моделі для проведення адаптивного контролю знань навчаємим за допомогою тестування, побудова алгоритму проведення адаптивного тестування, а також розробка системи контролю знань, що враховує завдання різних форм (закритої [многоальтернативні та одноальтернативні], відкритої, на встановлення відповідності між елементами та правильною послідовністю).

1. МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНЬ

Пропонується модель адаптивного контролю знань, що враховує виявлені недоліки систем контролю знань (рис. 1).

Модель адаптивного контролю знань умовно можна розділити на дві частини: керує систему та об'єкти управління.

Керує система містить методи вибору з бази даних питання за заданою темою T з заданим рівнем складності K , а також метод розрахунку оцінки за виконання тесту O_{st} з урахуванням похибки тестування ξ (наприклад, ймовірності гадання правильного відповіді на завдання).

К об'єктам управління слід віднести наступні компоненти.

1. Компонент «База даних» (БД) містить набір питань та завдань, їх рівні складності та тематичну належність, призначених для перевірки знань студента і/або дані для формування завдань. Контрольні завдання можуть також генеруватися автоматично.

2. Компонент «База знань» (БЗ) містить методи і/або моделі процесу адаптивного контролю, а також сукупність знань предметної області.

3. Компонент «Адаптивний контроль знань» виконує наступні функції:

- аналіз проходження тесту студентом (перевірка правильності його відповідей та виконуваних дій);
- управління процесом контролю знань на основі вибраного методу;
- визначення результатів контролю, що зазвичай зводиться до виставлення оцінки студенту.

4. «Модель студента» – це компонент, що відповідає за отримання відповідей студента на поставлені питання.

Контроль знань здійснюється наступним чином. В систему управління подаються дані про первісні параметри вектора питання \vec{v} , однозначно заданого у вигляді $\langle V, K, T \rangle$. «Модель студента» видає результат за виконання запропонованого завдання V з заданим рівнем складності K за теми T . Дані про правильність виконання завдання R_{zad} надходять до компонента «Адаптивний контроль знань», який, в свою чергу, на основі аналізу відповіді студента R_{zad} і використовуваного алгоритму проведення контролю, враховуючи зовнішні ресурси системи R_1 (наприклад, систему оцінювання знань студента) та внутрішні ресурси студента R_2 (наприклад, час контролю), визначає оцінку за виконання поточного завдання O_{zad} . «БЗ», отримавши від компонента «Адаптивний контроль знань» дані про оцінку поточного завдання, повертає на вхід системи вектор \vec{v} , що відповідає параметрам наступного питання. Визначений параметр K надходить на вхід системи. В моделі передбачена зворотна зв'язок зі студентом, що полягає у видачі коментарів на відповідь студента C . O_{st} виставляється компонентом «БЗ», враховуючи цілі контролю знань Z (наприклад, вхідний контроль,

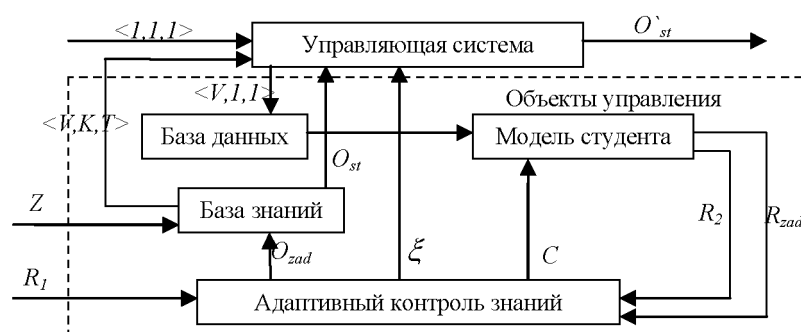


Рис. 1. Модель адаптивного контролю знань

итоговый контроль) и заложенные в БЗ методы для завершения теста. После получения управляющей системой общей оценки за выполнение теста и погрешности тестирования ξ вычисляется скорректированная оценка за тест O_{st} .

2. СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Организация подсистемы оценивания знаний является одной из наиболее сложных задач при синтезе системы адаптивного тестирования знаний обучаемых в реальном масштабе времени. При оценивании знаний необходимо учесть индивидуальные способности обучаемых, правильность выполнения каждого из заданий, учитывая количество допускаемых каждым обучаемым ошибок, а также вероятность угадывания правильного ответа обучаемыми. В данном разделе предлагается модель оценивания знаний при адаптивном тестировании, учитывающая отмеченные критерии.

При прохождении адаптивного теста в каждый момент времени обучаемые выполняют некоторые задания. По результатам выполнения каждого из заданий выдвигаются условия для выбора следующего задания из базы знаний. Исходя из сказанного выше, построим дифференциальную модель процесса оценивания знаний с помощью тестирования.

Дифференциальная модель представляет собой дифференциальное уравнение, полученное в результате исследования какого-либо реального явления или процесса, в данном случае процесса оценивания теста [6]. Итак, пусть некоторый обучаемый проходит адаптивное тестирование. Ему предлагается выполнить цепочку из N заданий, причем результат выполнения теста R в каждый момент времени (при выполнении каждого последующего задания) зависит от результатов, полученных при выполнении предыдущих заданий. Таким образом, результат выполнения теста изменяется непрерывно и, более того, он дифференцируем как функция, зависящая от количества выполненных в данный момент заданий. Конечно, это утверждение является упрощением реальной ситуации, поскольку R – целое число.

Для построения модели проведем анализ процесса адаптивного тестирования. Рассмотрим процесс прохождения тестирования и выделим основные параметры, влияющие на его результат.

1. Для получения объективной оценки знаний при прохождении тестирования рекомендуется использовать непрерывную шкалу оценивания. При этом за выполнение каждого из заданий теста обучаемый получает некоторый коэффициент $r_i \in [0;1]$, причем

этот коэффициент определяется индивидуально для каждой из форм тестовых заданий.

2. Одной из основных проблем тестирования является вероятность угадывания правильных вариантов ответа. Следовательно, в дифференциальную модель процесса проведения адаптивного тестирования введем параметр $c_i \in [0;1]$, соответствующий вероятности угадывания правильного варианта ответа для каждой из форм тестовых заданий.

3. При проведении адаптивного тестирования каждому из заданий присваивается некоторый уровень сложности z_i ($z_i = \overline{1, Z}$). В связи с этим, тем большая вероятность выполнить задание правильно, чем ниже уровень сложности задания.

4. При оценивании знаний применяются разные системы оценивания (4-бальная, 12-бальная, 100-бальная, буквенная). Для получения результата в заданной системе оценивания знаний, введем специальный параметр B – бальность системы. Рассмотрим алгоритм перевода результата тестирования в произвольную систему оценивания знаний. Для корректного перевода результата в любую систему оценивания знаний необходимо всем значимым результатам оценивания в порядке возрастания поочередно присвоить коэффициенты бальности, начиная с 1. Максимальное значение коэффициента бальности и будет соответствовать параметру B . Справедлив и обратный перевод от полученных баллов к заданной системе оценивания знаний.

При учете введенных параметров, влияющих на результат прохождения теста, динамика изменения результата выполнения теста при выполнении каждого из заданий может быть описана с помощью функционала (1):

$$f(N, r_i, z_i, c_i, B) = 1, \quad (1)$$

где N – количество тестовых заданий, выполняемых обучаемым; r_i – коэффициент оценивания заданий разных форм. Непрерывная величина, изменяется в диапазоне $[0,1]$; z_i – уровень сложности i -го задания; c_i – вероятность угадывания правильного ответа на i -е задание; B – бальность системы.

Задача состоит в том, чтобы указать соответствующие формулы для введенных выше величин коэффициента оценивания знаний при выполнении заданий разных форм r_i и вероятности угадывания правильного ответа c_i .

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОЦЕНИВАНИЯ ЗАДАНИЙ РАЗНЫХ ФОРМ

Для того, чтобы объективно оценить знания при тестировании с использованием тестовых заданий разных форм предлагается использовать для каждой

из форм заданий свою методику расчета оценки. Предлагается использование непрерывной шкалы оценивания на интервале $[0,1]$. Определим коэффициент $r_i \in [0, 1]$ оценивания знаний для ответов на тестовые задания разных форм в отдельности [7].

3.1. Одноальтернативные тестовые задания

Для оценивания одноальтернативного тестового задания достаточно применение известной и широко используемой дихотомической шкалы оценивания, в которой 1 соответствует правильному ответу, 0 – неправильному. Следовательно, в этом случае коэффициент r_i принимает одно из значений 0 или 1.

Многоальтернативные тестовые задания. При оценивании многоальтернативных заданий дихотомической шкалы недостаточно, т.к. обучаемый может дать неполный ответ, либо один из выбранных вариантов ответа будет неточен. Ответы на такие вопросы нельзя оценивать так же, как и вопросы, в которых был выбран полностью неправильный ответ. В случае многоальтернативного тестового задания необходимо учитывать не только правильность ответа на задание в целом, но и количество вариантов ответа, выбранных обучаемым верно/неверно. В данном случае коэффициент r_i предлагается рассчитывать по формуле (2):

$$r_i = \frac{Q_{2_i}}{(Q_{1_i} + Q_{3_i})}, \quad (2)$$

где Q_{1_i} – количество правильных вариантов ответа в i -м задании; Q_{2_i} – количество правильных вариантов ответа, выбранных обучаемым при выполнении i -го задания; Q_{3_i} – количество неправильных вариантов ответа, выбранных обучаемым при выполнении i -го задания.

Задания на установление соответствия. При выполнении задания на установление соответствия каждую пару ответов можно рассматривать как отдельный вариант ответа, и при вычислении результата выполнения задания следует учитывать, сколько пар было выбрано верно. Следовательно, коэффициент r_i необходимо рассчитывать по формуле (3):

$$r_i = \frac{Q_{5_i}}{Q_{4_i}}, \quad (3)$$

где Q_{4_i} – количество пар для сопоставления в i -м задании; Q_{5_i} – количество верно составленных пар в i -м задании.

3.2. Задания на установление последовательности

При оценивании заданий на установление правильной последовательности возможен только один

заведомо правильный ответ. Следовательно, для оценивания данной формы тестовых заданий достаточно использовать дихотомическую шкалу оценивания, коэффициент r_i принимает значение 0 или 1.

Задания на заполнение таблиц. Одной из форм открытых тестовых заданий является заполнение таблиц. Каждая ячейка таблицы является отдельным вариантом ответа и, если одна из ячеек заполнена неправильно, такой ответ нельзя засчитывать как полностью неправильный (введение одного неверного значения в ячейку может быть лишь механической ошибкой, и, следовательно, оно должно не полностью обнулить результат выполнения работы, а лишь снизить результат выполнения задания). Для определения коэффициента оценивания заданий на заполнение таблиц рекомендуется использовать показательную функциональную зависимость, представленную формулой (4):

$$r_{z_i} = 2^{\frac{Q_{7_i}}{Q_{6_i}}} - 1, \quad (4)$$

где Q_{6_i} – количество ячеек, которые предлагается заполнить обучаемому в i -м задании; Q_{7_i} – количество ячеек, которые обучаемый заполнил правильно при выполнении i -го задания.

3.3. Многошаговые тестовые задания

Многошаговые тестовые задания состоят из набора заданий (набора шагов), решаемых последовательно, когда переход к следующему шагу задания осуществляется только после правильного ответа на предыдущий шаг. Это дает возможность обучаемому анализировать не только задание в целом, но и разбираться в каждой составляющей задания. Благодаря этому обучаемый сразу может увидеть, где им допущена ошибка и в дальнейших шагах получить правильные исходные данные, то есть ошибки в заданиях не будут накапливаться. Многошаговое задание считается пройденным, если на каждом его шаге получен правильный ответ. Для объективного оценивания ответа и глубины знаний обучаемого используется счетчик допускаемых обучаемым ошибок, количество которых учитывается при выставлении оценки.

Однако встает вопрос об оценивании таких вопросов. Для них простая дихотомическая шкала не подходит. Рекомендуемая формула для вычисления коэффициента правильности для многошагового тестового задания, на каждом из шагов которого находится одноальтернативное задание или задание на установление правильной последовательности, имеет вид (5):

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i + 1}}{n}, \quad (5)$$

где i – номер шага, m_i – количество ошибок, допущенных на i -м шаге, n – количество шагов.

В случае использования на каком-либо из шагов тестового задания на соответствие или многоальтернативного тестового задания формулы (5) недостаточно. Целесообразно использовать формулы (6) и (7) соответственно.

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=0}^{m_i} Q_{5_{ij}}}{(m_i + 1) \cdot Q_{4_i}} \right), \quad (6)$$

где j – номер попытки прохождения шага, если на нем была допущена ошибка; Q_{4_i} – количество пар для составления на i -м шаге; $Q_{5_{ij}}$ – количество верно составленных пар на i -м шаге при j -й попытке.

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{m_i + 1} \cdot \sum_{j=0}^{m_i} \frac{Q_{2_{ij}}}{(Q_{1_{ij}} + Q_{3_{ij}})} \right), \quad (7)$$

где $Q_{1_{ij}}$ – количество правильных вариантов ответа на i -м шаге при j -й попытке; $Q_{2_{ij}}$ – количество правильных вариантов ответа, выбранных тестируемым на i -м шаге; $Q_{3_{ij}}$ – количество неправильных вариантов ответа, выбранных тестируемым на i -м шаге при j -й попытке.

4. ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ УГАДЫВАНИЯ ПРАВИЛЬНЫХ ОТВЕТОВ ДЛЯ КАЖДОЙ ИЗ ФОРМ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

Использование выборочных ответов сопряжено с возможностью неадекватной оценки знаний обучаемого в случае случайного ввода правильного ответа. Оценим эту вероятность для ответов на тестовые задания разных типов.

4.1. Закрытое тестовое задание

Для ответа на тестовые задания закрытого типа рассмотрим в отдельности ответ на одноальтернативные и многоальтернативные тестовые задания.

Одноальтернативное тестовое задание. Одноальтернативные тестовые задания представляют собой задания, в которых q вариантов ответа, один из которых правильный. Вероятность угадывания правильного ответа c_i в данном случае определяется по формуле (8):

$$c_i = \frac{1}{q}. \quad (8)$$

Многоальтернативное тестовое задание. При выполнении многоальтернативных тестовых заданий обучаемому предлагается из q вариантов ответа выбрать Q_1 правильных ($0 \leq Q_1 \leq q$). Вероятность ввода каждого ответа для выборки длиной Q_1 определяется как $c_i = \frac{1}{M}$, где M – общее количество возможных ответов, которые может дать обучаемый. В случае, если заведомо известно количество правильных вариантов ответа, значение M рассчитывается по формуле (9):

$$M = C_q^{Q_1} = \frac{q!}{(q - Q_1)! Q_1!}, \quad (9)$$

Общее число возможных ответов M на многоальтернативное задание при заранее неизвестном числе Q_1 равно количеству всех возможных вариантов выбора ответа. Следовательно,

$$M = \sum_{Q_1=0}^q C_q^{Q_1} = \sum_{k=0}^q \frac{q!}{(q - Q_1)! Q_1!}. \quad (10)$$

Из комбинаторики известно [8], что $\sum_{Q_1=0}^q C_q^{Q_1} = 2^q$.

Значение Q_1 неизвестно обучаемому, следовательно, можно считать все M вариантов возможного ответа равновероятными. Только один из возможных вариантов ответа является правильным. Таким образом, вероятность угадывания правильного ответа определяется по формуле (11):

$$c_i = \frac{1}{2^q}. \quad (11)$$

4.2. Тестовое задание на установление правильной последовательности

При составлении тестового задания на установление последовательности возможны два варианта представления списка элементов последовательности. В первом случае обучаемому необходимо составить последовательность, включив все предложенные элементы. Во втором случае – предлагается выбрать последовательность элементов, включив в нее только необходимые элементы. Рассмотрим оба случая.

Задание, в котором все q элементов последовательности входят в ответ. Для заданий, в которых необходимо составить последовательность из всех предложенных элементов, задача определения количества возможных комбинаций ответа сводится к нахождению числа перестановок элементов последовательности. Таким образом, количество M возможных

ответов определяется по формуле $M = q!$. Таким образом, вероятность угадывания правильного ответа для списка определяется по формуле (12):

$$c_i = \frac{1}{q!}. \quad (12)$$

Задание, в котором из q предложенных элементов l входит в правильную последовательность. Для рассматриваемого случая минимальное значение l равно 2, т.к. последовательность меньшей длины не имеет смысла. Количество M возможных вариантов ответа можно определить как размещение из q по l . Следует также учесть, что значение l изменяется от 2 до q . Таким образом, количество M различных вариантов перестановок определяется по формуле (13):

$$M = \sum_{l=2}^q A_q^l = \sum_{l=2}^q \frac{q!}{(q-l)!}. \quad (13)$$

Правильным является единственный вариант ответа, поэтому вероятность случайного ввода правильного ответа c_i определяется по формуле (14):

$$c_i = \frac{1}{M} = \frac{1}{\sum_{l=2}^q \frac{q!}{(q-l)!}}. \quad (14)$$

4.3. Тестовое задание на установление соответствия

При выполнении тестовых заданий на установление соответствия возможно представление ответа одним из следующих способов:

1. Имеется два списка по q_1 элементов. Необходимо составить q_1 пар.
2. Имеется два списка по q_1 и q_2 элементов соответственно ($q_2 < q_1$). Необходимо составить m пар.
3. Имеется два списка по q_1 и q_2 элементов соответственно ($q_2 \leq q_1$). Необходимо составить q_3 пар ($q_3 < q_1$).

Рассмотрим каждый из способов в отдельности.

При установлении соответствия между элементами двух множеств с одинаковым количеством элементов общее количество возможных вариантов введения ответа $M = (q_1!)^2$. Следовательно, в этом случае вероятность случайного ввода правильного ответа определяется по формуле (15):

$$c_i = \frac{1}{(q_1!)^2}. \quad (15)$$

В случае, когда необходимо установить соответствие между q_1 парами, причем количество элементов в одном из множеств q_2 ($q_2 \leq q_1$), количество возможных вариантов ответа возрастет и будет определяться по формуле (16):

$$M = P_{q_2} \cdot A_{q_1}^{q_2} = \frac{q_1! \cdot q_2!}{(q_1 - q_2)!}. \quad (16)$$

Вероятность угадывания ответа в таком случае определяется по формуле (17):

$$c_i = \frac{(q_1 - q_2)!}{q_2! \cdot q_1!}. \quad (17)$$

Для получения задания на установление соответствия с наименьшей вероятностью угадывания рекомендуется добавлять «лишние» элементы в оба множества элементов. Пусть имеется два множества, состоящие из q_1 и q_2 элементов соответственно. При установлении составления для q_3 пар ($q_3 < q_1$, $q_3 < q_2$) общее количество возможных ответов можно определить по формуле (18):

$$M = A_{q_1}^{q_3} \cdot A_{q_2}^{q_3} = \frac{q_1! \cdot q_2!}{(q_1 - q_3)! \cdot (q_2 - q_3)!}. \quad (18)$$

Вероятность угадывания ответа в случае, когда в задании на установление соответствия в оба множества элементов добавлены «лишние» элементы, определяется по формуле (19):

$$c_i = \frac{(q_1 - q_3)! \cdot (q_2 - q_3)!}{q_1! \cdot q_2!}. \quad (19)$$

4.4. Открытое тестовое задание

При выполнении открытых тестовых заданий обучаемому не предлагаются варианты ответа, поэтому вероятность угадывания правильного ответа стремится к нулю.

Многошаговое тестовое задание. При оценивании вероятности угадывания правильного ответа во время выполнения многошагового тестового задания первоначально необходимо оценить вероятность угадывания правильного ответа c_{s_i} на каждом из n шагов в отдельности. Общий результат в данном случае определяется по формуле (20):

$$c_8 = \prod_{i=1}^n c_{s_i}. \quad (20)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицированное адаптивное тестирование обеспечивает условия для создания тестов высокого качества и надежности и позволяет более точно оценить знания. Система компьютерного контроля знаний, построенная на основе описанной в статье модели компьютерного контроля знаний и использующая разработанные авторами методы представления и анализа ответов, в настоящее время апробируется в Харьковском национальном университете

радиоэлектроники для тестирования студентов по различным дисциплинам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Rash G. Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests / G. Rash. – Copenhagen : Danish Institute for Educational Research, 1960. – 184 p.*
2. *Чельшкова М. Б. Разработка педагогических тестов на основе современных математических моделей / М. Б. Чельшкова. – М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 1995. – 31 с.*
3. *Аванесов В. С. Теоретические основы разработки знаний в тестовой форме / В. С. Аванесов – М. : Изд-во Исслед. центра проблем качества подготовки специалистов, 1995. – 95 с.*
4. *Комплекс нормативных документов для разработки складовых системы вищої освіти. Додаток 1 до Наказу Міносвіти № 285 від 31 липня 1998 р. / Г. Я. Антоненко, І.С.Булах, В. Л. Петренко та ін. – К. : Інститут змісту і методів навчання, 1998. – 124 с.*
5. *Колісник М. Методичне забезпечення працює на успіх. Закордонна практика викладання дисциплін / М. Колісник // Аналітичний журнал по менеджменту СИ-НЕРГІЯ. – 2003. – № 2(6) – С. 48–53.*
6. *Амелькин В. В. Дифференциальные уравнения в приложениях / В. В. Амелькин – М. : Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1987. – 160 с.*
7. *Белоус Н. В. Автоматизированная система оценивания тестовых заданий разных форм / Н. В. Белоус, И. В. Войтович // Вестник ХНТУ. – 2006. – № 1(24). – С. 422–426.*
8. *Стенли Р. Перечислительная комбинаторика : пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 440 с.*

Надійшла 26.02.2009

Білоус Н. В., Куцевич І. В.

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

УДК 004.91:615.087-616.093

У статті описується модель адаптивного контролю знань і розглядаються основні стадії процесу контролю знань. У статті приведена концепція навчання і контролю знань об'єкта навчання при використанні різних форм тестових завдань. Пропонується модифікована система навчання і оцінювання знань для кожної з форм тестових завдань. Показано переваги використання запропонованих методів. На основі описаної моделі розроблено систему комп'ютерного контролю знань, яка в даний час проходить апробацію в Харківському національному університеті радіоелектроніки для тестування студентів з різних дисциплін.

Ключові слова: адаптивне навчання, контроль знань, тестування, тестове завдання, імовірність угадування, диференціююча здатність, складність завдань.

Belous N. V., Kutsevich I. V.

MODEL OF ADAPTIVE KNOWLEDGE CONTROL

In this paper the model for adaptive knowledge control is described and the basic stages of knowledge control process are examined. A teaching and testee knowledge control conception is presented using the different test forms. The authors propose the modified system of teaching and knowledge control for each test form. Advantages of the proposed methods are shown. On the basis of the described model a computer system of knowledge control has been developed being now approved in the Kharkov national university of radio electronics for students studying different disciplines.

Key words: adaptive teaching, knowledge control, testing, test item, guessing parameter, item discrimination parameter, item difficulty parameter.

Высоцкая Е. В.¹, Довнар А. И.², Порван А. П.³

¹Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

²Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

³Инженер Харьковского национального университета радиоэлектроники

ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ СУБЪЕКТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

В данной статье авторами рассматривается подход к оцениванию согласованности мнений экспертов при определении степени тяжести состояния организма человека. Для определения степени согласованности мнений экспертов был выбран метод анализа иерархий. Применение данного метода позволило установить связь между заболеваниями человека и степенью тяжести общего состояния его организма и точно описать суждения экспертов.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, отношение согласованности, состояние организма человека, субъективная информация.

ВВЕДЕНИЕ

Метод анализа иерархий (МАИ), разработанный известным ученым Т. Л. Саати [1], успешно приме-

няется на практике для принятия решений (ПР) в здравоохранении. Оценка вариантов решений с использованием МАИ осуществляется как на основе

© Высоцкая Е. В., Довнар А. И., Порван А. П., 2010

объективной, так и субъективной исходной информации о биологическом объекте.

В том случае, когда исходная информация получена из объективных источников в полном объеме, а значения показателей непротиворечивые, результаты задач ПР однозначны и соответствуют мнению лица, принимающего решение (ЛПР). Поэтому нет необходимости в согласовании исходных данных.

При использовании в процессе принятия решений субъективной информации, представленной в виде количественных (числовых) или качественных (лингвистических) оценок экспертов, возникают условия неопределенности, причинами которых могут являться: недостаточная степень уверенности ЛПР в правильности своих экспертных оценок; противоречивость знаний; нечеткость представления информации.

Последствиями проявления неопределенности являются систематические и случайные ошибки опроса ЛПР, которые в дальнейшем приводят к несогласованности данных и нарушению таких свойств суждений и отношений, как связность и транзитивность.

Качество, а, следовательно, точность и обоснованность принимаемого решения тем хуже, чем больше нарушены свойства связности и транзитивности между экспертными оценками исходного факторного пространства. Полное отсутствие рассматриваемых свойств в системе предпочтений не позволяет осуществить однозначный выбор на множестве объектов, представляющих собой альтернативные варианты. Поэтому при практическом принятии решений ЛПР стремится восстановить указанные свойства, а затем на их основе согласовать данные, повысив тем самым качество и обоснованность решений.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При анализе степени тяжести состояния организма пациента приходится сталкиваться со сложной системой взаимодействия компонент проблемы, которые нужно проанализировать. Исходные субъективные данные, характеризующие состояние организма, могут выражаться в виде суждений и отношений.

Суждения характеризуют свойства объектов безотносительно к другим свойствам, то есть по абсолютным значениям. Известно, что при многокритериальном принятии решений трудно сравнивать по абсолютному значению показатели свойств, имеющие разную физическую природу и судить о согласованности информации.

Элементарные суждения, как способ выражения предпочтений, могут быть описаны с помощью свойств бинарных отношений. Сложные суждения,

состоящие из элементарных, описываются сложными модельными отношениями, состоящими из бинарных.

Особенностью представления информации о состоянии здоровья человека в виде отношений является тот факт, что с помощью отношений могут быть формально описаны связи между элементами (органы и системы организма человека) и свойствами (степень тяжести состояния органа или системы организма) объектов.

В работах [2, 3] рассмотрены подходы выражения предпочтения ЛПР в виде модельных отношений, позволяющих сравнивать разнородные свойства объектов, однако, не учитывающие альтернативные объекты и процессы по каждому из свойств, что не позволяет представить суждения экспертов в виде показателя отношения предпочтения двух и более свойств.

Рассматриваемый авторами МАИ является систематической процедурой для иерархического представления элементов, определяющих суть любой проблемы, и включает процедуры синтеза множественных суждений, получение паритета с критериями и нахождение альтернативных решений [4]. Полученные таким образом значения являются оценками в шкале отношений и соответствуют так называемым жестким оценкам. Решение проблемы есть процесс поэтапного установления приоритетов. На первом этапе выявляются наиболее важные элементы проблемы. На втором этапе наилучший способ проверки наблюдений, испытания и оценки элементов. Следующим этапом может быть проверка способов применения решения и оценка его качества. Весь процесс подвергается проверке и переосмыслению до тех пор, пока не будет уверенности, что процесс охватил все важные характеристики, необходимые для представления и решения проблемы. Процесс может быть проведен над последовательностью иерархий; в этом случае результаты, полученные в одной из них, используются в качестве входных данных при изучении следующей.

Целью данной работы является разработка информационной технологии оценивания субъективной информации при определении степени тяжести состояния организма человека на основании известного метода анализа иерархий.

2. СУЩНОСТЬ РАБОТЫ

Общая технология оценивания субъективной информации для выявления взаимосвязи между степенью тяжести состояния организма пациентов (B_j) и имеющимися альтернативами формирования данных

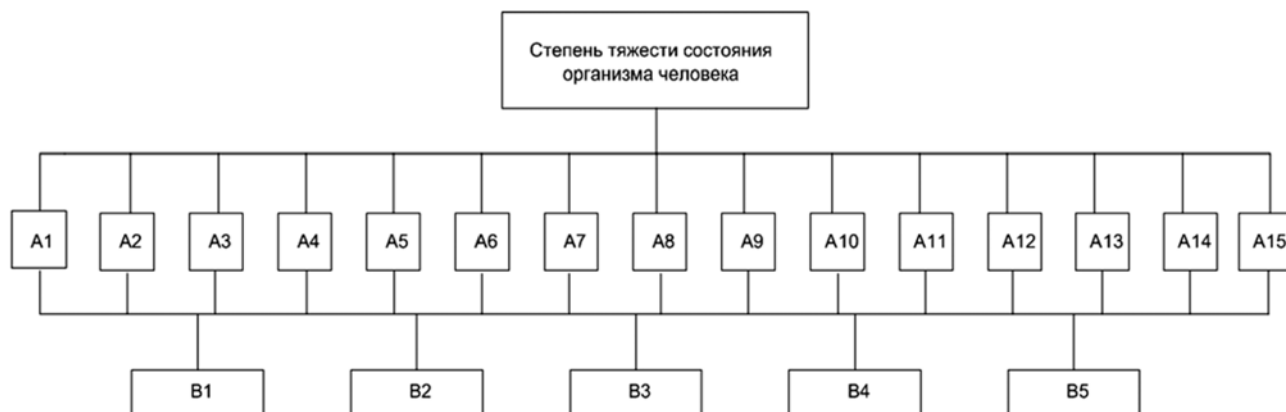


Рис. 1. Трехуровневая иерархическая структура оценки состояния организма человека

состояний (A_i) может быть представлена в следующем виде.

На первом этапе происходит построение иерархической структуры проблемы (рис. 1), где в качестве вершины служит доминанта, т. е. цель, которую необходимо достичь (степень тяжести состояния организма); промежуточный уровень представляет собой критерии, с помощью которых оцениваются более низкие уровни (диагнозы и симптомы по Международному классификатору болезней [5]); а самый низкий уровень представляет собой все возможные варианты решения рассматриваемой проблемы (степень тяжести состояния органов и систем организма человека). Представленная иерархия является доминантной и полной [6].

На втором этапе по составленной иерархии экспертами-медиками формируется матрица предпочтений, элементами которой (a_{ij}) являются результаты сравнения различных альтернатив A .

Элементы сравниваются между собой по шкале сравнения и каждое из суждений кодируется числом согласно следующей кодировке: 1 – равная важность альтернатив; 3 – умеренное превосходство одной альтернативы над другой; 5 – существенное превосходство; 7 – значительное превосходство; 9 – очень сильное превосходство. Символами 2, 4, 6, 8 кодируются промежуточные суждения экспертов о значимости той или иной системы организма человека.

На третьем этапе по полученным значениям матрицы предпочтений вычисляются приоритеты альтернатив γ_i :

$$\gamma_i = \frac{\sqrt[N]{\prod_{j=1}^N a_{ij}}}{\sum_{i=1}^N \sqrt[N]{\prod_{k=1}^N a_{ik}}}, \quad (1)$$

где N – количество сравниваемых объектов; a_{ij} , a_{ik} – степени превосходства j -го сравниваемого объекта над k -м.

В медицинской диагностике особо важна степень достоверности суждения эксперта о сравниваемых параметрах, поскольку положительный результат лечения человека во многом зависит от правильности определения степени тяжести состояния организма на момент обращения.

Для определения степени согласованности мнения эксперта вычисляется индекс согласованности (ИС), который несет информацию о степени нарушения кардинальной ($a_{ij} * a_{jk} = a_{ik}$) и транзитивной (порядковой) согласованности:

$$ИС = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i * \left(\sum_{j=1}^N a_{ji} \right) - N}{N - 1}. \quad (2)$$

На четвертом этапе вычисляется ошибка согласованности мнений экспертов (ОС):

$$ОС = \frac{ИС}{ИПС}, \quad (3)$$

где ИПС – индекс согласованности матрицы парных сравнений такой же размерности, но заполненной случайным образом (табл. 1).

При ошибке согласованности более 10 % эксперту рекомендуется пересмотреть свои суждения относительно сравниваемых объектов, так как величина относительных весов может не соответствовать действительной.

На пятом этапе определяется наилучшее решение, для которого значение критерия максимально, и проверяется достоверность решения.

Для этого рассчитывается обобщенный индекс согласования (ОИС) и определяется обобщенное

Таблиця 1. Показатель случайной согласованности матрицы парных сравнений различного порядка, заполненной случайным образом

Размерность матрицы, ($n \times n$)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>ИПС</i>	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

Таблиця 2. Матрица парных сравнений альтернатив А по степени важности

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15
A1	1,00	2,00	3,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	7,00	5,00	7,00	7,00	9,00	8,00	8,00
A2	0,50	1,00	2,00	4,00	4,00	4,00	3,00	5,00	7,00	6,00	7,00	6,00	8,00	8,00	8,00
A3	0,33	0,50	1,00	5,00	4,00	3,00	3,00	7,00	7,00	5,00	3,00	7,00	5,00	4,00	8,00
A4	0,20	0,25	0,20	1,00	2,00	2,00	3,00	5,00	3,00	4,00	7,00	7,00	7,00	9,00	5,00
A5	0,20	0,25	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	7,00	5,00	9,00	5,00	6,00	4,00	7,00	4,00
A6	0,25	0,25	0,33	0,50	0,50	1,00	3,00	5,00	3,00	8,00	4,00	8,00	5,00	4,00	5,00
A7	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	4,00	2,00	5,00	5,00	9,00	4,00	7,00	4,00
A8	0,20	0,20	0,14	0,20	0,14	0,20	0,25	1,00	2,00	6,00	7,00	7,00	7,00	2,00	8,00
A9	0,14	0,14	0,14	0,33	0,20	0,33	0,50	0,50	1,00	3,00	8,00	4,00	8,00	2,00	7,00
A10	0,20	0,17	0,20	0,25	0,11	0,13	0,20	0,17	0,33	1,00	7,00	5,00	7,00	2,00	8,00
A11	0,14	0,14	0,33	0,14	0,20	0,25	0,20	0,14	0,13	0,14	1,00	7,00	3,00	3,00	7,00
A12	0,14	0,17	0,14	0,14	0,17	0,13	0,11	0,14	0,25	0,20	0,14	1,00	3,00	5,00	7,00
A13	0,11	0,13	0,20	0,14	0,25	0,20	0,25	0,14	0,13	0,14	0,33	0,33	1,00	3,00	5,00
A14	0,13	0,13	0,25	0,11	0,14	0,25	0,14	0,50	0,50	0,50	0,33	0,20	0,33	1,00	3,00
A15	0,13	0,13	0,13	0,20	0,25	0,20	0,25	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,20	0,33	1,00

Таблиця 3. Расчетные значения приоритета альтернатив

Альтернатива	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15
γ_i	0,20	0,17	0,13	0,09	0,09	0,08	0,06	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01

отношение согласованности (*ООС*). Решение считается достоверным, если *ООС* 10–15 % [7].

При проведении данной процедуры нужно учитывать, что глобальные приоритеты синтезируются, начиная со второго уровня вниз. Локальные приоритеты перемножаются на приоритет соответствующего критерия на вышестоящем уровне и суммируются по каждому элементу в соответствии с критериями, на которые воздействует этот элемент. Это дает глобальный приоритет того элемента, который затем используется для взвешивания локальных приоритетов элементов, сравниваемых по отношению к нему как к критерию и расположенных уровнем ниже.

Максимальное значение в векторе глобальных приоритетов будет соответствовать наилучшему, с точки зрения заданных критериев и суждений, варианту.

Продемонстрируем данную технологию на следующем примере.

У пациентки Н., 27 лет, обратившейся за помощью в 23 клиническую больницу города Харькова, в результате обследования были выявлены заболевания системы кровообращения, органов дыхания, нервной и костно-мышечной систем. Перед медицинским экспертом, в роли которого выступал домашний врач, встала проблема определения степени тяжести общего состояния организма пациентки.

Согласно построенной иерархической модели было проведено исследование степени влияния показателей свойств качества состояния организма пациентки (заболевания и симптомы) на общее состояние организма, при котором было выявлено влияние второго уровня модели на цель и построена матрица парных сравнений (табл. 2).

Примечание к табл. 2:

- A_1 – болезни системы кровообращения;
- A_2 – новообразования;
- A_3 – болезни эндокринной системы;
- A_4 – болезни органов дыхания;
- A_5 – болезни органов пищеварения;

A_6 – болезни мочеполовой системы;
 A_7 – заболевания кожи и подкожной клетчатки;
 A_8 – заболевания крови и кроветворных органов;
 A_9 – инфекционные заболевания;
 A_{10} – травмы, отравления и влияние внешних факторов;
 A_{11} – болезни нервной системы;
 A_{12} – заболевания костно-мышечной системы;
 A_{13} – психические расстройства;
 A_{14} – заболевания глаз и придаточного аппарата;
 A_{15} – заболевания уха и сосцевидного отростка.

На следующем шаге проверялась согласованность оценок в матрице. Для этого по (1) рассчитывались

приоритеты альтернатив γ_i (табл. 3) и определялся индекс согласованности (2).

$$IS = 0,242.$$

Затем определялся показатель ИПС. Так как вектор размерности матриц парных сравнений $n = 15$, то, согласно табл. 1, $ИПС = 1,59$.

Далее по (3) определялась ошибка согласованности $OC = 0,24/1,59 \approx 0,151$.

На следующем этапе проводилось попарное сравнение степени тяжести состояния пациентки (вариантов B_j) по каждой из систем МКБ (альтернатив A_i) (табл. 4–7) и рассчитывались приоритеты альтернатив γ_i .

Таблица 4. Матрицы парных сравнений степеней тяжести состояния организма для болезней системы кровообращения

A1	B1	B2	B3	B4	B5	γ_i
B1	1,000	2,000	0,500	0,200	0,143	0,080
B2	0,500	1,000	3,000	5,000	7,000	0,380
B3	2,000	0,333	1,000	3,000	5,000	0,270
B4	5,000	0,200	0,333	1,000	3,000	0,170
B5	7,000	0,143	0,200	0,333	1,000	0,100

Таблица 5. Матрицы парных сравнений степеней тяжести состояния организма для болезней органов дыхания

A4	B1	B2	B3	B4	B5	γ_i
B1	1,000	2,000	5,000	7,000	8,000	0,473
B2	0,500	1,000	3,000	5,000	7,000	0,295
B3	0,200	0,333	1,000	3,000	5,000	0,134
B4	0,143	0,200	0,333	1,000	2,000	0,060
B5	0,125	0,143	0,200	0,500	1,000	0,038

Таблица 6. Матрицы парных сравнений степеней тяжести состояния организма для болезней нервной системы

A11	B1	B2	B3	B4	B5	γ_i
B1	1,000	1,000	2,000	3,000	5,000	0,35
B2	1,000	1,000	1,000	2,000	3,000	0,25
B3	0,500	1,000	1,000	1,000	2,000	0,18
B4	0,333	0,500	1,000	1,000	2,000	0,14
B5	0,200	0,333	0,500	0,500	1,000	0,08

Таблица 7. Матрицы парных сравнений степеней тяжести состояния организма для заболеваний костно-мышечной системы

A12	B1	B2	B3	B4	B5	γ_i
B1	1,000	1,000	1,000	2,000	3,000	0,257
B2	1,000	1,000	1,000	2,000	3,000	0,257
B3	1,000	1,000	1,000	3,000	3,000	0,279
B4	0,500	0,500	0,333	1,000	2,000	0,126
B5	0,333	0,333	0,333	0,500	1,000	0,081

Таблиця 8. Расчетные значения ИС и ОС для заболеваний пациентки

Система по МКБ	A1	A4	A11	A12
ИС	0,57	0,039	0,02	0,009
ОС	0,506	0,035	0,019	0,007

Таблиця 9. Расчетные значения обобщенного критерия для каждой степени тяжести состояния организма

Степень тяжести (B_j)	Обобщенный критерий, $A(B_j)$
B_1 – начальные изменения	0,295905
B_2 – легкая степень	0,184585
B_3 – средняя степень	0,323814
B_4 – тяжелая степень	0,100043
B_5 – крайне тяжелая степень	0,060772

Для каждого из случаев также проверялась согласованность мнений экспертов (табл. 8).

Далее рассчитывалось значение обобщенного критерия $A(B)$ для каждой степени тяжести состояния пациентки (табл. 9).

Из табл. 9 видно, что максимальное значение обобщенного критерия соответствует состоянию B_3 – «средняя степень тяжести» общего состояния организма. Затем рассчитали обобщенный индекс согласования $OIS = 0,210138$, определили обобщенный показатель случайной согласованности ($ИПС$) и обобщенное отношение согласованности $OOC = 0,048881$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, применение метода анализа иерархий позволило оценить субъективную информацию экспертов медиков при определении степени тяжести состояния организма человека. Из примера видно, что согласованность мнений экспертов может быть представлена как объективная информация о степени тяжести общего состояния пациента при условии, что отношение альтернатив (диагнозов и симптомов) заранее известно и не требует дополнительного описания с помощью метода парных сравнений. Рассчитанное в примере значение обобщенного отношения согласованности является достоверным ($OOC \approx 0,049$), что говорит о высокой степени согласованности информации, полученной от экспертов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Саати Т. Л. – М.: Радио и связь, 1993. – 210 с.
2. Шнейдерман М. В. Процедуры коллективного экспертного опроса и их экспериментальное исследование / Шнейдерман М. В. // АиТ. – 1988. – № 5. – С. 3–16.
3. Трахтенгерц Э. А. Генерация, оценка и выбор сценария в системах поддержки принятия решений / Трахтенгерц Э. А. // АиТ. – 1997. – № 3. – С. 12–20.

4. Трахтенгерц Э. А. Компьютерная поддержка принятия решений / Трахтенгерц Э. А. – М.: СИНТЕЗ, 1998. – 426 с.
5. Международный классификатор болезней Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) / Под ред. Р. В. Пономарева. – М.: Медицина, 1992. – 768 с.
6. Саати Т. Л. Аналитическое планирование. Организация систем / Саати Т. Л., Кернс К. – М.: Радио и связь, 1991. – 198 с.
7. Данилов В. И. Механизмы группового выбора / Данилов В. И., Сотсков А. И. – Новосибирск: Техноком, 1991. – 172 с.

Надійшла 21.07.2009

Висоцька О. В., Довнар О. Й., Порван А. П.

ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ СУБ'ЄКТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ СТУПЕНЯ ТЯЖКОСТІ СТАНУ ОРГАНІЗМУ ЛЮДИНИ МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

У даній статті авторами розглядається підхід до оцінювання погодженості думок експертів при визначенні ступеня тяжкості стану організму людини. Для визначення ступеня погодженості думок експертів був обраний метод аналізу ієрархій. Застосування даного методу дозволило встановити зв'язок між захворюваннями людини й ступенем тяжкості загального стану його організму та точно описати судження експертів.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій, відношення погодженості, стан організму людини, суб'єктивна інформація.

Visotskaja E. V., Dovnar A. I., Porvan A. P.

SUBJECTIVE INFORMATION ESTIMATION TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF PATIENT'S ORGANISM CONDITION USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD

The authors consider the approach to estimation of experts' opinion consistency when determining the patient's organism condition. The hierarchy analysis method has been chosen to determine a degree of experts' opinion consistency. The method permits to show relation between patient's diseases and his organism general condition and to describe experts' verdicts accurately.

Key words: hierarchy analysis method, consistency relationship, patient's organism condition, subjective information.

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОРТФЕЛЯ

Проаналізовано підходи до оптимізації інвестиційного портфеля, які використовуються в моделях Марковіца, Шарпа, методології Value-at-Risk, нечіткому підході на основі теорії можливостей. Детально розглянуто використовувані в них способи оцінки ризику (на основі середньоквадратичного, семіквадратичного та медіанного семіквадратичного відхилення, критичних значень дохідності) та визначено основні недоліки та переваги підходів. Розроблено рекомендації щодо вибору методів оптимізації (і відповідно оцінки ризиків) інвестиційного портфеля в тих чи інших умовах.

Ключові слова: оцінювання ризиків, інвестиційний портфель, модель Марковіца, Шарпа, методологія Value-at-Risk, нечіткий підхід.

ВСТУП

Процеси прийняття рішень під час управління проектами відбуваються, як правило, в умовах впливу в тій чи іншій мірі невизначеності, що визначається такими факторами [1]:

- неповним знанням всіх параметрів, умов, ситуації для вибору оптимального рішення, а також неможливістю адекватного і точного врахування всієї, навіть доступної, інформації та присутністю імовірнісних характеристик поведінки середовища;

- наявністю фактора випадковості, тобто реалізацією факторів, які неможливо передбачити та спрогнозувати навіть під час імовірнісної реалізації;

- наявністю суб'єктивних факторів протидії, коли прийняття рішень виконується в ситуації гри з партнером з протилежними або не співпадаючими інтересами.

Ризик є одним із засобів зняття невизначеності, яка являє собою незнання достовірного, відсутність однозначності [2]. Ризик – діяльність, що пов'язана із подоланням невизначеності в ситуації неминучого вибору, в процесі якої є можливість кількісно та якісно оцінити імовірність досягнення передбачуваного результату, невдачі та відхилення від цілей [3].

В даній роботі розглянемо способи оцінки ризику в процесі оптимізації інвестиційного портфеля (ІП).

ІП [4] – сукупність цінних паперів (ЦП), що розглядаються під час управління як єдине ціле. Під час формування ІП інвестор повинен:

- обрати адекватні ЦП, тобто такі, які б надавали максимально можливу дохідність та мінімально допустимий ризик;

- визначити, в ЦП яких емітентів варто вкладати кошти;

- диверсифікувати ІП: інвестору потрібно вкладати гроші в різноманітні ЦП, а не в один їх вид, з метою зниження ризику вкладів.

Під час вибору ІП важливо правильно оцінити майбутні ризики, адже від обраних фінансових інструментів прямо залежить дохідність затрачених ресурсів. Невірні оцінки ризиків може призвести до зменшення прибутку, який можна було б отримати, або в крайньому випадку до збитків. Тому інвестору важливо обрати той підхід, який би, зважаючи на конкретні умови застосування, дозволив найбільш ефективним шляхом вкласти наявні кошти в інвестиції. Виходячи з цього, актуальною проблемою є аналіз існуючих моделей оптимізації ІП щодо засобів оцінки ризиків в них, а також визначення умов застосування тієї чи іншої моделі та встановлення задач подальшого дослідження проблеми.

1. ОЦІНКА РИЗИКУ В МОДЕЛІ МАРКОВІЦА

Класичною методикою оптимізації ІП є модель Г. Марковіца [5]. В ній за міру ризику прийнято стандартне відхилення величини дохідності. Чим більше значення даного показника, тим більш ризикованим буде портфель.

В своїх дослідженнях Марковіц виходив з того, що значення дохідності ЦП – випадкові величини, що розподілені за нормальним (Гауссівським) законом. Він вважав, що, формуючи свій портфель, інвестор оцінює тільки два показники: очікувану дохідність $E(r)$ та стандартне відхилення δ (лише вони визначають щільність ймовірності випадкових чисел

за умов нормального розподілу). Інвестор повинен оцінити дохідність та стандартне відхилення кожного портфеля і вибрати такий портфель, який забезпечує максимальну дохідність при прийнятному рівні ризику або мінімальний ризик при заданому рівні очікуваної дохідності.

Визначаючи ризик портфеля, варто враховувати, що дисперсія портфеля визначається не тільки середньозваженою величиною дисперсій ЦП, що входять в портфель. Це обумовлено тим, що дисперсія портфеля залежить не тільки від дисперсій ЦП, що входять до його складу, але також і від взаємозалежності дохідності окремих ЦП. Тобто ризик портфеля вимірюється не тільки індивідуальним ризиком кожної окремої ЦП портфеля, але і тим, що існує ризик впливу змін щорічних величин дохідності однієї акції на зміни дохідності інших акцій, що входять до складу ПП.

Як міру взаємозалежності двох випадкових величин використовують коваріацію та коефіцієнт кореляції. Позитивне значення коваріації – індикатор тенденції зміни дохідності двох ЦП в одних і тих самих напрямках, тобто якщо дохідність однієї акції збільшується (зменшується), то і дохідність іншої акції також збільшується (зменшується). Негативна коваріація свідчить відповідно про те, що збільшення (зменшення) дохідності акцій однієї компанії призводить до зниження (збільшення) дохідності акцій іншої компанії.

Якщо розглядаються величини дохідності ЦП за минулі періоди, то коваріація розраховується за такою формулою:

$$\delta_{i,j} = \sum_{t=1}^N [r_{i,t} - E(r_i)] \times [r_{j,t} - E(r_j)] / (N - 1), \quad (1)$$

де $\delta_{i,j}$ – коваріація між величинами дохідності ЦП i та ЦП j ; $r_{i,t}$ та $r_{j,t}$ – дохідність ЦП i та ЦП j в момент часу t ; $E(r_i)$, $E(r_j)$ – очікувана (середньоарифметична) дохідність ЦП i та ЦП j ; N – загальна кількість періодів спостереження.

Задача оптимізації структури відповідного портфеля досягненням заданої дохідності з мінімальним ризиком називається задачею Марковіца і має такий вигляд (дана математична формалізація запропонована Дж. Тобіном):

$$\delta_n^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 \delta_i^2 + \sum_i \sum_j w_i w_j P_{i,j} \delta_i \delta_j \rightarrow \min_w, \quad (2)$$

$$E(r_{\text{портфеля}}) = \sum_i w_i E(r_i), \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n w_i = 1. \quad (4)$$

Аналітично наведена задача мінімізації неперервної функції з двома обмеженнями розв'язується за допомогою методу невизначених множників Лагранжа [6].

Головними недоліками класичного підходу є вимога щодо нормального розподілу значень дохідності, можливість розгляду тільки конкретних значень дохідності та необхідність встановлення ймовірності їх досягнення. Ризиком вважаються всі відхилення від запланованих показників, як у менший, так і у більший бік.

2. ОЦІНКА РИЗИКУ В МОДЕЛІ ШАРПА

У. Шарп запропонував новий метод побудови границі ефективних портфельів – одноіндексну модель Шарпа [7], яка дозволяє значно скоротити обсяг необхідних обчислень. За допомогою даної моделі можливо представити взаємозв'язок між величинами норми віддачі r_m та дохідності i -го ЦП r_i , випадкові значення яких спостерігаються протягом N кроків, в будь-який момент часу t в такому вигляді [8]:

$$r_{i,t} = \alpha_i + \beta_i r_{m,t} + \varepsilon_{i,t}, \quad (5)$$

де α_i – параметр, що вказує на те, яка частина дохідності i -го ЦП не пов'язана зі змінними значеннями дохідності ринку ЦП r_m ; β_i – параметр, що вказує на чутливість дохідності i -го ЦП до змін ринкової дохідності; $\varepsilon_{i,t}$ – випадкова помилка, яка вказує на те, що реальні значення часом відхиляються від лінійної залежності.

В моделі Шарпа дисперсія портфеля представляється у вигляді:

$$\delta_n^2 = \sum_{i=1}^{n+1} w_i^2 \delta_{\varepsilon,i}^2. \quad (6)$$

При цьому $w_{n+1} = \sum_{i=1}^n w_i \beta_i$, а $\delta_{\varepsilon,n+1}^2 = \delta_m^2$. Тобто дисперсію портфеля, що містить n ЦП, можна представити такою, що складається з 2 компонент:

– середньозважені дисперсії помилок $\sum_{i=1}^{n+1} w_i^2 \delta_{\varepsilon,i}^2$ (власний ризик);

– $\beta_n^2 \delta_m^2$ – зважена величина дисперсії ринкового показника δ_m^2 (ринковий ризик).

Величини β_i та α_i розраховуються таким чином:

$$\beta_i = \frac{\delta_{i,m}}{\delta_m^2}, \quad (7)$$

$$\alpha_i = E(r_i) - \beta_i E(r_m). \quad (8)$$

В моделі Шарпа мета інвестора полягає у мінімізації дисперсії портфеля

$$\delta_n^2 = \sum_{i=1}^{n+1} w_i^2 \delta_{\epsilon,i}^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} w_i \alpha_i = E^*, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i \beta_i = w_{n+1}. \quad (12)$$

В моделі Шарпа не ліквідовано наведені в моделі Марковіца недоліки, проте зменшено обсяг обчислень за допомогою використання лінійної регресійної моделі.

В портфелі Тобіна [9] враховано можливість наявності в портфелі безризикових паперів, що дозволило спростити процес розв'язання задачі знаходження оптимального портфеля за умов вибору безризикових ЦП, проте підхід для оцінки ризику в даній моделі такий самий, як і в моделі Марковіца.

3. ОЦІНКА РИЗИКУ В МЕТОДОЛОГІЇ VALUE-AT-RISK

Методологія Value-at-Risk (VaR) дозволяє оцінити величину максимально можливих збитків на визначеному горизонті планування із встановленим рівнем ймовірності [10]. На відміну від попередніх моделей, в даній методології під втратами розуміють від'ємну зміну вартості портфеля фінансових інструментів в момент часу t та в момент $t - 1$:

$$\Delta P = P_t - P_{t-1}. \quad (13)$$

Показник VaR може бути оцінений на основі величини абсолютних збитків або величини втрат відносно середнього доходу. Існує три основні методи розрахунку VaR: метод історичного моделювання, метод параметричної оцінки, метод імітаційного моделювання.

В загальному випадку даного підходу, якщо досліджуваний показник необхідно максимізувати, то VaR можна обчислити за допомогою формули:

$$\text{VaR} = m - kM_r, \quad (14)$$

де m – математичне очікування; M_r – міра ризику (в загальному випадку – середньоквадратичне відхилення); k – коефіцієнт, який залежить від обраної довірчої ймовірності (встановлює вартість ризику).

Інвестор розглядає ризик, пов'язаний з несприятливими ситуаціями, як тільки несприятливі відхилення від очікуваних значень. В даному підході запро-

поновано за міру ризику використовувати семіваріацію [11], яка для величини X обчислюється таким чином:

$$SV(X) = \sum_{j=1}^n \alpha_j p_j (x_j - M(X))^2, \quad (15)$$

де n – кількість значень випадкової величини X ; x_j – значення випадкової величини, $j = 1, \dots, n$; p_j – відповідні ймовірності; $M(X)$ – математичне очікування випадкової величини X ; α_j – індикатор несприятливих відхилень, який визначають за формулою:

$$\alpha_j = \begin{cases} 0, & \text{у випадку сприятливого} \\ & \text{відхилення,} \\ 1, & \text{у випадку несприятливого} \\ & \text{відхилення.} \end{cases} \quad (16)$$

Однак, одним із недоліків моделі Марковіца та класичної методології VaR є припущення про нормальність розподілу та наявність симетрії в розподілі. На практиці більшість економічних показників асиметричні. Тому в [12] за базу при розрахунках пропонується замість математичного очікування використати моду або медіану.

В такому випадку міра ризику визначається медіанною семіваріацією, яка обчислюється за допомогою формули:

$$SV_{M_e}(X) = \sum_{j=1}^n \alpha_j p_j (x_j - M_e(X))^2, \quad (17)$$

де $M_e(X)$ – медіана випадкової величини X .

Таким чином, методологія VaR та розглянуті її модифікації дозволяють усунути такі недоліки моделі Марковіца: припущення про нормальність розподілу досліджуваної величини та врахування як негативних, так і позитивних відхилень значень досліджуваної величини під час обчислення міри ризику.

4. ОЦІНКА РИЗИКУ В НЕЧІТКОМУ ПІДХОДІ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ІІІ

В нечіткому підході на основі теорії можливостей [13] дохідність i -го ЦП представляється у вигляді трикутного нечіткого числа

$$r_i = (r_{1i}; \bar{r}_i; r_{2i}), \quad (18)$$

де r_{1i} – нижня межа дохідності i -го ЦП; \bar{r}_i – очікувана дохідність i -го ЦП; r_{2i} – верхня межа дохідності i -го ЦП.

Дохідність портфеля визначається таким чином [14]:

$$r = \left(r_{\min} = \sum_{i=1}^N w_i r_{1i}; \bar{r} = \sum_{i=1}^N w_i \bar{r}_i; r_{\max} = \sum_{i=1}^N w_i r_{2i} \right). \quad (19)$$

Критичний рівень дохідності портфеля на момент часу T представляється як $r^* = (r_1^*; \bar{r}^*; r_2^*)$. Тоді взаємне співвідношення функцій приналежності r_i та критеріального значення r^* дозволяє розрахувати площу фігури, яка утворюється в результаті перетину цих функцій, таким чином:

$$S_\alpha = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } r_1 \geq r_2^*; \\ \frac{(r_2^* - r_1)^2}{2}, \text{ якщо } r_2^* > r_1 \geq r_1^*; r_2 \geq r_2^*; \\ \frac{(r_1^* - r_1) + (r_2^* - r_1)}{2} (r_2^* - r_1), \\ \text{якщо } r_1 < r_1^*; r_2 > r_2^*; \\ (r_2^* - r_1^*)(r_2 - r_1) - \frac{(r_2 - r_1^*)^2}{2}, \\ \text{якщо } r_1 < r_1^* \leq r_2; r_2 < r_2^*; \\ (r_2^* - r_1^*)(r_2 - r_1), \text{ якщо } r_2 \geq r_1^*. \end{array} \right\} \quad (20)$$

В такому випадку ступінь ризику неефективності $\varphi(\alpha)$ є геометрична ймовірність випадку потрапляння точки (r, r^*) в зону неефективного розподілу капіталу

$$\varphi(\alpha) = \frac{S_\alpha}{(r_2^* - r_1^*)(r_2 - r_1)}. \quad (21)$$

Значення ступеня ризику неефективності портфеля дорівнює

$$\beta = \int_0^{\alpha_1} \varphi(\alpha) d\alpha, \quad (22)$$

де α_1 – ордината точки перетину функцій приналежності r та r^* .

Тоді, використовуючи формули (20)–(22), ступінь ризику буде дорівнювати

$$\beta = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } r^* < r_{\min}; \\ R \left(1 + \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \ln(1 - \alpha_1) \right), \\ \text{якщо } r_{\min} \leq r^* \leq \bar{r}; \\ 1 - (1 - R) \left(1 + \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \ln(1 - \alpha_1) \right), \\ \text{якщо } \bar{r} \leq r^* < r_{\max}; \\ 1, \text{ якщо } r^* \geq r_{\max}, \end{array} \right\} \quad (23)$$

де

$$R = \left\{ \begin{array}{l} \frac{r^* - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}, \text{ якщо } r^* < r_{\max}; \\ 1, \text{ якщо } r^* \geq r_{\max}, \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } r^* < r_{\min}; \\ \frac{r^* - r_{\min}}{\bar{r} - r_{\min}}, \text{ якщо } r_{\min} \leq r^* < \bar{r}; \\ 1, \text{ якщо } r^* = \bar{r}; \\ \frac{r_{\max} - r^*}{r_{\max} - \bar{r}}, \text{ якщо } \bar{r} < r^* < r_{\max}; \\ 0, \text{ якщо } r^* \geq r_{\max}. \end{array} \right\} \quad (25)$$

Таким чином, за умов даного підходу необхідно розв'язати наступну задачу оптимізації:

$$r = \sum_{i=1}^N w_i r_i \rightarrow \max; \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i r_{1i} > r^*; \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1, \quad w_i \geq 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (28)$$

В даній моделі ліквідовано недоліки підходів на основі теорії ймовірності. Знято вимоги щодо нормального розподілу значень дохідності, розглядається не можливість досягнення окремих значень показника дохідності, а цілий інтервал значень, ймовірність досягнення яких не потрібно визначати наперед. Окрім того, на відміну від моделі Марковіца, при нечіткому підході за ризик приймаються тільки ті значення дохідності, які виявились менше запланованого.

ВИСНОВКИ

Аналіз існуючих методів оптимізації інвестиційного портфеля дозволив зробити висновки щодо умов їх використання.

У випадку однорідності ринку, коли із впевненістю можуть бути встановлені ймовірності досягнення того чи іншого значення дохідності, варто застосовувати для оптимізації інвестиційного портфеля модель Марковіца. Якщо критичною проблемою є зменшення обсягів обчислень, то кращим варіантом оптимізації є модель Шарпа, де застосовується лінійна регресійна модель.

Коли інвестор бажає враховувати як міру ризику тільки негативні відхилення значень досліджуваного показника, варто застосовувати методологію Value-at-Risk. Окрім того, якщо розподіл значень показника, що розглядається, не відповідає нормальному закону, необхідно використовувати модифіковану методологію Value-at-Risk, в якій за міру ризику прийнято медіану семіваріацію.

Якщо досліджуваний ринок неоднорідний (що характерно для кризових явищ) і необхідно розгляну-

ти весь інтервал можливих значень дохідності (і їх розподіл може не відповідати нормальному закону), потрібно застосувати нечіткий підхід на основі теорії можливостей. Даний метод дозволяє також, як і модифікована методологія Value-at-Risk, за міру ризику враховувати тільки негативні відхилення значень показника.

В процесі подальшого дослідження необхідно виконати такі завдання:

а) розробити програмний комплекс для реалізації проаналізованих методів;

б) дослідити на основі експериментальних даних проаналізовані методи оптимізації та використовувати в них способи оцінки ризику;

в) визначити шляхи застосування математичного апарату для оптимізації інвестиційного портфеля та оцінки ризиків, ґрунтуючись на отриманих результатах практичного дослідження, з метою усунення недоліків;

г) модифікувати нечіткий підхід з метою використання суджень експертів в нечіткій формі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Мазур И. И.* Управление проектами: Учебное пособие / И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге; под общ. ред. И. И. Мазура. – 5-е изд., перераб. – М. : Омега-Л, 2009. – 960 с.
2. *Шапкин А. С.* Теория риска и моделирование рискованных ситуаций: учебник / А. С. Шапкин, В. А. Шапкин – М. : Дашков и К^о, 2007. – 880 с.
3. *Альгин А. П.* Риск и его роль в общественной жизни / А. П. Альгин – М. : Мысль, 1989. – 187 с.
4. *Максимова В. Ф.* Портфельные инвестиции / В. Ф. Максимова – М. : Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2003. – 56 с.
5. *Markowitz H. M.* Portfolio Selection / H. M. Markowitz // Journal of Finance. – 1952. – № 7. – Pp. 77–91.
6. *Климова Е. Н.* Математическое моделирование оптимального портфеля ценных бумаг с ограничениями на отдельные активы / Е. Н. Климова, В. Л. Шур, О. В. Москалец // Вестник СамГУ. – 2008. – № 8/2 (67). – С. 263–275.
7. *Sharpe W. F.* A Simplified Model for Portfolio Analysis / W. F. Sharpe // Management Science. – 1963. – Vol. 9, № 2. – Pp. 277–293.
8. *Филатов Д. А.* Моделирование и анализ финансовых рынков на основе методов нелинейной динамики: дис. на соискание уч. степени канд. экон. наук: спец. 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики» / Д. А. Филатов – Воронеж : Институт менеджмента, маркетинга и финансов, 2007. – 162 с.
9. *Tobin J.* The Theory of Portfolio Selection / J. Tobin; ed. By F. H. Hahn, F. P. R. Brechling // Theory of Interest Rates. – London : MacMillan, 1965. – Pp. 3–51.
10. *Буренин А. Н.* Управление портфелем ценных бумаг / А. Н. Буренин – М. : Научно-техническое общество имени академика С. И. Вавилова, 2008. – 440 с.
11. *Вітлінський В. В.* Ризикологія в економіці та підприємстві : монографія / В. В. Вітлінський, Г. І. Великоіваненко – К. : КНЕУ, 2004. – 480 с.
12. *Скіцько В. І.* Оцінка ризику методом Value-at-Risk / В. І. Скіцько // Економіка: проблеми теорії та практики : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2005. – № 202. – С. 158–165.
13. *Недосекин А. О.* Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний : дис. на соискание уч. степени докт. экон. наук : спец. 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики» / А. О. Недосекин – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов, 2003. – 280 с.
14. *Зайченко Ю. П.* Анализ инвестиционного портфеля с использованием аппарата нечетких множеств / Ю. П. Зайченко, М. Есфандиярфард // Матеріали XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2006». – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2007. – С. 316–324.

Надійшла 11.09.2009

Дубровин В. И., Лёвкин В. Н.

ОЦЕНИВАНИЕ РИСКОВ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОРТФЕЛЯ

Проанализированы подходы к оптимизации инвестиционного портфеля, используемые в моделях Марковица, Шарпа, методологии Value-at-Risk, нечётком подходе на основе теории возможностей. Детально рассмотрены используемые в них способы оценки риска (на основе среднеквадратического, семиквадратического и медианного семиквадратического отклонения, критических значений доходности) и определены основные недостатки и преимущества подходов. Разработаны рекомендации для выбора методов оптимизации (и соответственно оценки рисков) инвестиционного портфеля в тех или иных условиях.

Ключевые слова: оценка рисков, инвестиционный портфель, модель Марковица, Шарпа, методология Value-at-Risk, нечёткий подход.

Dubrovin V. I., Liovkina V. N.

RISK ASSESSMENT OF INVESTMENT PORTFOLIO

Investment portfolio optimization approaches (proposed in the works by Markowitz, Sharpe and Value-at-Risk methodology, fuzzy approach based on possibility theory) were analyzed. Risk assessment tools (based on standard, semi-quadratic and median semi-quadratic deviation, critical values of profitability), used in these methods, were considered in details and their main shortcomings and advantages were detected. Advices for investment portfolio optimization methods choice (and for risk assessment accordingly) were given under special conditions.

Key words: risk assessment, investment portfolio, Markowitz, Sharpe model, Value-at-Risk methodology, fuzzy approach.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ АТАК НА ВНУТРИПЛАТЕЖНЫЕ БАНКОВСКИЕ СИСТЕМЫ

Анализируются угрозы информационных данных во внутриплатежных банковских системах (ВПБС). Разрабатываются модель реализации угроз информационных данных в ВПБС, математические модели пассивной и активной атак, исследуются основные направления защиты в ВПБС.

Ключевые слова: угрозы, внутриплатежная банковская система, математическая модель, модель реализации угроз, пассивная атака, активная атака, защита, шифрование, аутентичность, целостность.

ВВЕДЕНИЕ

В развитии рыночных отношений главенствующую роль играют коммерческие банки, аккумулирующие огромные финансовые потоки. Информационные банковские системы становятся одной из наиболее уязвимых сторон современного банка, притягивающие к себе злоумышленников, как из числа персонала банка, так и со стороны [1–3].

Нарушение работы банковских систем приводит к потере не только конфиденциальной информации банка, но и к экономическому ущербу как банка, так и его клиентов, что создает общенациональную проблему.

Целью статьи является анализ угроз информационных данных в ВПБС, построение общей структуры подсистемы защиты информации, структурной схемы модели реализации угроз информационных ресурсов, математических моделей пассивной и активной атак, исследование основных направлений защиты во ВПБС.

1. Анализ угроз безопасности ВПБС. *Внутриплатежная банковская система* представляет собой совокупность правил, организационных мероприятий, программно-технических средств, средств защиты, используемых банком для выполнения внутрибанковского перевода денег, а также для взаимодействия с другими банковскими платежными системами для обеспечения выполнения межбанковского перевода денег филиалами банка [2]. Данная система относится к числу многоуровневых критических систем, т. к. ее отказ, отступление от задаваемых ограничений либо изменения в работе подсистемы могут по-

влечь за собой серьезные последствия либо привести к краху всей системы в целом.

Для обеспечения защиты банковской информации в ВПБС на различных уровнях используются криптографические механизмы, однако бурный рост вычислительной техники, создание систем и технологий кибертерроризма приводит к появлению новых угроз (активных и пассивных атак) и взлому подсистемы защиты ВПБС. Под *угрозой* понимается совокупность условий факторов, создающих опасность несанкционированного, в том числе случайного, доступа к информации, результатом которого может стать уничтожение, изменение, блокирование, копирование, распространение информации [4]. Подтверждением этому являются широко известные факты утечки информации: данных из ядерной лаборатории Los Alamos (2007 г.); базы данных NASA о новых проектах (ущерб более 720 тыс. долл., 2006 г.); базы данных клиентов крупнейшего японского банка Mizuho (ущерб более 100 миллионов йен, 2006–2009 г.г.); базы данных одного из крупнейших банков Великобритании – «Ройял бэнк оф Скотланд» в Атланта (9 млн. долл., 2009 г.); секретных документов и разработок Lockheed Martin (ущерб более 1 млрд. долл., 2006 г.); Формулы-1: утечка данных из Феррари в МакЛарен (2008 г.) [1].

Все источники угроз безопасности информации можно разделить на три основные группы: умышленные угрозы безопасности в ВПБС, стихийные бедствия и сбои. На рис. 1 приведена общая классификация угроз информационных ресурсов в ВПБС.

Одним из наиболее уязвимых мест в системе электронных платежей является пересылка платежных



Рис. 1. Общая классификация угроз информационных ресурсов в ВПБС

и других сообщений между банками, между банком и банкоматом, между банком и клиентом.

Для защиты платежных сообщений используется система защищенной электронной почты (СЗЭП), предназначенная для обмена электронными сообщениями в формате SMF-70 через сеть передачи данных произвольного типа в соответствии с критериями НД ТЗІ 2.5-004-99 [3]. Общая структура подсистемы защиты информации в ВПБС и возможных угроз ее отдельным составляющим представлена на рис. 2.

Для совершенствования подсистемы защиты ВПБС в условиях появления новых угроз необходим постоянный анализ риска проведения той или иной атаки (реализации угрозы). Перечень угроз, оценка вероятности их реализации, а также модель нарушителя служат основой для проведения анализа риска и формулирования требований к системе защиты ВПБС. Таким образом, анализ угроз в конкретных условиях составляет основу для планирования и осуществления мероприятий, направленных на обеспечение безопасности ВПБС, в том числе: на формирование обоснованных требований по защите, методов оценки экономического ущерба, нанесенного вследствие реализации угрозы (проведения атаки) нарушителем, выбор конкретных механизмов, систем защиты информационных банковских ресурсов и

транзакций. Однако в полной мере все это невозможно выполнить без построения и анализа модели реализации угроз и моделей пассивных и активных атак.

1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РЕАЛИЗАЦИИ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ВПБС

Моделирование процесса реализации угроз безопасности ВПБС целесообразно осуществлять на основе рассмотрения логической цепочки: «угрозы – источник угрозы – метод реализации – уязвимость – последствия». На рис. 3 представлена структурная схема модели реализации угроз информационных ресурсов в ВПБС.

Для описания модели реализации угроз информационных ресурсов в ВПБС (математических моделей активной и пассивных атак) зафиксируем конечное множество субъектов, взаимодействующих с информационной системой (S). Под *субъектом* s подразумеваем организацию, группу, одного человека или программно-аппаратное средство, способное принимать активное участие в процессе функционирования системы, то есть оказывать прямое влияние на нее. Определим рост атак на компьютеры субъекта S .

Пусть параметр N – количество уязвимых к атаке компьютеров (ПК), а параметр D содержит начальное значение среднего количества атакованных

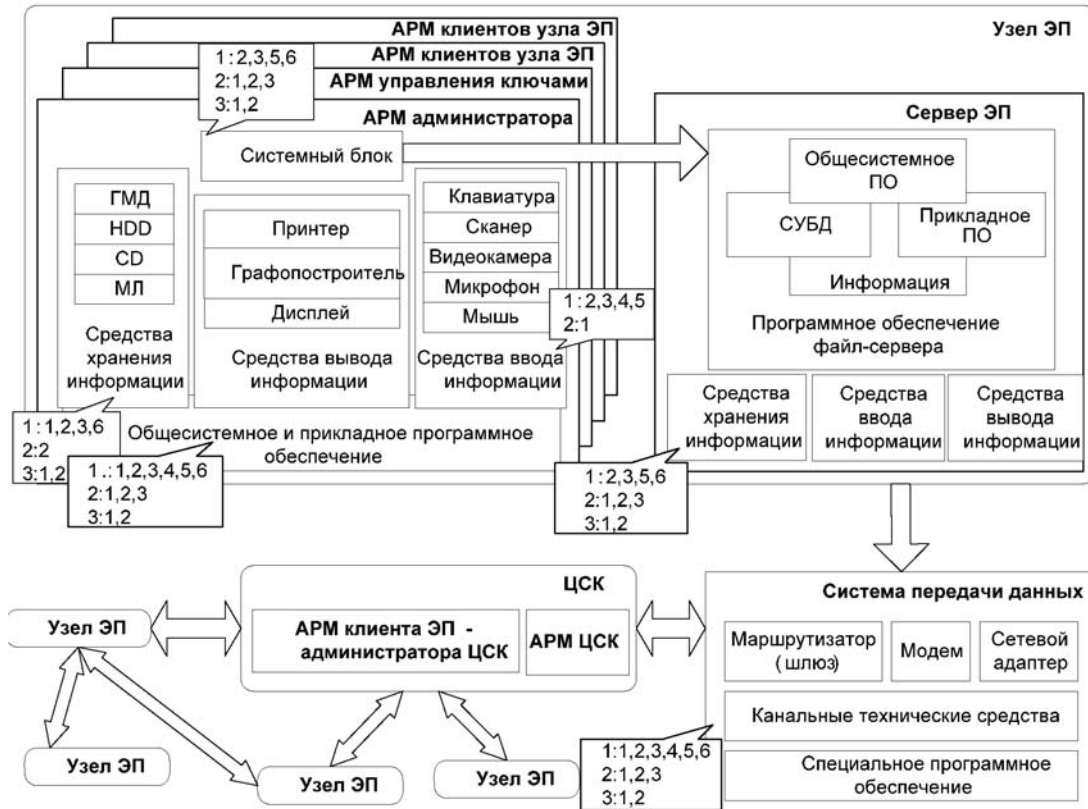


Рис. 2. Общая структура подсистемы защиты информации в ВПБС



Рис. 3. Структурная схема модели реализации угроз информационных ресурсов в ВПБС

компьютеров за выбранную единицу времени. Считаем, что D является константой на протяжении всех дальнейших вычислений, несмотря на различия в мощности и типах атакуемого вычислительного оборудования и пропускной способности каналов связи. Кроме того, вычисления делаются с учетом того, что один и тот же компьютер не может быть атакован дважды. Пусть $a(t)$ – пропорция уязвимых ПК, кото-

рые были успешно атакованы во время t , тогда $N \cdot a(t)$ – общее количество успешно атакованных компьютеров. Поскольку часть компьютеров уже была успешно атакована (их доля составляет $a(t)$), каждым новым захваченным компьютером будет произведено не более $D(1 - a(t))$ новых успешных атак. Таким образом, количество захваченных компьютеров за период времени $d(t)$ равно (зафиксировав $a(t)$):

$$n = aN \cdot D(1 - a)dt.$$

Учитывая, что N – константа, то $n = d(Na) = Nda$. Тогда верно следующее уравнение:

$$Nda = aN \cdot D(1 - a)dt,$$

которое ведет к дифференциальному уравнению вида

$$\frac{da}{dt} = Da(1 - a)$$

и имеет следующее решение:

$$a = \frac{e^{D(t-T)}}{1 + e^{D(t-T)}},$$

где T является временным параметром, характеризующим наибольший рост атак.

На основании проведенных вычислений разработаем общую структуру подсистемы защиты информационных ресурсов в ВПБС.

2. ПОСТРОЕНИЕ ОБЩЕЙ СТРУКТУРЫ ПОДСИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВПБС

Для построения общей структуры подсистемы безопасности информационной безопасности ВПБС и моделей атак выбран функциональный тип математических моделей, называемый моделями «черного ящика». Математическая модель является моделью объекта, процесса или явления, представляющей собой математические закономерности, с помощью которых описаны основные характеристики моделируемого объекта, процесса или явления [5]. Данные модели построены в соответствии с методологиями

IDEFO и DFD с использованием CASE-средства BP-Win.

Для обеспечения защиты информации в системе электронного документооборота используется криптографический метод электронной цифровой подписи согласно стандартам, ратифицированным в Украине: ДСТУ-4145, ГОСТ 28147-89, ГОСТ 34310-95, ГОСТ 34311-95. Необходимо отметить, что цифровая подпись позволяет не только аутентифицировать автора электронного документа, но и подтвердить целостность последнего.

На рис. 4-5 приведена общая структура подсистемы защиты информационных ресурсов ВПБС. При этом под нарушителем безопасности понимается физическое лицо, случайно или преднамеренно совершающее действие, следствием которого является нарушение безопасности ВПБС.

На основании проведенного анализа угроз и построенной общей модели подсистемы защиты информационных ресурсов ВПБС рассмотрим модели активной и пассивных атак, которые могут быть реализованы в банковской системе. Общим для описания данных математических моделей является процесс формирования криптограммы.

Для этого зафиксируем конечное множество $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ пакетов, передаваемых в банковской транзакции, причем каждому пакету соответствует вероятность $P^*(I_j)$. Распределение вероятностей случайного процесса задается совокупным распределением вероятностей случайных величин, т. е. множеством вероятностей $P_o^* = \{P^*(I_1), P^*(I_2), \dots, P^*(I_m)\}$ [6]. Источник ключей порождает поток ключей из множества K и/или K^* . Каждому ключу



Рис. 4. Общая структура подсистемы защиты информационных ресурсов ВПБС (контекстная диаграмма)

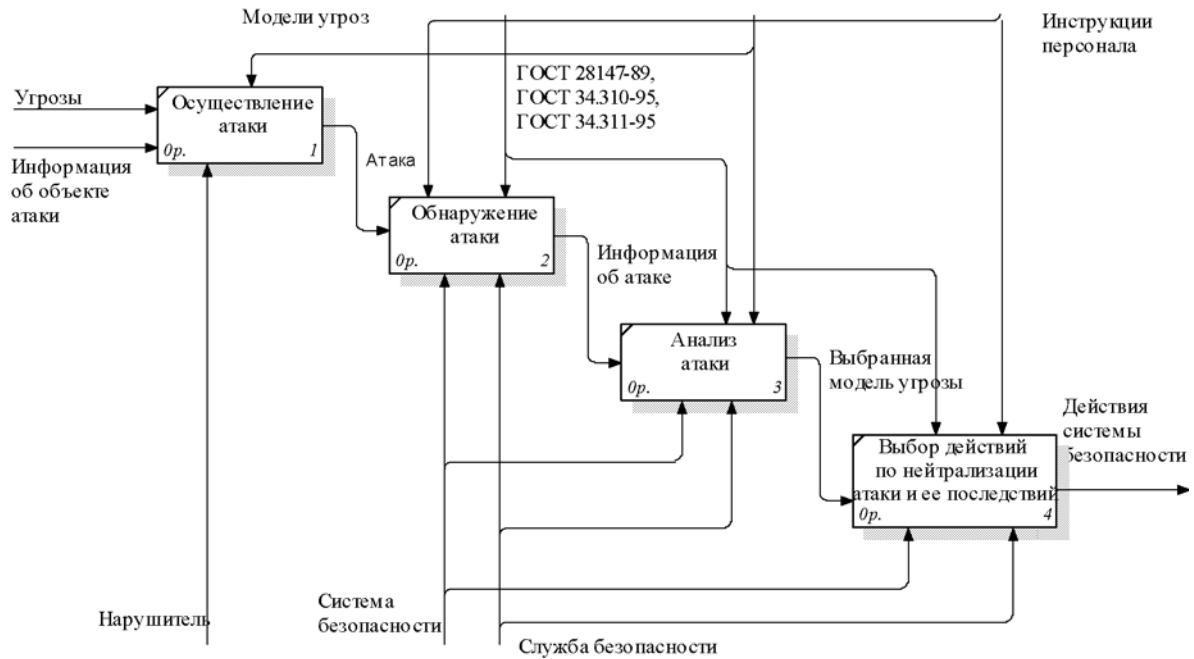


Рис. 5. Декомпозиция общей структуры подсистемы защиты информационных ресурсов

$K_i \in K = \{K_1, K_2, \dots, K_k\}$ соответствует некоторая вероятность $P^*(K_i)$, а каждому $K_i^* \in K^* = \{K_1^*, K_2^*, \dots, K_k^*\}$ соответствует вероятность $P^*(K_i^*)$. Случайный процесс выработки ключей задается множествами вероятностей:

$$P_K^* = \{P^*(K_1), P^*(K_2), \dots, P^*(K_k)\};$$

$$P_{K^*}^* = \{P^*(K_1^*), P^*(K_2^*), \dots, P^*(K_k^*)\}.$$

Выбор ключа K_i определяет конкретное отображение φ_i из множества отображений φ . С помощью отображения φ_i , соответствующего выбранному ключу K_i , по поступившему пакету I_j формируется криптограмма

$$E_l = \varphi_i(K_i, I_j).$$

Криптограмма E_l передается в точку приема по некоторому каналу. Последующие действия нарушителя определяются целью проведения атаки, а соответственно ее типом.

Отличие между активными и пассивными атаками заключается в том, что при выполнении атак первого типа (активные атаки) нарушитель осуществляет активные действия, т. е. действия, связанные с изменением потока данных либо с созданием фальшивых потоков (имитация, воспроизведение, модификация сообщений или помехи в обслуживании). Целью второго типа атак (пассивные атаки) является получение

передаваемой информации (раскрытие содержимого сообщений и анализ потока данных).

Оценка степени эффективности атаки может быть осуществлена за счет проведения анализа данных, которыми владеет злоумышленник, анализа его возможностей и других параметров атаки. Основным методом оценки возможностей злоумышленника при атаке есть создание модели атаки. Рассмотрим основные модели атак на ВПБС.

3. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПАСИВНЫХ АТАК НА ВПБС

Пассивные угрозы вытекают из прослушивания (несанкционированного считывания информации) и не связаны с каким-либо изменением информации [6]. Суть атаки заключается в том, что нарушитель, определив факт выполнения криптографического протокола, перехватывает все данные, которые были переданы по каналу связи. То есть при передаче криптограммы E_l в точку приема по некоторому каналу нарушитель выполняет мониторинг сети. При этом нарушитель (криптоаналитик) обязан владеть всеми открытыми параметрами и данными, которые используются субъектами s , выполняющими обмен данными. В таком случае криптоаналитик может провести криптоанализ протокола с целью определения сеансовых или долгосрочных ключей, которые используются субъектами – участниками протокола. Криптоанализ протокола зависит от типа протокола,

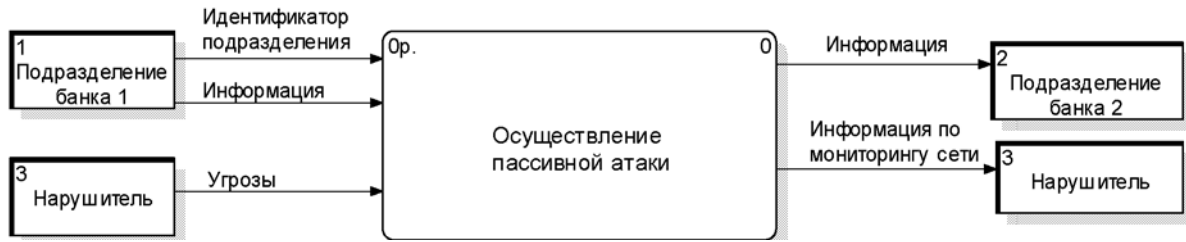


Рис. 6. Модель пассивных атак на информационные ресурсы во ВПБС



Рис. 7. Декомпозиция модели пассивных атак

количества и типа ключей, математического аппарата, который используются в протоколе, и других характеристик протокола.

На приемной же стороне с помощью обратного отображения φ_i^{-1} (заданного ключом K_i^*) из криптограммы E_i восстанавливается первоначальная информация

$$I_j = \varphi_i^{-1}(K_i^*, E_i).$$

Обобщенная модель пассивных атак представлена на рис. 6–7.

Таким образом, криптоанализ представляет собой решение математической задачи с целью определения самого сообщения или некоторых личных ключей субъектов – участников протокола. Более опасными с точки зрения экономического ущерба для ВПБС являются активные атаки. Рассмотрим основные типы активных атак.

4. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ АТАК НА ВПБС С БЛОКИРОВКОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Суть атаки с блокировкой передачи информации заключается в том, что нарушитель, определив факт выполнения криптографического протокола, блокирует передачу информации, в результате чего криптограмма не достигает приемной стороны.

Обобщенная модель активных атак с блокировкой передачи информации представлена на рис. 8–9. Получателем информации в данной модели является нарушитель.

Таким образом, при реализации данной атаки необходимые данные не достигают пункта назначения, либо достигают слишком поздно, что приводит к потере конфиденциальной банковской информации.

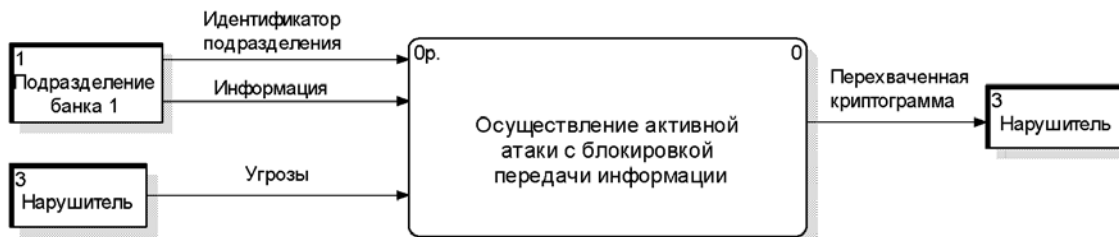


Рис. 8. Модель активных атак с блокировкой передачи информации

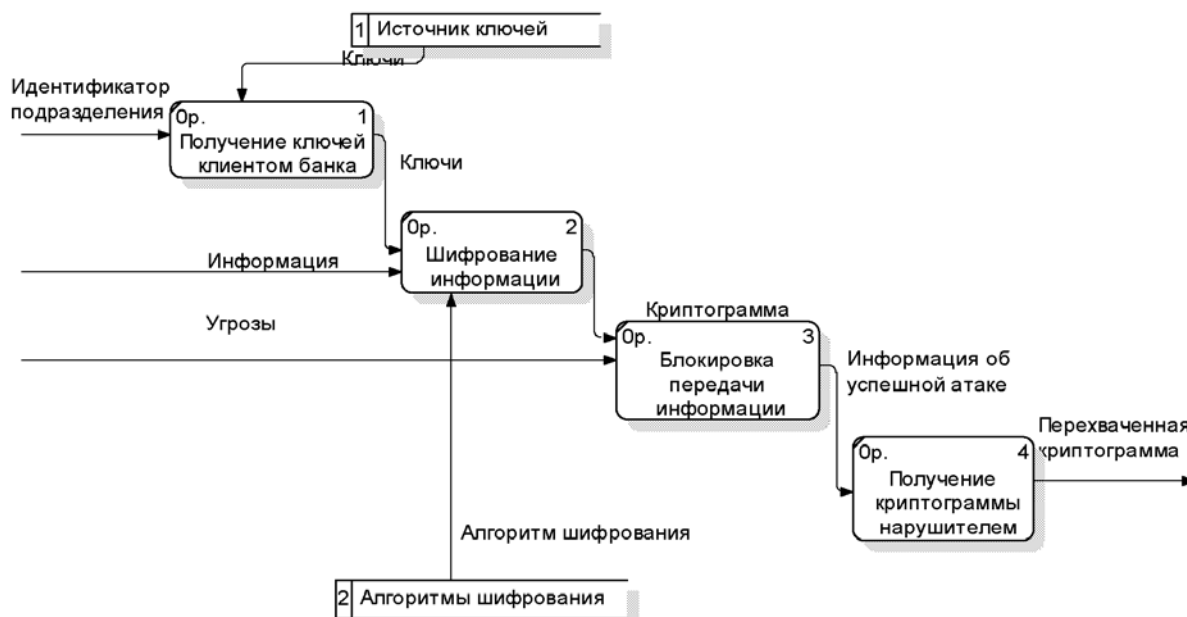


Рис. 9. Декомпозиция модели активных атак с блокировкой передачи информации

5. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ АТАК НА ВПБС С ВНЕСЕНИЕМ ПОМЕХ

Суть атаки с внесением помех заключается в том, что нарушитель, определив факт выполнения криптографического протокола, вносит некоторую ошибку e и передает в точку приема криптограмму $(E_i + e)$. На приемном конце с помощью обратного отображения φ_i^{-1} (заданного ключом K_i^*) из криптограммы $(E_i + e)$ восстанавливается недостоверная информация

$$I_j^e = \varphi_i^{-1}(K_i^*, E_i + e),$$

т. е. подразделение банка получает сообщение, отличное от исходного $I_j^e \neq I_j$.

Обобщенная модель активных атак с внесением помех представлена на рис. 10–11.

Реализация данной атаки может привести к сбою или к получению на приемной стороне ложной транзакции. Таким образом, нарушитель может «руково-

дить» банковскими активами и конфиденциальной информацией банка.

6. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ АТАК «МАСКАРАД» НА ВПБС

Суть атаки «маскарад» заключается в том, что пользователь (или иная сущность – процесс, подсистема и т. д.) передает информацию от имени другого пользователя. Способы замены идентификатора могут быть разные, обычно они определяются ошибками и особенностями сетевых протоколов. Тем не менее, на приемном узле такое сообщение будет воспринято как корректное, что может привести к серьезным нарушениям работы ВПБС.

Рассмотрим процесс выполнения атаки данного типа. Нарушитель, определив факт выполнения криптографического протокола, перехватывает криптограмму E_j . С ее помощью он может попытаться вычислить апостериорные вероятности различных возможных сообщений:

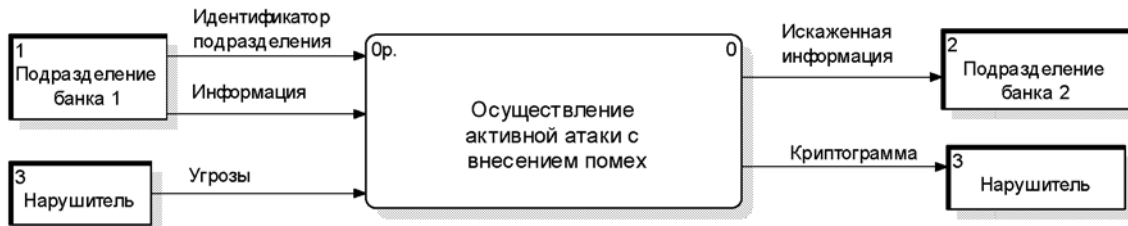


Рис. 10. Модель активных атак с внесением помех

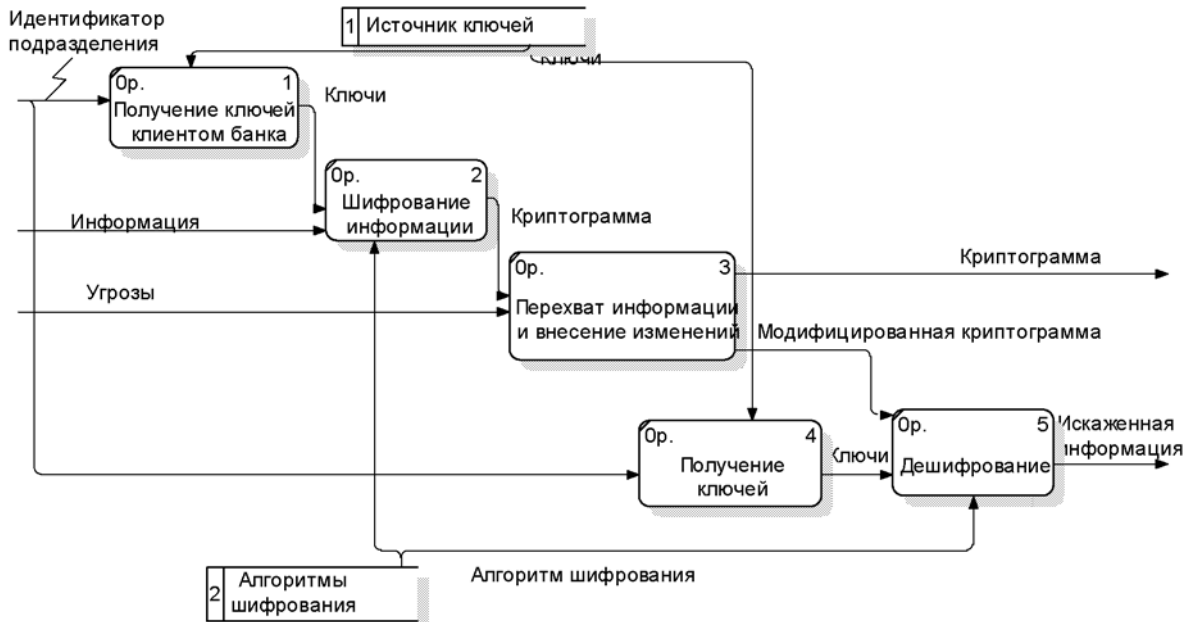


Рис. 11. Декомпозиция модели активных атак с внесением помех

$$P_{0|E_l}^* = \{P^*(I_1|E_l), P^*(I_2|E_l), \dots, P^*(I_m|E_l)\}$$

и различных возможных ключей:

$$P_{k|E_l}^* = \{P^*(K_1|E_l), P^*(K_2|E_l), \dots, P^*(K_k|E_l)\},$$

которые могли быть использованы при формировании криптограммы E_l .

Множества апостериорных вероятностей образуют апостериорные знания нарушителя о ключах $K = \{K_1, K_2, \dots, K_k\}$ и об информации $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ после перехвата криптограммы E_l . Фактически, множества $P_{k|E_l}^*$ и $P_{m|E_l}^*$ представляют собой множества предположений, которым приписаны соответствующие вероятности.

Затем, получив необходимую информацию, нарушитель формирует криптограмму с недостоверной информацией

$$E_l^e = \varphi_i(K_i, I_j^e)$$

и передает ее в точку приема.

На приемном конце с помощью обратного отображения φ_i^{-1} (заданного ключом K_i^*) из криптограммы E_l^e восстанавливается недостоверная информация, переданная нарушителем:

$$I_j^e = \varphi_i^{-1}(K_i^*, E_l^e), I_j^e \neq I_j.$$

Такого типа атака, как правило, связана с попытками проникновения внутрь периметра безопасности ВПБС и часто реализуется хакерами.

Обобщенная модель активных атак «маскарад» представлена на рис. 12–13.

Наиболее опасен «маскарад» в банковских системах электронных платежей, где неправильная идентификация клиента может привести к потере его конфиденциальной информации и активов.

Анализ рассмотренных атак показывает, что любая реализованная активная атака приводит к потере конфиденциальной информации (банка или его клиентов) и наносит экономический ущерб, как активам банка, так и активам его клиентов. Реализация

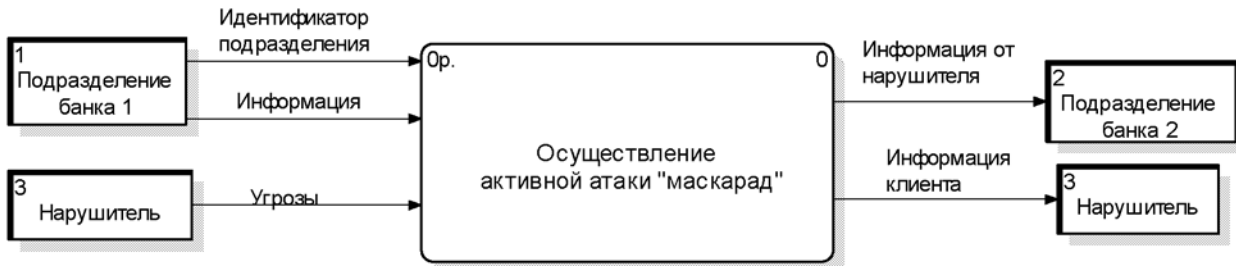


Рис. 12. Модель активных атак «маскарад»

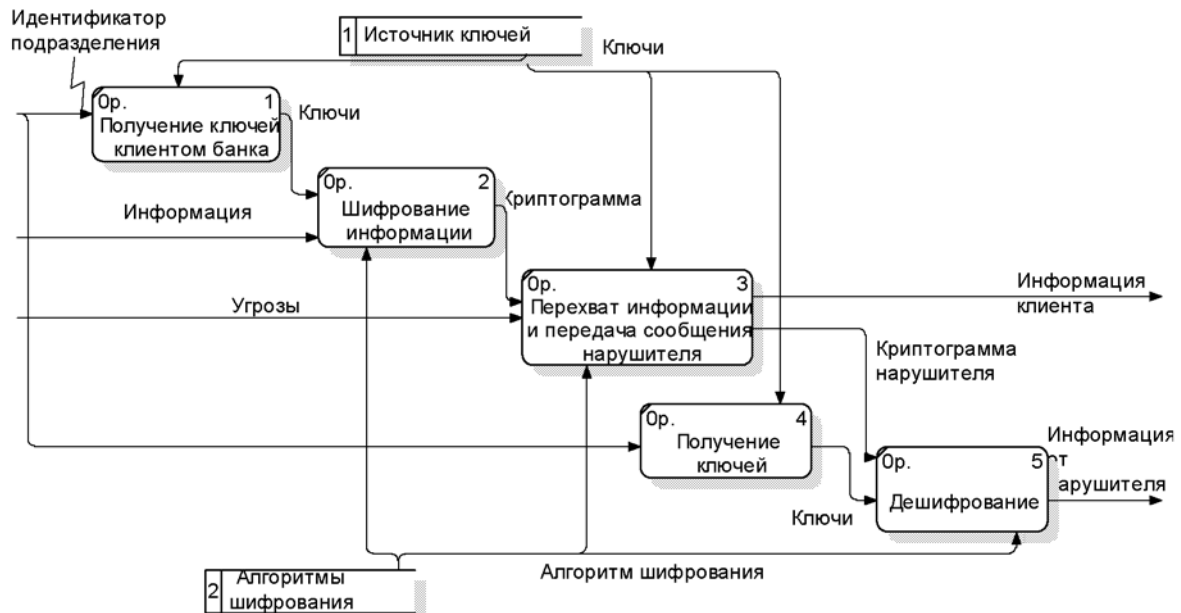


Рис. 13. Декомпозиция модели активной атаки «маскарад»

пассивной атаки может привести к потере «конфиденциальности» передаваемой транзакции, что дает возможность нарушителю на основе полученной информации реализовать активную атаку.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ЗАЩИТЫ ВПБС

Для предотвращения угроз на информационные ресурсы ВПБС рассмотрим основные направления защиты банковской информации, представленные на рис. 14.

Анализ средств защиты показал, что большинство из них реализовано с помощью аппаратных, программно-аппаратных и программных систем и средств, на основе соответствующих криптографических алгоритмов. Достоинством аппаратных средств является их простота реализации, недостатком – невозможность совершенствования и модернизации, возможность «обхода» злоумышленником ал-

горитма защиты, высокая стоимость реализации криптоалгоритма.

Достоинством программно-аппаратных средств является функция стирания секретной информации при попытках физического проникновения в аппаратную часть системы, возможность модернизации и совершенствования используемых криптоалгоритмов, недостатком – высокая стоимость по сравнению с программными средствами защиты. Учитывая экономическую эффективность системы обеспечения безопасности, чаще применяют только программные средства. Программные средства предоставляют гибкую, обеспечивающую достаточный уровень защиты, и в то же время незначительную по стоимости обслуживания программных комплексов систему, а также возможность упрощения или усложнения применяемых криптографических методов, в зависимости от потребностей обеспечения безопасности. На рис. 15 приведена взаимосвязь основных направ-

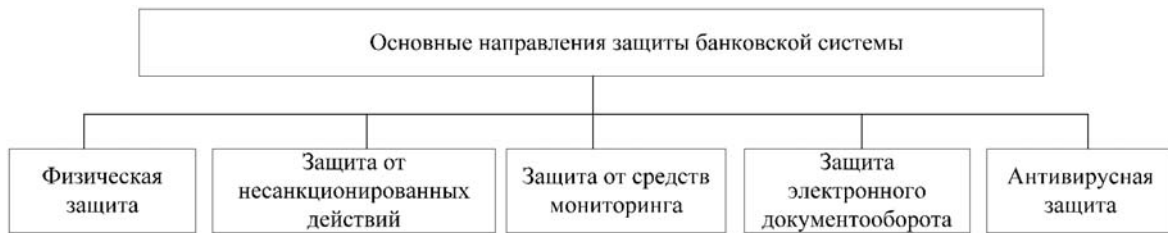


Рис. 14. Основные направления защиты информации

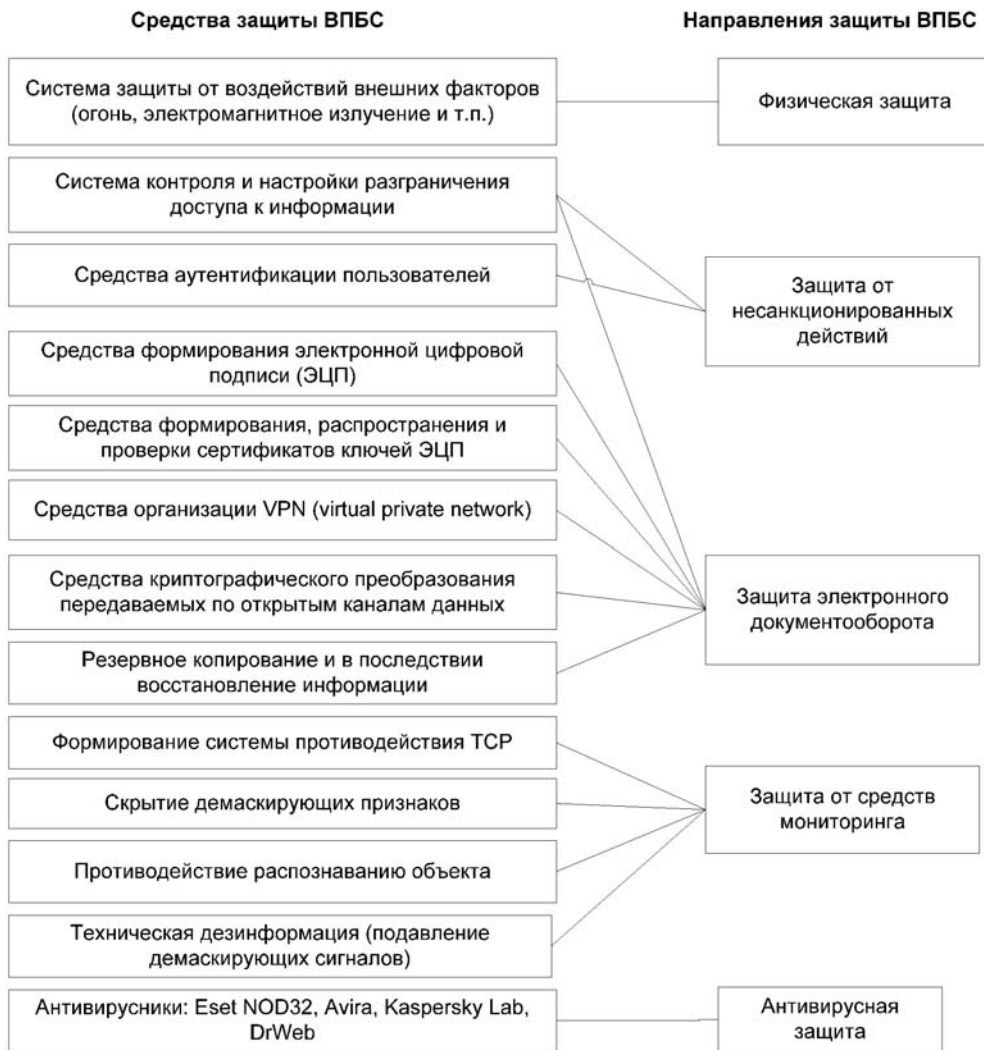


Рис. 15. Взаимосвязь направлений и средств защиты ВПБС

лений и средств защиты информационных ресурсов в ВПБС.

Проведенный анализ рис. 14 показал, что для обеспечения надежной защиты необходим комплексный подход, включающий в себя анализ общей структуры ВПБС, возможных угроз и реализованных атак; выбор ратифицированных стандартов для обеспечения аутентичности, целостности и конфи-

денциальности банковских транзакций; программную реализацию выбранных криптографических алгоритмов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования показали, что для обеспечения безопасности банковской информации в ВПБС используются криптографические

симметричные и асимметрические алгоритмы шифрования, обеспечивающие аутентичность и целостность сообщений. Разработанные математические модели позволяют оценить степень эффективности основных типов атак, что облегчает выбор необходимых средств и методов защиты информации в ВПБС. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка методики оценки экономического ущерба, нанесенного в результате реализации угроз на информационные ресурсы ВПБС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Украинский ресурс по безопасности [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://kiev-security.org.ua>. – Загл. с экрана.
2. Дело [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://delo.ua/wiki/Glossary/vnutribankovskaja-platezhnaja-sistema-130342>. – Загл. с экрана.
3. Кузнецов А. А. Анализ механизмов обеспечения безопасности банковской информации во внутриплатежных системах коммерческого банка / А. А. Кузнецов, О. Г. Король, А. М. Ткачов // Материалы I международной научно-практической конференции «Безопасность и защита информации в информационных и телекоммуникационных системах», 28–29 мая 2008 г. Зб. наук. статей «Управление развитием». – Х. : ХНЕУ, 2008. – № 6. – С. 28–35.
4. В. Столлингс. Криптография и защита сетей: принципы и практика : пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2001. – 672 с.

5. Глоссарий [электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.glossary.ru>. – Загл. с экрана.
6. Кузнецов О. О. Защита информации та економічна безпека підприємства : монографія / О. О. Кузнецов, С. П. Євсєєв, С. В. Кавун. – Х. : ХНЕУ, 2008. – 360 с.

Надійшла 08.09.2009

Євсєєв С. П., Король О. Г., Гончарова А. І.
ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ АТАК НА ВНУТРІШНЬО-ПЛАТІЖНІ БАНКІВСЬКІ СИСТЕМИ

Аналізуються погрози інформаційних даних у внутрішньоплатіжних банківських системах (ВПБС). Розробляються модель реалізації погроз інформаційних даних у ВПБС, математичні моделі пасивної і активної атак, досліджуються основні напрями захисту у ВПБС.

Ключові слова: погрози, внутрішньоплатіжна банківська система, математична модель, модель реалізації погроз, пасивна атака, активна атака, захист, шифрування, автентичність, цілісність.

Evseev S. P., Korol O. G., Goncharova A. I.
MODEL-BUILDING OF ATTACKS ON INTERNAL-PAYMENT BANKING SYSTEM

Threats to information data in an internal-payment banking system (IPBS) are being analyzed. The realization model of information data threats in IPBS as well as the mathematical models of passive and active attacks are being developed. The general protection areas in IPBS are being studied.

Key words: threats, internal-payment banking system, mathematical model, realization model of threats, passive attack, active attack, protection, encoding, authenticity, integrity.

УДК 621.391

Калекина Т. Г.¹, Коваленко Т. Н.²

¹Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиозлектроники

²Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиозлектроники

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ СТРУКТУРНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СВЯЗНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

В работе предложены комплексные показатели надежности телекоммуникационных систем и сетей, учитывающие одновременно как структурные, так и функциональные характеристики сети. Предложенные показатели позволяют оценить не только потенциальную надежность телекоммуникационной сети – верхнюю границу структурной надежности, но и надежность сети с учетом ограниченной пропускной способности каналов.

Ключевые слова: надежность, структурная связность, информационная связность, интегральный показатель, граф, телекоммуникационная сеть.

Вопросы анализа надежности сложных разветвленных телекоммуникационных систем и сетей (ТКС) всегда были в центре внимания проектировщиков перспективных систем связи. Под структурной надежностью сети связи понимается объек-

тивное свойство сети обеспечивать связность пользователей сети с качеством не хуже заданного. Без средств анализа надежности ТКС отдел информационных технологий предприятия не сможет ни проконтролировать, ни тем более обеспечить необхо-

© Калекина Т. Г., Коваленко Т. Н., 2010

димый уровень обслуживания для конечных пользователей сети. Результаты анализа производительности и надежности позволяют контролировать соглашение об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA), заключаемое между пользователем сети и ее администраторами. Обычно в SLA оговариваются такие параметры надежности, как коэффициент готовности службы в течение года и месяца, максимальное время устранения отказа, а также параметры производительности, средняя и максимальная пропускная способность при соединении двух точек подключения пользовательского оборудования, время реакции сети, максимальная задержка пакетов при передаче через сеть [1, 2]. При этом одной из актуальных задач является выбор и обоснование комплексных показателей, позволяющих наиболее полно оценить надежность телекоммуникационной системы. В качестве критерия оценки надежности ТКС целесообразно взять такой показатель, который, с одной стороны, больше всего отвечает целевому предназначению сети, а с другой – дает возможность переходить к оценке качества функционирования высших звеньев иерархии некоторой сложной системы, в область управления которой телекоммуникационная сеть входит как составляющая.

Количественно надежность сложных технических систем, к которым относятся и телекоммуникационные системы, можно охарактеризовать рядом показателей: наличием в заданных двухполюсных сетях направлений связи, математическим ожиданием количества этих путей, отношением количества исправных ребер к их общему количеству, мощностью простого минимального сечения множества – минимальной совокупности элементов, отказ которых нарушает связность [3, 4]. В основе всех перечисленных выше показателей положен один факт: наступление события связности или несвязности. Поэтому в качестве интегрального критерия надежности связи обычно используется критерий структурной связности, который определяется следующим образом: надежностью связи между узлами X_k и X_l называется вероятность $P_{k,l}$ того, что работоспособным является хотя бы один путь из множества путей на графе сети между данными узлами. Реальные телекоммуникационные сети могут представлять собой довольно сложную структуру, поэтому используются приближенные методы, позволяющие определить верхние и нижние границы структурной надежности [4].

Под отказом канала связи понимается такое состояние, при котором оборудование канала полностью вышло из строя, либо его параметры настолько ухуд-

шились, что дальнейшее использование канала невозможно. Под отказом узла коммутации понимается невозможность передачи через него информации от входящих каналов на исходящие. Такой отказ эквивалентен одновременному отказу всех ребер, инцидентных этому узлу. Отказ узла приводит к нарушению значительно большего числа путей, чем отказ ребра, однако вероятность такого события значительно меньше вероятности отказа ребра. Поэтому при оценке структурной надежности связей будем рассматривать только влияние ребер, считая, что надежность узлов $p_i = 1$. Под надежностью $p(l_{ij})$ ребра l_{ij} будем понимать вероятность нахождения ребра в состоянии работоспособности.

Простейшими формулами вычисления надежности структур последовательного и параллельного соединения ненадежных элементов являются следующие:

$$P_{k,l} = \prod_{i=1}^m p_i, \quad (1)$$

$$P_{k,l} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i, \quad (2)$$

где m, n – число элементов, соединенных последовательно и параллельно, соответственно; p_i – надежность i -го элемента; q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Суть практически всех методов вычисления $P_{k,l}$ так или иначе заключается в реализации некоторых преобразований исходного графа двухполюсной сети, приводящих либо к простейшему последовательному, либо параллельному соединению элементов [3, 4]. Самым простым методом вычисления вероятности связности является метод, основанный на разложении структуры сети относительно какого-нибудь его элемента (метод разложения Шеннона – Мура).

Критерий структурной связности не может в полной мере характеризовать надежность связи, т. к. он не учитывает алгоритмы функционирования сети, в частности, алгоритм выбора исходящих направлений на узлах в процессе установления соединений. Поэтому для оценки надежностных характеристик сети в целом рассмотрим критерий структурно-информационной связности и критерий информационной надежности, характеризующие качество обслуживания запросов (вызовов) в условиях ненадежности элементов сетей.

Под вероятностью структурно-информационной связности между двумя фиксированными узлами сети, при наличии между ними потока информации, понимается вероятность того, что в заданном интервале времени при поступлении очередного запроса

на передачу інформації в процесі пошуку установлення з'єднання знайдено хоча б один справний шлях між даними вузлами.

В якості критерія структурно-інформаційної зв'язності від вузла X_k до вузла X_l вводиться показатель

$$H_{k,l} = \frac{Y_{kl}^{bx} - Y_{kl}^{пот}}{Y_{kl}^{bx}}, \quad (3)$$

где Y_{kl}^{bx} – потік, поступивший на обслуговування від вузла X_k до вузла X_l ; $Y_{kl}^{пот}$ – необслугований (потеряний) потік при організації зв'язу від вузла X_k до вузла X_l .

При визначенні $H_{k,l}$ враховується алгоритм обслуговування поступаючих запитів на вузлах мережі. Для випадку, коли використовується алгоритм встановлення з'єднання з поверненням на вже пройдені вузли і повторним пошуком шляху, т.е., якщо для організації зв'язу між вузлами мережі допускається перебір всіх можливих шляхів між ними, показатель $H_{k,l}$ визначається співвідношенням

$$H_{k,l} = \frac{Y_{kl}^{bx} - Y_{kl}^{пот}}{Y_{kl}^{bx}} = \frac{Y_{kl}^{bx} - Y_{kl}^{пот}(1 - p_{kl})}{Y_{kl}^{bx}} = P_{k,l}, \quad (4)$$

т.е. структурно-інформаційна зв'язність дорівнює структурній зв'язності.

Оцінка структурно-інформаційної зв'язності мережі в цілому проводиться за матрицею $H = \|H_{k,l}\|$, елементами якої є значення $H_{k,l}$, якщо $Y_{kl}^{bx} > 0$. Якщо $Y_{kl}^{bx} = 0$ або $k = l$, то значення елемента $H_{k,l}$ не визначено. Будемо вважати, що мережа знаходиться в робочому стані, якщо $H_{k,l} \neq 0$ для всіх значень k, l .

Для заданого мінімально допустимого значення зв'язності h^{min} мережа вважається в робочому стані, якщо $H_{k,l} > h^{min}$ на множині $H_{k,l}$, для яких значення визначені. Исходними даними алгоритму визначення $H_{k,l}$ є: структура мережі, значення надійності всіх гілок мережі, Y_{kl}^{bx} , план розподілу потоків (маршрутні таблиці).

Критерій структурно-інформаційної зв'язності оцінює потенціальну надійність мережі. Значення

цього критерія є верхнім межею ймовірності зв'язу між вузлами мережі. Однак, зв'яз між вузлами може бути не встановлено не тільки через порушення робочості каналів, але й через відсутність в даний момент часу вільних каналних ресурсів. Для визначення ймовірності зв'язу між вузлами мережі в умовах, коли пропускна спроможність ліній обмежена, введено поняття інформаційної зв'язності $Q_{k,l}$ від вузла X_k до вузла X_l . Визначається інформаційна зв'язність за формулою

$$Q_{k,l} = \frac{Y_{kl}^{bx} - Y_{kl}^{пот}}{Y_{kl}^{bx}}. \quad (5)$$

Формула (5), як і входять в неї величини, аналогічна (3). Різниця полягає в методиці визначення втраченого потоку $Y_{kl}^{пот}$. При визначенні $H_{k,l}$ враховується втрачений потік тільки через відмову гілки, а при визначенні $Q_{k,l}$ – і через зайнятість всіх каналних ресурсів. З ростом пропускної спроможності ліній зв'язу $Q_{k,l} \rightarrow H_{k,l}$.

Проведемо аналіз структурно-інформаційної зв'язності мереж, структури яких зображені на рис. 1. Припустимо, що для організації зв'язу між вузлами X_1 і X_8 допускається перебір всіх можливих шляхів між ними. В цьому випадку показатель структурно-інформаційної зв'язності $H_{1,8}$ визначається співвідношенням (4) і структурно-інформаційна зв'язність дорівнює структурній зв'язності $P_{1,8}$. При розрахунках приймемо, що ймовірність справності ребер однакова і дорівнює p .

Для структури, наведеної на рис. 1, а ймовірність зв'язності вершин X_1 і X_8 розраховується згідно з вираженнями (1) і (2) і становить:

$$P_{1,8}^{(1)} = 1 - (1 - p^4)^2 = 2p^4 - p^8 = H_{1,8}^{(1)}. \quad (6)$$

Для розрахунку структурної надійності мережі, граф якої наведено на рис. 1, б, будемо використовувати метод з застосуванням теореми розкладання. В якості елемента розкладання виберемо ребро-перемичку $l_{2,7}$. Ймовірність зв'язності вершин X_1 і X_8 при

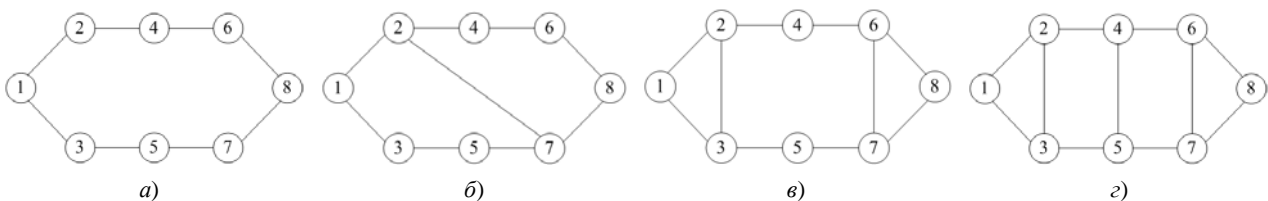


Рис. 1. Структури досліджуваних мереж

исправном и неисправном состоянии ребра-перемычки l_{27} рассчитывается в соответствии с соотношениями (1) и (2). Вероятность $P_{1,8}$ связности вершин X_1 и X_8 есть сумма вероятностей $p(G_{1,8}^0|l_{27})$ и $p(G_{1,8}^0|\bar{l}_{27})$ существования структуры двойственной схемы подграфа $G_{1,8}^0$:

$$P_{1,8}^{(2)} = p(F_{1,8} = 1) = p(l_{27}) \cdot p(G_{1,8}^0|l_{27}) + q(l_{27}) \cdot p(G_{1,8}^0|\bar{l}_{27}).$$

Таким образом, вероятность связности вершин X_1 и X_8 равна

$$P_{1,8}^{(2)} = p \cdot (1 - (1-p)(1-p^3))^2 + (1-p) \cdot (1 - (1-p^4)^2);$$

$$P_{1,8}^{(2)} = 2p^9 - 3p^8 + p^7 - 2p^6 + 2p^4 + p^3 = H_{1,8}^{(2)}. \quad (7)$$

Проанализировав структуры, изображенные на рис. 1, в, з, и рассмотрев все возможные состояния элементов разложения, получим выражения для расчета вероятности связности вершин X_1 и X_8 в сетях с соответствующими структурами:

$$P_{1,8}^{(3)} = -3p^{10} + 8p^9 - 4p^8 + 2p^7 - 12p^6 + 8p^5 + 2p^4 = H_{1,8}^{(3)}, \quad (8)$$

$$P_{1,8}^{(4)} = 8p^{11} - 36p^{10} + 52p^9 - 15p^8 - 18p^7 + 2p^6 + 6p^5 + 2p^4 = H_{1,8}^{(4)}. \quad (9)$$

На рис. 2, а приведены полученные с использованием выражений (6), (7), (8), (9) графики зависимости вероятности $P_{1,8}$ структурной (структурно-информационной) связности от вероятности p исправного состояния ребер для исследуемых структур сетей. При определении информационной связности $Q_{1,8}$

необходимо учитывать поток, потерянный по причине занятости всех канальных ресурсов. На рис. 2, б приведены графики зависимости вероятности $Q_{1,8}$ информационной связности от вероятности p исправного состояния ребер, если пропускная способность линий связи ограничена и вероятность отсутствия свободных канальных ресурсов составляет $p_0 = 0, 1$.

Как видно из приведенных на рис. 2, а графиков, самой ненадежной является сеть со структурой, представленной на рис. 1, а, которая представляет собой кольцо без перемычек. Введение в такую сеть одной перемычки (рис. 1, б) значительно увеличивает ее надежность. Увеличение количества перемычек приводит к росту вероятности структурной и информационной связности, хотя и не такому значительному, как при переходе от структуры без перемычек к структуре с одной перемычкой. Так, при надежности всех ветвей сети $p = 0, 9$, связности $P_{1,8}$ в сети без перемычек вероятность составляет 0,88, в сети с одной перемычкой – 0,94, а в сетях с двумя и тремя перемычками – 0,95 и 0,96 соответственно. Наилучшей из рассмотренных структур с точки зрения надежности является кольцо с тремя перемычками (рис. 1, з).

Из графиков, приведенных на рис. 2, б видно, что при учете ограниченности пропускной способности каналов сети вероятность связности $P_{1,8}$ становится ниже, чем в идеализированных условиях. Так, если вероятность отсутствия свободных канальных ресурсов составляет $p_0 = 0, 1$, то при надежности всех ветвей $p = 0, 9$ в сети с наиболее надежной структурой вероятность информационной связности $Q_{1,8} \cong \cong 0, 84$, в то время как вероятность структурной связности $P_{1,8} \cong 0, 96$. В сети с кольцевой структурой без

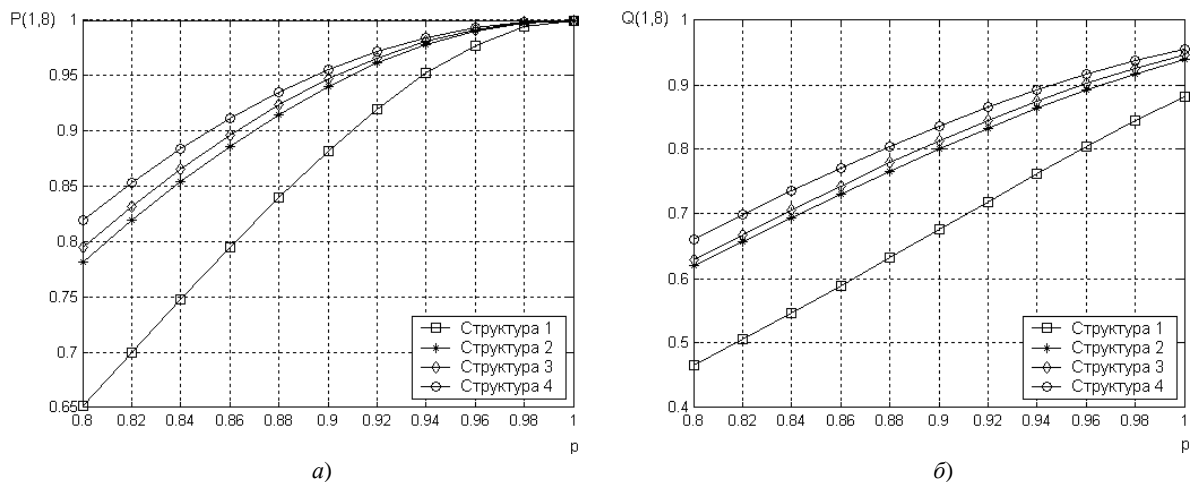


Рис. 2. Графики зависимости вероятности структурной и информационной связности от надежности ветвей сети

перемычек, которая является наименее надежной из рассмотренных вариантов, вероятность информационной связности $Q_{1,8} = 0,9$ вообще не может быть достигнута даже при надежности всех ветвей $p = 1$.

Таким образом, в данной работе предложены показатели надежности ТКС, учитывающие одновременно как структурные, так и функциональные характеристики сети. Использование предложенных показателей для оценки надежности телекоммуникационных систем и сетей позволяет оценить не только потенциальную надежность ТКС – верхнюю границу структурной надежности сети, но и ее надежность с учетом алгоритмов обслуживания поступающих запросов на узлах сети, плана распределения потоков, ограниченных пропускных способностей каналов. На примере сетей с различной структурой было показано, что вероятность связи между узлами сети существенно зависит не только от надежности ветвей сети, но и от вероятности наличия в данный момент времени свободных канальных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / Олифер В. Г., Олифер Н. А. – С-Пб. : Питер Принт, 2004. – 668 с.
2. Стеклов В. К. Основы управления сетями и услугами телекоммуникаций / Стеклов В. К., Кильчицкий С. В. – К. : Техника, 2002. – 438 с.
3. Филин Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи / Филин Б. П. – М. : Радио и связь, 1988. – 208 с.

УДК 004.9

Киричек Г. Г.

Старший викладач Запорізького національного технічного університета

КЕРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ НА ВСІХ РІВНЯХ ІЄРАРХІЇ ОТРИМАННЯ ЗНАНЬ

Система навчання представлена у вигляді багаторівневої конструкції взаємодіючих між собою та із зовнішнім середовищем елементів. Розроблено модель розподіленої системи керування інформаційними потоками на всіх рівнях ієрархії отримання знань з її подальшою реалізацією в інформаційній системі.

Ключові слова: керування інформацією, модель одержання знань, пошукова модель, навчальний процес, інформаційна система, інформаційні ресурси, імовірність одержання інформації.

ВСТУП

Вищий навчальний заклад (ВНЗ) за своєю суттю є інноваційною структурою – розробка і використання нових освітніх технологій і підходів є невід'ємною

© Киричек Г. Г., 2010

4. Дудник Б. Я. Надежность и живучесть систем связи / Б. Я. Дудник, В. Ф. Овчаренко, В. К. Орлов и др. ; под ред. Б. Я. Дудника. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.

Надійшла 24.11.2008

Калекіна Т. Г., Коваленко Т. М.

ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЗВ'ЯЗНОСТІ ПРИ АНАЛІЗІ НАДІЙНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

В роботі запропоновано комплексні показники надійності телекомуникаційних систем і мереж, які враховують одночасно як структурні, так і функціональні характеристики мережі. Запропоновані показники дозволяють оцінити не лише потенційну надійність телекомуникаційної мережі – верхню межу структурної надійності, але й надійність мережі з урахуванням обмеженої пропускної здатності каналів.

Ключові слова: надійність, структурна зв'язність, інформаційна зв'язність, інтегральний показник, граф, телекомуникаційна мережа.

Kalekina T. G., Kovalenko T. N.

JUSTIFICATION OF STRUCTURAL-INFORMATIONAL CONNECTIVITY INDICATOR WHEN ANALYZING RELIABILITY OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS

In this work the integrated reliability indicators for telecommunication systems and networks are proposed, that consider both structural and functional network characteristics. The indicators make it possible to evaluate not only potential reliability of a telecommunication network which is the upper bound of structural reliability but also network reliability subject to limited channel throughput.

Key words: reliability, structural connectivity, informational connectivity, integrated indicator, graph, telecommunication network.

частиною його життєдіяльності. Організаційна структура ВНЗ життєздатна і динамічна. Тому система керування інформаційними потоками на всіх рівнях ієрархії отримання знань повинна забезпечувати

інформаційну підтримку навчання у цілому та сприяти росту його ефективності. Задачі, що пов'язані з побудовою алгоритмів проектування та розробки системи, потребують глибокого наукового аналізу та розгляду процесів одержання знань в умовах розподіленого середовища інформаційних ресурсів різного ступеня структурованості.

Проведені теоретичні дослідження [1–6] не мають зв'язку між собою на рівнях взаємодії процесів навчання (враховуючи його ієрархічність) з процесами одержання інформаційних матеріалів, розроблених викладачами, систематизованими та анотованими бібліотечними працівниками, структурованими та представленими програмістами [7]. Наукові підходи до вирішення цієї задачі тільки починають формуватися, тому потребують цілісного представлення та структурованого рішення, враховуючи вимоги систем відкритого навчання з орієнтацією на використання перспективних інформаційних технологій.

Виходячи з цього, актуальною стає розробка моделі науково обгрунтованої системи керування інформаційними потоками на всіх рівнях ієрархії освітніх, наукових, науково-практичних процесів ВНЗ, з подальшою її практичною реалізацією в системі, що ефективно функціонує в умовах відкритого інформаційно-освітнього простору, забезпечує генерацію нових знань і технологій та високу конкурентоспроможність випускників на ринку праці.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Будь-який навчальний процес з його рівнями ієрархії є складною системою для керування. Складність обумовлена залежністю від ряду факторів, характерних тільки для певного рівня навчання.

Як правило, вивчення кожної дисципліни включає широкий спектр робіт, що складаються з лекцій, семінарів, контрольних, самостійних, тестових, лабораторних і практичних робіт. А отримання кваліфікації за спеціальністю – множину цих робіт, та ще й розробку курсових і дипломних проектів, проведення наукових і науково-практичних досліджень. Кожна з цих робіт потребує самостійної роботи з інформаційними джерелами та складається з пошуку, одержання і переробки інформації за усіма видами навчання. Тому більш детально розглянемо задачі формування і використання електронної інформації; структури інформаційного забезпечення навчального процесу та взаємозв'язок рівнів навчання із системою інформаційного забезпечення [8]. Побудуємо модель розподіленої системи керування інформаційними потоками на всіх рівнях ієрархії отримання знань, на прикладі ЗНТУ, до складу якого входить

6 інститутів, 15 факультетів, 60 кафедр, 48 спеціальностей, на яких вивчається 1232 дисципліни.

Складна система навчання представляється у вигляді багаторівневої конструкції взаємодіючих між собою та із зовнішнім середовищем елементів. При аналізі цих систем часто зустрічається ієрархічна структура, яка дозволяє зменшити кількість інформації, що передається з рівня на рівень та спрощує процес створення математичної моделі. Основним завданням варто вважати вирішення задач, що дозволять на основі вивчення особливостей функціонування, одержання характеристик окремих елементів і аналізу взаємодії між елементами визначити характеристики системи в цілому.

Побудуємо ієрархічну модель навчального процесу для одного з шести інститутів. Та візьмемо її за аналог побудови моделі отримання знань на рівні зв'язків між навчальним процесом та його інформаційним забезпеченням. Розглянемо злиття ієрархічної багаторівневої структури навчального процесу ВНЗ з багаторівневою структурою його інформаційної підтримки в єдину інформаційну систему підтримки навчального процесу з сучасними пошуковими можливостями.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Процес отримання освіти пов'язаний з необхідністю щодня одержувати та переробляти інформацію різної складності.

Професійний рівень того, хто навчається, врешті-решт залежить від повноти та обсягу засвоєних знань і, згодом, від практичної їх реалізації. Тому процес навчання, в першу чергу, пов'язаний з пошуком і збором необхідної для отримання знань інформації. В цьому відношенні істотну допомогу тому, хто навчається, повинні надавати сучасні інформаційні системи. Побудова якісної та перспективної моделі такої інформаційної системи залежить від наукового підходу до вирішення ряду питань з розгляду та створення зв'язків між загальними структурними елементами цієї системи.

При докладному аналізі спостерігаємо як однозначні (на рівні інститутів, факультетів, кафедр), так і багатозначні (на рівні спеціальностей та дисциплін) ієрархічні зв'язки.

Розглянемо більш детально зв'язок спеціальність – дисципліна – види контролю знань – інформаційні матеріали.

Для прикладу, тільки спеціальність інженер з комп'ютерних систем та мереж потребує вивчення 69 дисциплін математичного, фізичного та інженерно-технічного напрямків, а також економічного

і гуманітарного. Кількість видів контролю знань складає 79 загальних (курсіві проекти, заліки, іспити, практика, дипломний проект) та більш ніж 250 інших (лабораторні, практичні, контрольні та самостійні роботи, захист модулів, семінари та ін.). За універсальною десятковою та бібліотечно-бібліографічними класифікаціями інформаційні матеріали за цими дисциплінами відносяться до 21 загального розділу, більш ніж 30 їх модифікацій в межах 2-го рівня та безлічі модифікацій на 3-му і 4-му рівнях класифікаційної ієрархії.

Проведення попереднього наукового аналізу ієрархічної структури ВНЗ з його окремими елементами стало передумовою побудови зв'язків інститут → факультет → кафедра → спеціальність ↔ дисципліна ↔ вид контролю ↔ інформаційний ресурс ↔ атрибути інформаційного ресурсу. Науковий аналіз цих зв'язків є невід'ємною частиною та одним з важливих чинників підвищення ефективності побудови, а потім і функціонування розробленої інформаційної системи. Розроблення та застосування базових універсальних механізмів надало можливість створення уніфікованої програмної платформи та змоги застосувати її до будь-якої подібної системи керування інформаційними потоками в процесі навчання.

Ієрархічна послідовність обробки і візуалізації наборів даних починається з вводу даних довільного інформаційного джерела. Після вводу може використовуватися довільне число обробників будь-якого ступеня глибини і вкладеності. Кожній операції обробки відповідає окремий вузол дерева, або об'єкт сценарію. Будь-який об'єкт можна візуалізувати тим або іншим доступним способом. Набір даних служить механізмом, що сполучає всі об'єкти сценарію. Це дозволяє швидко створювати моделі, що мають велику гнучкість і розширюваність, порівнювати декілька моделей [9, 10].

На сьогодні найбільше розповсюдження отримали самонавчальні методи і машинне навчання, що і складає сутність відкритого навчання. Тому застосуємо розглянуті питання для вирішення задачі побудови моделі отримання знань для одного з шести інститутів ЗНТУ, як одного з сегментів даної моделі. За основу візьмемо інститут інформатики та радіоелектроніки, який налічує 2 факультети та 8 кафедр і випускає спеціалістів та магістрів за 12 спеціальностями, з загальною кількістю дисциплін, що вивчаються 262, та побудуємо для цієї навчальної структури модель отримання знань в процесі навчання (рис. 1), де K_1 – K_8 – кафедри інституту інформатики та радіоелектроніки та D_1 – D_n – дис-

ципліни, що викладаються студентам наведених спеціальностей (7.0..., 8.0..., 8.1...).

Візьмемо цю модель за основу ієрархічної моделі навчального процесу та розглянемо можливі різновиди форм пошукових запитів для використання їх в пошуковому алгоритмі інформаційної системи, що розробляється.

За своєю суттю пошукові запити з інформаційних баз даних можна розділити на:

- швидкі форми. До них можна віднести запити за одним критерієм інформаційного пошуку. Наприклад, запити за ключовими словами, автором чи назвою, словом з анотації чи повного тексту, темою, редактором, серією, датою, мовою, видом документу;
- розширені. Запити за багатьма критеріями з можливістю обмеження області пошуку або з обмеженим переліком критеріїв. Він може надавати можливість задати фільтри, шаблони пошуку та обмежити області пошуку;
- складні. Це пошукові запити за багатьма критеріями, які пов'язані логічними зв'язками, наприклад: «ТАК», «НІ» чи «АБО»;
- комбіновані. До них відносимо запити за кількома критеріями інформаційного пошуку, які користувач вибирає зі списку тематичних класифікаторів.

Найбільш вживаним є метод пошукового запиту за ключовими словами, він може використовуватись з іншими критеріями пошуку. Крім того, в інформаційній системі до критеріїв пошуку можуть бути додані пошукові запити за дисципліною та кафедрою ВНЗ [11].

У кожному випадку одержання інформації в процесі отримання знань, тим, хто навчається, крім основних, можуть бути реалізовані різноманітні варіанти пошукових запитів. У всіх режимах пошуку застосовується екранна форма, в якій при формуванні введення даних запиту використовуються спеціальні форми.

Визначимо схеми і приклади формування пошукових запитів за принципом послідовного ускладнення умов пошуку у системі.

Формування швидкого запиту без використання довідників виконується тим, хто навчається, за такою схемою:

- ввійти в режим пошуку;
- у формі пошукового запиту ввести значення будь-якого параметру, що відповідає критерію інформаційного пошуку за темою, що вивчається;
- ввести виконавчу команду і чекати результати пошуку.

З використанням довідників, простий пошук відрізняється тим, що після входу в режим необхідно

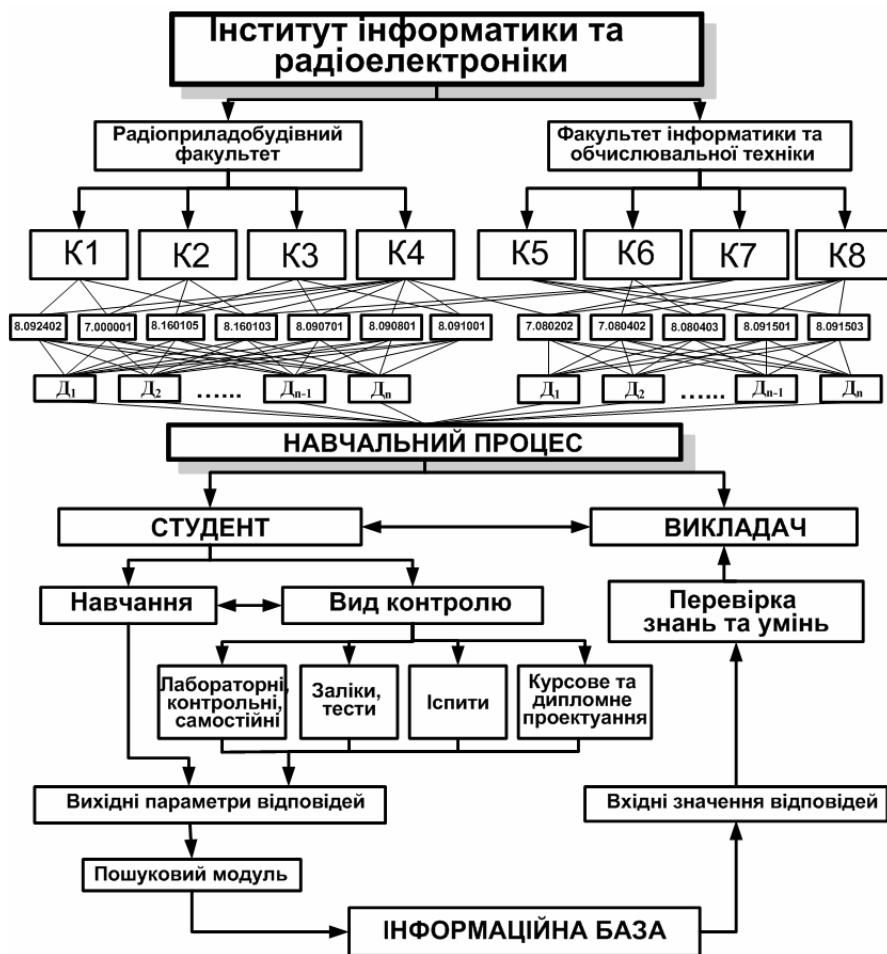


Рис. 1. Ієрархічна модель отримання знань в процесі навчання

відкрити потрібний довідник, знайти в ньому необхідне значення пошукового параметру та задати пошук. Він також має такі особливості:

- параметри, взяті з довідника, не можуть поєднуватися з іншими параметрами;

- при використанні довідника в пошуковому запиті значення параметра однозначно дорівнює саме тому, що зберігається в обраному рядку довідника, без можливості змінювати умови запиту.

Формування складного запиту виконується за такою загальною схемою:

- визначаємо структуру запиту, обмежуючись загальним числом параметрів (бажано до 5 параметрів) та визначаємо логічні умови;

- входимо до режиму пошуку;

- послідовно заповнюємо форму введення даних, з визначенням логіки пошуку;

- вводимо виконавчу команду і чекаємо результату пошуку.

Необхідно пам'ятати, що при використанні логічної змінної «ТАК» спочатку задається «головна

умова» (наприклад, «Автор»), а потім – додаткова, уточнююча (наприклад, «рік видання»). А при використанні логічної змінної «АБО», як правило, задається вибір з рівноцінних критеріїв [12].

Використовуючи фільтри, можна ввести в пошуковий запит такі додаткові умови і/чи обмеження, видати тільки видання:

- конкретного виду (навчальний посібник, методичне видання, наукова стаття, конспект лекцій, автореферат дисертації);

- з певної дисципліни;

- ті, що вийшли у визначений період або нові надходження;

- одного з наукових напрямків;

- українською мовою.

Відмінність процедури пошуку статей з періодичних видань полягає у наданні тому, хто навчається, можливості вибору джерела інформаційного пошуку, що забезпечує більш конкретизований вид запиту, з отриманням меншої кількості інформації.

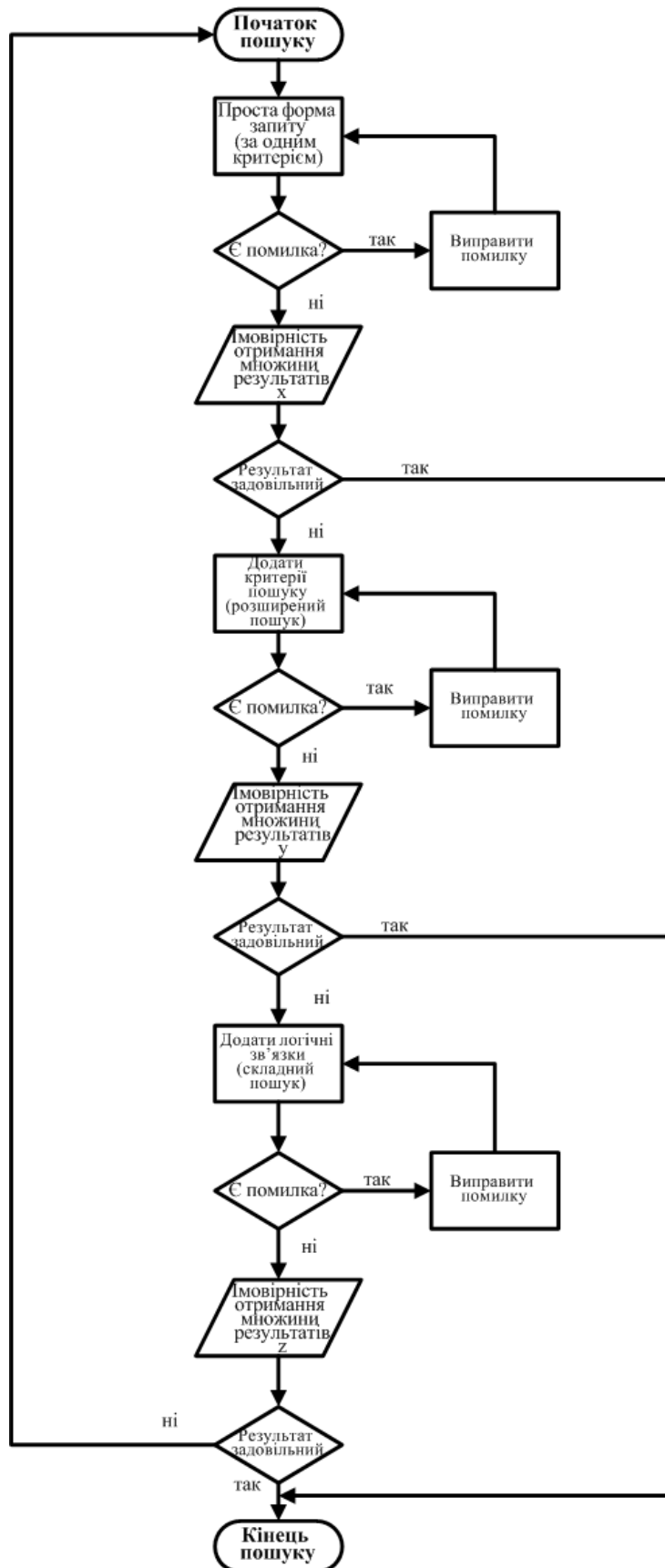


Рис. 2. Схема алгоритму пошуку та отримання інформації

Типовий набір відомостей про статтю містить: відомості про автора, основну назву, найменування джерела, до складу якого входить стаття, рік видання та номер, обсяг статті, індекси ББК чи УДК, міжнародний стандартний номер ISSN джерела.

При отриманні повнотекстових матеріалів з сервера їхній перегляд здійснюється засобами браузера клієнта. Той, хто навчається, при одержанні списку видань за своїм запитом, здійснивши перехід за необхідним посиланням, повинен отримати повну анотовану бібліографічну інформацію про видання та доступ до посторінкового перегляду повнотекстового навчального ресурсу.

Алгоритм пошуку, як моделі керування інформаційним попитом, побудовано у вигляді схеми алгоритму пошуку та отримання інформації, яка наведена на рис. 2.

Проведемо дослідження пошукової моделі одержання інформації та побудуємо узагальнену модель керування інформаційними потоками у навчальному процесі. Визначимо такі стани, у яких може перебувати процес одержання інформації:

S_{1-0} – вихідний стан пошуку;

S_{1-1} – задання форми пошуку за одним критерієм;

S_{1-2} – позитивний результат перевірки правильності введеного критерію;

S_{1-3} – одержання безлічі результатів пошуку за одним критерієм (x);

S_{1-4} – негативний результат пошуку за одним критерієм;

S_{2-1} – задання форми пошуку за розширеним критерієм;

S_{2-2} – позитивний результат перевірки правильності введеного критерію;

S_{2-3} – одержання безлічі результатів пошуку за розширеним критерієм (y);

S_{2-4} – негативний результат пошуку за розширеним критерієм;

S_{3-1} – задання форми пошуку за складним критерієм;

S_{3-2} – позитивний результат перевірки правильності введеного критерію;

S_{3-3} – одержання безлічі результатів пошуку за складним критерієм (z);

S_{3-4} – негативний результат пошуку;

S_+ – позитивний результат пошуку.

Розглянемо можливі переходи між станами в процесі пошуку за одним критерієм, кожний з яких відображає:

$S_{1-0} \rightarrow S_{1-1}$ – роботу із задання форми пошуку за одним критерієм, імовірність переходу дорівнює 1;

$S_{1-1} \rightarrow S_{1-2}$ – позитивний результат пошуку після правильного задання критерію, імовірність переходу визначається складністю задання форми пошуку і дорівнює p_{1z} ;

$S_{1-1} \rightarrow S_{1-0}$ – помилкове задання пошуку за одним критерієм, при цьому операція по формуванню запиту повторюється, імовірність переходу дорівнює $1 - p_{1z}$;

$S_{1-2} \rightarrow S_{1-3}$ – одержання результатів пошуку після правильного задання критерію, імовірність переходу дорівнює 1;

$S_{1-3} \rightarrow S_+$ – позитивний результат аналізу отриманої інформації, залежить від обсягу аналізованої інформації та дорівнює p_{1A} ;

$S_{1-3} \rightarrow S_{1-4}$ – негативний результат аналізу отриманої інформації, імовірність переходу дорівнює $1 - p_{1A}$.

Аналогічні переходи маємо для розширеного й складного критеріїв пошуку, для яких вихідним станом є негативний результат попереднього пошуку.

Описаний процес для переходів між станами в процесі пошуку за одним критерієм можна представити у вигляді матриці переходів:

$$P = \begin{matrix} & S_{1-0} & S_{1-1} & S_{1-2} & S_{1-3} & S_{1-4} & S_+ \\ \begin{matrix} S_{1-0} \\ S_{1-1} \\ S_{1-2} \\ S_{1-3} \\ S_{1-4} \\ S_+ \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - p_{1z} & 0 & p_{1z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1A} & 1 - p_{1A} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Процес одержання інформації описується першими трьома станами. Для нього матриця переходів має вигляд:

$$P_{1z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 - p_{1z} & 0 & p_{1z} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Останній стан є поглинаючим. Матриці переходів до входу в поглинаючий стан Q_{1z} і переходів у поглинаючий стан R_{1z} мають відповідно вигляд:

$$Q_{1z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 - p_{1z} & 0 \end{bmatrix}; \quad R_{1z} = \begin{bmatrix} 0 \\ p_{1z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Фундаментальна матриця $N = (E - Q)^{-1}$ дозволяє оцінити кількість моментів часу, проведених процесом у тому або іншому стані:

$$N_{1z} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -(1-p_{1z}) & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p_{1z}} & \frac{1}{p_{1z}} \\ \frac{1-p_{1z}}{p_{1z}} & \frac{1}{p_{1z}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Елемент $n_{i,j}$ матриці N_{1z} дає очікувану кількість моментів часу, що проводить процес у стані j до входу в поглинаючий стан за умови, що він почався в стані i . У даному випадку кількість інтервалів часу, проведених у станах S_{1-0} і S_{1-1} , однакова й дорівнює $\frac{1}{p_{1z}}$.

Матриця $B_{1z} = N_{1z} * R_{1z}$ дозволяє оцінити ймовірність влучення у відповідний поглинаючий стан:

$$B_{1z} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p_{1z}} & \frac{1}{p_{1z}} \\ \frac{1-p_{1z}}{p_{1z}} & \frac{1}{p_{1z}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ p_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

тобто результат пошуку буде завжди.

Ймовірність якісної обробки p_{1A} результатів пошуку залежить від обсягу отриманої інформації. Якщо вважати, що ймовірність якісної обробки нескінченно малого обсягу інформації пропорційна величині обсягу, то це приведе до експоненціального закону, відповідно до якого ймовірність якісної обробки інформації буде дорівнювати

$$p_{1z} = e^{-\lambda v_{1z}}; p_{1A} = e^{-\lambda v_{1A}}, \quad (6)$$

де λ – коефіцієнт пропорційності; v_{1z} і v_{1A} – обсяг роботи на підготовку запиту та обсяг роботи при обробці інформації, одержаної у результаті запиту.

Загальні витрати на підготовку запиту з урахуванням усунення помилок будуть дорівнювати:

$$V_{1z} = v_{1z} \frac{1}{p_{1z}}. \quad (7)$$

Обсяг витрат на підготовку й обробку запиту за одним критерієм V_1 дорівнює:

$$V_1 = V_{1z} + v_{1A} = v_{1z} \frac{1}{p_{1z}} + v_{1A}. \quad (8)$$

Аналогічно можна одержати обсяги витрат на підготовку та обробку запиту за розширеним V_2 і склад-

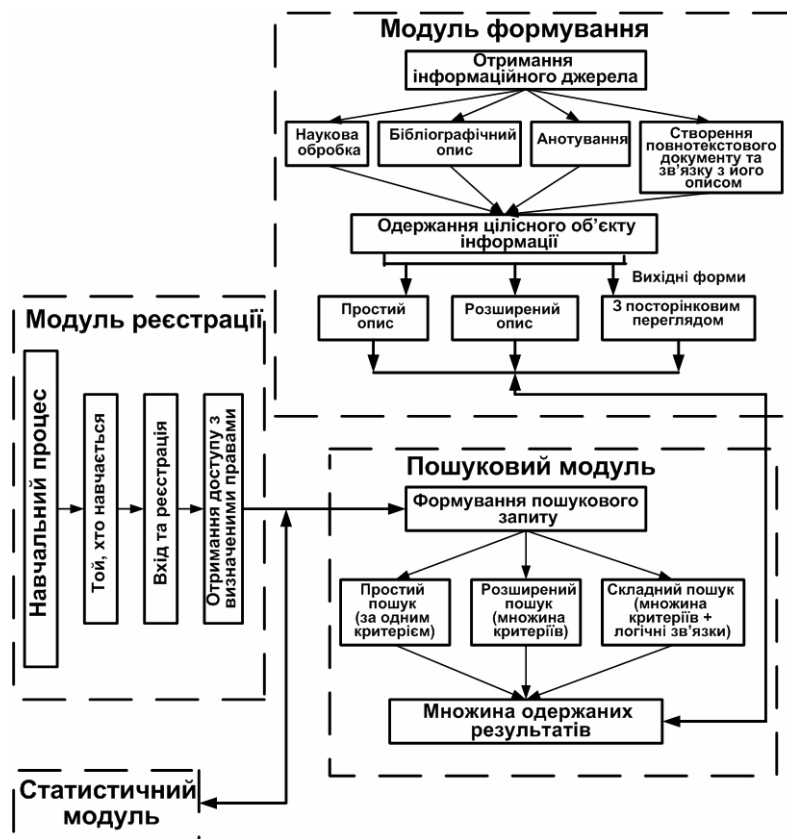


Рис. 3. Узагальнена модель керування інформаційними потоками

ним V_3 критеріями пошуку. Вони, відповідно, дорівнюють:

$$V_2 = V_{2z} + v_{2A} = v_{2z} \frac{1}{p_{2z}} + v_{2A}, \quad (9)$$

$$V_3 = V_{3z} + v_{3A} = v_{3z} \frac{1}{p_{3z}} + v_{3A}, \quad (10)$$

де p_{2z} і p_{3z} – імовірності якісної обробки результатів пошуку за розширеним і складним критеріями.

Імовірність одержання позитивного результату пошуку визначається ймовірністю того, що пошук успішно завершений за першим критерієм, або у випадку відсутності позитивного результату, пошук успішно завершений за розширеним критерієм, або у випадку відсутності позитивного результату пошуку за першими двома критеріями він буде успішно завершений за складним критерієм:

$$P_+ = p_{1A} + (1 - p_{1A})p_{2A} + (1 - p_{1A})(1 - p_{2A})p_{3A}, \quad (11)$$

де p_{2A} і p_{3A} – імовірність одержання позитивного результату пошуку за розширеним і складним критеріями.

Імовірність негативного результату P_- як протилежної події при цьому дорівнює:

$$P_- = 1 - P_+. \quad (12)$$

Ці висновки можна в подальшому використати для кількісної оцінки ефективності функціонування даної системи в цілому.

Використання повнотекстової навчально-методичної бази даних, що включає науково оброблений та систематизований інформаційний матеріал (модуль формування), у зв'язку з сучасним пошуковим модулем є головними частинами інформаційної системи, що розробляється. Додавши до них модуль реєстрації в системі, забезпечивши отримання статистики доступу та отримання інформації, можна реалізувати схему організації й експлуатації навчальної інформаційної системи. Виходячи з вищезазначеного, отримано узагальнену модель керування інформаційними потоками (рис. 3) у вигляді моделі інформаційної системи.

Система має властивість розширюватись, тому її можна в подальшому розглядати як основу інформаційної міжвузівської системи підтримки інформатизації навчального процесу.

ВИСНОВКИ

Розглянуто задачі формування і використання електронної інформації, структури інформаційного забезпечення навчального процесу та взаємозв'язок

рівнів навчання із системою інформаційного забезпечення. Складну систему навчання представлено у вигляді багаторівневої конструкції взаємодіючих між собою та із зовнішнім середовищем елементів. Ієрархічність її структури дозволила зменшити кількість інформації, що передається з рівня на рівень, і спростило процес створення математичної моделі.

Визначено можливі стани, у яких може перебувати процес одержання інформації та можливі переходи між станами в процесі пошуку за одним критерієм, множиною критеріїв і множиною критеріїв з використанням логічних зв'язків.

Проведено дослідження пошукової моделі одержання інформації. Одержано формули розрахунку обсягів витрат на підготовку та обробку запитів та імовірності позитивного та негативного результатів пошуку за всіма критеріями, які в подальшому можна використати для кількісної оцінки ефективності функціонування даної системи в цілому.

Побудовано узагальнену модель керування інформаційними потоками у навчальному процесі, яка практично реалізована в інформаційній системі «Електронна бібліотека ЗНТУ» (№ ДР0107U007672 Державна програма «Інформаційні та комунікаційні технології в освіті і науці» на 2006–2010 роки) [7], з перспективою її інтеграції в інформаційну міжвузівську систему підтримки інформатизації навчального процесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Армс В. Электронные библиотеки : пер. с англ. / В. Армс. – М. : ПИК ВИНТИ, 2001. – 276 с.
2. Антопольский А. Б. Формирование Национальной электронной библиотеки и проблемы выбора базовых принципов организации фонда электронных документов / А. Б. Антопольский, Т. В. Майстрович, А. В. Чугунов // Национальная электронная библиотека: проекты методических материалов по формированию фонда / СПб. : Росийская государственная библиотека, 2004. – С. 3–13.
3. Конноли Т. Бази даних. Проектування, реалізація й супровід. Теорія й практика / Т. Конноли, К. Бегт, А. Стрчан – К. : Діалектика, 2003. – 1440 с.
4. Биков В. Ю. Моделі організаційних систем відкритої освіти = Models of the Education Organizational Systems : [монографія] / В. Ю. Биков. – Київ : Атіка, 2009. – 682 с.
5. Земсков А. И. Электронные библиотеки : учеб. для вузов / А. И. Земсков, Я. Л. Шрайберг. – М. : Либерея, 2003. – 352 с.
6. Резніченко В. А. Електронні бібліотеки: інформаційні ресурси та сервіси / В. А. Резніченко, О. В. Захарова, Е. Г. Захарова // Проблеми програмування. – 2005. – № 4. – С. 60–71.
7. Електронна бібліотека ЗНТУ : звіт про НДР (заключний) / Запорізький національний технічний університет (ЗНТУ) ; кер. С. Т. Яримбаш; відп. викон. Г. Г. Киричек ; викон. Л. І. Козиряцька [та ін.]. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 107 с. – ДР № 0107U007672.
8. Вершина А. И. Моделирование информационного обеспечения учебного процесса университета / Вер-

- шина А. И., Киричек Г. Г. // Тижень науки. Тези доповідей науково-технічної конференції 25–28 квітня 2005 року / Під редакцією Внукова Ю. М. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2005. – С. 188.
9. *Лена Є. В.* Системи підтримки прийняття рішень : навчальний посібник. В 2 ч. Ч. 1 / Є. В. Лена, Є. К. Міхеєв, В. В. Крніцін. – Херсон, 2006. – 324 с.
 10. *Лена Є. В.* Системи підтримки прийняття рішень : навчальний посібник. В 2 ч. Ч. 2 / Є. В. Лена, Є. К. Міхеєв, В. В. Крніцін. – Херсон, 2006. – 248 с.
 11. *Резніченко В. А.* Електронні бібліотеки: інформаційні ресурси та сервіси / В. А. Резніченко, О. В. Захарова, Е. Г. Захарова // Проблеми програмування. – 2005. – № 4. – С. 60–71.
 12. *Копейкин М. В.* Базы данных. Инфологические модели баз данных : учеб. пособие / Копейкин М. В., Спиридонов В. В., Шумова Е. О. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 187 с.

Надійшла 28.08.2009
Після доробки 17.09.2009

Киричек Г. Г.

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ НА ВСЕХ УРОВНЯХ ИЕРАРХИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗНАНИЙ

Система обучения представлена в виде многоуровневой конструкции взаимодействующих между собой и с внеш-

ней средой элементов. Разработана модель распределенной системы управления информационными потоками на всех уровнях иерархии получения знаний с её дальнейшей реализацией в информационной системе.

Ключевые слова: управление информацией, модель получения знаний, поисковая модель, учебный процесс, информационная система, информационные ресурсы, вероятность получения информации.

Kirichek G. G.

MANAGEMENT OF INFORMATION STREAMS AT ALL HIERARCHY LEVELS OF TRAINING

The training system is presented in the form of a multilevel construction of units interacting with other units and with the environment. The model of distributed system is developed for information streams control at all hierarchy levels of training and its further implementation in the information network.

Key words: information management, model of training, search model, educational process, information system, information resources, probability of information acquisition.

УДК 681.269(088.8)

Кошевой Н. Д.¹, Калашников Е. Е.², Костенко Е. М.³, Черепашук Г. А.⁴

¹Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

²Ассистент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

³Канд. техн. наук, проректор Полтавской государственной аграрной академии

⁴Канд. техн. наук, доцент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье с использованием оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента получены математические модели весоизмерительной системы. Определены оптимальные режимы ее работы.

Ключевые слова: планирование эксперимента, стоимостные затраты, математическая модель, весоизмерительная система, оптимальные режимы.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема дозирования сыпучих материалов возникает в целом ряде технологических производств, связанных с переработкой сыпучих материалов, таких, как грунт, песок, шихта и т. д. На большинстве заводов проблему дозирования сыпучих материалов решают путем частичной модернизации морально и физически устаревших дозаторов. Такое решение не всегда позволяет добиться требуемой точности дозирования, от которой зависит качество приготавливаемых смесей, а значит, и качество выпускаемой предприятием продукции.

© Кошевой Н. Д., Калашников Е. Е., Костенко Е. М., Черепашук Г. А., 2010

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Детальное изучение современных требований технологических процессов и существующих дозирующих систем показало необходимость разработки весодозирующей системы, которая отвечала бы современным требованиям по точности, надежности и учитывала специфику отечественных предприятий металлургической промышленности. На данный момент авторами разработан и исследован опытный образец весоизмерительной системы для непрерывного дозирования сыпучих материалов [1, 2].

Разработанная весоизмерительная система построена на современной элементной базе, которая позволяет системе функционировать с высокой надежностью. Использование в весоизмерительной системе измерительного лотка позволило исключить недостатки, присущие системам, которые построены на базе конвейерных весов. Оригинальное крепление тензометрических преобразователей дает возможность повысить точность дозирования по сравнению с другими весоизмерительными системами, использующими измерительный лоток.

Возникает задача получения математических моделей такой системы и ее оптимизации по критерию точности дозирования сыпучих материалов.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

С использованием оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента получить математические модели весоизмерительной системы, описывающие зависимость погрешности взвешивания δ и чувствительности системы от угла наклона α весоизмерительного лотка, влажности W сыпучего материала и коэффициента трения сыпучего материала f_d в движении. Определить режимы работы системы, обеспечивающие минимальную погрешность взвешивания сыпучего материала.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Исследования проводились на опытном образце весоизмерительной системы с измерительным лотком оригинальной конструкции [3].

В качестве критериев оптимизации были выбраны следующие технические показатели весоизмерительной системы: погрешность измерения δ , %; чувствительность (коэффициент передачи) S . Факторами, которые влияют на эти показатели, были выбраны: X_1 – угол наклона весоизмерительного лотка, α , градусы; X_2 – влажность сыпучего материала, W , %; X_3 – коэффициент трения сыпучего материала в движении, f_d . Интервалы варьирования и основные уровни факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования	Размерность
	-1	0	+1		
$X_1(\alpha)$	30	37,5	45	7,5	Градусы
$X_2(W)$	5	15	25	10	%
$X_3(f_d)$	0,48	0,58	0,68	0,10	–

Для выявления закономерностей дозирования и нахождения оптимальных режимов и конструктивных параметров весоизмерительной системы был выбран исходный план полного факторного эксперимента ПФЭ типа 2^k (число факторов $k=3$, число опытов $N=8$, число наблюдений в n -м опыте равно 5). Матрица планирования такого эксперимента приведена в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Учитывая то, что опыты являются дорогостоящими, принято решение оптимизировать исходный план по критерию стоимостных затрат на его реализацию.

Стоимости изменений значений уровней факторов из «-1» в «+1» и из «+1» в «-1» приведены в табл. 3, а стоимости начальной установки уровней факторов – в табл. 4.

Таблица 3. Стоимости изменений значений уровней факторов

Обозначение факторов	Стоимости	
	из «-1» в «+1», грн.	из «+1» в «-1», грн.
$X_1(\alpha)$	12,0	8,0
$X_2(W)$	16,0	24,0
$X_3(f_d)$	10,0	10,0

Таблица 4. Стоимости начальной установки уровней факторов

Обозначение факторов	Стоимости	
	из «0» в «+1», грн.	из «0» в «-1», грн.
$X_1(\alpha)$	6,0	4,0
$X_2(W)$	8,0	12,0
$X_3(f_d)$	10,0	10,0

С помощью пакета прикладных программ синтезирован оптимальный по стоимости проведения план

експеримента, полученный в результате реализации перестановок (проанализировано 40320 вариантов). Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 5.

Таблица 5. Оптимальный план эксперимента

Номер опыта	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
5	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
4	+1	+1	-1
3	-1	+1	-1

Стоимости реализации экспериментов по оптимальному, исходному планам и плану с максимальной стоимостью реализации приведены в табл. 6.

Таблица 6. Стоимости реализации планов эксперимента

Стоимости реализации планов эксперимента	Метод поиска
	Анализ перестановок
Стоимость исходного плана, грн.	164
Стоимость оптимального плана, грн.	102
Максимальная стоимость реализации плана, грн.	278

Опыты проводились на сыпучих компонентах различной влажности. Погрешность измерения весоизмерительной системы определялась по формуле

$$\delta = \frac{M_{\text{изм}} - M_{\text{ист}}}{M_{\text{ист}}} \cdot 100 \%,$$

где $M_{\text{ист}}$ – масса сыпучего материала, которая измерялась на весах для статического взвешивания и равна 30 кг; $M_{\text{изм}}$ – масса просыпанного материала, измеренная на макетной модели весоизмерительной системы.

Результаты экспериментальных исследований объекта по оптимальному плану эксперимента приведены в табл. 7.

При обработке результатов с использованием пакета прикладных программ по автоматизации планирования эксперимента [4] получены статические модели, которые описывают зависимость показателей качества Y (δ и S) от кодированных значений факторов X_1, X_2, X_3 :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3,$$

где Y – показатель качества (δ, S); $b_0, b_1, b_{ij}, b_{ijk}$ – коэффициенты неполной квадратичной модели; X_1, X_2, X_3 – факторы, влияющие на показатель качества.

Таблица 7. Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	$M_{\text{изм}}$, кг	δ , %	S
1	-1	-1	-1	29,35	2,17	1,02
2	+1	-1	-1	29,08	3,06	1,03
3	+1	-1	+1	29,91	0,31	1,00
4	-1	-1	+1	29,44	1,87	1,02
5	-1	+1	+1	30,63	2,11	0,98
6	+1	+1	+1	30,16	0,53	0,99
7	+1	+1	-1	30,75	2,50	0,98
8	-1	+1	-1	30,80	2,67	0,97

Значения коэффициентов математических моделей приведены в табл. 8.

Таблица 8. Значения коэффициентов математических моделей

Обозначения коэффициентов	Показатели качества	
	δ	S
b_0	1,903	0,9980
b_1	-0,301	0,0013
b_2	0,050	-0,0189
b_3	-0,699	0,0013
b_{12}	-0,676	-0,3660
b_{13}	-1,026	-0,2586
b_{23}	0,064	0,0063
b_{123}	0,128	0,0038

По величинам коэффициентов математических моделей можно сделать следующие выводы о степени влияния факторов на выходные показатели δ и S :

– среди влияющих факторов α , W и f_d наибольшее влияние на точность измерения имеет коэффициент трения f_d движения, далее по степени влияния следует угол наклона α весоизмерительного лотка, а влажность W сыпучего материала оказывает наименьшее влияние;

– коэффициент трения f_d движения и угол наклона α весоизмерительного лотка оказывают при совместном воздействии наибольшее влияние на погрешность измерения веса сыпучего материала;

– влажность W сыпучего материала оказывает значительное влияние на чувствительность весоизмерительной системы, тогда как угол наклона α весоизмерительного лотка и коэффициент трения f_d движения оказывают гораздо меньшее влияние;

– влажность W сыпучего материала и угол наклона α весоизмерительного лотка оказывают при совместном воздействии наибольшее влияние на чувствительность весоизмерительной системы.

По результатам анализа экспериментальных данных, представленных в табл. 7, можно сделать вывод, что весоизмерительная система обладает рациональными техническими характеристиками при параметрах, указанных в строке 3 матрицы планирования, а именно: угол наклона весоизмерительного лотка $\alpha = 45^\circ$; влажность сыпучего материала $W = 5\%$; коэффициент трения сыпучего материала в движении $f_d = 0,68$. При этих параметрах у весоизмерительной системы будет минимальная погрешность измерения ($\delta = 0,31\%$) и максимальная чувствительность ($S = 1,00$).

Для дальнейшей оптимизации весоизмерительной системы по критерию точности использовался метод крутого спуска. При этом математическая модель для критерия оптимизации δ в натуральных значениях факторов имеет следующий вид:

$$\delta = -22,37 + 0,793\alpha - 5,19W + 44,14f_d - 1,368\alpha f_d - 2,39\alpha W f_d - 102,42W f_d - 0,14\alpha W.$$

Результаты оптимизации по методу крутого спуска приведены в табл. 9.

Таблица 9. Результаты оптимизации по методу крутого спуска

Последовательность этапов крутого спуска	Факторы			Параметр оптимизации
	X_1	X_2	X_3	δ
Коэффициенты уравнения b_i	-0,301	0,050	-0,699	
Произведение $b_i \Delta X_i$	-2,258	0,5	-0,069	
Округленный шаг	-2,26	0,5	-0,07	
Шаг, уменьшенный в 2 раза	-1,13	0,25	-0,03	
Натуральные значения факторов	α	W	f_d	
Опыты				
1	37,5	15	0,58	1,903
2	38,6	14,75	0,61	1,60
3	39,7	14,5	0,64	1,21
4	40,8	14,25	0,67	0,73
5	41,9	14	0,70	0,20

Таким образом, в результате оптимизации получены следующие рациональные значения конструктивных параметров весоизмерительной системы и сыпучего материала: угол наклона весоизмерительного лотка $\alpha = 41,9^\circ$; коэффициент трения движения $f_d = 0,70$; влажность сыпучего материала $W = 14\%$. При этом погрешность взвешивания сыпучего материала составляет 0,20 %.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования с использованием оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента получены математические модели весоизмерительной системы для таких критериев качества, как точность и чувствительность системы. С использованием математической модели проведена оптимизация весоизмерительной системы по критерию точности, что позволило снизить погрешность взвешивания до 0,20 %. Перспективным направлением развития приведенных исследований является создание опытного образца весоизмерительной системы с оптимальными конструктивными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 27285 Україна, МПК G01F11/00. Ваговимірвальна система / Калашніков Є. Є., Кошовий М. Д., Черепашук Г. О. (Україна). – № U200706404; Заявл. 08.06.2007; Опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17. – 3 с.
2. Кошевой Н. Д. Весоизмерительная система для непрерывного дозирования сыпучих материалов / Н. Д. Кошевой, Е. Е. Калашников, Г. А. Черепашук // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2008. – Вып. 38. – С. 146–149.
3. Кошевой Н. Д. Оценка точности непрерывного дозирования сыпучих материалов / Н. Д. Кошевой, Г. А. Черепашук, Е. Е. Калашников // Радиотехника и компьютерные системы. – 2008. – № 1(28). – С. 143–147.
4. Кошевой Н. Д. Разработка программного обеспечения по автоматизации планирования эксперимента / Н. Д. Кошевой // Авиационно-космическая техника и технология : труды Харьк. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского за 1997 г. – Харьков : ХАИ, 1998. – С. 242–244.

Надійшла 6.07.2009

Кошовий М. Д., Калашников Є. Є., Костенко О. М., Черепашук Г. О.

МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ВАГОВИМІРВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті з використанням оптимального за вартісними витратами планування експерименту отримано математичні моделі ваговимірвальної системи. Визначено оптимальні режими її роботи.

Ключові слова: планування експерименту, вартісні витрати, математична модель, ваговимірвальна система, оптимальні режими.

Koshevoy N. D., Kalashnikov E. E., Kostenko E. M., Cherapaschuk G. A.

MODELING AND OPTIMIZATION OF WEIGHT-MEASURING SYSTEM FOR CONTINUOUS DOZING OF DRY MATERIALS

In this article the mathematical models of a weight measuring system have been developed with the use of optimum price expenses experiment planning. The optimum modes of its operation have been determined.

Key words: experiment planning, price expenses, mathematical model, weight measuring system, optimum modes.

УДК 004.03

Кудерметов Р. К.

Канд. техн. наук, заведующий кафедрой Запорожского национального технического университета

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Сформулирована задача оптимизации для системы, которая имеет иерархическую многоуровневую структуру и построена с использованием сервис-ориентированной архитектуры. Определены целевые функции каждого из уровней такой системы и показано, что эта система имеет межуровневую функцию качества. Рассмотрены свойства межуровневой функции качества при условии, что система обладает свойством монотонности.

Ключевые слова: сервис-ориентированная архитектура, иерархическая многоуровневая система, постулат сатисфакции, межуровневая функция качества.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «Сервис-ориентированная архитектура» (Service-oriented architecture, SOA) имеет много определений. Одни определения учитывают технические аспекты SOA, другие – информационно-сетевые, третьи подчеркивают преимущества для бизнеса. В данной статье наиболее подходящим будет одно из официальных бизнес-определений фирмы IBM: «SOA предлагает возможность гибкой работы с элементами бизнес-процессов и лежащей в их основе IT-инфраструктурой как безопасными, стандартизированными компонентами (службами), которые можно использовать многократно и комбинировать при изменении приоритетов бизнеса» [1].

Из этого определения следует, SOA – это компонентная модель, в которой компонентами являются сервисы, и эти сервисы взаимодействуют в компьютерной среде, в общем случае с использованием компьютерной сети. Ключевым понятием для SOA является *интероперабельность*, т. е. способность взаимодействовать. Интероперабельность достигается за счет использования стандартов, разработанных организациями W3C, OASIS и WS-I. Организация WS-I определила так называемый базовый профиль интероперабельности, который называется Web-Services Interoperability Basic Profile и включает в себя стандарты:

– XML и XML Schema 1.0 (XSD). Для определения моделей и моделей обмена данными между сервисами;

– SOAP 1.1 (Simple Object Access Protocol). Протокол, определяющий правила, по которым сервисы обмениваются сообщениями, записанными на языке XML;

– WSDL 1.1 (Web Services Description Language). Язык описания Web-сервисов, который включает описание реализуемых сервисом методов, адресную и др. информацию;

– UDDI 2.0. (Universal Description, Discovery and Integration). Определяет правила для отображения информации о сервисах в распределенном UDDI-реестре сервисов, размещенных в Интернете.

В определениях SOA особенно часто выделяют свойство слабой связанности сервисов друг с другом, что обусловлено, прежде всего, использованием вышеназванных стандартов. Поэтому для организации некоторого процесса с применением SOA могут привлекаться независимые поставщики сервисов – провайдеры. Еще одна характерная особенность архитектуры SOA – возможность генерации новых, комплексных, сложных сервисов из более простых сервисов. Процессы формирования таких сервисов и управление ими получили названия оркестровка и хореография сервисов (Web-services orchestration,

© Кудерметов Р. К., 2010

choreography) [2, 3]. Таким образом, сервисы могут синтезироваться, модифицироваться, быть распределенными во времени и пространстве и принадлежать разным организациям.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наряду с совершенствованием технологий создания и использования Web-сервисов, интеграции их в предприятия, кооперации и виртуальные организации, в настоящее время развиваются методы и технологии управления сервисами. Они охватывают вопросы управления жизненным циклом сервисов, создание новых сервисов из множества других сервисов, образование сложных сервисов *ad hoc* (на лету) для решения специфических задач, в том числе одноразовых, использование онтологий для определения номенклатуры сервисов и т. д. [3].

Вместе с тем, важным является исследование структурных свойств таких сервисов и использующих их организаций. Прежде всего, для реализации некоторого полезного процесса в организации нужно убедиться, что необходимые сервисы существуют. Также необходимо определить, насколько использование сервисов эффективно с точки зрения организации.

Как в любом предприятии, в организации, использующей сервисы, возможны конфликты между участниками организации, которые обусловлены в первую очередь несопадением их интересов (целей). В данном случае положение усугубляется ввиду основного положительного свойства SOA – слабой связанности. Действительно, если координатор, управляющий основным процессом в организации, преследует свои цели, то у провайдеров сервисов могут быть совсем иные цели.

Далее под системой будем понимать объединение процесса и организации, которая управляет процессом, совокупности провайдеров сервисов или просто сервисов. Структура такой системы показана на рис. 1.

Здесь показан некоторый процесс и сервисы, которые используются для обеспечения некоторого подпроцесса. Система представлена в виде иерархической структуры: сервисы первого уровня взаимодействуют с подпроцессом и, в свою очередь, могут использовать сервисы второго уровня.

Введем следующие обозначения для сервисов: уровни в иерархии сервисов будем обозначать с помощью верхнего индекса, первым нижним индексом будем обозначать номер сервиса в рамках уровня, т. е. тип сервиса на данном уровне, а вариант сервиса определенного типа – вторым нижним индексом. Та-

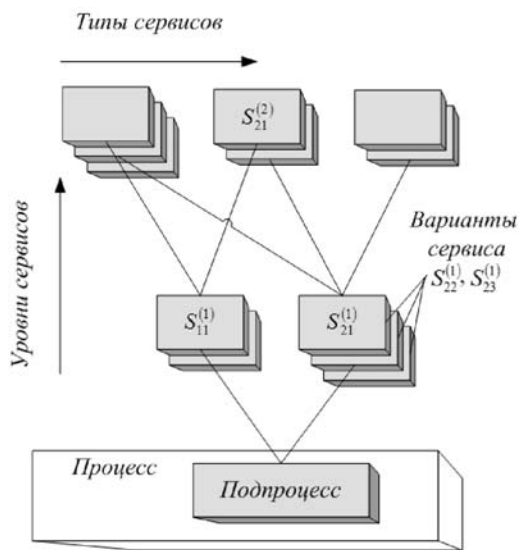


Рис. 1. Иерархическая организация системы с использованием SOA

ким образом, сервис будет обозначаться как $S_{jk}^{(i)}$, где $i = 1, \dots, I$ – уровень сервиса, $j = 1, \dots, J_i$ – тип сервиса i -го уровня и $k = 1, \dots, K_{j_i}$ – вариант сервиса j -го типа i -го уровня.

Координатор процесса для каждого из подпроцессов *должен* выбрать необходимые типы сервисов из множества $S^{(1)} = \{S_1^{(1)}, \dots, S_{J_1}^{(1)}\}$ с целью организации подпроцесса, а для каждого j -го типа сервиса *может* выбрать вариант из множества $S_j^{(1)} = \{S_{j1}^{(1)}, \dots, S_{jK_j}^{(1)}\}$ с целью достижения некоторой эффективности организации процесса.

Для провайдера j -го типа сервиса 1-го уровня *может* потребоваться p_j сервисов 2-го уровня. Тогда он *должен* использовать эти p_j сервисов из множества $S_j^{(2)} = \{S_{j1}^{(2)}, \dots, S_{j2}^{(2)}\}$, но из каждого j -го типа сервиса 2-го уровня *может* выбрать вариант сервиса из множества $S_{jk}^{(2)} = \{S_{jk1}^{(2)}, \dots, S_{jkK_j}^{(2)}\}$.

Если говорить о целях, которые преследуют все участники такой системы, то не исключено, что они могут конфликтовать. Предполагается, что координатор процесса непосредственно может выбирать варианты сервисов для минимизации целевой функции своей организации и даже влиять в какой-то мере на цели провайдеров сервисов первого уровня, но, в общем случае, влиять на цели провайдеров сервисов второго и более высоких уровней и на их качество не может. Можно предположить, что такое влияние возможно, но косвенное, например, с помощью экономических или политических методов. В любом случае процесс координации целей провайдеров

сервисов может быть гораздо медленнее, чем основной процесс организации.

В данной работе ставится задача исследовать структурные свойства определенной выше системы и взаимосвязи целевых функций ее участников.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для рассмотрения системы, которая включает участников с разнородными целями, необходимо определиться с тем, что является целью такой системы. Если рассматриваемая система образовалась благодаря наличию достаточного числа и/или удачному сочетанию экзогенных и эндогенных системообразующих факторов (а не целенаправленно создана), устойчива, функционирует и полезна, скажем для общества, значит она, возможно, имеет цель. Однако получение результата на выходе процесса и его эффективное достижение определяют целевую функцию не системы в целом, а локальную цель координатора или организации, осуществляющей процесс. Поэтому такую целевую функцию следует понимать как *локальную*.

Цели провайдеров сервисов также являются локальными, поскольку провайдер сервиса может и не знать целей координатора процесса и цели системы, если она есть. Более того, цели провайдеров сервисов могут быть даже противоположными целям координатора процесса, а также целям других провайдеров как на одном уровне иерархии, так и на разных уровнях. Таким образом, достижение минимумов локальными целевыми функциями провайдеров не обязательно обеспечивает минимум целевой функции координатора процесса. Исследуем, как могут быть связаны между собой целевые функции участников системы.

Рассматриваемая система имеет многоуровневую иерархическую структуру и для того, чтобы она могла существовать, должен выполняться постулат сатисфакции [4]. Смысл постулата сатисфакции (1) заключается в том, что сервисы второго уровня удовлетворяют процесс тогда, когда они удовлетворяют сервисы первого уровня.

$$(\forall s^{(2)})(\forall s^{(1)})\{[\Pi(s^{(2)}, S^{(1)}(s^{(2)})) \& P(s^{(1)}, s^{(2)})] \Rightarrow \Pi(f(s^{(1)}, S^{(2)}), s^{(2)})\}, \quad (1)$$

где $\Pi(s^{(i)}, S^{(i)})$ – предикат « $s^{(i)}$ – есть результат сервиса $S^{(i)}$ », т. е. предикат $\Pi(s^{(i)}, S^{(i)})$ является истинным тогда и только тогда, когда $S^{(i)}$ – сервис, а $s^{(i)}$ – результат этого сервиса; $f(s^{(1)})$ – некоторая полезная функция, которая реализуется в процессе благодаря

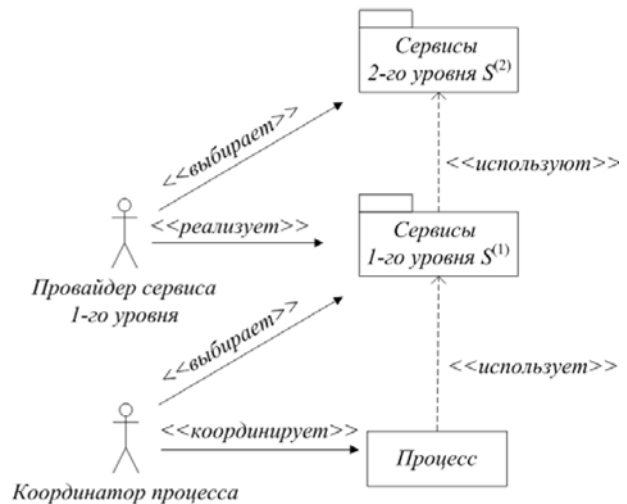


Рис. 2. UML-представление двухуровневой системы с SOA

сервису первого уровня; $P(s^{(1)}, s^{(2)})$ – предикат, связывающий сервисы первого и второго уровней и являющийся истинным тогда и только тогда, когда существует такой результат $s^{(1)}$ сервиса $S^{(1)}$, который создается благодаря результату $s^{(2)}$ сервиса $S^{(2)}$ (рис. 2).

Очевидно, что этот постулат можно обобщить и на случай большего числа уровней иерархии сервисов.

Другими словами, это формальное выражение того факта, что существование иерархической системы, включающей в себя элементы, которые предоставляют сервисы и сами могут зависеть от сервисов, возможно, если все составные элементы системы обеспечивают друг друга необходимыми сервисами и сервисы обеспечивают целевой процесс.

Сформулируем задачу оптимизации для координатора процесса. Вначале следует предположить, что система может состоять из нескольких уровней и/или контуров управления для осуществления основного процесса, а также содержать несколько уровней сервисов как для вспомогательных функций в процессе, так и основных. Т.е. такая система является смешанной и содержит как координирующие воздействия на элементы различных уровней иерархии и процесс, так и связи, возникающие в результате выбора подходящих сервисов провайдерами нижестоящих сервисов, а также координатором процесса таких сервисов, которые непосредственно взаимодействуют с основным процессом. Что касается координации, то такие системы подробно исследованы М. Месаровичем в [5]. В данной работе рассматривается только та составляющая системы, которая обеспечивается выбором сервисов (рис. 2).

Сделаем еще несколько очень важных уточнений: 1) в общем случае каждый тип сервиса может реализовываться как одним провайдером, так и несколькими; 2) каждый вариант одного типа сервиса также может обеспечиваться как одним, так и разными провайдерами; 3) для реализации конкретного варианта определенного сервиса может потребоваться разное число типов других сервисов. Поэтому реальная структура системы может быть различной сложности, и от нее может зависеть окончательная формулировка задачи оптимизации.

Возьмем для определенности простой вариант структуры системы, а именно, будем считать, что каждый вариант любого типа сервиса 1-го уровня использует одинаковое число типов сервисов 2-го уровня. Например, для реализации сервиса $S_1^{(1)}$ необходимы сервисы $\{S_1^{(2)}, S_3^{(2)}, S_4^{(2)}\}$, а для реализации $S_2^{(1)}$ – необходимы $\{S_1^{(2)}, S_2^{(2)}\}$, провайдер сервиса $S_1^{(1)}$ может выбрать по своему усмотрению комбинации вариантов, например $\{S_{12}^{(2)}, S_{31}^{(2)}, S_{42}^{(2)}\}$ или $\{S_{11}^{(2)}, S_{32}^{(2)}, S_{43}^{(2)}\}$.

Предположим, что процесс P состоит только из одного подпроцесса и будем считать, что его результат Y зависит непосредственно только от сервисов первого уровня. Если P – выходная функция процесса, то $P: S^{(1)} \rightarrow Y$. Функцию качества задачи, решаемой координатором, можно выразить как $G: \bar{S}^{(1)} \times Y \rightarrow V$, где $\bar{S}^{(1)} = S_1^{(1)} \times \dots \times S_{J_1}^{(1)}$, V – некоторое множество платежей, частично или полностью упорядоченное отношением \leq .

Множеством результатов сервисов 1-го уровня является множество J_1 -мерных векторов $s^{(1)}$, связанных отношением $\bar{S}^{(1)}$. Каждый j -й сервис 1-го уровня имеет $k_j^{(1)}$ вариантов, следовательно, всего таких векторов будет $M = \prod_{j=1}^{J_1} k_j^{(1)}$ и мощность $|V| = M$.

Целевую функцию координатора процесса можно задать, исходя из введенных выходной функции процесса и функции качества, следующим образом:

$$g(s^{(1)}) = G(s^{(1)}, P(s^{(1)})), \quad (2)$$

а оптимальным решением задачи координатора процесса будет такой выбор J_1 -мерного вектора $\hat{s}^{(1)}$ среди $s_m^{(1)}$ результатов сервисов 1-го уровня ($m = 1, \dots, M$), что

$$g(\hat{s}^{(1)}) = \min_{m \in M} g(s_m^{(1)}). \quad (3)$$

Теперь рассмотрим задачу одного из провайдеров сервиса 1-го уровня как задачу оптимизации. Возь-

мем для определенности сервис 1-го типа, т. е. $S_1^{(1)}$. Положим, что для реализации этого типа сервиса требуется множество, состоящее из q типов сервисов 2-го уровня $\tilde{S}_1^{(2)} = \{S_{j_1}^{(2)}, \dots, S_{j_q}^{(2)}\}$. Если каждый из этих типов имеет k_{j_r} вариантов, $r = 1, \dots, q$, то можно рассмотреть отображение $h_1: \bar{S}_1^{(2)} \rightarrow V_1$, где $\bar{S}_1^{(2)} = S_{j_1}^{(2)} \times \dots \times S_{j_q}^{(2)}$; V_1 – множество платежей провайдера сервиса $S_1^{(1)}$, частично или полностью упорядоченное отношением \leq , мощность $|V_1| = N_1$, $N_1 = \prod_{r=1}^q k_{j_r}$. Тогда задачу провайдера сервиса $S_1^{(1)}$ можно записать как

$$h_1 = h_1(s_1^{(2)}), \quad (4)$$

где $s_1^{(2)}$ – q -мерные векторы результатов сервисов, связанных отношением $\bar{S}_1^{(2)}$, а его оптимальным решением будет такой выбор вектора $\hat{s}_1^{(2)}$ среди $s_{1n_1}^{(2)}$ ($n_1 = 1, \dots, N_1$), что

$$h_1(\hat{s}_1^{(2)}) = \min_{n_1 \in N_1} h_1(s_{1n_1}^{(2)}). \quad (5)$$

Таким образом, каждый p -й сервис 1-го уровня $S_p^{(1)}$ имеет целевую функцию $h_p = h_p(s_p^{(2)})$ при реализации результата $s_p^{(1)}$, $p = 1, \dots, J_1$ и $h_p: \bar{S}_p^{(2)} \rightarrow V_p$. Областью значений функций h_p будут соответствующие множества V_p , частично или полностью упорядоченные отношением \leq множества платежей провайдеров сервисов $S_p^{(1)}$, $|V_p| = N_p$, $N_p = \prod_{r=1}^{q_p} k_{j_r}$, где q_p – число сервисов 2-го уровня, необходимых для реализации p -го сервиса 1-го уровня.

Тогда, рассматривая систему в целом и обозначив совокупность областей значений функций h_p как $\bar{V}_p = V_1 \times \dots \times V_{J_1}$, можно построить отношение

$$\Omega \subseteq \bar{V}_p \times V, \quad (6)$$

которое связывает множества платежей провайдеров 1-го уровня и координатора.

Отметим, что в системе, построенной на принципах координации, где на месте результатов сервисов выступают координирующие сигналы, возможны такие векторы локальных затрат, для которых не существует соответствующих координирующих сигналов [5]. Т. е., если бы $s^{(2)}$ представляли собой искомые для решения задачи управляющие сигналы, то возможны векторы (v_1, \dots, v_{J_1}) в \bar{V}_p , не являющиеся результатом любых $s^{(2)}$.

Для существования системы на основе использования сервисов должен выполняться постулат сатисфакции. Предположим, что Ω – функция, обозначим ее как ω , тогда

$$\omega: \bar{V}_p \rightarrow V. \quad (7)$$

Таким образом, мы предположили существование межуровневой функции качества

$$g(s^{(1)}) = \omega(h_1(s^{(2)}), \dots, h_{J_1}(s^{(2)})), \quad (8)$$

т. е. функции зависимости целевой функции координатора от целевых функций провайдеров сервисов для системы, построенной с использованием сервисов для организации некоторого процесса. В следующей теореме доказывается существование межуровневой функции качества для такой системы.

Теорема 1. Система, для которой выполняется постулат сатисфакции (1), имеет межуровневую функцию качества.

Доказательство. Одним из условий постулата сатисфакции является истинность предиката $\mathbf{P}(s^{(1)}, s^{(2)})$, т. е. существование такого результата $s^{(1)}$ сервиса $S^{(1)}$, который создается благодаря результату $s^{(2)}$ сервиса $S^{(2)}$. Значит, если система, созданная на базе сервисов, существует, такой предикат истинен для каждого сервиса 1-го уровня и каждого необходимого для его реализации набора сервисов 2-го уровня, т. е. $(\forall s^{(2)})(\forall s^{(1)})\mathbf{P}(s^{(1)}, s^{(2)})$.

Это означает, что всегда (если система существует) имеется функциональная зависимость результата сервиса 1-го уровня от необходимого набора результатов сервисов 2-го уровня $s^{(1)} = \varphi(s^{(2)})$. Из утверждения постулата $(\forall s^{(1)})\mathbf{P}(f(s^{(1)}), S^{(2)})$ следует, что существует функциональная зависимость $y = \psi(s^{(1)})$ выхода процесса от результатов каждого сервиса 1-го уровня. Отсюда вытекает функциональная зависимость выхода процесса от сервисов 2-го уровня, т. е. композиция функций $y = \psi(\varphi(s^{(2)}))$ или $\psi \circ \varphi: s^{(2)} \rightarrow Y$.

Составим список пар отображений $[h_p \circ \varphi_p: s_p^{(2)} \rightarrow V_p; g \circ \psi \circ \varphi: s_p^{(2)} \rightarrow V]$ для всех $p = 1, \dots, J_1$, он будет представлять собой таблицу соответствия каждого вектора на отношении \bar{V}_p элементу множества V и, таким образом, задающую межуровневую функцию качества $\omega: \bar{V}_p \rightarrow V$. ■

Рассматриваемая система в особых случаях может обладать свойством монотонности, когда цели провайдеров совпадают с целью координатора процесса. Согласно [5] система является монотонной,

если ее межуровневая функция качества является монотонной. Для нашего случая это означает, что целевая функция координатора процесса $g(s^{(1)})$ монотонно связана с целевыми функциями $h_j(s^{(2)})$ каждого провайдера сервисов 1-го уровня ($j = 1, \dots, J_1$). Для такой системы, по аналогии с монотонными координируемыми системами [5] и на основании существования межуровневой функции качества, можно доказать следующую теорему.

Теорема 2. Для монотонной системы, построенной на основе сервис-ориентированной архитектуры, целевая функция координатора процесса достигает минимума всякий раз, когда достигают минимума целевые функции провайдеров сервисов, т. е. $g(s^{(1)}) = \min g$, если $(\forall j)(h_j(s^{(2)}) = \min h_j)$, $j = 1, \dots, J_1$.

Доказательство. Монотонная система имеет монотонную межуровневую функцию качества $g(s^{(1)}) = \omega(h_1(s^{(2)}), \dots, h_{J_1}(s^{(2)}))$, поэтому уменьшение каждой из целевых функций провайдеров $h_j(s^{(2)})$ не будет увеличивать целевую функцию координатора, а при строгой монотонности уменьшение любых целевых функций провайдеров будет вызывать уменьшение целевой функции координатора, отсюда вытекает справедливость данной теоремы. ■

Отметим, что системы, подобные рассматриваемой, не всегда могут обладать свойством монотонности. Это связано со свойством слабой связанности элементов сервисов, что, с одной стороны, придает гибкость таким системам, но с другой – возможную несогласованность целей ее участников.

Полученные в данной работе результаты могут быть распространены на системы с большим, чем два, числом уровней иерархии и для случаев, когда варианты типов сервисов используют разное число других сервисов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для систем, построенных с использованием концепции SOA, возможна постановка задач оптимизации как для координатора процесса, для осуществления которого собственно система создана или образовалась, так и для провайдеров сервисов, которыми пользуются процесс и другие сервисы. Благодаря постулату сатисфакции для таких систем существует межуровневая функция качества, с помощью которой можно исследовать степень согласованности целей участников или элементов системы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Компас в мире сервис-ориентированной архитектуры (SOA): ценность для бизнеса, планирование и план развития предприятия / [Биберштейн Н., Боуз С., Джонс К. и др.]. – М. : КУДИЦ-ПРЕСС, 2007. – 256 с.
2. Service oriented architecture Modeling Language (SoaML) – Specification for the UML Profile and Metamodel for Services (UPMS). Revised Submission. OMG document: ad/2008-08-04. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.omg.org/>
3. Cox D. E. Management of the service-oriented architecture life cycle / D.E. Cox, H. Kreger // IBM Systems Journal. – 2005. – Vol. 44, No. 4. – Pp. 709–726.
4. Кудерметов Р. К. Концептуальная и формальная модели систем с сервис-ориентированной архитектурой / Р. К. Кудерметов // Науковий вісник Чернівецького університету : збірник наук. праць. – Вип. 446: Комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці : ЧНУ, 2009. – С. 94–99.
5. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1973. – 344 с.

Надійшла 17.08.2009

Кудерметов Р. К.

ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМ
НА БАЗІ СЕРВІС-ОРИЄНТОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ

Сформульовано задачу оптимізації для системи, що має ієрархічну багаторівневу структуру та побудована з використанням сервіс-орієнтованої архітектури. Визначено цільові функції кожного рівня такої системи та показано, що ця система має міжрівневу функцію якості. Розглянуто властивості міжрівневої функції за умовою, що система має властивість монотонності.

Ключові слова: сервіс-орієнтована архітектура, ієрархічна багаторівнева система, постулат сатисфакції, міжрівнева функція якості.

Kudermetov R. K.

OPTIMIZATION PROBLEM FOR HIERARCHICAL SYSTEMS BASED ON SERVICE-ORIENTED ARCHITECTURE

The problem of optimization is formulated for a hierarchic multilevel system which uses the foundations of Service-oriented architecture. The objective functions of each of such system levels are determined and it is shown that this system has an interlevel performance function. Properties of interlevel performance function are considered provided that the system has a monotonicity property.

Key words: Service-oriented architecture, hierarchical multilevel system, satisfaction postulate, interlevel performance function.

УДК 621.7.073-52

Невлюдов И. Ш.¹, Шостак Б. А.², Бабай О. Н.³, Юрьева С. В.⁴

¹Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Харьковского национального университета радиоэлектроники

²Канд. техн. наук, ведущий инженер ООО «НПО «Агротехника»»

³Доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

⁴Студент Харьковского национального университета радиоэлектроники

ДИАГНОСТИКА МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Рассмотрен новый метод диагностирования работы микросхем памяти, который позволяет проводить диагностику в процессе эксплуатации запоминающих устройств. Приведено описание принципа функционирования аппаратной части, а также описана структура программного обеспечения, позволяющего реализовать разработанный метод диагностики микросхем памяти.

Ключевые слова: запоминающее устройство, диагностирование, оперативное запоминающее устройство, постоянное запоминающее устройство, эмуляция, информационный сигнал, стробирующий сигнал, данные.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях производства и эксплуатации диагностика и контроль запоминающих устройств (ЗУ) является чрезвычайно актуальной задачей. И хотя в настоящее время существует большое количество методов диагностики и соответствующих программно-аппаратных комплексов, методы, позволяющие диагностировать ЗУ в процессе эксплуатации, т. е. не выпаивая микросхему из платы, недостаточно развиты. На сегодняшний момент су-

ществует несколько способов диагностирования микросхем памяти. Наиболее распространенный – тестовое диагностирование. При таком способе вначале формируется диагностическая модель объекта диагностики, генерируется набор тестовых программ и затем производится непосредственно процесс диагностирования.

Редко применяется и еще один из способов диагностирования, основанный на измерении температуры микросхем. При таком способе с помощью

© Невлюдов И. Ш., Шостак Б. А., Бабай О. Н., Юрьева С. В., 2010

специального высокочувствительного термовизиографа считывается информация о распределении тепловых полей объекта диагностирования и на основании расчетов формируется вывод об исправности или неисправности отдельных микросхем памяти.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Описанные способы имеют существенные недостатки. В первом случае для диагностирования одного цифрового модуля необходимо выполнить предварительно большой объем работ (формирование диагностической модели, тестовых программ, разработка и изготовление дополнительных аппаратных средств и т. д.). Кроме того, в условиях априорной неопределенности (например, отсутствие принципиальной схемы) реализация такого способа невозможна. Во втором случае недостатками являются: во-первых, наличие специализированного дорогостоящего оборудования, во-вторых, низкая достоверность результатов расчетов. Для решения этой задачи предлагается использовать контроль микросхем памяти с применением принудительного диагностирования [1].

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ

Современные системы управления применяют статические и динамические ОЗУ. В первом варианте запоминающими элементами являются триггеры, сохраняющие свое состояние, пока схема находится под питанием и нет новой записи данных. Во втором варианте данные хранятся в виде зарядов конденсаторов, образуемых элементами МОП-структур. Саморазряд конденсаторов ведет к разрушению данных, поэтому они должны периодически (каждые несколько миллисекунд) регенерироваться.

Статические ОЗУ подразделяются на асинхронные, тактируемые и синхронные (конвейерные). В асинхронных ОЗУ сигналы управления могут задаваться либо импульсами, либо уровнями. Эти сигналы могут оставаться неизменным на протяжении многих циклов обращения к памяти. В тактируемых ОЗУ некоторые сигналы обязательно должны быть импульсными. В синхронных ОЗУ синхросигналы памяти тесно связаны с тактовой частотой системы, в них используется конвейеризация тракта продвижения информации, может применяться многобанковая структура памяти и др.

Функционирование ОЗУ во времени регламентируется временными диаграммами, приведенными на рис. 1. Как видно из рисунка, для процесса чтения характерны такие временные интервалы:

T_1 – момент времени подачи информационного сигнала (адреса ячейки ОЗУ);

T_2 – момент времени подачи стробирующего сигнала (строб R/W);

T_3 – момент времени подачи разрешающего сигнала (CS\);

T_4 – момент времени подачи информационного сигнала (данные).

Для процесса записи характерны такие временные интервалы:

T_1 – момент времени подачи информационного сигнала (адреса ячейки ОЗУ);

T_2 – момент времени подачи стробирующего сигнала (строб R/W) и информационного сигнала (данные);

T_3 – момент времени подачи разрешающего сигнала (CS\).

Для статических ОЗУ наиболее характерны структуры 2D, 3D и 2DM, но чаще всего используют структуру 2DM. Структура 2D чаще используется при небольшой информационной емкости. В структуре 2D запоминающие элементы (ЗЭ) представляют собой прямоугольную матрицу размерностью $M = k \times m$, где M – информационная емкость памяти в битах, k – число хранимых слов, m – их разрядность.

При наличии разрешающего сигнала CS\ дешифратор адресного кода DC активизирует одну из выходных линий, т. е. разрешает одновременный доступ ко всем элементам выбранной строки. Элементы каждого столбца соединены вертикальной линией – линией записи/считывания. В столбцах хранятся одноименные биты всех слов. Под воздействием сигнала R/W осуществляется направление обмена усилителями чтения/записи. Недостатком такой структуры является чрезмерное усложнение дешифратора адреса (число выходов дешифратора равно числу хранимых слов).

Структура 3D характеризуется двухкоординатной выборкой запоминающих элементов. Здесь код адреса разрядностью n делится на две половины, каждая из которых декодируется отдельно, и выбирается запоминающий элемент, который находится на пересечении активных линий выходов обоих дешифраторов. Количество пересечений при этом составляет $2^{n/2} * 2^{n/2} = 2^n$. Общее число выходов обоих дешифраторов составляет $2^{n/2} + 2^{n/2} = 2^{n/2+1}$. Это меньше, чем для структуры 2D. Недостатком структуры 3D является усложнение элементов памяти, которые имеют двухкоординатную выборку.

ОЗУ структуры 2DM похожи на ОЗУ структуры 2D тем, что возбужденный выход дешифратора выбирает

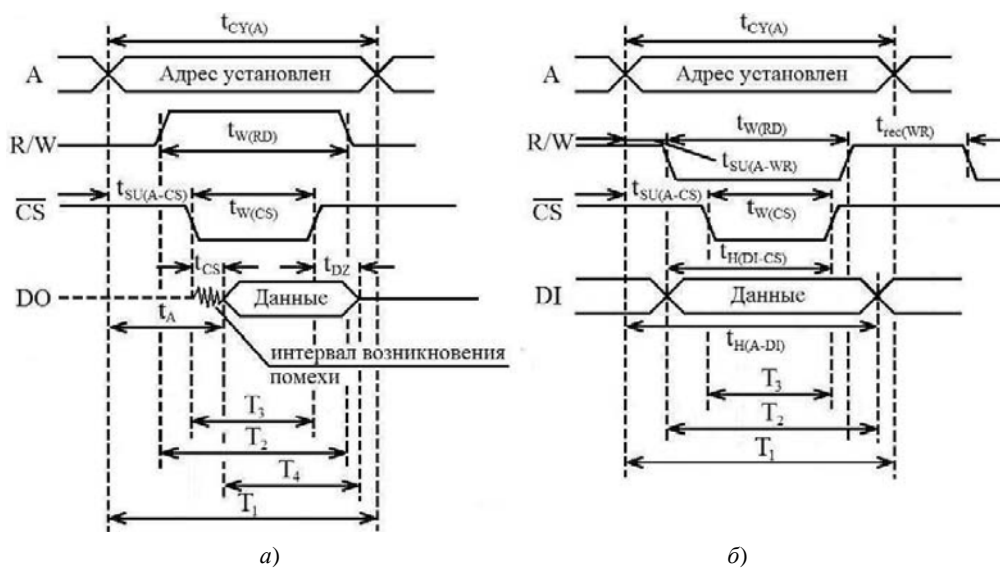


Рис. 1. Временные диаграммы процессов чтения (а) и записи (б) в статическом ЗУ

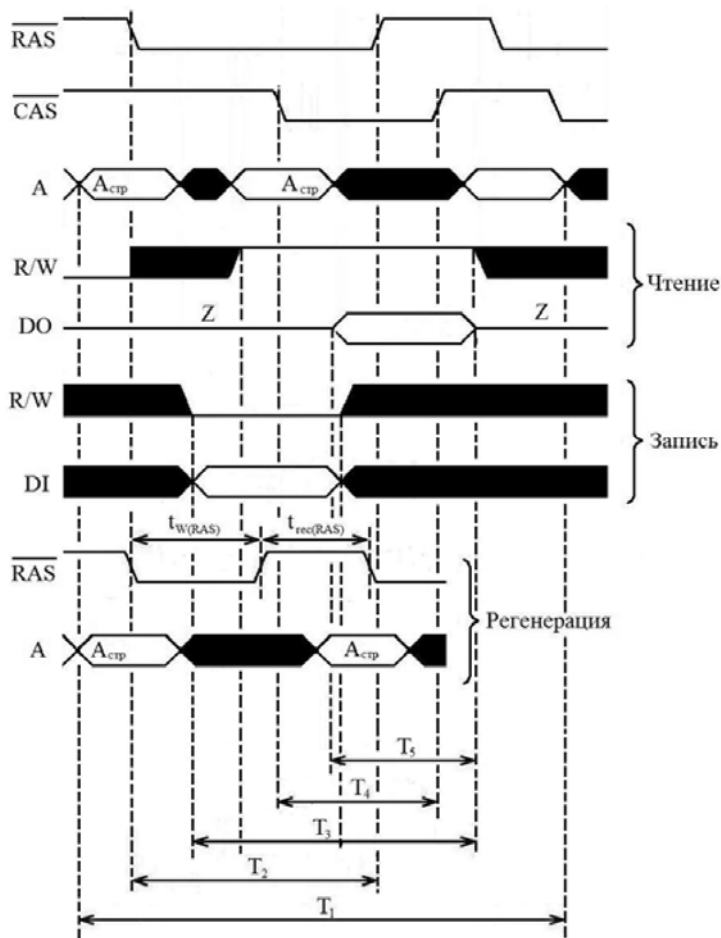


Рис. 2. Временные диаграммы динамического ЗУ

целую строку, но длина ее намного больше разрядности хранимых слов. При этом уменьшается и число строк матрицы, и число выходов дешифратора. Для выбора строки служит часть адресного кода $A_{n-1} \dots A_k$, остальные разряды адреса используются при выборе слова в данной строке. Диаграмма работы ЗУ типов 2D, 3D и 2DM отличается только обратной последовательностью подачи сигналов (CS\)) и (R/W).

В динамических ЗУ данные хранятся в виде зарядов емкостей МОП-структур, и основой ЗЭ является конденсатор небольшой емкости. Особенностью динамических ЗУ является мультиплексирование шины адреса. Адрес делится на два полуадреса, один из которых представляет собой адрес строки, а другой – адрес столбца матрицы ЗЭ. Полуадреса подаются на одни и те же выводы корпуса ИС поочередно. Подача адреса строки сопровождается соответствующим стробом RAS\), а адреса столбца – стробом CAS\). В режимах регенерации адрес столбца не нужен. На рис. 2 приведены временные диаграммы работы динамического ОЗУ.

Для выполнения операций чтения информации выделяются такие этапы времени:

T_1 – момент времени подачи информационного сигнала (адреса ячейки);

T_2 – момент времени подачи стробирующего сигнала (RAS\);

T_3 – момент времени подачи стробирующего сигнала (строб R/W);

T_4 – момент времени подачи стробирующего сигнала (CAS\);

T_5 – момент времени подачи информационного сигнала (данные).

Для процесса записи выделяются такие временные интервалы:

T_1 – момент времени подачи информационного сигнала (адреса ячейки);

T_2 – момент времени подачи разрешающего сигнала (RAS\);

T_3 – момент времени подачи стробирующего сигнала (строб R/W) и информационного сигнала (данные);

T_4 – момент времени подачи стробирующего сигнала (CAS\).

Также следует отметить, что при работе микропроцессорных систем используются и постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). В процессе их эксплуатации также необходим контроль операции записи в них информации и ее последующего считывания. Для этого можно применить рассматриваемый

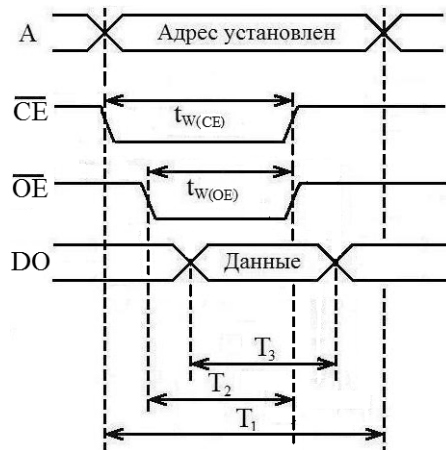


Рис. 3. Временная диаграмма работы для микросхемы ПЗУ 27C512

метод диагностики. Постоянные запоминающие устройства хранят информацию, которая либо вообще не изменяется, либо изменяется редко и не в оперативном режиме. ПЗУ обычно выполняются по структуре 2DM [2]. На рис. 3 приведен пример временной диаграммы работы для микросхемы ПЗУ 27C512.

Для выполнения операции чтения информации выделяются такие этапы времени:

T_1 – момент времени подачи информационных сигналов (адреса ячейки) и разрешающего сигнала (CE\);

T_2 – момент времени подачи разрешающего сигнала (OE\);

T_3 – момент времени подачи информационных сигналов (данные).

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМУЛЯЦИИ РАБОЧИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ

Для проведения процесса контроля с использованием эмуляции рабочих воздействий к исследуемому цифровому модулю подключаются соответствующие переходные разъемы. Эмуляционное устройство в соответствии с заданной микропрограммой осуществляет передачу всех информационных и управляющих сигналов между управляющей ЭВМ и исследуемым модулем. Микропрограмма эмуляционных воздействий формируется заранее на этапе разработки программ в той или иной системе управления технологическим оборудованием. Таким образом, эмуляция рабочих воздействий является основой формирования тестовых воздействий на все шины микросхем памяти.

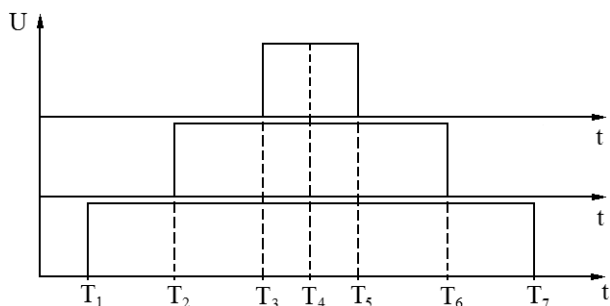


Рис. 4. Последовательность подачи активных уровней на входы микросхемы статического ОЗУ для операции записи/чтения информации

Как известно, для тестирования ОЗУ необходима активизация входов микросхемы при помощи аппаратной части системы принудительной диагностики [3]. По функциональной принадлежности входные выходы делятся на разрешающие, информационные и стобирующие. Соответственно, активизация входов происходит в определенной последовательности.

Таким образом, как видно из приведенных выше временных диаграмм работы ЗУ, для тестирования микросхем необходимо произвести имитацию цикла работы ЗУ (рис. 4).

Процесс записи определенных данных производится в 7 этапов:

1. Установить на адресные входы дешифратора адресного кода DC адрес требуемой ячейки (момент времени T_1).
2. Затем установить строб чтения/записи R/W и определенный набор данных для тестирования (момент времени T_2).
3. Для разрешения работы микросхемы установить сигнал CS\ (момент времени T_3).
4. Записать данные (момент времени T_4).
5. Сбросить сигнал CS\ (момент времени T_5).

6. Сбросить строб чтения/записи R/W и набор данных для тестирования (момент времени T_6).

7. Сбросить адрес требуемой ячейки (момент времени T_7).

Для процесса чтения записанных данных необходимо 7 этапов:

1. Установить на адресные входы дешифратора адресного кода DC адрес требуемой ячейки (момент времени T_1).
2. Затем установить строб чтения/записи R/W и сигнал разрешения по выходу OE\ (момент времени T_2).
3. Для разрешения работы микросхемы установить сигнал CS\ (момент времени T_3).
4. Считать данные (момент времени T_4).
5. Сбросить сигнал CS\ (момент времени T_5).
6. Сбросить строб чтения/записи R/W и сигнал разрешения по выходу OE\ (момент времени T_6).
7. Сбросить адрес требуемой ячейки (момент времени T_7).

Затем необходимо сравнить выходные данные с данными диагностической модели и определить неисправности.

Соответственно, для тестирования динамических ОЗУ при имитации цикла работы ЗУ необходимо 9 этапов (рис. 5):

1. Установить полуадрес необходимой ячейки (момент времени T_1).
2. Установить сигнал RAS\ (момент времени T_2).
3. Затем установить строб чтения/записи R/W и определенный набор данных для тестирования (момент времени T_3).
4. Установить сигнал CAS\ (момент времени T_4).
5. Записать данные (момент времени T_5).
6. Сбросить сигнал CAS\ (момент времени T_6).

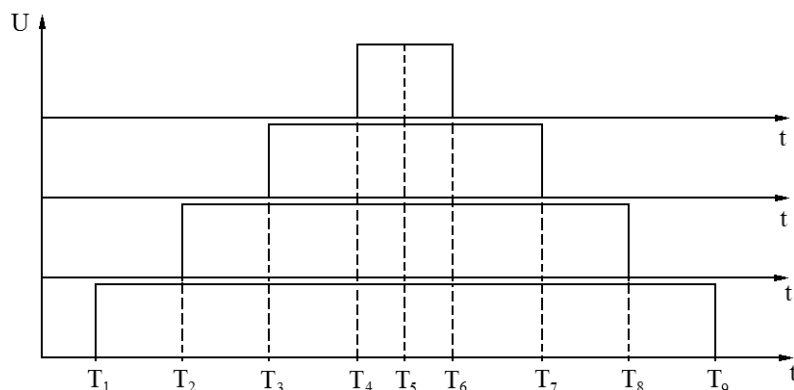


Рис. 5. Последовательность подачи импульсов на входы микросхемы динамического ОЗУ для операции записи/чтения информации

7. Сбросить строб чтения/записи R/W и подаваемые данные (момент времени T_7).

8. Сбросить сигнал RAS\ (момент времени T_8).

9. Сбросить полуадрес необходимой ячейки (момент времени T_9).

Для процесса чтения записанных данных необходимо 9 этапов:

1. Установить полуадрес необходимой ячейки (момент времени T_1).

2. Установить сигнал RAS\ (момент времени T_2).

3. Затем установить строб чтения/записи R/W (момент времени T_3).

4. Установить сигнал CAS\ (момент времени T_4).

5. Считать данные (момент времени T_5).

6. Сбросить сигнал CAS\ (момент времени T_6).

7. Сбросить строб чтения/записи R/W (момент времени T_7).

8. Сбросить сигнал RAS\ (момент времени T_8).

9. Сбросить полуадрес необходимой ячейки (момент времени T_9).

Затем так же, как в первом случае, выходные данные сравниваются с данными диагностической модели и определяются неисправности.

Подача данных последовательностей импульсов на микросхему памяти и считывание полученных данных производится при помощи системы принудительной диагностики. Зонд для подачи тестовой информации подключается к ОЗУ прямо на плате. При этом формирование тестовой информации может производиться любым из существующих методов. Например, тест «шахматный код» используется для проверки взаимовлияния ячеек, содержащих информацию в обратном коде. В ОЗУ через зонд записывается информация, имеющая шахматное распре-

ление (01010101, 10101010, 01010101 и т. д.), затем производится последовательное считывание и проверка этой информации. «Сканирующий» тест предназначен для проверки ОЗУ в условиях максимальной статической помехи, вызванной суммарным током утечки всех ячеек ОЗУ, находящихся в одном состоянии. Производится запись нулей (единиц) во все ячейки ОЗУ, затем производится последовательное считывание и проверка информации. После этого во все ячейки ОЗУ записываются единицы (нули) и процесс повторяется [4]. Для оценки эффективности необходимо проанализировать количество тестовых наборов отдельных типов микросхем памяти [5]. В процессе диагностики при полном переборе двоичных комбинаций общее количество тестовых наборов определяется как

$$N = 2^{(I+U)},$$

где N – общее количество тестовых наборов; I – разрядной информационной шины; U – количество управляющих сигналов.

Аппаратная часть системы принудительной диагностики подключается к ЭВМ посредством 32-разрядного унифицированного интерфейсного модуля сопряжения PCI 1733 фирмы Advantech (рис. 6). Программное обеспечение системы принудительной диагностики состоит из трех частей:

1. Программа, формирующая последовательность управляющих и стробирующих кодов для каждого тестового набора.

2. Программа, активизирующая работу системы принудительной диагностики.

3. Программа, анализирующая полученные на предыдущем этапе данные.

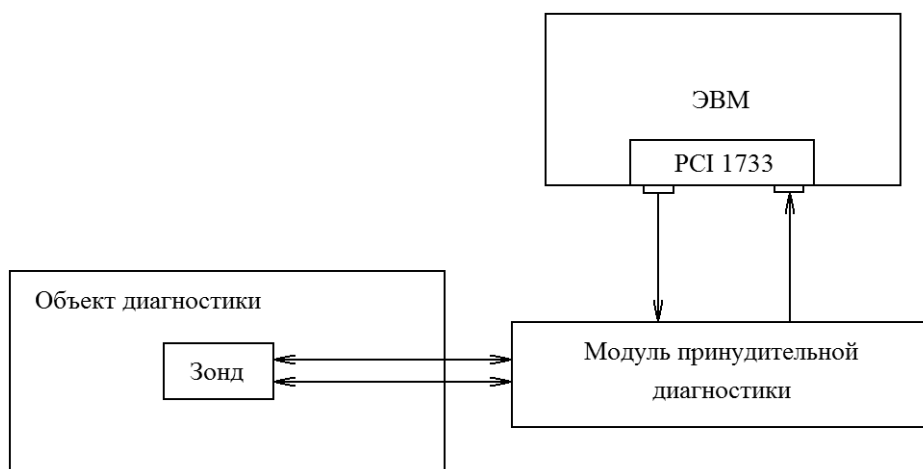


Рис. 6. Схема подключения аппаратных узлов

ВЫВОДЫ

Предложенная система принудительного тестирования позволяет проводить оперативную диагностику микросхем ОЗУ. Время проверки микросхем составляет несколько секунд (например, для микросхемы M62256 время проверки составляет 3 секунды). Представленный метод позволяет сохранить целостность платы и подходит для большинства современных ЗУ. Также в перспективе возможно использования этого метода и для памяти с конвейерной организацией. Применение данного метода позволяет существенно ускорить процесс диагностики ЗУ, что крайне необходимо в условиях современного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невлюдов И. Ш. Программно-технические средства диагностики цифровых модулей систем управления технологическим оборудованием / Невлюдов И. Ш., Омаров М. А., Шостак Б. А. – Х. : НТМТ, 2008. – 216 с.
2. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника / Угрюмов Е. П. – СПб. : БХВ – Санкт-Петербург, 2000. – 528 с.
3. Хаханов В. И. Техническая диагностика цифровых и микропроцессорных структур: учеб. пособие / Хаханов В. И. – Киев : ИСИО, 1995. – 242 с.
4. Хаханов В. И. Контроль и диагностика вычислительных устройств и систем : учеб. пособие / Хаханов В. И. – Харьков : ХВУ, 1997. – 304 с.

5. Хаханов В. И. Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров : учеб. пособие / Хаханов В. И. – Киев : ИЗМН, 1997. – 308 с.

Надійшла 01.09.2009

Невлюдов І. Ш., Шостак Б. О., Юр'єва С. В., Бабай О. М.
ДІАГНОСТИКА МІКРОСХЕМ ПАМ'ЯТІ В МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЯХ

Розглянуто новий метод діагностування роботи мікросхем пам'яті, який дозволяє проводити діагностику у процесі експлуатації запам'ятовуючих пристроїв. Наведено структурну схему апаратної частини, а також описано структуру програмного забезпечення, яке дозволяє реалізувати розроблений метод діагностики мікросхем пам'яті.

Ключові слова: запам'ятовуючий пристрій, діагностування, оперативний запам'ятовуючий пристрій, постійний запам'ятовуючий пристрій, емуляція, інформаційний сигнал, стробуючий сигнал, дані.

Nevlyudov D. E. I., Shostak C. T. B., Yurieva S., Babay O.
DIAGNOSTICS OF MEMORY CHIPS IN MICROPROCESSOR-BASED UNITS

A new method of memory chips diagnostics is described which makes it possible to perform diagnostics of operating memory devices. The block diagram of hardware component is shown and software structure is described, which permits to implement the developed method of memory chips diagnostics.

Key words: memory, diagnostics, random-access memory, read-only memory, emulation, information signal, strobe, data.

УДК 621.372.061

Рибін О. І.¹, Наталенко С. С.², Ніжебецька Ю. Х.³

¹Д-р техн. наук, завідувач кафедри Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

²Аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

³Студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

ВЛАСТИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ RTF

Проводиться порівняння точності дискретних перетворень RTF (Root domain Transfer Function) та Фур'є при використанні операцій диференціювання та інтегрування. Відмічена доцільність використання немінімальних різницевоїх формул диференціювання при застосуванні перетворення RTF.

Ключові слова: обробка сигналів, перетворення Фур'є, власне число, диференціювання, інтегрування.

ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Методи аналізу сигналів та систем на базі дискретизації сигналів в області натуральних координат [1–5] та в області ортогональних перетворень [6–11] знайшли широке застосування в сучасній техніці, медицині тощо, що пов'язано з комп'ютеризацією наукових досліджень і технічних розробок. При аналізі лінійних систем (розв'язанні лінійних диференціальних

рівнянь їх динамічної рівноваги) найбільш поширеними є методи, побудовані на дискретних Фур'є та Z-перетвореннях, що пов'язано з відомими властивостями цих перетворень [6–10]. Так, як відомо, операції диференціювання в області натуральних координат в області перетворення Фур'є відповідає множення на $j \cdot \omega$, що дозволяє звести диференціальні лінійні рівняння до відповідних їм алгебраїчних рівнянь.

© Рибін О. І., Наталенко С. С., Ніжебецька Ю. Х., 2010

З іншого боку, набули розповсюдження різницеві методи [1–3], які є потужним інструментом для аналізу лінійних систем в області натуральних координат.

Незручністю при застосуванні різницевого методу для розв'язання диференціальних рівнянь є циркулянтність матриць коефіцієнтів, викликана уявною періодичністю дискретного сигналу (зумовленою дискретизацією спектра).

При обмежених форматах перетворень (і матриць коефіцієнтів диференціальних рівнянь) це приводить до накладання в отриманому розв'язку попередніх реакцій системи на періодичний вхідний сигнал. При цьому матриця коефіцієнтів різницевого рівняння не є трикутною [3], що значно ускладнює обчислювальну процедуру [3–5] (обернення такої матриці).

Перехід від різницевого рівняння до його ортогонального перетворення RTF [12–15] значно спрощує (як і перехід до образів дискретного перетворення Фур'є) обчислювальну процедуру, оскільки в разі цього перетворення операція диференціювання в області натуральних координат також замінюється множенням, але на власне значення λ [12, 15]. Таким чином, перетворення RTF (Root domain Transfer Function) є точним аналогом (в області ортогонального перетворення Фур'є дії та реакції) різницевого методу з усіма позитивними властивостями перетворення Фур'є.

Метою даної роботи є порівняння властивостей дискретних перетворень RTF та Фур'є з точки зору їх точності та можливості взаємного переходу. При цьому усі оцінки точності для перетворення RTF справедливі і для відповідного різницевого методу з урахуванням значно більш простої реалізації в області перетворень.

ОПЕРАЦІЇ ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ТА ІНТЕГРУВАННЯ В ОБЛАСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є І RTF

Як відомо, використання будь-якого прямого і зворотного дискретного ортогонального перетворення сигналу приводить до точного (відволікаючись від операційної похибки) відновлення значень вхідного сигналу в точках дискретизації.

Але при розв'язанні диференціальних рівнянь в області ортогональних перетворень ситуація погіршується. Так, при диференціюванні сигналу в натуральних координатах в області перетворення Фур'є множник $j\omega$ забезпечує зсув відповідної гармоніки складової на чверть періоду. При цьому, враховуючи, що звичайний формат перетворення $N = 2^n$, n – ціле, усі непарні гармоніки (3, 5, 7, ...) посунуться

на інтервал, не кратний кроку дискретизації. Тоді, якщо апроксимація сигналу рядом Фур'є (в інтервалах між дискретними відліками) мала суттєву похибку, ця похибка суттєво проявляється в точках дискретних відліків реакції. Так, на рис. 1 наведено вхідний сигнал (крива 1), його похідну, обчислену за дискретним перетворенням Фур'є (крива 2) та похідну, отриману за перетворенням RTF (множенням на λ_i для кожної i -ї складової). Крива 3 повністю співпадає з результатом, отриманим диференціюванням заміною похідної поділеною різницею, що й відповідає множенню дискретного Фур'є образу вхідного сигналу на λ_i .

Ще більш вражаючу похибку дає використання перетворення Фур'є для прямокутного сигналу рис. 2 та рис. 3. В розглянутих прикладах рис. 1 та рис. 3 формат перетворення $N = 64$. Його збільшення з одного боку призведе до підвищення частоти коливання похибки при використанні дискретного перетворення Фур'є та підвищення точності обчислень (за рахунок зменшення систематичної похибки апроксимації, що виникає при обмеженні нескінченного ряду Фур'є), та до зменшення точності за рахунок накопичення операційної похибки (внаслідок збільшення формату матриць i , відповідно, кількості операцій з обмеженою розрядністю). Але така операційна похибка буде помітною при розв'язанні диференціального рівняння відносно великого порядку, а не при простій операції диференціювання.

Результати диференціювання, наведені на рис. 4–7 для форматів перетворень $N = 16, 32, 128, 256$, показують, що при збільшенні формату похибка при використанні перетворення Фур'є хоча і зменшується, але залишається суттєво великою у порівнянні до «точного» результату, яким є використання формул поділеної різниці в натуральних координатах (різницевого методу), та до результатів використання перетворення RTF, яке є точним аналогом різницевого методу.

Цікаво, що при тих самих форматах операція інтегрування як за перетворенням RTF, так і за дискретним перетворенням Фур'є дає практично однакові результати, що викликано згладжуючим характером самої операції інтегрування (рис. 9–10).

ВИСНОВКИ

Використання немінімальних різницевого методу формул диференціювання [1], як це було показано в [15], приводять до підвищення точності диференціювання, і відповідно, розв'язання диференціальних рівнянь при діях певних класів, хоча це й потребує додаткових досліджень.

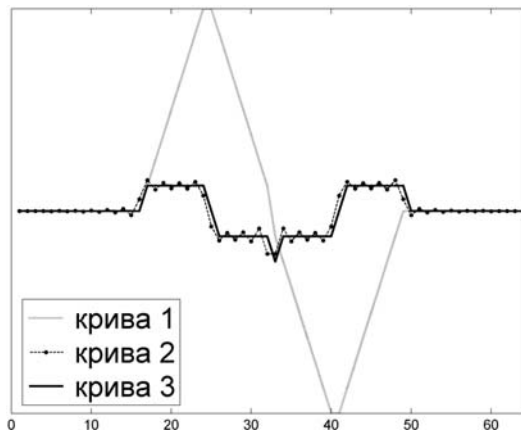


Рис. 1. Результат диференціювання трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 64$

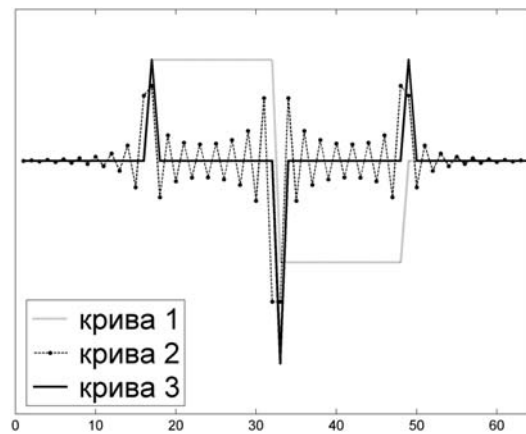


Рис. 2. Результат диференціювання прямокутних імпульсів при форматі перетворення $N = 64$

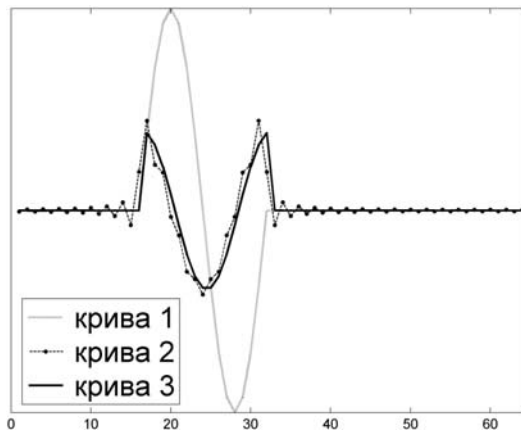


Рис. 3. Результат диференціювання імпульсу періоду синусоїди при форматі перетворення $N = 64$

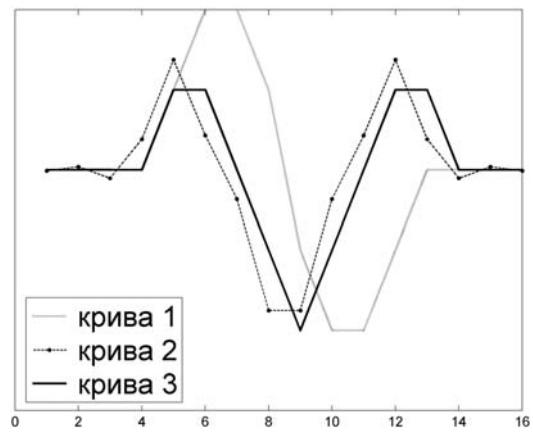


Рис. 4. Результат диференціювання трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 16$

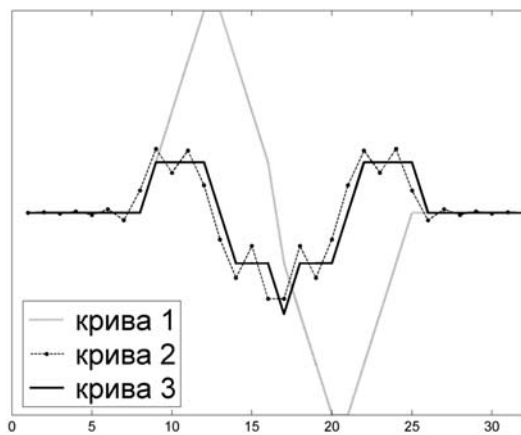


Рис. 5. Результат диференціювання трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 64$

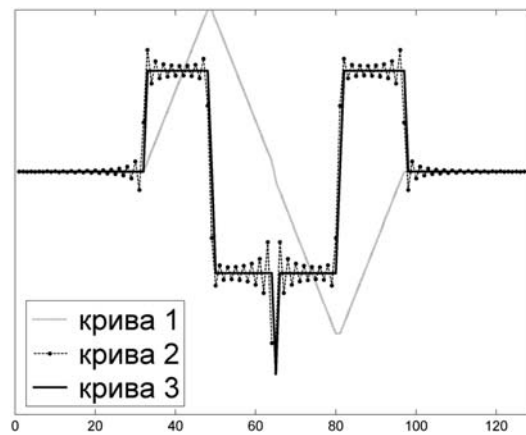


Рис. 6. Результат диференціювання трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 128$

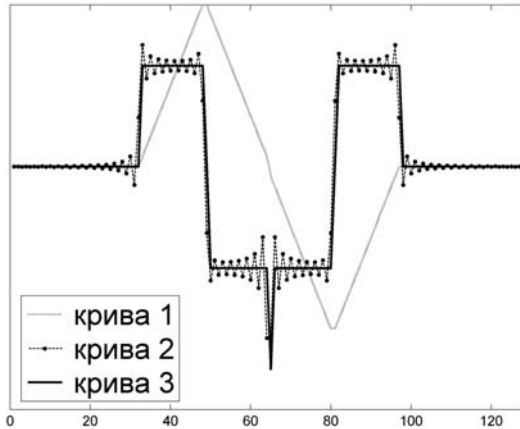


Рис. 7. Результат диференціювання трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 256$

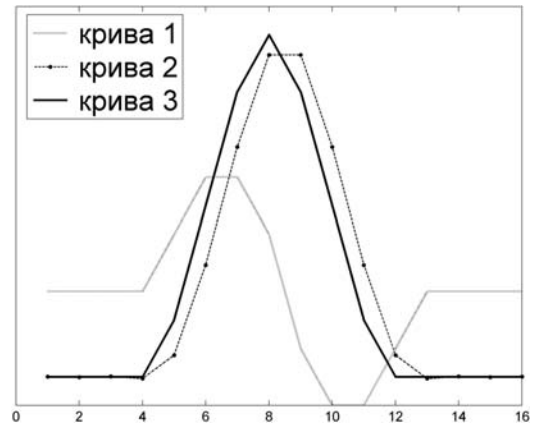


Рис. 8. Результат інтегрування трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 16$

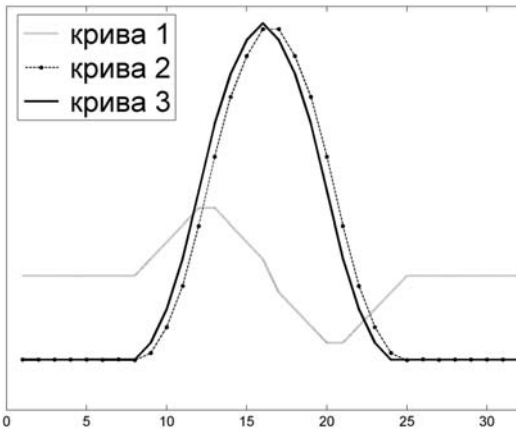


Рис. 9. Результат інтегрування трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 32$

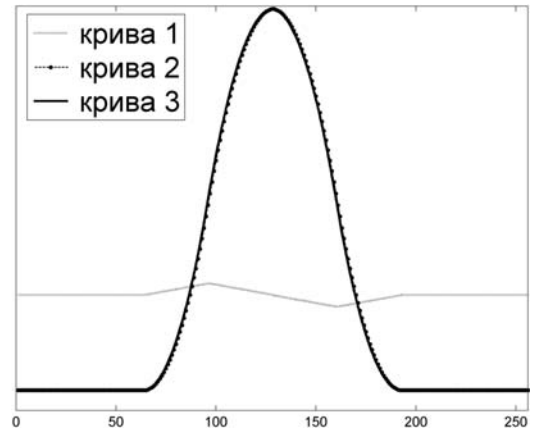


Рис. 10. Результат інтегрування трикутних імпульсів при форматі перетворення $N = 256$

Таким чином, слід сподіватися, що використання саме перетворення RTF (для опису в λ -області коефіцієнтів передачі моделі деградації образів та додаткових умов, що накладаються для однозначного розв'язку задачі реставрації образу [7–19] на моделі деградації, є більш природним і приведе до кращих результатів, наприклад, при реалізації методів умовної деконволюції в області перетворення Фур'є, оскільки ці методи базуються на аналогах в натуральних координатах, розв'язуваних різницевиими методами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Годунов С. К. Разностные схемы (введение в теорию) / Годунов С. К., Рябенский В. С. – М. : Наука, 1973. – 400 с.
2. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А. А. – М. : Наука, 1971. – 328 с.
3. Рыбин А. И. Анализ линейных цепей в базе преобразования Уолша / Рыбин А. И. // Радиоэлектроника. – 2004. – № 5 – С. 36–41. – (Изв. всш. учеб. заведений).
4. Рыбин А. И. Метод модификаций для анализа линейных цепей в базе функций Уолша / Рыбин А. И. // Радиоэлектроника. – 2004. – № 6 – С. 36–41. – (Изв. всш. учеб. заведений).
5. Рыбин А. И. Анализ электрических цепей в натуральных координатах на базе ортогональных преобразований с действительным ядром / Рыбин А. И., Пилинский В. В., Радионова М. В // Праці Інституту електродинаміки НАНУ : зб. наук. праць. – 2004. – № 1(7). – С. 7–12.
6. Proakis John G. Digital Signal Processing. Prentice / Proakis John G., Manolakis Dimitris G. – New Jersey : Hall Inc, 1996. – 968 p.
7. Jan I. Cislicova filtrace, analiza a restaurace signalu / Jan I. – Brno: VUT, 1997. – 438 s.
8. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. / Ахмед Н., Рао К. – М. : Связь, 1980. – 221 с.
9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2 т. / Прэтт У. ; [пер. с англ. ; под ред. Лебедева Д. С.]. – М. : Мир, 1982. – 792 с.
10. Сиберт У. М. Цепи, сигналы, системы. Ч. 2. / Сиберт У. М. – М. : Мир, 1988. – 359 с.
11. Рыбин А. И. Алгоритм анализа электрических цепей в базе ортогональных преобразований с действительным ядром в области трансформант / Рыбин А. И., Григоренко Е. Г., Родионова М. В. // Праці інституту

- електродинаміки НАНУ: зб. наук. праць. – 2004. – № 3(9) – С. 10–14.
12. *Рибін О. І.* Аналіз лінійних систем в області трансформант перетворення Уоша-Адамара / Рибін О. І., Ткачук А. П. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2006. – № 33. – С. 14–23.
 13. *Рибін О. І.* Аналіз лінійних систем в області кратного перетворення EIWAL / Рибін О. І., Ткачук А. П. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2006. – № 33. – С. 31–38.
 14. *Рыбин А. И.* Анализ линейных систем в области трансформант собственных частот преобразования RTF / Рыбин А. И., Ткачук А. П. // Радиотехника. – 2006. – № 11. – С. 56–63. – (Изв. выш. учеб. заведений).
 15. *Ильцова Ю. Х.* Анализ линейных систем в области преобразования RTF при не минимальных разностных уравнения / Ильцова Ю. Х., Шарпан О. Б. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2007. – № 35. – С. 23–29.
 16. *Jan J.* Metody restaurace obrazu a jejich možnosti / Jan J. // Vybrane odborné a vědecké práce VUT v Brně. Falculta electrotechnická. – 1991. – S. 7–72.
 17. *Рыбин А. И.* Алгоритм условной деконволюции в частной области / Рыбин А. И., Королёв В. Ю. // Радиотехника. – 2000. – № 4. – С. 51–55. – (Изв. выш. учеб. заведений).
 18. *Рыбин А. И.* Реставрация образов в частной области методом взвешенной фильтрации / Рыбин А. И., Королёв В. Ю. // Радиотехника. – 2001. – № 4. – С. 51–56. – (Изв. выш. учеб. заведений).
 19. *Рибін О.* Реставрація образів методом умовної деконволюції в області просторових частот / Рибін О., Ко-

рольов В. // Вісник Технічного університету Поділля. – 2000. – № 1. – С. 145–147.

Надійшла 14.10.2008
Після доробки 12.12.2008

Рыбин А. И., Наталенко С. С., Нижегородская Ю. Х.
СВОЙСТВА ПЕРЕОБРАЗОВАНИЯ RTF

Проводится сравнение точности дискретных преобразований RTF (Root domain Transfer Function) и Фурье при использовании операций дифференцирования и интегрирования. Отмечена целесообразность использования неминимальных разностных формул дифференцирования при использовании преобразования RTF.

Ключевые слова: обработка сигналов, преобразование Фурье, собственное число, дифференцирование, интегрирование.

Rybin O. I., Natalenko S. S., Nizhebetska Yu. H.
RTF TRANSFORM PROPERTIES

Precision of discrete RTF (Root domain Transfer Function) and Fourier transform is compared using the differentiation and integration operations. Expedience of using nonminimum difference formulae of differentiation in the RTF transform is stated.

Key words: signal processing, Fourier transform, eigenvalue, differentiation, integration.

УДК 519.832.4

Романюк В. В.

Канд. техн. наук, доцент Хмельницького національного університету

ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ПЕРШОГО ГРАВЦЯ В ОДНОМУ ПІДКЛАСІ НЕСТРОГО ОПУКЛИХ АНТАГОНІСТИЧНИХ ІГОР

На прикладі двох нестрого опуклих антагоністичних ігор, де другий гравець має єдину оптимальну чисту стратегію, доведено, що існує підклас нестрого опуклих антагоністичних ігор, у якому за відомим методом не можуть бути визначені оптимальні імовірності вибору істотних чистих стратегій першого гравця. Показано, що для їх визначення достатньо скористатись концепцією сідлової точки у відомому принципі оптимальності з використанням відповідної правої нерівності.

Ключові слова: антагоністична гра, опукла гра, оптимальна стратегія, оптимальна імовірність.

ВСТУП

Чимало конфліктно-керованих явищ і процесів, які виникають повсякчас у будь-якому соціумі, можуть бути наближено змодельовані у вигляді безкоаліційних, та, зокрема, антагоністичних ігор. Клас \mathcal{U} опуклих антагоністичних ігор часто використовується для моделювання процедур формування оптимальних рішень в умовах як деяких соціально-екологічних сис-

тем типу «хижак – жертва» [1, 2], так і конкурентних ринкових відносин між двома комерційними об'єктами [3, 4]. Ядро $K(x, y)$ гри класу \mathcal{U} зазвичай задається на одиничному квадраті $U = X \times Y \subset \mathbb{R}^2$, де $x \in X$ є чистою стратегією першого гравця, $y \in Y$ є чистою стратегією другого гравця, а множини $X = [0;1]$ та $Y = [0;1]$ є множинами усіх чистих стратегій першого та другого гравців відповідно. Така

орієнтація ядра гри дозволяє легко переходити до аналізу інших опуклих антагоністичних ігор [5, 6], ядра яких задаються, взагалі кажучи, на борелевих підмножинах простору \mathbb{R}^2 . Умова

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} K(x, y) \geq 0 \quad \forall x \in X, \quad \forall y \in Y, \quad (1)$$

яка визначає клас \mathcal{U} , є передумовою того, що часто в іграх такого класу другий гравець має єдину оптимальну стратегію, яка є чистою [7, 8; 9, с. 125]. Ця чиста стратегія $y_{\text{opt}} \in [0;1]$ знаходиться [9, с. 125] як аргумент зовнішнього екстремуму

$$\begin{aligned} \{y_{\text{opt}}\} &\in \arg \min_{y \in Y} \max_{x \in X} K(x, y) = \\ &= \arg \min_{y \in [0;1]} \max_{x \in [0;1]} K(x, y). \end{aligned} \quad (2)$$

Тоді, отримавши оптимальне значення гри

$$V_{\text{opt}} = \min_{y \in Y} \max_{x \in X} K(x, y) = \min_{y \in [0;1]} \max_{x \in [0;1]} K(x, y). \quad (3)$$

оптимальні стратегії першого гравця знаходяться за коренями $x_{\text{opt}}^{(1)} \in [0;1]$ та $x_{\text{opt}}^{(2)} \in [0;1]$ рівняння [9, с. 126]

$$V_{\text{opt}} = K(x, y_{\text{opt}}), \quad (4)$$

яке складається відносно змінної x .

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо [9, с. 126], що імовірність $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ обирає чисту істотну стратегію $x_{\text{opt}}^{(1)}$, як і імовірність $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$ обирає чисту істотну стратегію $x_{\text{opt}}^{(2)}$, є розв'язком рівняння [9, с. 126]

$$\begin{aligned} p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})r_1 + p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})r_2 &= \\ = p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})r_1 + [1 - p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})]r_2 &= \\ = [1 - p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})]r_1 + p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})r_2 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

складеного відносно змінної $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ або $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) = 1 - p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$, де

$$r_1 = \left. \frac{dK(x_{\text{opt}}^{(1)}, y)}{dy} \right|_{y=y_{\text{opt}}}, \quad (6)$$

$$r_2 = \left. \frac{dK(x_{\text{opt}}^{(2)}, y)}{dy} \right|_{y=y_{\text{opt}}}. \quad (7)$$

Проте у роботах [10, 11] показано, що існують ігри класу \mathcal{U} , в яких ймовірності $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) \in [0;1]$ і $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) \in [0;1]$ як корені рівняння (5) не існують. Як у таких випадках знаходити оптимальні стратегії першого гравця

$$\mathbf{X}_{\text{opt}} = \{X_{\text{opt}}, \{p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}), p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})\}\}, \quad (8)$$

де $X_{\text{opt}} = \{x_{\text{opt}}^{(1)}, x_{\text{opt}}^{(2)}\}$, на даний момент ніде не описано. Тому завданням даного дослідження є формування та доведення положень, за якими знаходяться усі оптимальні стратегії першого гравця (8) в тих іграх класу \mathcal{U} , де імовірності $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) \in [0;1]$ і $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) \in [0;1]$ неможливо визначити з рівняння (5).

ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ІМОВІРНостей ВИБОРУ ІСТОТНИХ ЧИСТИХ СТРАТЕГІЙ ПЕРШОГО ГРАВЦЯ

Спочатку розглянемо наступний приклад. Нехай поверхня

$$K(x, y) = ax^2 + bx + gx + cy + k \quad (9)$$

з ненульовими коефіцієнтами a, b, g, c та довільною сталою $k \in$ ядром антагоністичної неперервної гри, яку задамо на одиничному квадраті $U = X \times Y \subset \mathbb{R}^2$. Спробуємо розв'язати цю гру для $a > 0$, коли парабола (9) як функція від змінної x має точку глобального мінімуму, а максимум досягається на одному з кінців одиничного сегменту $X = [0;1]$. Для визначеності візьмемо також коефіцієнти $b > 0, g < 0, c < 0$. Оскільки максимум ядра (9) по змінній x залежить від знаку виразу $a + b + gy$, то покладемо ще й суму $a + b + g = 0$. Тоді нерівність $a + b + gy > 0$ виконуватиметься при $y < -\frac{a+b}{g} = 1$. Нерівність $a + b + gy < 0$ буде виконана при $y > -\frac{a+b}{g} = 1$, але оскільки у нас $y \in Y = [0;1]$, то така нерівність неможлива. Отже, максимумом ядра (9) по змінній x на одиничному сегменті $X = [0;1]$ є

$$\begin{aligned} \max_{x \in X} K(x, y) &= \max_{x \in [0;1]} K(x, y) = \\ &= \max_{x \in [0;1]} (ax^2 + bx + gx + cy + k) = \\ &= \max\{K(0, y), K(1, y)\} = \\ &= \begin{cases} K(1, y) = a + b + gy + cy + k, & y < 1; \\ K(0, y) = K(1, y) = cy + k, & y = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Очевидно, що мінімум прямої (10) на одиничному сегменті $Y = [0;1]$ є значенням гри (3):

$$\begin{aligned} \min_{y \in Y} \max_{x \in X} K(x, y) &= \min_{y \in [0;1]} \max_{x \in [0;1]} K(x, y) = \\ &= \min \left\{ \inf_{y \in [0;1]} (a + b + gy + cy + k), \min_{y \in \{1\}} (cy + k) \right\} = \\ &= \min\{K(1, 1), K(0, 1)\} = \\ &= K(1, 1) = K(0, 1) = c + k = V_{\text{opt}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Мінімум (11) при цьому досягається у єдиній оптимальній стратегії $y_{\text{opt}} = 1$ другого гравця.

Коренями відповідного рівняння (4)

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= c + k = K(1, 1) = K(0, 1) = \\ &= ax^2 + bx + gx + c + k = \\ &= x(ax + b + g) + c + k = x(ax - a) + c + k = \\ &= K(x, 1) = K(x, y_{\text{opt}}) \end{aligned} \quad (12)$$

є $x_{\text{opt}}^{(1)} = 0$ та $x_{\text{opt}}^{(2)} = 1$. Далі знаходимо значення (6) і (7):

$$\begin{aligned} r_1 &= \left. \frac{dK(x_{\text{opt}}^{(1)}, y)}{dy} \right|_{y=y_{\text{opt}}} = \left. \frac{dK(0, y)}{dy} \right|_{y=1} = \\ &= \left. \frac{d(cy + k)}{dy} \right|_{y=1} = c, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} r_2 &= \left. \frac{dK(x_{\text{opt}}^{(2)}, y)}{dy} \right|_{y=y_{\text{opt}}} = \left. \frac{dK(1, y)}{dy} \right|_{y=1} = \\ &= \left. \frac{d(a + b + gy + cy + k)}{dy} \right|_{y=1} = g + c. \end{aligned} \quad (14)$$

Тоді рівняння (5) відносно, скажімо, імовірності $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) = p_{\text{opt}}(0)$ набуває вигляду

$$\begin{aligned} p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})r_1 + p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})r_2 &= \\ p_{\text{opt}}(0) \cdot c + p_{\text{opt}}(1) \cdot (g + c) &= \\ = p_{\text{opt}}(0) \cdot c + [1 - p_{\text{opt}}(0)] \cdot (g + c) &= \\ = g + c - p_{\text{opt}}(0) \cdot g = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

З останньої рівності у виразі (15) отримуємо

$$p_{\text{opt}}(0) = \frac{g + c}{g}. \quad (16)$$

Але за вихідних умов щодо коефіцієнтів $g < 0$ та $c < 0$ виходить, що число $\frac{g + c}{g} > 1$, тобто $p_{\text{opt}}(0) > 1$ й імовірність $p_{\text{opt}}(0)$ слід вважати такою, що не визначається з рівняння (15). Зрозуміло, що й імовірність $p_{\text{opt}}(1)$ тут також не визначається з відповідного рівняння (5), так як

$$p_{\text{opt}}(1) = 1 - p_{\text{opt}}(0) = 1 - \frac{g + c}{g} = -\frac{c}{g} < 0. \quad (17)$$

Множину тих ігор класу \mathcal{U} , в яких корені $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ і $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$ рівняння (5) не належать одиничному сегменту $[0; 1]$, тобто не можуть бути імовірностями, об'єднаємо у клас \mathcal{P} . Зауважимо, що, звичайно ж, сюди увійдуть не тільки ігри з ядрами у класі параболічних поверхонь, які просто більш зручні для демонстрації прикладів, а й усі ті опуклі антагоністичні ігри, для яких корінь $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ рівняння (5) не буде імовірністю. Таким чином, в іграх

підкласу $\mathcal{P} \subset \mathcal{U}$ за стандартною схемою знаходження [5; 9, с. 126; 12; 13] сідлових точок $\langle X_{\text{opt}}, Y_{\text{opt}} \rangle$ з використанням співвідношень (2)–(7) неможливо визначити жодну оптимальну стратегію першого гравця (8).

Для того, щоб зрозуміти, як знаходити імовірності для оптимальної стратегії першого гравця (8) в іграх підкласу $\mathcal{P} \subset \mathcal{U}$, достатньо згадати означення рівноважної ситуації $\langle x_{\text{opt}}, y_{\text{opt}} \rangle$ у чистих стратегіях [9, с. 32–34], де $x_{\text{opt}} \in X$: ситуація $\langle x_{\text{opt}}, y_{\text{opt}} \rangle$ називається рівноважною або сідловою точкою, якщо $\forall x \in X$ та $\forall y \in Y$ виконується подвійна нерівність

$$K(x, y_{\text{opt}}) \leq K(x_{\text{opt}}, y_{\text{opt}}) \leq K(x_{\text{opt}}, y). \quad (18)$$

На цій основі ситуацію $\langle X_{\text{opt}}, Y_{\text{opt}} \rangle$ називають рівноважною [9, с. 98; 11, с. 85], якщо $\forall x^{(1)} \in X$ та $\forall x^{(2)} \in X$ при $x^{(1)} \neq x^{(2)}$, $\forall y \in Y$, $\forall p(x^{(1)}) \in [0; 1]$ та $\forall p(x^{(2)}) \in [0; 1]$ при $p(x^{(1)}) + p(x^{(2)}) = 1$, де $p(x)$ є імовірністю обирання чистої стратегії x , виконана подвійна нерівність [9, с. 98; 11, с. 85; 14, с. 172]

$$\begin{aligned} K(x^{(1)}, y_{\text{opt}})p(x^{(1)}) + K(x^{(2)}, y_{\text{opt}})p(x^{(2)}) &\leq \\ \leq V_{\text{opt}} = K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) &\leq \\ \leq K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y)p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y)p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) &. \end{aligned} \quad (19)$$

З подвійної нерівності (19) випливає, що, знаючи V_{opt} та y_{opt} , імовірності $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ і $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$ можна визначити з відповідної правої нерівності

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) \leq \\ &\leq K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y)p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y)p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) = \\ &= K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y)p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y)[1 - p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})] = \\ &= K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y)[1 - p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})] + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y)p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) \end{aligned} \quad (20)$$

Повернемося до поданого прикладу гри класу \mathcal{P} з ядром (9) за умов $a > 0$, $b > 0$, $a + b + g = 0$ та $c < 0$. Маємо нерівність (20) відносно імовірності $p_{\text{opt}}(0)$:

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= c + k = K(0, 1)p_{\text{opt}}(0) + K(1, 1)p_{\text{opt}}(1) \leq \\ &\leq K(0, y)p_{\text{opt}}(0) + K(1, y)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= (cy + k)p_{\text{opt}}(0) + (a + b + gy + cy + k)[1 - p_{\text{opt}}(0)] = \\ &= (cy + k)p_{\text{opt}}(0) - (cy + k)p_{\text{opt}}(0) + \\ &+ a + b + gy + cy + k - (a + b + gy)p_{\text{opt}}(0) = \\ &= gy - g + cy + k - (gy - g)p_{\text{opt}}(0), \end{aligned} \quad (21)$$

звідки, перенісши імовірність $p_{\text{opt}}(0)$ у ліву частину, дістаємо

$$\begin{aligned} (gy - g)p_{\text{opt}}(0) &= g(y - 1)p_{\text{opt}}(0) \leq gy - g + cy - c = \\ &= g(y - 1) + c(y - 1) = (g + c)(y - 1). \end{aligned} \quad (22)$$

При $y \neq 1$, тобто при $y \neq y_{\text{opt}}$, з урахуванням співвідношення $g(y-1) > 0$ з нерівності (22) випливає, що

$$p_{\text{opt}}(0) \leq \frac{(g+c)(y-1)}{g(y-1)} = \frac{g+c}{g}. \quad (23)$$

При $y = y_{\text{opt}} = 1$ матимемо

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= K(0, 1)p_{\text{opt}}(0) + K(1, 1)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= (c+k)p_{\text{opt}}(0) + (c+k)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= (c+k)[p_{\text{opt}}(0) + p_{\text{opt}}(1)] = c+k, \end{aligned} \quad (24)$$

що виключає залежність оптимального значення гри від $p_{\text{opt}}(0)$ чи $p_{\text{opt}}(1)$. Тому, оскільки число $\frac{g+c}{g} > 1$, із нерівності (23) остаточно отримуємо імовірність

$$p_{\text{opt}}(0) \in [0; 1]. \quad (25)$$

Тут уже неважко показати, що у розглянутій грі імовірність $p_{\text{opt}}(1)$ теж є довільною. Звичайно, можна використати те, що $p_{\text{opt}}(1) = 1 - p_{\text{opt}}(0)$, або ж, діючи з початку,

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= c+k \leq K(0, y)p_{\text{opt}}(0) + K(1, y)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= (cy+k)[1-p_{\text{opt}}(1)] + (a+b+gy+cy+k)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= cy+k + (gy-g)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= cy+k + g(y-1)p_{\text{opt}}(1), \end{aligned} \quad (26)$$

$$c-cy = -c(y-1) \leq g(y-1)p_{\text{opt}}(1), \quad (27)$$

$$p_{\text{opt}}(1) \geq \frac{-c(y-1)}{g(y-1)} = \frac{-c}{g}, \quad (28)$$

звідки з урахуванням нерівності $-\frac{c}{g} < 0$ та (24) отримується імовірність

$$p_{\text{opt}}(1) \in [0; 1]. \quad (29)$$

Підсумком усього вищезазначеного є твердження про те, що в іграх класу \mathcal{P} оптимальні стратегії першого гравця (8) при відомій множині $X_{\text{opt}} = \{x_{\text{opt}}^{(1)}, x_{\text{opt}}^{(2)}\}$ складаються з тієї множини \mathcal{A} розв'язків нерівності (20) відносно імовірності $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ або $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$, яка задовольняє рівності

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) = \\ &= K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y_{\text{opt}})[1-p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})] = \\ &= K(x_{\text{opt}}^{(1)}, y_{\text{opt}})[1-p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})] + \\ &\quad + K(x_{\text{opt}}^{(2)}, y_{\text{opt}})p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}). \end{aligned} \quad (30)$$

Розглянемо ще такий граничний приклад з ядром (9). Нехай все ще коефіцієнт $a > 0$, але коефіцієнти $b < 0$, $g > 0$, $c > 0$, причому $a+b=0$. Тоді нерів-

ність $a+b+gy > 0$ виконується при $y > 0$, і максимум ядра (9) по змінній x на одиничному сегменті $X = [0; 1]$

$$\begin{aligned} \max_{x \in X} K(x, y) &= \max_{x \in [0; 1]} K(x, y) = \\ &= \max_{x \in [0; 1]} (ax^2 + bx + gxy + cy + k) = \\ &= \max\{K(0, y), K(1, y)\} = \\ &= \begin{cases} K(0, y) = K(1, y) = cy + k, & y = 0; \\ K(1, y) = gy + cy + k, & y > 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

Мінімум прямої (31) на одиничному сегменті $Y = [0; 1]$

$$\begin{aligned} \min_{y \in Y} \max_{x \in X} K(x, y) &= \min_{y \in [0; 1]} \max_{x \in [0; 1]} K(x, y) = \\ &= \min \left\{ \min_{y \in \{0\}} (cy + k), \inf_{y \in (0; 1]} (a + b + gy + cy + k) \right\} = \\ &= \min\{K(1, 0), K(0, 0)\} = \\ &= K(1, 0) = K(0, 0) = k = V_{\text{opt}} \end{aligned} \quad (32)$$

досягається у єдиній оптимальній стратегії $y_{\text{opt}} = 0$ другого гравця. Коренями відповідного рівняння (4)

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= k = K(0, 0) = ax^2 + bx + k = \\ &= x(ax + b) + k = x(ax - a) + k = \\ &= K(x, 0) = K(x, y_{\text{opt}}) \end{aligned} \quad (33)$$

є $x_{\text{opt}}^{(1)} = 0$ та $x_{\text{opt}}^{(2)} = 1$. Оскільки значення (6) і (7) залишаються рівними (13) та (14) відповідно, то і тут із відповідного рівняння (15) отримуємо значення (16) та (17), які не є імовірностями. Тому така гра належить класу \mathcal{P} .

Знаходимо множину \mathcal{A} розв'язків нерівності (20) відносно імовірності $p_{\text{opt}}(0)$:

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= k = K(0, 0)p_{\text{opt}}(0) + K(1, 0)p_{\text{opt}}(1) \leq \\ &\leq K(0, y)p_{\text{opt}}(0) + K(1, y)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= (cy+k)p_{\text{opt}}(0) + (gy+cy+k)[1-p_{\text{opt}}(0)] = \\ &= (cy+k)p_{\text{opt}}(0) - (cy+k)p_{\text{opt}}(0) + \\ &\quad + gy+cy+k - gyp_{\text{opt}}(0) = \\ &= gy+cy+k - gyp_{\text{opt}}(0), \end{aligned} \quad (34)$$

$$gyp_{\text{opt}}(0) \leq (g+c)y. \quad (35)$$

При $y \neq y_{\text{opt}} = 0$ з урахуванням співвідношення $gy > 0$ з нерівності (35) випливає, що

$$p_{\text{opt}}(0) \leq \frac{(g+c)y}{gy} = \frac{g+c}{g}. \quad (36)$$

При $y = y_{\text{opt}} = 0$ матимемо

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}} &= K(0, 0)p_{\text{opt}}(0) + K(1, 0)p_{\text{opt}}(1) = \\ &= kp_{\text{opt}}(0) + (a+b+k)p_{\text{opt}}(1) = kp_{\text{opt}}(0) + kp_{\text{opt}}(1) = \\ &= k[p_{\text{opt}}(0) + p_{\text{opt}}(1)] = k, \end{aligned} \quad (37)$$

тобто множина (36) розв'язків нерівності (20) задовольняє рівності (30). Тому остаточно після (31)–(37) отримуємо імовірність (25) та, що очевидно, імовірність (29) для оптимальної стратегії першого гравця (8) у цій грі.

Таким чином, принцип визначення оптимальних імовірностей вибору істотних чистих стратегій першого гравця в іграх класу \mathcal{P} полягає не у розв'язуванні рівняння (5), а у розв'язуванні нерівності (20) відносно змінної $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ або $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$ з урахуванням співвідношення $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}) + p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)}) = 1$. Далі необхідно кожен елемент множини розв'язків нерівності (20) перевірити на те, чи він задовольняє рівності (30). Якщо так, то цей елемент і буде шуканою імовірністю вибору відповідної істотної чистої стратегії першого гравця, а сукупність усіх таких елементів \mathcal{A} фактично складатиме множину усіх оптимальних імовірнісних мір $\{p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)}), p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})\}$ в оптимальній стратегії (8).

ВИСНОВОК

Як показано прикладами двох опуклих антагоністичних ігор класу \mathcal{U} , який визначається на основі нерівності (1), існує підклас $\mathcal{P} \subset \mathcal{U}$ цих ігор, де корені рівняння (5) $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ і $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$ як імовірності не існують. Тому ігри класу \mathcal{P} слід розв'язувати не з використанням рівняння (5) зі значеннями (6) і (7), а з використанням основи принципу оптимальності теорії антагоністичних ігор, який виражається у концепції сідлових точок за допомогою подвійної нерівності (18) або, точніше, подвійної нерівності (19). При цьому імовірності $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(1)})$ та $p_{\text{opt}}(x_{\text{opt}}^{(2)})$ для оптимальних стратегій першого гравця (8) при відомій множині $X_{\text{opt}} = \{x_{\text{opt}}^{(1)}, x_{\text{opt}}^{(2)}\}$ знаходяться з тієї множини \mathcal{A} розв'язків нерівності (20), яка задовольняє рівності (30). Практичне значення запропонованого принципу визначення оптимальних стратегій першого гравця у відповідних нестрого опуклих антагоністичних іграх полягає у тому, що знайдена за цим принципом множина оптимальних ситуацій у грі є повною, а це розкриває більші можливості перед першим гравцем у його діях щодо зрівноваження чистої оптимальної стратегії другого гравця. Тоді і вирішення відповідних конфліктних явищ та процесів, які описуватимуться за допомогою розглянутого підкласу нестрого опуклих антагоністичних ігор, буде більш логічним, справедливим і раціональним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kumkov S. I.* Optimal strategies in a differential game with incomplete information / S. I. Kumkov, V. S. Patsko // Tr. Inst. Mat. Mekh. – 1995. – No. 3. – P. 104–131.
2. *Savinov V. B.* A differential pursuit game with one pursuer and several evaders / V. B. Savinov // Tr. Inst. Mat. Mekh. – 1995. – No. 3. – P. 147–171.
3. *Romanuke V. V.* Convex game on the unit square with the payoff function that is the second power of the weighted strategies difference / V. V. Romanuke // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 1(11). – С. 14–18.
4. *Romanuke V. V.* The nine solution forms of a continuous strictly convex-concave antagonistic game / V. V. Romanuke // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2008. – № 5, т. 3. – С. 30–37.
5. *Пинелис И. Ф.* Критерии полной определенности для вогнуто-выпуклых игр / И. Ф. Пинелис // Матем. заметки. – 1991. – № 49:3. – С. 73–76.
6. *Мащенко С. О.* Локальні умови слабкої індивідуальної оптимальності рівноваг / С. О. Мащенко // Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки. – 2008. – № 1. – С. 127–136.
7. *Романюк В. В.* Розв'язки однієї строго випуклої гри на одиничному квадраті з добутком чистих стратегій / В. В. Романюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 2. – С. 174–179.
8. *Романюк В. В.* Загальні розв'язки трьох нескінченних антагоністичних строго випуклих ігор / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2008. – № 3, т. 3. – С. 158–165.
9. *Воробьев Н. Н.* Теория игр для экономистов-кибернетиков / Воробьев Н. Н. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 272 с.
10. *Романюк В. В.* Представления одинадцяти випадків загального розв'язку однієї нестрого випуклої гри / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 4. – С. 184–191.
11. *Романюк В. В.* Загальні розв'язки однієї неперервної антагоністичної гри / В. В. Романюк // Науково-теоретичний журнал Хмельницького економічного університету «Наука й економіка». – 2007. – Випуск 4 (8). – С. 73–100.
12. *Romanuke V. V.* The convex game on the unit square with the kernel, that is the sum of the weighted strategies and their weighted product / V. V. Romanuke // Математическое моделирование, обратные задачи, информационно-вычислительные технологии: сборник статей VII Международной научно-технической конференции. Ч. II. – Пенза: РИО ПГСХА, 2007. – С. 73–77.
13. *Романюк В. В.* До питання загального розв'язку однієї нескінченної антагоністичної гри / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – № 2. – С. 34–38.
14. *Романюк В. В.* Чотири опорних співвідношення для чотирьох видів розв'язку однієї строго випуклої неперервної антагоністичної гри / В. В. Романюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 169–174.

Надійшла 16.01.2009
Після доробки 17.07.2009

Романюк В. В.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ ПЕРВОГО ИГРОКА В ОДНОМ ПОДКЛАСЕ НЕСТРОГО ВЫПУКЛЫХ АНТАГОНИСТИЧЕСКИХ ИГР

На примере двух нестрого выпуклых антагонистических игр, где второй игрок имеет единственную оптимальную чистую стратегию, доказано, что существует подкласс нестрого выпуклых антагонистических игр, в котором известным методом не могут быть определены оптимальные вероятности выбора существенных чистых стратегий пер-

вого гравця. Показано, що для їх визначення достатньо використати концепцію седлової точки в відомому принципі оптимальності з використанням відповідного правого нерівності.

Ключевые слова: антагоністическа гра, випукла гра, оптимальна стратегія, оптимальна ймовірність.

Romanuke V. V.

METHOD OF DETERMINATION OF THE FIRST PLAYER OPTIMAL STRATEGIES IN A SUBCLASS OF THE NONSTRICTLY CONVEX ANTAGONISTIC GAMES

By the example of two nonstrictly convex antagonistic games, where the second player has the single optimal pure strategy, it has been asserted, that there exists a subclass of nonstrictly convex antagonistic games, in which by the known method there cannot be determined the optimal probabilities of selecting the essential pure strategies of the first player. It has been demonstrated that to determine them, it is sufficient to employ the saddle point concept in the known optimality principle by applying the corresponding right-side inequality.

Key words: antagonistic game, convex game, optimal strategy, optimal probability.

УДК 51.001.57+004.652.4+004.827

Шаховська Н. Б.

Канд. техн. наук, доцент Національного університету «Львівська політехніка»

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОСТОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГЕБРАІЧНОЇ СИСТЕМИ

Проаналізовано проблеми опрацювання розрізнених даних. Побудовано формальну модель простору даних та уведено операції над ним.

Ключові слова: простір даних, сховище даних, база даних, алгебраїчна система, пошук даних, групування даних, інтелектуальний агент, джерело даних.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ В ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

У різних галузях науки спостерігається експоненційний ріст обсягів експериментальних даних. Складність використання таких даних виникає внаслідок їхньої природної різноманітності (зберігання у різних системах, призначення для різних задач, різні методи опрацювання та зберігання тощо). Розрив, який збільшується між джерелами даних і сервісами, приводить до необхідності пошуку нових шляхів організації рішення задач над множинними розподіленими колекціями даних і програм, які концентруються в спеціалізованих центрах даних і обчислювальних ресурсах.

Традиційно при рішенні певних задач фахівці використовують звичні для них джерела інформації і формують завдання з огляду на лише на такі джерела. Очевидна неповнота інформації, яку вдається охопити при такому підході. Безліч джерел даних і сервісів, що існують в Інтернеті, їхня розмаїтість викликають потребу в радикальній зміні такого традиційного підходу. Сутність цієї зміни полягає в тому, що задачі повинні формуватися незалежно від існуючих джерел інформації, і лише після такого формулювання повинна здійснюватися ідентифікація релевантних завданню джерел, приведення їх до

виду, необхідного для розв'язання задачі, інтеграція, ідентифікація сервісів, які дозволяють реалізувати окремі частини абстрактного процесу рішення завдання.

Для прийняття адекватних рішень у певній галузі необхідно, щоб дані, які надходять із різних джерел і використовуються для прийняття керівних рішень, задовольняли такі вимоги:

- були повними, несуперечливими та надходили вчасно;
- були інформативними, оскільки вони застосовуватимуться для прийняття рішень;
- були однакової структури, щоб мати можливість завантажити їх у єдине сховище даних та проаналізувати;
- зберігалися в однакових моделях даних та були незалежними від платформи розроблення, щоб мати можливість використання цих даних іншими засобами.

Сьогодні найгостріші проблеми керування інформацією виникають в організаціях (наприклад, готелів, баз відпочинку, оздоровчих закладів, туристичних агентств), робота яких полягає в опрацюванні великої кількості різноманітних, взаємозалежних джерел даних. Такий тип системи отримав назву *простір даних*. На відміну від систем інтеграції даних, що також пропонують загальноприйнятний доступ до різ-

норідних джерел даних, простори даних не припускають, що всі семантичні взаємозв'язки між джерелами відомі і вказані. Багато користувачів, які працюють з просторами даних, проводять дослідження даних, і немає єдиної схеми, за якою вони можуть створювати запити.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні немає жодної методики опрацювання даних, яка б задовольняла всі наведені вимоги до опрацювання даних, а отже, немає можливості аналізувати стан галузі загалом, використовуючи першоджерела інформації, а не визначені наперед статистичні звіти [1, 2]. Розроблені методи інтеграції даних спираються на джерела даних із наперед визначеними структурами, які мають відомі механізми погодження [3, 4], що є неприпустимим у разі прийняття керівного рішення по усій предметній області.

Простір даних розглядають як нову абстракцію керування даними [4]. Основоположником ідеї просторів даних був Алон Хелеві. Ведуться два проекти, орієнтовані на підтримку просторів індивідуальних даних. Перший з них – проект SEMEX (SEMantic Explorer) [5, 6] – виконується в University of Washington під керівництвом Хелеві. Другий, з назвою iMeMex [7], виконується під керівництвом Йенса-Петера Диттриха в ETH Zurich. Проте, судячи з аналізу інтернет-джерел, жоден з проектів ще не формалізував поняття простору даних, що, у свою чергу, призводить до розрізненості підходів роботи з ними.

Важливим елементом інтеграції є сумісне використання структурованих, частково структурованих та неструктурованих джерел інформації. Як показано у [7], наразі проблема пошуку неструктурованої інформації вирішується лише в окремих областях, для яких побудована онтологія.

Отже, метою статті є формалізація поняття простору даних та визначення операцій над ним, а також розроблення методів інтеграції неоднорідної інформації. Для цього розглянемо основні елементи простору даних, формалізуємо методи взаємодії між ними та розробимо методи автоматичного визначення структур даних джерела.

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОСТОРУ ДАНИХ

1. Подання простору даних як алгебраїчної системи

Як відомо [8], алгебраїчною системою $\langle AI; WF; WR \rangle$ називається об'єкт, що складається з трьох множин: непорожньої множини AI , множини операцій алгебри WF , визначених на AI , і множини відношень (предикатів) WR , визначених на AI :

$$A = \langle AI, WF, WR \rangle. \quad (1)$$

Дослідження в області моделей даних інформаційних систем [3, 4] показують, що на сьогодні центральним стало поняття типу даних. З цим зв'язані як проблематика створення нових мов програмування, так і впровадження сучасних технологій організації даних, зокрема і просторів даних.

Будь-який інформаційний простір E доцільно подати у вигляді абстрактної алгебраїчної системи (1), де AI – об'єкти інформаційного простору; WR – зв'язки між об'єктами AI ; WF – операції маніпулювання об'єктами у просторі. Як об'єкти моделі (1) можуть виступати компоненти інтелектуальної системи – файли всіх типів, каталоги, логічні і фізичні диски.

Відношення $WR = \{WR_1, \dots, WR_n\}$ між об'єктами інформаційного простору визначає конкретну конфігурацію інтелектуальної системи, орієнтовану на конкретного користувача чи користувачів, $G = \{G_1, \dots, G_n\}$ – множина користувачів. Модель взаємодії користувача з інформаційним простором можна подати у вигляді:

$$Y(t) = E(Z_1(t), \dots, Z_n(t)),$$

де $Z_i(t)$ – вхідний вплив на інформаційний простір з боку користувача $G_i \in G$; $Y(t)$ – реакція системи (відповідь), що сконфігурована під користувача і має вигляд E . У загальному випадку $Z_i(t)$ – елементарна задача, що користувач G_n вирішує за допомогою інформаційного простору $E(AI, WR, WF)$. Прикладами елементарних задач є: пошук інформації (за зразком, за індексом, за описом, за методом найближчого сусіда тощо), інтеграція даних (консолідація, федералізація, розповсюдження), агрегація тощо [9].

У загальному випадку кожна із елементарних задач вирішується на певному носії даних AI_j , $j = 1, \dots, n$, з використанням певних операцій маніпулювання WF_j , ефективність виконання яких для задачі $Z_i(t)$ залежить від типу носія. Користувач не знає наперед, з яким саме носієм йому потрібно працювати, та дозволені операції над цим носієм. Тому визначення типу елементарної задачі відбувається за допомогою множини відношень WR .

Множина відношень WR здійснює структурування знань про носій інформаційного простору та допустимі операції над ним.

Визначимо правила структуризації даних довільної предметної області:

- факторизація множини об'єктів інформаційного простору AI за відношенням еквівалентності [3];
- конструювання додаткових функцій Id , Num , $Selector$:

$Id(x)$ – функція задає для кожного об'єкту додатковий атрибут – його індивідуальний ідентифікатор;

$Num(x)$ – функція задає для кожного об'єкту додатковий атрибут – його порядковий номер в класі еквівалентності X_i , де $i = 1, \dots, p$. Областю значення функції Num є множина натуральних чисел;

$Selector(x)$ – функція задає для кожного об'єкту додатковий атрибут – його подання. Областю значень для цієї функції є деякий кортеж з атрибутів об'єкту, тобто значень функцій $Id(x)$, $Num(x)$, $f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_k(x)$;

- побудова інвертованих індексів [4];
- побудова багатовимірних матриць (використання алгебри кортежів).

Оскільки інструмент моделювання баз даних повинен з потреби включати не лише засоби структуризації даних, але і операційні можливості для маніпулювання даними, модель даних в інструментальному сенсі розуміється як алгебраїчна система.

Основними моделями для побудови інформаційних систем є бази даних, сховища даних, простори даних.

Подамо кожен із зазначених об'єктів як алгебраїчну систему.

2. Побудова ієрархії об'єктів носіїв простору даних

Отже, реляційна база даних – це алгебраїчна система, у якій носієм є множина реляційних відношень r , множиною операцій – реляційна алгебра \mathfrak{R} , множиною предикатів – словник даних (схема даних бази даних) R .

$$DB = \langle r, \mathfrak{R}, R \rangle, \mathfrak{R} = \{\pi, \sigma, \bowtie, \cup, \cap, -\}. \quad (2)$$

Тепер дамо формальне означення сховища даних.

Сховищем даних (СД) назовемо шістьку

$$DW = \langle DB, rf, RF, rm, RM, func \rangle,$$

де DB – множина вхідних баз даних (реляційних, багатовимірних, об'єктно-орієнтованих, ненормалізованих тощо) (або множина відношень, їх схем та обмежень цілісності, які містять інформацію з вхідних баз даних), rf – множина відношень фактів, RF – схема rf , rm – множина відношень метаданих, RM – схема rm , $func$ – множина процедур прийняття рішень.

Метадані – дані, що містять опис структури сховища даних, джерел та приймачів даних тощо (дані про дані). Тоді *нові дані* (або *рішення*) – це результат застосування функцій сховища даних над відношенням фактів:

$$Design = func(rf, user_param),$$

де $user_param$ – множина параметрів користувача, або вимог, які ставляться до рішення.

Відношення між вимірами – відношення, яке є зв'язком між певними вимірами та відношенням фактів:

$$V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \times rf \rightarrow rel.$$

У відношенні фактів виміри подаються за допомогою зовнішніх ключів, а самі значення – за допомогою атрибутів агрегації. У свою чергу, rel можуть бути параметрами для інших відношень між вимірами і тим самим створювати ієрархію вимірів.

Над даними сховища даних виконуються такі операції:

1. *Інтеграція даних* – це об'єднання даних, які знаходяться у різних системах (базах даних). Існують такі методи інтеграції:

– консолідація даних – це збір даних з територіально віддалених або різноплатформених джерел DB_i даних в єдине сховище даних DW з метою їх подальшого опрацювання та аналізу.

$$DW.rel \xrightarrow{consolid} DB_{1,r} \cup \dots \cup DB_{n,r}.$$

– операція *федералізації даних* полягає у витяганні даних з первинних систем на підставі зовнішніх вимог. Всі необхідні перетворення даних здійснюються при їх витяганні з первинних файлів.

$$\begin{aligned} \text{Virtual.DW} : \sigma_{fed\ rm = DB_{1,r}}(DB_{1,r}) \cup \dots \cup \\ \cup \sigma_{fed\ rm = DB_{n,r}}(DB_{n,r}). \end{aligned}$$

2. *Агрегація даних* – це обчислення узагальнених значень на основі даних відношень вимірів для підтримки стратегічного або тактичного керування з детальних даних.

$$rel = Ag(DB_{1,r}, \dots, DB_{n,r}).$$

Опишемо сховище даних як алгебраїчну систему.

Оскільки воно інтегрує інформацію з баз даних, а інтегровані значення містяться у відношенні фактів, то звідси випливає, що сховище даних – це алгебраїчна система виду

$$\begin{aligned} DW = \langle DW, \mathfrak{R}, rm \rangle, DW = \{rel, DB_{1,r}, \dots, DB_{n,r}\}, \\ \mathfrak{R} = \{\mathfrak{R}, \xrightarrow{consolid} \sigma_{fed}, Ag, func\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Отже, алгебраїчна система класу реляційна БД є підсистемою алгебраїчної системи класу сховище даних.

Тепер дамо формальне означення простору даних.

Простір даних DS – це множина даних, поданих у різних моделях (баз даних DB , сховищ даних DW , статичних Web-сторінок Wb , неструктурованих даних Nd , графічних та мультимедійних даних Gr), ло-

кальних сховищ та **ODW**, а також засобів інтеграції **Int**, пошуку **Se** та опрацювання інформації **Wo**, об'єднаних середовищем керування моделями **EM** [10, 11].

$$DS = \langle DB, DW, ODW, Wb, Nd, Gr, Int, Se, Wo, EM \rangle. \quad (4)$$

Каталог **CG** – це реєстр ресурсів даних, що містить найбільш базову інформацію про кожного з них: джерело, ім'я, місцезнаходження в джерелі, розмір, дату створення і власника та ін. Каталог є інфраструктурою для більшості інших сервісів простору даних, але він також може підтримувати базовий, призначений для користувача, інтерфейс перегляду простору даних.

Для організації роботи з розрізненими джерелами використовуються словник термінів та понять (ключових слів) *Dic*, який містить синонімічний опис одного і того ж концепту у різних джерелах даних. Заповнення словника даних на початку здійснюється за допомогою розробленої онтології предметної області, пізніше – автоматизовано.

$$\text{Metadata}(DB, DW, Wb, Nd, Gr, ODW) \cup \cup Dic \Rightarrow Cg. \quad (5)$$

Для подання простору даних як алгебраїчної системи необхідною умовою є уніфікація джерел даних, оскільки саме вони є носіями (об'єктами, над якими виконуються операції та відношення алгебраїчної системи). Уніфікація сховищ даних та баз даних здійснюється за допомогою інтелектуального агента (подано нижче). Проте, як видно із визначення простору даних (4), джерелами його інформації є також неструктурований текст та веб-сайти. Для ефективного пошуку та аналізу неструктурованої текстової інформації використаємо семантичну мережу.

Семантична мережа – це структура для подання знань у вигляді вузлів, з'єднаних дугами. Особливості структури семантичних мереж:

1) вузли семантичних мереж являють собою концепти предметів, подій, станів, які у свою чергу визначаються із словника *Dic*;

2) довільні вузли одного концепту відносяться до різних значень, якщо вони не відмічені як такі, що відносяться до одного концепту;

3) дуги семантичних мереж створюють відношення між вузлами-концептами (помітки над дугами вказуватимуть на тип відношення).

Визначимо семантичну мережу неструктурованого джерела інформації *Q* як двійку

$$Q = \{V, D\},$$

де $V = \{v_i\}$ – множина вершин (вузлів мережі), $V \in Dic$, $D = \{d_j\}$ – множина дуг.

Дуги між елементами визначають взаємозв'язки між вершинами і задають послідовність пошуку концептів (їх важливість). Вершини є елементами локального сховища даних **ODW**.

Для опису веб-ресурсів використовують поняття семантичної павутини, функції та структура якої співмірні з семантичною мережею. Для створення зрозумілого комп'ютеру опису ресурсу в семантичній павутині використовується формат RDF. Оскільки джерелами даних простору даних є веб-ресурси, то для *Dic* використовуватимемо формат RDF. Пошук у такій мережі здійснюватиметься за допомогою ключових слів.

Побудуємо функцію трансформації неструктурованого тексту та веб-сайтів у вигляді семантичної мережі:

$\text{SemNet}(Wb) \rightarrow ODW$ – для веб-ресурсів,

$\text{SemNet}(Nd) \rightarrow ODW$ – для текстових даних.

Подання неструктурованих даних у вигляді семантичної мережі із збереженням вершин та відношень між ними у локальному сховищі **ODW** дозволяє звести інформацію з неоднорідних джерел даних до баз даних та сховищ даних, що, у свою чергу, при визначенні та уніфікації їхніх структур даних дасть можливість здійснювати інтеграцію, пошук та агрегування даних.

3. Агент визначення структури джерела

Визначення структур даних джерел просторів даних здійснюється за допомогою інтелектуального агента

$$EM(CG) \xrightarrow{Agent} ODW. \quad (6)$$

Агент *Op* подається сімкою об'єктів [11]:

$$Agent = \langle CG, EM, Dic, Experience_Base, Solver, Effector \rangle, \quad (7)$$

де **CG** – ідентифікатор внутрішнього стану агента (інформація про джерела, що вже є у ПД); **EM** – компонента агента, що відповідає за сприйняття середовища (сенсор), тобто середовище керування моделями; *Dic* – база знань, що містить знання агента про власні можливості (терміни-синоніми, що позначають у джерелах одні і ті ж властивості); *Experience_Base* – база накопиченого досвіду агента, що містить «історію» впливів на агент з боку середовища й відповідної їм реакції агента ($Experience_Base = \sigma_{evdate = Date()}(Dic)$); *Solver* – компонента, що відповідає за навчання (подає список розбіжностей,

які виявив агент); *Effector* – компонента, яка відповідає за дії агента (формування запиту по декількох джерелах, приведення результатів запитів по джерелах до єдиної структури, відмова у запиті).

В основі роботи агента лежить інформація про джерела, які вже є у просторі. Його задачею є порівняння структур даних джерела даних, що входить у простір, з структурами даних джерел, що вже є у просторі, та визначення різниці. Це дозволить автоматизувати формування запитів, що виконуватимуться у просторі даних. Чим більше джерел здатний «розрізнити» агент, тим точніше буде інформація в **ODW** і тим ефективніше можна буде проводити процедури інтеграції, пошуку та опрацювання даних у просторі даних **DS**.

Розглянемо принцип роботи агента порівняння інформації із двох схем даних для тих самих фізичних сутностей. При цьому допускається, що схеми мають різні системи кодування, тобто той самий об'єкт може мати в цих схемах різні ідентифікатори. Допускається, що назви таблиць, атрибутів і розподіл атрибутів у таблицях можуть розрізнятися. Але передбачається, що між схемами існують взаємозв'язки, які можуть бути задані експертами (словник *Dic*). Необхідно класифікувати типи можливих взаємозв'язків і знайти необхідні умови для інтеграції даних на основі цих взаємозв'язків.

Нехай деяка сутність описується в першій схемі даних відношенням *A*, що містить кортежі $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а в другій схемі даних відношенням *B*, що містить кортежі $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$. Відношення *A* і *B* можуть бути як окремими таблицями в реляційній схемі даних, так і переглядами. Запишемо формально умову, що *A* і *B* містять ті самі фізичні сутності. Будемо вважати, що в цьому випадку існують взаємозв'язки між окремими атрибутами x_i й y_j . Розглянемо різні типи таких взаємозв'язків між двома скалярними атрибутами x і y , визначеними на скінчених доменах X і Y відповідно.

1. Змістовний взаємозв'язок доменів. Найзагальнішим типом взаємозв'язку можна вважати випадок, коли ми хоча б можемо визначити, чи співпадають об'єкти за атрибутами x і y або не співпадають і чи співпадають назви-синоніми у словнику термінів *Dic*. Інакше кажучи, задана функція змістовної еквівалентності: $P: X \times Y \rightarrow \{0, 1\}$, $Dic_{x=y}$. $P(x, y) = 1$, якщо за атрибутами x і y об'єкти співпадають, $P(x, y) = 0$ у іншому випадку. Якщо $P(x, y) = 1$ і $Dic_{x \neq y}$, то доповнюємо *Dic* новими синонімами.

2. Існує відображення, що конвертує X в Y , якщо для будь-якого $x \in X$ значення існує $y \in Y$ значення,

таке, що за атрибутами x і y об'єкти будуть співпадати. Інакше кажучи, існує відображення, $F: X \rightarrow Y$, таке, що для всіх $x \in X$ виконується рівність

$$P(x, F(x)) = 1, Dic_{x \neq y}. \quad (8)$$

3. Існує узагальнююче відображення з X в Y (Y – узагальнення X), якщо для будь-якого значення $x \in X$ існує рівно одне значення $y \in Y$, таке, що за атрибутами x і y об'єкти будуть співпадати. Інакше кажучи, існує відображення $F: X \rightarrow Y$, таке, що для всіх $x \in X$ виконуються умова (2.5) і нерівність

$$P(x, y) < 1, Dic_x, Dic_y \text{ для всіх } y \neq F(x). \quad (9)$$

4. Існує узагальнююче відображення X на Y (X – деталізація Y), якщо для будь-якого значення $x \in X$ існує рівно одне значення $y \in Y$, і для будь-якого Y існує хоча б одне значення x , таке, що за атрибутами x і y об'єкти будуть співпадати. Інакше кажучи, існує відображення $F: X \rightarrow Y$, таке, що для всіх $y \in Y$ існує $x \in X$, такий, що $F(x) = y$; і для всіх $x \in X$ виконуються умови (8) і (9).

Крім наведених типів взаємозв'язків, розглянемо наступні:

- а) існує відображення, що конвертує Y в X .
- б) існує узагальнююче відображення з Y в X .
- в) існує узагальнююче відображення Y на X .

Будемо вважати, що об'єкт, заданий кортежем $a = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ в одній схемі даних, співпадає з об'єктом, заданим кортежем $b = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ в іншій схемі даних, якщо вони співпадають за всіма взаємозалежними атрибутами, тобто для всіх функцій взаємозв'язку відношень $P_{ij}: X_i \times Y_j \rightarrow \{0, 1\}$ правильна рівність $P_{ij}(x_i, y_j) = 1$. Множину пар індексів (i, j) , для яких задані функції P_{ij} , позначимо $\Omega = \{(i, j)\}$, $i = Num(x)$, $j = Num(y)$, $x, y \in Dic$. Тоді можна задати функцію відповідності об'єктів $P: A \times B \rightarrow \{0, 1\}$ таким чином:

$$P(a, b) = 1, \text{ якщо } P_{ij}(x_i, y_j) = 1 \text{ для всіх } (i, j) \in \Omega; \quad (10)$$

$$P(a, b) = 0, \text{ якщо існує } (i, j) \in \Omega, \text{ такі, що } P_{ij}(x_i, y_j) \neq 1. \quad (11)$$

Перейдемо до класифікації взаємозв'язків між схемами даних.

1. Відповідність об'єктів. Якщо Ω не порожня, і задана функція $P: A \times B \rightarrow \{0, 1\}$, будемо говорити, що встановлено відповідність об'єктів. Нехай X_1 і Y_1 є первинними ключами відношень *A* і *B*. Тоді, якщо вибрати всі пари $\{x_1, y_1\}$, для яких $P(a, b) = 1$, одержимо таблицю відповідності *Dic* із заголовком $\{\langle x_1: X_1 \rangle, \langle y_1: Y_1 \rangle\}$.

Маючи таку таблицю, можна робити запити, що одержують дані з обох схем, таким чином:

Select $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m$

From A, B, Dic

Where $Dic.X_1 = A.X_1$ and $Dic.Y_1 = B.Y_1$

2. За кортежем a з відношення A можна швидко знайти у відношенні B кортеж b такий, що $P(a, b) = 1$, не створюючи й не використовуючи таблицю відповідності.

3. За кортежем з A можна однозначно визначити кортеж в B .

4. Відношення A і B синхронізовані. Якщо за кортежем з A можна однозначно визначити кортеж в B і за кортежем з B можна однозначно визначити кортеж в A , будемо говорити, що відношення A і B синхронізовані. Зміст цієї умови в тому, що якщо перенести деякий кортеж з A в B , а потім назад, то гарантовано не буде створено нового запису, що дублює a .

Отже, результатом роботи агента є встановлення взаємозв'язку між схемами даних.

4. Операції над носіями простору даних

Одною з ключових задач побудови простору даних є визначення виразної потужності запитів із Se . Над носіями простору даних виконуються такі операції із множини Se :

1) *Запит про довільні дані* Se_{simple} – у користувачів повинна бути можливість запити будь-якого елементу даних, незалежно від його формату і моделі даних. Здійснюється на основі ключових слів key_word та каталогу даних Cg .

$$Se_{simple} : \sigma_{key_word}(Cg), \quad (12)$$

2) *Структуровані запити* будуються з використанням SQL та подібних мов. За допомогою каталогу визначається, чи джерело, у якому здійснюватиметься пошук, містить структуровану інформацію. Якщо це так, то виконується запит безпосередньо до джерела даних. У іншому випадку запит продовжується виконуватись по каталогу даних у вигляді пошуку ключових слів.

$$Se_{structured} : \sigma_{key_word}(Cg), \sigma(Source). \quad (13)$$

3) *Запити до метаданих* повинні забезпечуватися можливістю:

– отримання даних про джерело відповіді та місцезнаходження джерела;

– визначення елементів даних в просторі даних, що можуть залежати від заданого елементу даних, і підтримка гіпотетичних запитів;

– визначення рівня невірогідності відповіді.

$$Se_{meta} : \sigma_{user_param}(Cg), \quad (14)$$

де $user_param$ – множина параметрів користувача (вимог до запити), його профілю, або вимог, які ставляться до рішення.

Простір даних є не тільки засобом обміну даними. Він повинен містити засоби отримання нових знань. У контексті просторів даних знання – це результат застосування засобів опрацювання даних над джерелами та каталогом даних:

$$Design = \mathbf{Wo}(\mathbf{DB}, \mathbf{DW}, \mathbf{Wb}, \mathbf{Nd}, \mathbf{Cg}, user_param).$$

Під профілем користувача будемо розуміти підмножину каталогу даних, яка вказує на ті джерела даних, до яких користувач має доступ.

$$profile : \sigma_{access = Yes}(Cg).$$

Із визначення простору даних впливає подання ПД як алгебраїчної системи:

$$\mathbf{DS} = \langle \mathbf{DS}, \emptyset, \mathbf{Cg} \rangle,$$

$$\mathbf{DS} = \{ \mathbf{ODW.r}, \mathbf{DW1.rel}, \dots, \mathbf{DWn.rel}, \mathbf{SemNet}(\mathbf{Wb}), \mathbf{SemNet}(\mathbf{Nd}) \},$$

$$\emptyset = \{ \mathbf{Agent}(\mathbf{x}), Se_{simple}, Se_{structured}, Se_{meta}, \sigma_{access}, \mathbf{Agent} \}. \quad (15)$$

Таке визначення ґрунтується на таких висновках:

– базу даних можна вважати виродженням сховищем даних (сховище даних з єдиним джерелом та обмеженою множиною операцій – реляційною алгеброю),

– оскільки інформація про інші джерела простору даних (\mathbf{Wb} , \mathbf{Nd} , \mathbf{Gr}) міститься у каталозі \mathbf{Cg} (побудова семантичної мережі), а дані, що отримуються з цих об'єктів, за допомогою операцій інтеграції потрапляють у локальне сховище даних \mathbf{ODW} , то в просторі даних \mathbf{Wb} , \mathbf{Nd} , \mathbf{Cr} можна замінити каталогом даних \mathbf{Cg} .

Отже, алгебраїчна система класу сховище даних та алгебраїчна система класу реляційна база даних є підсистемами алгебраїчної системи класу простір даних.

5. Операції над просторами даних

Простори даних можуть вкладатися одне в інше (наприклад, простір даних району вкладається в простір даних області), і вони можуть перекриватися (наприклад, простір даних в сфері туризму перекривається з просторами даних оздоровчо-лікувальної, історичної сфери та сфери управління природними ресурсами).

Тому в просторі даних повинні міститися правила розмежування доступу. Прикладами таких розмежувань для простору даних в сфері туризму є:

– для учасників простору даних в сфері туризму надати можливість пошуку даних у просторах даних оздоровчо-лікувальної, історичної сфери та сфери управління природними ресурсами;

– для учасників простору даних сфери управління природними ресурсами надати права блокування записів та встановлення властивості неактуальності для даних простору даних в сфері туризму та ін.

Уведемо операцію об'єднання просторів даних:

$$DS_1 \cup DS_2 = \langle DB_1 \cup DB_2, DW_1 \cup DW_2, Wb_1 \cup Wb_2, Nd_1 \cup Nd_2, Mp_1 \cup Mp_2, ODW_1 \cup ODW_2, Int, Se, Wo_1, Wo_2, EM \rangle,$$

$$Cg = \text{profile}(\text{Agent}(Cg_1) \cup \text{Agent}(Cg_2)),$$

$$Int = Int_1 = Int_2,$$

$$Se = Se_1 = Se_2,$$

$$EM = EM_1 = EM_2.$$

Уведемо операцію перетину просторів даних:

$$DS_1 \cap DS_2 = \langle DB_1 \cap DB_2, DW_1 \cap DW_2, Wb_1 \cap Wb_2, Nd_1 \cap Nd_2, Mp_1 \cap Mp_2, ODW_1 \cap ODW_2, Int, Se, Wo, EM \rangle,$$

$$Cg = Cg_1 \cap Cg_2,$$

$$Wo = Wo_1 \cap Wo_2,$$

$$Int = Int_1 \cap Int_2,$$

$$Se = Se_1 \cap Se_2,$$

$$EM = EM_1 = EM_2.$$

ВИСНОВКИ

У статті подано формальну модель простору даних. Показано, що алгебраїчні системи класу база даних та сховище даних є підкласом алгебраїчної системи класу простір даних.

Наукова новизна полягає у поданні простору даних як алгебраїчної системи. Уведено операції над просторами даних.

Практична цінність полягає у визначенні основних задач та компонент простору даних та зв'язку між ними.

Подальші дослідження стосуватимуться формалізації методів пошуку неструктурованих, напівструктурованих та строго структурованих даних та побудови відповідних алгоритмів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Интеграция данных и хранилища [Електронний ресурс] : за даними InterSoft Lab. – 2006. – Режим доступу: <http://citcity.ru/12101/>
2. Интеграция корпоративной информации: новое направление [Електронний ресурс] : за даними InterSoft Lab. – 2006. – Режим доступу: <http://citcity.ru/11155/>
3. Qi Su. Indexing Relational Database Content Offline for Efficient Keyword-Based Search / Qi Su, Jennifer Widom // 9th International Database Engineering; Application Symposium (IDEAS'05). – 2005. – P. 297–306.
4. Аграновский А. В. Индексация массивов документов / Аграновский А. В., Арутюнян Р. Э. [Електронний ресурс]. – 2003. – Режим доступу: http://www.scandocs.ru/page.jsp?pk=node_1185787748359.
5. Denoyer L. The Wikipedia XML Corpus / Denoyer L., Gallinari P. // SIGIR Forum. – 2006. – P. 108–121.
6. DeRose P. DBLife: A community information management platform for the database research community / DeRose P., Shen W., Chen F., Lee Y., Burdick D., Doa A., Ramakrishnan R. // In CIDR. – 2007. – P. 92–101.
7. Dong X. A Platform for Personal Information Management and Integration / Dong X., Halevy A. / In CIDR. – 2005. – P. 67–71.
8. Мальцев А. И. Алгебраические системы / Мальцев А. И. – М. : Наука, 1970. – 392 стр.
9. Шаховська Н. Б. Простори даних: поняття та призначення // Матеріали конференції CSIT-2007. – Львів, 2007. – С. 269–277.
10. Шаховська Н. Б. Особливості моделювання просторів даних // Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології : вісник НУ «Львівська політехніка». – 2008. – № 608. – С. 145–154.
11. Шаховська Н. Б. Простір даних області наукових досліджень // Моделювання та інформаційні технології. – 2008. – № 45. – С. 132–140.

Надійшла 29.04.2009
Після доробки 04.06.2009

Шаховская Н. Б.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проанализированы проблемы обработки данных из различных источников. Описана формальная модель пространства данных и операции над ним.

Ключевые слова: пространство данных, хранилище данных, база данных, алгебраическая система, поиск данных, группировка данных, интеллектуальный агент, источник данных.

Shakhovska N. B.

FORMALIZATION OF DATA SPACE USING THE ALGEBRAIC SYSTEM

Problems of different sources data processing are analyzed. A formal data space model and operations performed in it are described.

Key words: data space, data warehouse, database, algebraic system, database search, classification, intellectual agent, data source.

НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.032.026

Bodyanskiy Ye.¹, Dolotov A.²

¹Doctor of Science (Dr.-Ing. habil.), Kharkiv National University of Radio Electronics

²Ph. D. student, Kharkiv National University of Radio Electronics

ANALOG-DIGITAL SELF-LEARNING FUZZY SPIKING NEURAL NETWORK AND ITS LEARNING ALGORITHM BASED ON 'WINNER-TAKES-MORE' RULE

Analog-digital architecture of self-learning fuzzy spiking neural network is proposed in this paper. Spiking neuron synapse and some are treated in terms of classical automatic control theory. Conventional unsupervised learning algorithm of spiking neural network is improved by applying 'Winner-Takes-More' rule.

Key words: analog-digital architecture, self-learning fuzzy spiking neural network, automatic control theory, unsupervised learning algorithm, 'winner-takes-more' rule.

INTRODUCTION

Unsupervised classification, or clustering, is one of the fundamental problems of computational intelligence. Nowadays, there are various means for its solving, among them the significant place is occupied by artificial neural networks (self-organizing maps, ART neural networks, 'Brain-State-in-a-Box' neuromodels, etc.) [1], fuzzy clustering systems (fuzzy c-means, algorithms of Gustafson – Kessel, Yager – Filev, Klawonn – Hoepfner, etc) [2, 3], and hybrid systems based on the combination of both of them [4]. While the mentioned computational intelligence means for unsupervised data processing are well developed and rather powerful, they often appear to be inapplicable for real life problems solving due to their time-consuming run time. The present requires data processing systems to be not only powerful from computational point of view, but also to

be sufficiently rapid to handle instantaneous changes in real world environment. New generation of artificial neural networks, commonly known as spiking neural networks [5, 6], challenged to overcome this drawback of the classical computational intelligence means. Being highly realistic models of biological neurons, spiking neural networks also inherited capability of rapid information processing from them [5, 7, 8]. Moreover, hybrid computational intelligence systems based on self-learning spiking neural network made it possible to extend capabilities of latter for efficient data clustering even under uncertainty [9–12]. Anyway, the highest efficiency of spiking neural networks can be achieved in the case of their hardware implementation only [8]. One can run into a difficulty, however, in this direction. Although spiking neural networks are becoming a popular computational intelligence tool for various technical problems

solving that is confirmed by constant growing of the number of scientific and research works on that subject, their architecture and functioning are treated in terms of neurophysiology rather than in terms of any technical sciences apparatus. None technically plausible description of spiking neurons functioning has been proposed yet. Spiking neural network descriptions lack for general technical ground.

This work presents self-learning spiking neural network as a data processing system of classical control theory. Neuron synapse is shown to be a second-order critically damped response unit, and neuron soma is treated as a threshold-detection unit. Description of spiking neuron functioning in terms of the Laplace transform makes it possible to state spiking neural network architecture on a general technical ground that can be used in the following for constructing various hardware implementations of self-learning spiking neural networks.

SELF-LEARNING FUZZY SPIKING NEURAL NETWORK

Self-learning fuzzy spiking neural network architecture is heterogeneous three-layered feed-forward neural network with lateral connections in the second hidden layer [9].

The first hidden layer is constructed to perform population coding of input signal [7]. It acts in such a manner that each dimensional component $x_i(k)$, $i = \overline{1, n}$, of input signal $x(k)$ is processed by a pool of h receptive neurons RN_{li} , $l = \overline{1, h}$. Obviously, there can be different number of receptive neurons h_i in a pool for each dimensional component in the general case. For the sake of simplicity, we will consider here that the number of neurons is equal for all pools.

As a rule, activation functions of receptive neurons within a pool are bell-shaped (Gaussians usually), shifted, overlapped, of different width, and have dead zone. Generally firing time of a spike emitted by a receptive neuron RN_{li} upon incoming signal $x_i(k)$ lies in a certain interval $\{-1\} \cup [0, t_{\max}^{[0]}]$ referred to as coding interval and is described by the following expression:

$$t_{li}^{[0]}(x_i(k)) = \begin{cases} \lfloor t_{\max}^{[0]}(1 - \Psi(|x_i(k) - c_{li}^{[0]}|, \sigma_{li})) \rfloor, \\ \Psi(|x_i(k) - c_{li}^{[0]}|, \sigma_{li}) \geq \theta_{r.n.}; \\ -1, \Psi(|x_i(k) - c_{li}^{[0]}|, \sigma_{li}) < \theta_{r.n.}, \end{cases} \quad (1)$$

where $\lfloor \bullet \rfloor$ is the floor function, $\Psi(\bullet, \bullet)$, $c_{li}^{[0]}$, σ_{li} , and $\theta_{r.n.}$ are the receptive neuron's activation function, center, width and dead zone, respectively (r.n. in the last parameter means 'receptive neuron'), -1 indicates that the neuron does not fire.

In this work, we used Gaussian as activation function of receptive neurons:

$$\Psi(|x_i(k) - c_{li}^{[0]}|, \sigma_{li}) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li}^{[0]})^2}{2\sigma_{li}^2}\right). \quad (2)$$

There can be several ways to set widths and centers of receptive neurons within a pool. As a rule, activation functions can be of two types – either 'narrow' or 'wide'. Centers of each width type of activation function are calculated in different ways but in either case they cover date range uniformly. More details can be found in [7].

Spiking neurons form the second hidden layer of the network. Spiking neuron is considered to be formed of two constituents, they are: synapse and soma. Synapses between receptive neurons and spiking neurons are multiple structures. A multiple synapse MS_{jli} consists of a set of q subsynapses with different time delays d^p , $d^p - d^{p-1} > 0$, $d^q - d^1 > t_{\max}^{[0]}$, and adjustable weights w_{jli}^p (here $p = \overline{1, q}$). It should be noted that number of subsynapses within a multiple synapse are fixed for the whole network. Having a spike $t_{li}^{[0]}(x_i(k))$ from the li -th receptive neuron, the p -th subsynapse of the j -th spiking neuron produces delayed weighted postsynaptic potential

$$u_{jli}^p(t) = w_{jli}^p \varepsilon_{jli}^p(t) = w_{jli}^p \varepsilon(t - (t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)), \quad (3)$$

where $\varepsilon(\bullet)$ is a spike-response function usually described by the expression [13]

$$\begin{aligned} \varepsilon(t - (t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)) &= \frac{t - (t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)}{\tau_{\text{PSP}}} \times \\ &\times \exp\left(1 - \frac{t - (t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)}{\tau_{\text{PSP}}}\right) \times \\ &\times H(t - (t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)), \end{aligned} \quad (4)$$

τ_{PSP} – membrane potential decay time constant whose value can be obtained empirically (PSP means 'postsynaptic potential'), $H(\bullet)$ – the Heaviside step function. Output of the multiple synapse MS_{jli} forms total postsynaptic potential

$$u_{jli}(t) = \sum_{p=1}^q u_{jli}^p(t). \quad (5)$$

Each incoming total postsynaptic potential contributes to membrane potential of spiking neuron SN_j as follows:

$$u_j(t) = \sum_{l=1}^n \sum_{i=1}^h u_{jli}(t). \quad (6)$$

Spiking neuron SN_j generates at most one outgoing spike $t_j^{[1]}(x(k))$ during a simulation interval (the presentation of an input pattern $x(k)$), and fires at the instant the membrane potential reaches firing threshold $\theta_{s.n.}$

(s.n. means here ‘spiking neuron’). After neuron has fired, the membrane potential is reset to the rest value u_{rest} (0 usually) until the next input pattern is presented.

Number of spiking neurons in the second hidden layer is set to be equal to the number of clusters to be detected. Each spiking neuron corresponds to a certain cluster. In self-learning spiking neural network, the neuron that has fired first to the input pattern defines cluster that the pattern belongs to [7]. Firing time of spiking neuron $t_j^{[1]}(x(k))$ defines temporal distance of input pattern to center of the corresponding cluster.

The third layer, namely output fuzzy clustering layer, takes temporal distances of input pattern to centers of all classes and produces membership level according to fuzzy probabilistic approach [9]:

$$\mu_j(x(k)) = \frac{\left(t_j^{[1]}(x(k))\right)^{\frac{2}{1-\zeta}}}{\sum_{i=1}^m \left(t_i^{[1]}(x(k))\right)^{\frac{2}{1-\zeta}}}, \quad (7)$$

where m is the number of classes, $\zeta \geq 0$ is the fuzzifier that determines boundary between clusters and controls the amount of fuzziness in the final partition.

LEARNING ALGORITHM

The purpose of an unsupervised learning algorithm of spiking neural network is to adjust centers of spiking neurons so as to make each of them to correspond to centroid of a certain data cluster. Such learning algorithm was introduced on the basis of two learning rules, namely, ‘Winner-Takes-All’ rule and temporal Hebbain rule [13]. The first one defines which neuron should be updated, and the second one defines how it should be updated. The algorithm adjusts neuron centers through synaptic weights updating, whereas synaptic time delays always remain constant. The concept here is that significance of the given time delay can be changed by varying corresponding synaptic weight.

Each learning epoch consists of two phases. Competition, the first phase defines a neuron-winner. Being laterally linked with inhibitory connections, spiking neurons compete to respond to the pattern. The one wins (and fires) whose center is the closest to the pattern. After competition, weights adjusting takes place. The learning algorithm adjusts synaptic weights of the neuron-winner to move it closer to the input pattern. It strengthens weights of those subsynapses which contributed to the neuron-winner’s firing (i.e. the subsynapses produced delayed spikes right before the neuron firing) and weakens ones which did not contribute (i. e. the delayed spikes appeared right after the neurons firing or

long before it). Generally, the learning algorithm can be expressed as

$$w_{jli}^p(K+1) = \begin{cases} w_{jli}^p(K) + \eta_w(K)L(\Delta t_{jli}^p), & j = \tilde{j}; \\ w_{jli}^p(K), & j \neq \tilde{j}, \end{cases} \quad (8)$$

where K is the current epoch number, $\eta_w(\bullet) > 0$ is the learning rate (while it is constant in [13], it can depend on epoch number in the general case; w means ‘weights’), $L(\bullet)$ is the learning function [7, 13], \tilde{j} is the number of neuron-winner on the current epoch, Δt_{jli}^p is the time delay between delayed spike $t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p$ produced by the p -th subsynapse of the li -th synapse and spiking neuron firing time $t_j^{[1]}(x(k))$:

$$\Delta t_{jli}^p = t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p - t_j^{[1]}(x(k)). \quad (9)$$

As a rule, the learning function has the following form [9, 13]:

$$L(\Delta t_{jli}^p) = (1 + \beta) \exp\left(-\frac{(\Delta t_{jli}^p - \alpha)^2}{2(\kappa - 1)}\right) - \beta, \quad (10)$$

$$\kappa = 1 - \frac{v^2}{2 \ln\left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)}, \quad (11)$$

where $\alpha < 0$, $\beta > 0$, v are the shape parameters of the learning function $L(\bullet)$ that can be obtained empirically [7, 13]. The learning function and its shape parameters are depicted on Fig. 1.

After learning stage, center of a spiking neuron represents centroid of a certain data cluster, and spiking neural network can successfully perform unsupervised classification of the input set.

The learning algorithm (8) updates only neuron-winner on each epoch and disregards other neurons. It seems more natural to update not only spiking neuron-

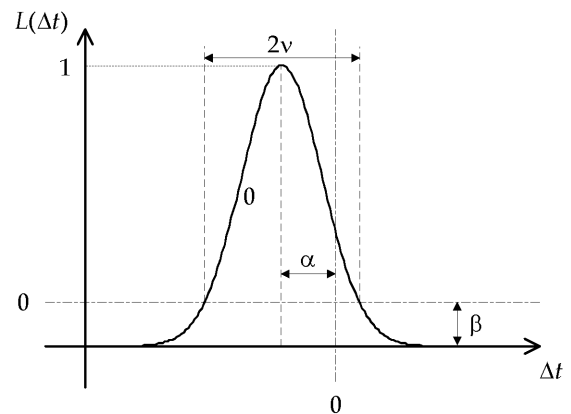


Fig. 1. Learning function $L(\bullet)$

winner, but also its neighbours. This approach is known as ‘Winner-Takes-More’ rule. It implies that there is a cooperation phase before weights adjustment. Neuron-winner determines a local region of topological neighbourhood on each learning epoch. Within this region, the neuron-winner fires along with its neighbours, and the closer a neighbour is to the winner, the more its weights are adjusted. The topological region is represented by the neighbourhood function $\varphi(|\Delta t_{ji}|)$ that depends on difference $|\Delta t_{ji}|$ between the neuron-winner firing time $t_j^{[1]}(x(k))$ and the neighbour firing time $t_j^{[1]}(x(k))$ (distance between the neurons in temporal sense) and a parameter that defines effective width of the region. As a rule, $\varphi(\bullet)$ is a kernel function that is symmetric about its maximum at the point where $\Delta t_{ji} = 0$. It reaches unity at that point and monotonically decreases as Δt_{ji} tends to infinity. The functions that are the most frequently used as neighbourhood function are Gaussian, paraboloid, Mexican Hat, and many others [14].

For self-learning spiking neural network, the learning algorithm based on ‘Winner-Takes-More’ rule can be expressed in the following form:

$$w_{ji}^p(K+1) = w_{ji}^p(K) + \eta_w(K)\varphi(|\Delta t_{ji}|)L(\Delta t_{ji}^p), \quad (12)$$

where temporal distance Δt_{ji} is

$$\Delta t_{ji} = t_j^{[1]}(x(k)) - t_j^{[1]}(x(k)). \quad (13)$$

Obviously, expression (12) is a generalization of (8).

Analysis of competitive unsupervised learning convergence showed that width parameter of the neighbourhood function should decrease during synaptic weights adjustment [15]. For Gaussian neighbourhood function

$$\varphi(|\Delta t_{ji}|, K) = \exp\left(-\frac{(\Delta t_{ji}^2)}{2\rho^2(K)}\right) \quad (14)$$

width parameter ρ can be adjusted as follows [16]:

$$\rho(K) = \rho(0)\exp\left(\frac{K}{\gamma}\right), \quad (15)$$

where $\gamma > 0$ is a scalar that determines rate of neuron-winner effect on its neighbours.

Noteworthy that exponential decreasing of width parameter can be achieved by applying the simpler expression instead of (15) [14]:

$$\rho(K) = \gamma\rho(K-1), \quad 0 < \gamma < 1. \quad (16)$$

Learning algorithm (12) requires modification of self-learning spiking neural architecture. Lateral inhibitory

connections in the second hidden layer should be replaced with excitatory ones during the network learning stage in order to implement ‘Winner-Takes-More’ rule.

In the following sections, it will be shown that the learning algorithm based on ‘Winner-Takes-More’ rule is more natural than the one based on to ‘Winner-Takes-All’ rule to learn fuzzy spiking neural network.

FUZZY SPIKING NEURAL NETWORK AS ANALOG-DIGITAL SYSTEM

Hardware implementations of spiking neural network demonstrated fast processing ability that made it possible to apply such systems in real-life applications where processing speed was a rather critical parameter [5, 8]. From theoretical point of view, research works on spiking neurons hardware implementation subject are very particular, they lack for a technically plausible description on a general ground. In this section, we consider a spiking neuron as a processing system of classical automatic control theory. Spiking neuron functioning is described in terms of the Laplace transform.

Within a scope of automatic control theory, a spike $t(x(k))$ can be represented by the Dirac delta function $\delta(t - t(x(k)))$. Its Laplace transform is

$$L\{\delta(t - t(x(k)))\} = e^{-t(x(k))s}, \quad (17)$$

where s is the Laplace operator. Spiking neuron takes spikes on its input, performs spike – membrane potential – spike transformation, and produces spikes on its output. Obviously, it is a kind of analog-digital system that processes information in continuous-time form and transmits it in pulse-position form. This is the basic concept for designing analog-digital architecture of self-learning spiking neural network. Overall network architecture is depicted on Fig. 2.

Multiple synapse MS_{ji} of a spiking neuron SN_j transforms incoming pulse-position signal $\delta(t - t_{ji}^{[0]}(x_i(k)))$ to continuous-time signal $u_{ji}(t)$. Spike-response function (4), the basis of such transformation, has form that is similar to the one of impulse response of second-order damped response unit. Transfer function of a second-order damped response unit with unit gain factor is

$$\tilde{G}(s) = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} = \frac{1}{\tau_4^2 s^2 + \tau_3 s + 1}, \quad (18)$$

where $\tau_{1,2} = \frac{\tau_3}{2} \pm \sqrt{\frac{\tau_3^2}{4} - \tau_4^2}$, $\tau_1 \geq \tau_2$, $\tau_3 \geq 2\tau_4$, and its impulse response is

$$\tilde{\varepsilon}(t) = \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right). \quad (19)$$

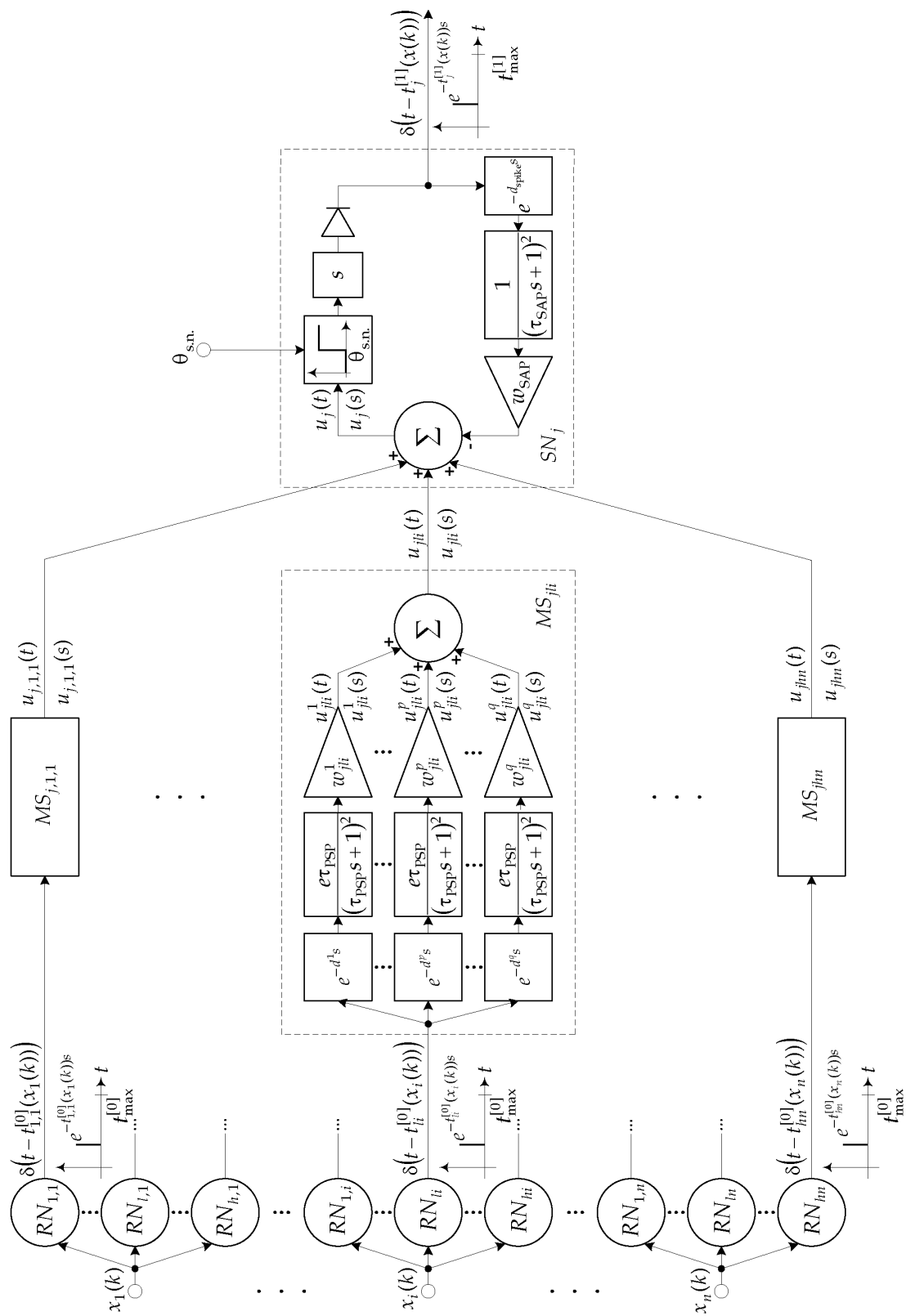


Fig. 2. Spiking neuron as a nonlinear dynamic system

Putting $\tau_1 = \tau_2 = \tau_{\text{PSP}}$ (that corresponds to a second-order critically damped response unit) and applying l'Hôpital's rule, one can obtain

$$\tilde{\varepsilon}(t) = \frac{t}{\tau_{\text{PSP}}^2} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{PSP}}}}. \quad (20)$$

Comparing spike-response function (4) with the impulse response (20) leads us to the following relationship:

$$\varepsilon(t) = \tau_{\text{PSP}} e \tilde{\varepsilon}(t). \quad (21)$$

Thus, transfer function of the second-order critically damped response unit whose impulse response corresponds to a spike-response function is

$$G_{\text{SRF}}(s) = \frac{e \tau_{\text{PSP}}}{(\tau_{\text{PSP}} s + 1)^2}, \quad (22)$$

where SRF means 'spike-response function'.

Now, we can design multiple synapse in terms of the Laplace transform. As illustrated on Fig. 2, multiple synapse MS_{jli} is a dynamic system that consists of a set of subsynapses that are connected in parallel. Each subsynapse is formed by a group of time delay, second-order critically damped response unit, and gain. As a response to incoming spike $\delta(t - t_{li}^{[0]}(x(k)))$, the subsynapse produces delayed weighted postsynaptic potential $u_{jli}^p(s)$, and the multiple synapse produces total postsynaptic potential $u_{ji}(s)$ that arrives to spiking neuron soma.

Taking into account (22), transfer function of the p -th subsynapse of MS_{jli} takes the following form:

$$U_{jli}^p(s) = w_{jli}^p e^{-d^p s} G_{\text{SRF}}(s) = \frac{\tau_{\text{PSP}} W_{jli}^p e^{1-d^p s}}{(\tau_{\text{PSP}} s + 1)^2}, \quad (23)$$

and its response to a spike $\delta(t - t_{li}^{[0]}(x_i(k)))$ is

$$u_{jli}^p(s) = e^{-t_{li}^{[0]}(x_i(k))s} U_{jli}^p(s) = \frac{\tau_{\text{PSP}} W_{jli}^p e^{1-(t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)s}}{(\tau_{\text{PSP}} s + 1)^2}. \quad (24)$$

So finally, considering transfer function of multiple synapse MS_{jli}

$$U_{jli}(s) = \sum_{p=1}^q U_{jli}^p(s) = \sum_{p=1}^q \frac{\tau_{\text{PSP}} W_{jli}^p e^{1-d^p s}}{(\tau_{\text{PSP}} s + 1)^2}, \quad (25)$$

the Laplace transform of the multiple synapse output can be expressed in the following form:

$$\begin{aligned} u_{jli}(s) &= e^{-t_{li}^{[0]}(x_i(k))s} U_{jli}(s) = \\ &= \sum_{p=1}^q \frac{\tau_{\text{PSP}} W_{jli}^p e^{1-(t_{li}^{[0]}(x_i(k)) + d^p)s}}{(\tau_{\text{PSP}} s + 1)^2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Spiking neuron soma performs transformation that is opposite to one of the synapse. It takes continuous-time signals $u_{jli}^p(t)$ and produces pulse-position signal $\delta(t - t_j^{[1]}(x(k)))$. In doing so soma responds each time membrane potential reaches a certain threshold value. In other words, spiking neuron soma acts as a threshold detection system and consequently it can be designed on the base of bang-bang control systems concept [17].

Threshold detection behaviour of a neuron soma can be modelled by an element relay with dead zone $\theta_{\text{s.n.}}$ that is defined by the nonlinear function

$$\Phi_{\text{relay}}(u_j(t), \theta_{\text{s.n.}}) = \frac{\text{sign}(u_j(t) - \theta_{\text{s.n.}}) + 1}{2}, \quad (27)$$

where $\text{sign}(\bullet)$ is the signum function. Soma firing can be described by a derivative unit that is connected with the element relay in series and produces a spike each time the relay switches. In order to avoid a negative spike that appears as a response to the relay resetting, a usual diode is added next to the derivative unit. The diode is defined by the following function:

$$\Phi_{\text{diode}}(\delta(t - t_{\text{relay}}^{[1]})) = \delta(t - t_{\text{relay}}^{[1]}) H(\delta(t - t_{\text{relay}}^{[1]})), \quad (28)$$

where $t_{\text{relay}}^{[1]}$ is a spike produced by the derivative unit upon the relay switching.

Now we can define the Laplace transform of an outgoing spike $t_j^{[1]}(x(k))$, namely,

$$\begin{aligned} L\left\{\delta\left(t - t_j^{[1]}(x(k))\right)\right\} &= e^{-t_j^{[1]}(x(k))s} = \\ &= L\{\Phi_{\text{diode}}(sL\{\Phi_{\text{relay}}(u_j(t), \theta_{\text{s.n.}})\})\}. \end{aligned} \quad (29)$$

As it was mentioned above, the leaky integrate-and-fire model disregards the neuron refractoriness. Anyway, the refractory period is implemented in the layer of spiking neurons indirectly. The point is that a spiking neuron cannot produce another spike after firing and until the end of the simulation interval since the input pattern is provided only once within the interval. In the analog-digital architecture of spiking neuron, the refractoriness can be modelled by a feedback circuit. As shown on Fig. 2, it is a group of a time delay, a second-order critically damped response unit, and a gain that are connected in series. The time delay defines duration of a spike generation period d_{spike} (usually, $d_{\text{spike}} \rightarrow 0$). The second-order critically damped response unit defines a spike after-potential. Generally, spike after-potential can be represented by a second-order damped response unit, but for the sake of simplicity, we use critically damped response unit as it can be defined by one parameter only, namely, τ_{SAP} (SAP means here 'spike after-potential').

This parameter controls duration of the refractory period. Finally, the gain unit sets amplitude of the spike after-potential w_{SAP} . Obviously, w_{SAP} should be much greater than any synaptic weight.

Thus, transfer function of the feedback circuit is

$$G_{F.B.}(s) = \frac{w_{SAP} e^{-d_{spike}s}}{(\tau_{SAP}s + 1)^2}, \quad (30)$$

where F.B. means 'feedback circuit', and transfer function of the soma is

$$G_{soma}(s) = \frac{G_{F.F.}}{1 + G_{F.F.}G_{F.B.}}, \quad (31)$$

where $G_{F.F.}$ is defined by (29) (F.F. means 'feed forward circuit').

It is easily seen that the functioning of spiking neuron analog-digital architecture introduced above is similar to the spike-response model [6].

CONCLUSIONS

Spiking neural networks are more realistic models of real neuronal systems than artificial neural networks of the previous generations. Nevertheless, they can be described in a strict technically plausible way based on the Laplace transform. Spiking neural network designed in terms of transfer functions is an analog-digital nonlinear dynamic system that conveys and processes information both in pulse-position and continuous-time forms. Such precise formal description of spiking neural network architecture and functioning provides researchers and engineers with a framework to construct hardware implementations of various spiking neural networks for real-time data processing of different levels of complexity.

REFERENCES

1. *Haykin S.* Neural Networks: A Comprehensive Foundation / Haykin S. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. – 842 p.
2. *Bezdek J. C.* Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing / Bezdek J. C., Keller J., Krishnapuram R., Pal N. R. – New York : Springer, 2005. – 776 p.
3. *Sato-Ilic M.* Innovations in Fuzzy Clustering / Sato-Ilic M., Jain L. C. – Berlin – Heidelberg – New York : Springer, 2006. – 152 p.
4. *Jang J.-Sh. R.* Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence / Jang J.-Sh. R., Sun Ch.-T., Mizutani E. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1997. – 614 p.
5. *Maass W.* Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models / Maass W. // Neural Networks. – 1997. – 10. – P. 1659–1671.
6. *Gerstner W.* Spiking Neuron Models / Gerstner W., Kistler W. M. – Cambridge : The Cambridge University Press, 2002. – 400 p.
7. *Bohte S. M.* Unsupervised clustering with spiking neurons by sparse temporal coding and multi-layer RBF networks / Bohte S. M., Kok J. S., La Poutre H. // IEEE Trans. on Neural Networks. – 2002. – 13. – P. 426–435.
8. *Maass W.* Pulsed Neural Networks / Maass W., Bishop C. M. – Cambridge, MA : The MIT Press, 1998. – 408 p.
9. *Bodyanskiy Ye.* A self-learning spiking neural network for fuzzy clustering task / Bodyanskiy Ye., Dolotov A. // Sci. Proc. of Riga Technical University: Information Technology and Management Science. – 2008. – 36. – P. 27–33.
10. *Bodyanskiy Ye.* Fuzzy possibilistic clustering using self-learning spiking neural network / Bodyanskiy Ye., Dolotov A., Pliss I., Viktorov Ye. // Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Goerlitz. – 2008. – Heft 100. – Nr. 2360–2395. – S. 53–60.
11. *Bodyanskiy Ye.* Fuzzy spiking neural network and design of experiments alphabetical optimality criteria using in data clustering problem / Bodyanskiy Ye., Dolotov A. // Proc. Int. Conf. "Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence (ISDM-CI'2009)" (May 18–22, 2009, Yevpatoria, Ukraine). – Kherson : Kherson National Technical University, 2009. – Vol. 2. – P. 154–157.
12. *Bodyanskiy Ye.* Adaptive Gustafson-Kessel fuzzy clustering algorithm based on self-learning spiking neural network / Bodyanskiy Ye., Dolotov A., Pliss I. ; eds. by G. Setlak, K. Markov. – Rzeszow : Rzeszow University of Technology, 2009. – P. 17–24. – (International Book Series "Information Science and Computing" ; No. 13).
13. *Natschlaeger T.* Spatial and temporal pattern analysis via spiking neurons / Natschlaeger T., Ruf B. // Network: Computations in Neural Systems. – 1998. – 9. – P. 319–332.
14. *Бодянский Е. В.* Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, применения / Бодянский Е. В., Руденко О. Г. – Харьков : ТЕЛІТЕХ, 2004. – 372 с.
15. *Cottrel M.* A stochastic model of retinotopy: a self-organizing process / Cottrel M., Fort J. // Biological Cybernetics. – 1986. – 53. – P. 405–411.
16. *Ritter H.* On stationary state of the Kohonen self-organizing sensory mapping / Ritter H., Schulten K. // Biological Cybernetics. – 1986. – 54. – P. 239–249.
17. *Цыпкин Я. З.* Теория релейных систем автоматического управления / Цыпкин Я. З. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 456 с.

Надійшла 24.08.2009

Бодянский Е., Долотов А.

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВА САМОНАВЧАЛЬНА ФАЗЗИ-СПАЙК-НЕЙРОННА МЕРЕЖА ТА АЛГОРИТМ ЇЇ НАВЧАННЯ НА ОСНОВІ ПРАВИЛА «ПЕРЕМОЖЕЦЬ ОТРИМУЄ БІЛЬШЕ»

У цій роботі запропоновано аналогово-цифрову архітектуру фаззі-спайк-нейронної мережі, що самонавчається. Синапс та сома спайк-нейрона розглянуто з позиції класичної теорії автоматичного керування. Застосуванням правила «переможець отримує більше» поліпшено стандартний алгоритм самонавчання спайк-нейронної мережі.

Ключові слова: аналогово-цифрова архітектура, самонавчальна фаззі-спайк-нейронна мережа, теорія автоматичного керування, алгоритм навчання без учителя, правило «переможець отримує більше».

Бодянский Е., Долотов А.

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВАЯ САМООБУЧАЮЩАЯСЯ ФАЗЗИ-СПАЙК-НЕЙРОННАЯ СЕТЬ И АЛГОРИТМ ЕЕ ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛА «ПОБЕДИТЕЛЬ ПОЛУЧАЕТ БОЛЬШЕ»

В настоящей работе предложена архитектура аналогово-цифровой самообучающейся фаззи-спайк-нейронной сети. Синапс и сома спайк-нейрона рассмотрены с позиции

теории автоматического управления. Посредством применения правила «победитель получает больше» усовершенствован стандартный алгоритм самообучения спайк-нейронной сети.

Ключевые слова: аналогово-цифровая архитектура, самообучающаяся фаззи-спайк-нейронная сеть, теория автоматического управления, алгоритм обучения без учителя, правило «победитель получает больше».

УДК 681.51: 622.7

Купін А. І.

Канд. техн. наук, завідувач кафедри Криворізького технічного університету

СТРУКТУРА ПРОТОТИПУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Наведено структурну схему прототипу інтелектуальної системи керування секцією магнітного збагачення залізної руди. На основі результатів промислових випробувань зроблена оцінка економічної ефективності впровадження подібної системи в умовах збагачувального виробництва.

Ключові слова: інтелектуальна система керування, збагачення, залізна руда, ефективність.

ВСТУП

У наш час достатньо актуальною проблемою для вітчизняних підприємств гірничо-металургійної галузі промисловості є підвищення конкурентоспроможності виробництва за рахунок зменшення собівартості переділу, оптимізації енерговитрат, стабілізації або поліпшення якості продукції тощо. Загальновідомо, що одним з найбільш перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є комплексна автоматизація технологічних процесів (ТП) [1, 2].

Технологічні процеси збагачення руд чорних металів (магнетитових кварцитів) є достатньо складними об'єктами автоматизації. Це обумовлено їх багатомірністю та багатостадійністю, властивостями нелінійності та нестационарності, значним запізненням інформаційних показників у часі, наявністю нечіткої та неповної інформації. У зв'язку з цим можливості застосування класичних підходів теорії автоматизованого керування є доволі обмеженими [3].

Теоретичні дослідження, комп'ютерне моделювання та промислові випробування [3–9] довели потенціальні можливості застосування інтелектуальних підходів щодо ідентифікації, керування та оптимізації ТП збагачення магнетитових кварцитів. У першу чергу це стосується сучасних напрямів розвитку штучного інтелекту: нейрокерування, нечіткої логіки, класифікаційного керування та еволюційної оптимізації.

Враховуючи, що поточний стан дослідження можливостей застосування подібних технологій у гірни-

чій справі поки містить доволі обмежену кількість реальних впроваджень на вітчизняних підприємствах, постійно виникають питання щодо техніко-економічного обґрунтування таких розробок. Тому метою статті є оцінка ефективності впровадження інтелектуальної системи керування в умовах технологічної лінії (секції) рудозбагачувальної фабрики (РЗФ) гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК).

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Згідно з рішеннями, розглянутими у попередніх роботах автора [3, 5–8], розглядається така схема реалізації ІСК (рис. 1).

Основою системи є апаратно-програмне ядро ІСК (блок № 1), що складається з п'яти підсистем.

1.1. Інтерфейсна частина, сервер та монітор SCADA. Реалізується на підставі спеціалізованого програмного забезпечення типу: Контур, Monitor Pro, Scantic, Trace Mode [10–14]. Ця підсистема виконує функції візуалізації (моніторингу) ходу ТП, введення та контролювання уставок технологічних параметрів, формування звітів. На апаратному рівні такі підсистеми реалізуються на підставі застосування архітектури «клієнт – сервер». В якості серверів робочих станцій застосовується переважно комп'ютерне обладнання у промисловому виконанні з підвищеним рівнем надійності (стандарти IP50, IP65-67 [13]). Клієнтські станції реалізуються у вигляді автоматизованих робочих місць (АРМ) спеціалістів (наприклад, технолога, диспетчера РЗФ). Для інфор-

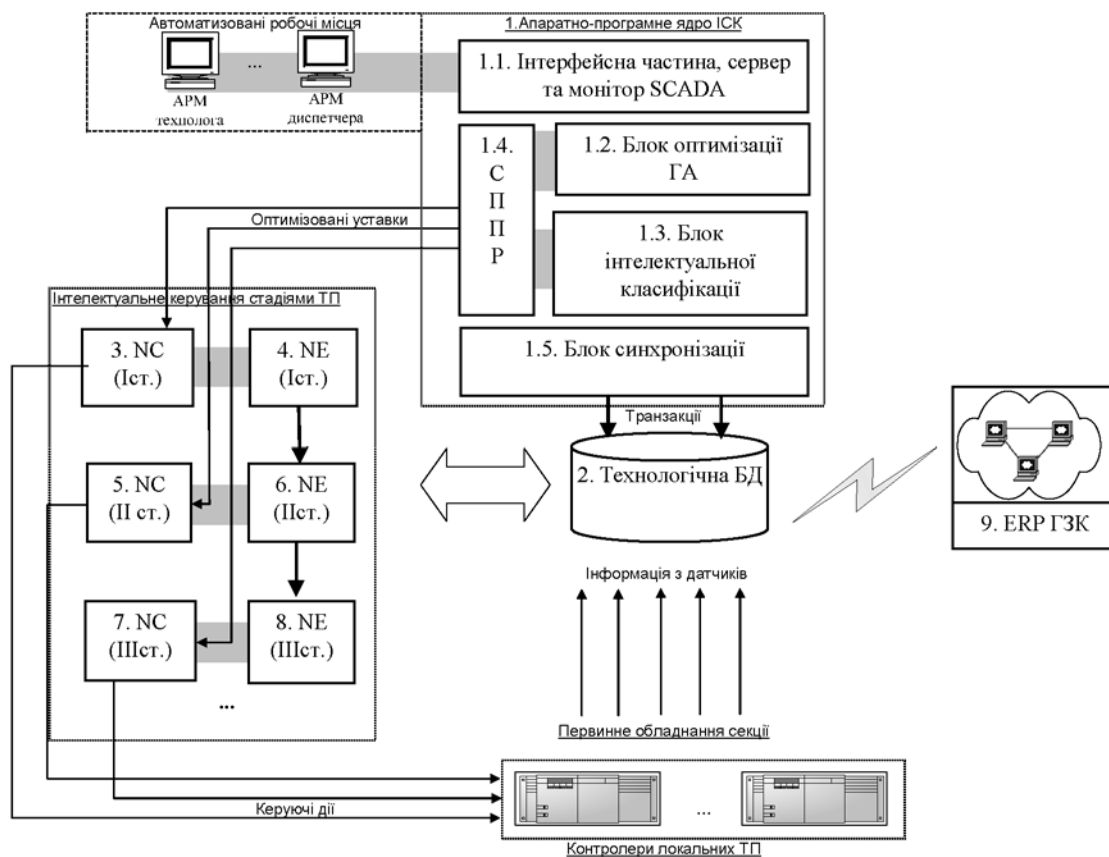


Рис. 1. Загальна структурна схема реалізації прототипу ІСК секцією збагачення

маційного обміну необхідно застосовувати промислові протоколи типу ModBus, ProfBus, CAN [14].

1.2. Блок оптимізації з застосуванням генетичних алгоритмів (ГА) призначений для визначення уставок для показників стадій та локальних ТП збагачення з застосуванням еволюційних методів та генетичних алгоритмів. Реалізується програмно на підставі застосування відповідних алгоритмів або у вигляді окремого модуля (бібліотеки) поширених спеціалізованих пакетів типу MATLAB, GeneHunter, FlexTool, Evolver, Auto2Fit [2].

1.3. Блок інтелектуальної класифікації має схожі функції з попереднім блоком, але працює на підставі застосування підходів класифікаційного керування. Реалізується програмно з використанням процедур нейромережевої кластеризації та класифікації. Можливо також застосування інших спеціалізованих програмних пакетів аналогічного призначення [15].

1.4. Система підтримки прийняття рішень (СППР) фактично поєднує два попередні блоки оптимізації та класифікації. Блок реалізується програмно на підставі застосування алгоритму, наведеного в [3].

1.5. Блок синхронізації призначений для забезпечення безперервного опитування датчиків усіх ло-

кальних ТП з непохідною дискретністю, поповнення технологічної бази даних (БД) актуальними значеннями показників згідно з переліком [4], забезпечення постійної взаємодії та інформаційного обміну з іншими підсистемами ІСК (нейроемюляторами та контролерами). Реалізується програмно засобами SCADA.

2. Технологічна база даних (БД) призначена для накопичення статистики зміни показників у ході роботи ТП. Як системи керування такою БД доцільно застосовувати СУБД промислового типу: Industrial SQL, ORACLE, MS SQL, Informix [12–14].

3–8. Блоки, що реалізують автоматизоване інтелектуальне керування окремими стадіями ТП збагачення в умовах секції як технологічної лінії РЗФ. Згідно зі структурною схемою (рис. 1) такі підсистеми реалізуються із застосуванням нейромережевих контролерів (NC) та емуляторів (NE). Причому, згідно з [3] кожна окрема стадія має окремий контролер та емулятор. Згідно з принципами роботи ІСК, нейроконтролери призначені для забезпечення підтримки необхідних уставок, значення яких розраховуються у СППР (блок 1.4). У свою чергу нейроемюлятори (предиктори) забезпечують здійснення

процедур прямого та зворотного (інверсного) прогнозування на підставі поточних значень показників з технологічної БД. Таким чином забезпечується робота ІСК як на рівні окремих стадій, так і на рівні окремих локальних ТП.

9. Шлюз до корпоративної інформаційної системи підприємства (ERP ГЗК). Блок забезпечує можливість обміну інформацією між ІСК та апаратно-програмними системами більш високого рівня (ERP, MES, АСУП тощо). Принципи, технології та апаратне забезпечення для реалізації таких структур достатньо добре відомі [1–3, 10–14 та ін.].

Існують два основних способи реалізації штучних нейронних (нейромережевих) структур: програмний та апаратний. Кожен із зазначених способів має чітко визначені переваги та недоліки, які обов'язково необхідно враховувати при проектуванні та практичній реалізації нейромережевих систем та пристроїв [5]. У роботі [3] для структурної схеми рис. 1 запропоновано прототипи реалізації ІСК ТП збагачення як першим, так і другим способом. При цьому було встановлено, що програмна реалізація нейромережевих блоків ІСК із застосуванням нейроемулатору типу Neuro Solution показала більшу гнучкість при синтезі та при переналаштуванні. Разом з цим продуктивність роботи ІСК і, особливо, параметризації (навчання) була на 40–60 % нижчою, ніж при застосуванні апаратної реалізації.

Апаратна реалізація ІСК засобами нейропроцесорів типу NeuroMatrix NM6403/6404 [3, 16] продемонструвала більш високу продуктивність параметризації, обчислень та спостереження (підтримання) уставок. Однак, така технологія є більш складною та

трудомісткою в процесі відтворення, а також дозволяє реалізувати обмежений набір нейромережевих структур та алгоритмів навчання.

Промислові випробування програмного прототипу ІСК проводилися в умовах секції № 6 РЗФ-2 Новокриворізького ГЗК (ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») та секції № 2 РЗФ-2 Південного ГЗК (м. Кривий Ріг). Результати зазначених випробувань довели, що застосування подібної системи дозволяє стабілізувати низку важливих результуючих показників якості, виходу та вилучення корисного компоненту в концентраті. Зазначений факт було обрано за основу для обґрунтування доцільності подальшої технічної реалізації проекту.

Отже, у роботі ставиться завдання оцінки ефективності впровадження подібної ІСК в умовах діючої секції збагачувальної фабрики.

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ

Обґрунтування застосування системи інтелектуального керування в умовах технологічної лінії (секції) РЗФ можливо здійснити на підставі урахування низки стабілізуючих факторів (зниження амплітуди коливань математичного сподівання та дисперсії якісних та кількісних показників ТП). Для цього використовувалися залежності собівартості переділу в умовах різних ГЗК Кривбасу (рис. 2), отримані в роботі [17].

Аналіз залежностей рис. 2 свідчить, що збільшення виходу концентрату на 1 % приводить до зменшення питомих витрат на переділ збагачення у середньому на 2–4 грн./т. Наведені дані достатньо

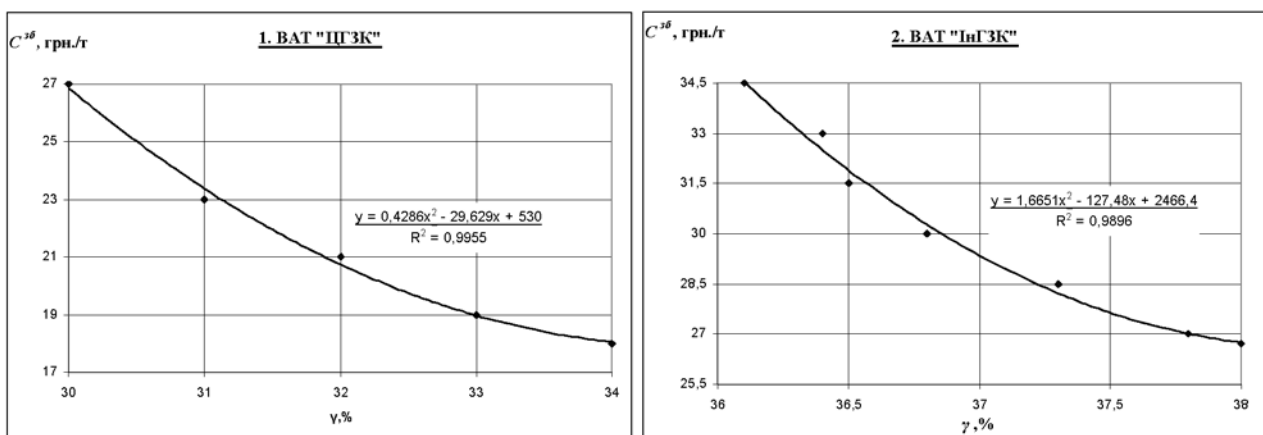


Рис. 2. Тренд залежності питомих витрат з переробки та збагачення (C^{36} , грн./т) від виходу концентрату (γ , %):

1 – Центральний ГЗК; 2 – Інгулецький ГЗК

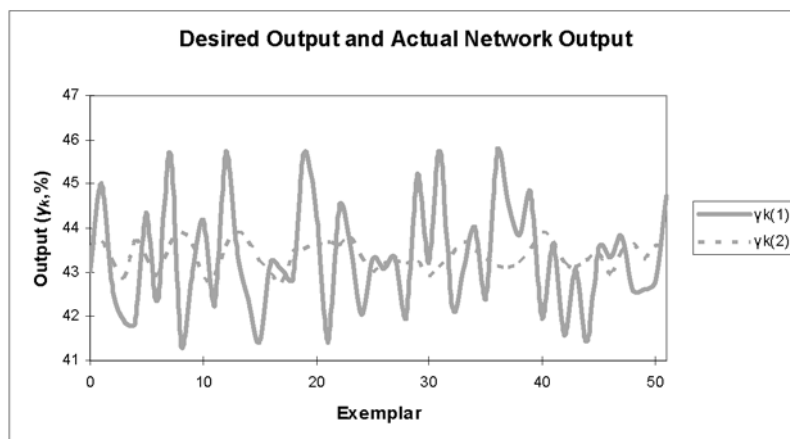


Рис. 3. Зміни показника виходу концентрату (ЦГЗК):

1 – без застосування ІСК; 2 – при застосуванні ІСК

добре апроксимуються поліноміальним трендом другого порядку (коефіцієнт детермінації R^2 перевищує 0,99). З іншого боку, результати моделювання та промислових випробовувань роботи ІСК при відстеженні показників виходу концентрату дозволяють стверджувати про достатню результативність застосування запропонованого підходу (рис. 3).

Розрахунки, виконані на підставі досліджень за даними РЗФ Центрального ГЗК, показують зменшення дисперсії виходу результуючого концентрату приблизно на 1,5 % (за рахунок стабілізуючих властивостей системи інтелектуального керування в умовах локальних ТП збагачення). При цьому математичне сподівання збільшилося на 0,3 %. Останнє дозволяє стверджувати про потенційне збільшення виходу результуючого концентрату у середньому на 0,3 %.

Отже, з урахуванням трендових залежностей (рис. 2) та рекомендацій методики [1] оцінка річного економічного ефекту за рахунок збільшення виходу результуючого концентрату на прикладі РЗФ Центрального ГЗК буде складати

$$E_p = \Delta\gamma \cdot \Delta C^{36} \cdot Q_p + \Delta\gamma \cdot C^k \cdot Q_p = \Delta\gamma \cdot Q_p (\Delta C^{36} + C^k), \quad (1)$$

де E_p – оцінка значення загального річного економічного ефекту, що очікується, грн.; $\Delta\gamma$ – приріст значення виходу результуючого концентрату за рахунок стабілізації технологічних показників, % (на підставі вищезазначених міркувань приймаємо $\Delta\gamma = 0,3\%$); ΔC^{36} – зменшення питомої собівартості переділу збагачення за рахунок збільшення виходу концентрату на 1 %, грн./т (для розрахунку приймаємо $\Delta C^{36} = 2$ грн./т); C^k – ринкова ціна 1 т концентрату вста-

новленої якості, вологості, домішок тощо, грн./т (від 70 \$/т в цінах першого півріччя 2008 р.); Q_p – усереднена річна продуктивність типової секції РЗФ з переробки руди, т/рік (з урахуванням проектної місячної продуктивності, ремонтних та інших вимушених простой, для цього приймаємо $Q_p = 1,2$ млн. т/рік).

При цьому перша складова формули (1) враховує зменшення собівартості переділу збагачення, а друга – збільшення доходу за рахунок реалізації додаткового концентрату. З урахуванням цього розрахунок інтегрованого значення річного економічного ефекту для однієї типової секції РЗФ в умовах Центрального ГЗК дає

$$E_p = 0,003 \times 1200000 (2 + 340) = 1\,231\,200 \text{ грн.} \approx 1,23 \text{ млн. грн.}$$

Для розрахунку решти показників економічної ефективності та терміну окупності при створенні ІСК застосуємо відомі методики [3].

Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($e_{кв}$) на впровадження ІСК розраховується за формулою

$$e_{кв} = E_p / (K_B + E_B), \quad (2)$$

де K_B – капітальні витрати на створення ІСК; E_B – експлуатаційні витрати на впровадження, експлуатацію та обслуговування системи.

Гранична величина капітальних витрат на створення ІСК, призначеної для одночасного контролю однієї технологічної лінії (секції) РЗФ, згідно з [1] становить 600 тис. грн.

Експлуатаційні витрати на рік (12 місяців) з розрахунку 1,5 % на місяць складуть

$$E_B = 0,015 K_B \times 12 = 108 \text{ тис. грн.}$$

Тоді на підставі залежності (2) коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень дорівнює

$$e_{\text{кв}} = 1\,231\,200 / (600\,000 + 108\,000) = 1,74.$$

Термін повної окупності системи

$$T = 1/e_{\text{кв}} = 1/1,74 \approx 0,6 \text{ р.} = 7,2 \text{ міс.} \quad (3)$$

Схожі результати дають аналогічні розрахунки для РЗФ інших ГЗК Кривбасу.

ВИСНОВКИ

1. Розрахунок економічної ефективності впровадження ІСК в умовах секції РЗФ з річним обсягом продуктивності переробки за рудою 1,2 млн. т при збільшенні виходу (за рахунок стабілізації) сумарного концентрату на 0,3 %, капітальних витратах 600 тис. грн., додаткових експлуатаційних витратах 100 тис. грн. показує, що інтегральний річний економічний ефект складає 1,23 млн. грн., строк окупності проекту 0,6 року.

2. Результати промислових випробувань ІСК секцією збагачення та розрахунки потенційного економічного ефекту свідчать про доцільність впровадження подібних рішень в умовах технологічних ліній вітчизняних ГЗК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко В. М. Управління роботою гірничозбагачувального комбінату при використанні інформаційних технологій 21-го сторіччя / В. М. Назаренко, М. В. Назаренко, С. А. Хоменко, А. І. Купін // Академический вестник Криворожского территориального отделения Международной Академии компьютерных наук и систем. – 2001. – № 7–8. – С. 43–49.
2. Назаренко В. М. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку інтегрованих систем управління на підприємствах ГМК / В. М. Назаренко, А. І. Купін // Академический вестник Международной Академии компьютерных наук и систем. – 2007. – № 20. – С. 61–66.
3. Купін А. І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології : монографія. – Кривий Ріг : КТУ, 2008. – 204 с.
4. Купін А. І. Обґрунтування використання технологій штучного інтелекту для управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів / А. І. Купін // Вісник КТУ. – 2003. – Вип. 1. – С. 51–55.
5. Гвоздик В. С. Реализация согласованного управления мельницами измельчения на основе применения нечеткого контролера / В. С. Гвоздик, А. И. Купин // Разраб. рудн. месторожден. – 2005. – Вып. 88. – С. 148–152.
6. Купін А. И. Исследование авторегрессионных моделей нейросетевой идентификации для процессов обогащительной технологии / А. И. Купин, В. М. Назаренко // Матеріали XIV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика–2007). – Ч. 2. – Севастополь : СМУЯС-ІП, 2007. – С. 147–149.
7. Купін А. И. Исследование инверсных моделей нейроконтроллера для систем интеллектуального управления

ТП горнорудных предприятий / А. И. Купин, С. А. Рубан // Вісник КТУ. – 2007. – № 18. – С. 157–161.

8. Назаренко В. М. Інтелектуальне управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів / В. М. Назаренко, А. І. Купін // Матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика–2006). – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – С. 406–409.
9. Kupin A. Neural identification of technological process of iron ore beneficiation / A. Kupin // Proceedings of 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems Technology and Applications (IDAACS'2007). – 2007. – P. 225–227.
10. Мишель Ж. Программируемые контроллеры: архитектура и применение / Мишель Ж. – М. : Машиностроение, 1992. – 320 с.
11. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Практическое применение языков стандарта МЭК 61131-3 / И. В. Петров ; под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М. : Солон-Пресс, 2004. – 254 с.
12. Андреев Е. Б. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е. Б. Андреев, Н. А. Куцевич, О. В. Синенко. – М. : РТСОфт, 2004. – 176 с.
13. Анашкин А. С. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления / А. С. Анашкин, Э. Д. Кадыров, В. Г. Хазаров ; под ред. проф. В. Г. Хазарова – СПб. : П-2, 2004. – 368 с.
14. Ослендер Д. Управляющие программы для механических систем: объектно-ориентированное проектирование систем реального времени / Д. Ослендер, Дж. Риджи, Дж. Ринггенберг. – М. : БИНОМ Лаборатория базовых знаний, 2004. – 413 с.
15. Краснопопосовский А. С. Информационный синтез интеллектуальных систем управления / Краснопопосовский А. С. – Сумы : СумДУ, 2004. – 261 с.
16. Костров Б. В. Микропроцессорные системы и микроконтроллеры / Б. В. Костров, В. Н. Ручкин. – М. : «ТехБук», 2007. – 320 с.
17. Варава Л. М. Методичні підходи до розробки підвищення конкурентоспроможності сировинної продукції / Л. М. Варава // Вісник КТУ. – № 21. – 2008. – С. 237–241.

Надійшла 16.04.2009

Купин А. И.

СТРУКТУРА ПРОТОТИПА И ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Приведена структурная схема прототипа интеллектуальной системы управления секцией магнитного обогащения железной руды. На основе результатов промышленных испытаний сделана оценка экономической эффективности внедрения подобной системы в условиях обогатительного производства.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, обогащение, железная руда, эффективность.

Kupin A. I.

FEASIBILITY REPORT ON INTRODUCTION OF THE INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM FOR IRON ORE BENEFICATION PROCESS

The block diagram of the prototype of an iron ore magnetic separation intellectual control system is presented. On the basis of industrial tests results cost-effectiveness of this system introduction at the concentration plant has been estimated.

Key words: intellectual control system, concentration, iron ore, efficiency.

МЕТОД СИНТЕЗА НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

С целью автоматизации построения численных моделей количественных зависимостей в работе решена актуальная задача построения нейро-нечетких аппроксиматоров. Предложены метод синтеза и модель нейро-нечеткой сети, позволяющие строить нейро-нечеткие регрессионные модели аппроксимируемой зависимости, обладающие способностями к обобщению и субъективному оцениванию достоверности результата.

Ключевые слова: диагностика, нейро-нечеткая сеть, аппроксимация.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании, в процессе производства, а также при эксплуатации состояние сложных технических объектов, как правило, описывается достаточно большим числом параметров, измерение части которых может быть довольно дорогостоящим, трудоемким, либо приводящим к разрушению или снижению ресурса объекта диагностики.

Поэтому на практике весьма актуальна задача моделирования зависимостей между параметрами сложных технических объектов, решение которой позволяет исключить необходимость измерения значительной части сложноизмеримых параметров.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть задана обучающая выборка $\langle x, y \rangle$, где $x = \{x^s\}$, $y = \{y^s\}$, $x^s = \{x_j^s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$; $j = 1, 2, \dots, N$; x_j^s – значение j -го признака s -го экземпляра выборки, y^s – значение выходного признака, сопоставленное s -му экземпляру обучающей выборки, S – количество экземпляров, N – количество признаков.

Задача моделирования зависимости $y(x)$ может быть представлена как задача отыскания аппроксимирующей функции $y^s = f(x^s)$, такой, что критерий качества модели E будет минимально возможным (в идеале – равным нулю) или приемлемым (меньше некоторой заранее заданной константы ϵ). Чаще всего E определяют как

$$E = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^S (y^s - f(x^s))^2 \rightarrow \min.$$

2 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

В общем случае задача построения модели зависимости по точечным данным может рассматриваться как задача построения многомерной нелинейной регрессии на всей выборке данных с помощью метода наименьших квадратов [1]. Недостатками данного подхода являются: необходимость предварительного задания (как правило, пользователем) вида аппроксимирующей функции (идентификация структуры) для регрессионной модели; требование статистической репрезентативности выборки – каждая разновидность объектов в выборке должна быть представлена с частотой, пропорциональной частоте ее встречаемости в генеральной совокупности (ввиду ограниченности объема выборки, условий моделирования (например, пассивного эксперимента), а также неопределенности параметров генеральной совокупности это требование не всегда возможно выполнить на практике); зависимость методов градиентного поиска, применяемых для поиска значений параметров регрессионной модели, от выбора начальной точки поиска в пространстве управляемых параметров и неопределенность выбора начальной точки.

Метод группового учета аргументов [2] позволяет решить задачу структурно-параметрической идентификации модели зависимости в условиях обучающей выборки малого объема. Однако, ввиду чрезвычайно большого разнообразия критериев, используемых в методе и разновидностей самого метода, на практике его применение требует заметного участия пользователя. Кроме того, для сложных задач метод приводит к построению полиномиальных моделей большой размерности, сложных для анализа и недостаточно удобных для применения в задачах диагностики.

Широкое применение при решении данной задачи на практике получили также методы вычислительного интеллекта: искусственные нейронные [3] и нейро-нечеткие [4–7] сети.

Нейронные сети, хотя, как правило, и позволяют получить приемлемое решение, тем не менее, являются медленно обучающимися, сильно зависят от выбора начальной точки поиска функционала ошибки в процессе весов, а также представляют собой структуры, сложные для последующего анализа.

Нейро-нечеткие сети, в отличие от нейронных сетей, сочетают в себе способности к обучению, а также являются логически прозрачными (интерпретируемыми), однако они, как правило, не обладают (или заметно слабее обладают) обобщающими свойствами.

Кроме того, известные методы [1–4, 6] не обеспечивают синтезируемым моделям способность самостоятельно оценивать уверенность в принимаемом решении.

Целью данной работы является создание метода синтеза нейро-нечеткой сети, обладающей способностями к обобщению, для построения моделей зависимостей в условиях малых выборок, а также позволяющих оценивать уверенность результатов расчетов.

Разрабатываемый метод должен решать такие задачи, как: формирование разбиения признакового пространства, выделение нечетких термов для признаков, синтез структуры нейро-нечеткой сети (определение числа слоев и нейронов в слоях, задание дискриминантных и активационных функций нейронов, определение топологии связей между нейронами), а также настройка значений весовых коэффициентов нейронов сети.

3 РАЗБИЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ

Для выделения нечетких термов необходимо предварительно разбить пространство признаков на множество прямоугольных областей, проекции которых на координатные оси признаков позволят разбить их на интервалы значений признаков, координаты границ которых можно будет использовать для настройки параметров функций принадлежности к нечетким термам. Для выделения прямоугольных блоков можно использовать метод решеток [6, 7] или метод с выделением интервалов значений признаков с неизменным номером класса [7].

Метод решеток [6] требует задания шага разбиения, а метод [7] требует предварительного выделения классов. Поскольку мы рассматриваем задачу ап-

проксимации количественной зависимости, то классы не заранее заданы. Тем не менее, представляется возможным выделить псевдоклассы. Для этого диапазон значений выходного признака следует разбить на интервалы, например, следующим образом:

$$y^{s*} = \left\{ k \mid \frac{(k-1)}{K} \leq \frac{y^s - \min_{p=1,2,\dots,S} \{y^p\}}{\max_{p=1,2,\dots,S} \{y^p\} - \min_{p=1,2,\dots,S} \{y^p\}} < \frac{k}{K} \right\},$$

где $y^{s*} \in \{k\}$, $k = 1, 2, \dots, K$; K – число классов.

Количество псевдоклассов предлагается выбирать, используя формулу

$$K = \min \left(\max \left(10 \ln S, \frac{(\max_{p=1,2,\dots,S} \{y^p\} - \min_{p=1,2,\dots,S} \{y^p\})}{\epsilon} \right), \frac{S}{2} \right).$$

В результате использования метода [6] или [7] мы получим разбиение пространства признаков на блоки $\{B_b\}$, а осей признаков – на интервалы $\{x_{i,q} = \langle L_{i,q}, R_{i,q} \rangle\}$, где $x_{i,q}$ – q -й интервал значений i -го признака; $L_{i,q}, R_{i,q}$ – соответственно, координаты левой и правой границ q -го интервала значений i -го признака, b – номер блока. Обозначим: N_i – количество интервалов, на которые разбит диапазон значений i -го признака, B – количество прямоугольных блоков, S_b – количество экземпляров обучающей выборки, попавших в b -й блок.

4 РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ

Вместо построения одной сложной регрессионной модели на основе всей выборки данных представим результирующую модель как объединение частных регрессионных моделей, построенных для каждого блока в отдельности. Это позволит упростить и ускорить построение результирующей модели, поскольку существенно сократит объем обрабатываемых при построении частных моделей данных, а также сделает возможным выявить локально наиболее важные признаки и выделить локальный характер зависимости, что крайне важно при решении задач диагностики.

Таким образом, для каждого выделенного блока B_b необходимо построить частную регрессионную модель $y^s = f_b(x^s)$. При этом после выделения блоков возможны следующие случаи:

- в блок попало два и более экземпляра обучающей выборки;
- в блок попал только один экземпляр из обучающей выборки;
- в блок не попало ни одного экземпляра.

Для каждого блока B_b , в который попали, по крайней мере, два экземпляра обучающей выборки,

определим коэффициенты частных регрессионных моделей. При этом предварительно упорядочим номера блоков так, чтобы вначале были блоки, содержащие два и более экземпляра, а затем блоки, в которые попало меньше экземпляров.

Вначале определим с помощью неитеративного метода наименьших квадратов [1] коэффициенты одномерных линейных регрессий по каждому признаку:

$$\forall x^s \in B_b : f_{b,i}(x^s) = \beta_{bi}x_i^s + \beta_{b0}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где $f_{b,i}$ – линейная регрессионная модель по i -му признаку для экземпляров b -го блока, β_{bi} , β_{b0} – коэффициенты уравнения регрессии.

После чего оценим ошибку этих моделей для экземпляров, попавших в данный блок:

$$E_{b,i} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left\{ (y^s - f_{b,i}(x^s))^2 \mid x^s \in B_b \right\}.$$

Выберем модель с наименьшей ошибкой:

$$p = \arg \min_{p=1, 2, \dots, N} \{E_{b,i}\}.$$

Если ошибка лучшей одномерной линейной регрессионной модели является приемлемой, т. е.

$E_{b,p} \leq \frac{\epsilon S_b}{S}$, то примем ее в качестве результирующей модели для данного блока: $f_b(x^s) = f_{b,i}(x^s)$; в противном случае – построим многомерную линейную регрессионную модель f_{bL} [1] для всего набора признаков для экземпляров, попавших в b -й блок:

$$\forall x^s \in B_b : f_{bL}(x^s) = \sum_{i=1}^N \beta_{bi}x_i^s + \beta_{b0},$$

и оценим ошибку этой модели для экземпляров, попавших в данный блок:

$$E_{bL} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left\{ (y^s - f_{bL}(x^s))^2 \mid x^s \in B_b \right\}.$$

Если ошибка многомерной линейной регрессионной модели является приемлемой, т. е. $E_{bL} \leq \frac{\epsilon S_b}{S}$, то примем ее в качестве результирующей модели для данного блока: $f_b(x^s) = f_{bL}(x^s)$; в противном случае – построим многомерную нелинейную регрессионную модель [1] для всего набора признаков для экземпляров, попавших в b -й блок:

$$\forall x^s \in B_b : f_{bNL}(x^s) = \Phi_b \left(\sum_{i=1}^N \beta_{bi}x_i^s + \beta_{b0} \right),$$

где Φ_b – некоторая нелинейная базисная элементарная функция (например, логистическая сигмоидная),

коэффициенты которой β_{bi} определим с помощью нелинейного метода наименьших квадратов, и оценим ошибку этой модели для экземпляров, попавших в данный блок:

$$E_{bNL} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left\{ (y^s - f_{bNL}(x^s))^2 \mid x^s \in B_b \right\}.$$

Если ошибка многомерной линейной регрессионной модели является приемлемой, т. е. $E_{bNL} \leq \frac{\epsilon S_b}{S}$, то примем ее в качестве результирующей модели для данного блока: $f_b(x^s) = f_{bNL}(x^s)$; в противном случае в качестве результирующей модели примем ту частную регрессионную модель, которая обеспечивает минимум ошибки.

Для каждого блока B_b , в который не попал ни один экземпляр из обучающей выборки, будем определять значение выходного параметра на основе частных регрессионных моделей, построенных для тех блоков, в которые попали экземпляры. При этом возникает необходимость определить принцип комбинирования частных моделей. Это можно сделать одним из двух способов.

Первый способ заключается в том, чтобы на основе определенного критерия выявить из имеющихся наиболее подходящую частную модель и использовать ее для блока, в который не попали экземпляры.

Предлагается использовать следующие критерии (обозначим: P – число блоков, в которые попало два и более экземпляров, p – номер блока, причем учитываются только блоки, содержащие два и более экземпляров):

– критерий минимума расстояния:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1, 2, \dots, P} \{d^2(b, p)\}}(x^s),$$

где

$$d^2(b, p) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \{(R_{i,q} - L_{i,q} - R_{i,t} + L_{i,t})^2 \mid x_{i,q} \in B_b, x_{i,t} \in B_p\};$$

– критерий минимума ошибки:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1, 2, \dots, P} \{E_p\}}(x^s);$$

– критерий максимума объема обучающего множества:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1, 2, \dots, P} \{S_p\}}(x^s) = f_{\arg \min_{p=1, 2, \dots, P} \left\{ \frac{1}{S_p} \right\}}(x^s);$$

– критерий минимума числа используемых переменных:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1, 2, \dots, P} \{N_p\}}(x^s),$$

где N_{f_p} – число переменных, используемых в регрессионной модели блока, коэффициенты при которых не равны нулю;

– критерий минимума сложности вычислений функции:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1,2,\dots,P} \{t_p\}}(x^s);$$

где t_p – сложность вычисления функции f_p для одного экземпляра, выраженная в некоторых единицах (время или количество элементарных операций сложения).

На основе данных первичных критериев отбора моделей можно сформировать более сложные интегральные критерии:

– комбинированный критерий минимума расстояния – максимума объема обучающего множества:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1,2,\dots,P} \left\{ \frac{d^2(b,p)}{S_p} \right\}}(x^s);$$

– комбинированный критерий минимума расстояния и ошибки – максимума объема обучающего множества:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1,2,\dots,P} \left\{ \frac{E_p d^2(b,p)}{S_p} \right\}}(x^s);$$

– комбинированный критерий минимума расстояния, ошибки и числа используемых переменных – максимума объема обучающего множества:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1,2,\dots,P} \left\{ \frac{N_{f_p} E_p d^2(b,p)}{S_p} \right\}}(x^s);$$

– комбинированный критерий минимума расстояния, ошибки, числа используемых переменных и сложности – максимума объема обучающего множества:

$$f_b(x^s) = f_{\arg \min_{p=1,2,\dots,P} \left\{ \frac{N_{f_p} E_p t_p d^2(b,p)}{S_p} \right\}}(x^s).$$

Второй способ заключается в том, чтобы определить функцию для блока, в который не попали экземпляры, на основе всех построенных частных моделей. Для этого предлагается использовать модификацию рекуррентного метода потенциальных функций [8, 9].

По аналогии с методом [8, 9] определим функцию для блока, в который не попали экземпляры, как:

$$f_b(x^s) = \frac{\sum_{p=1}^P f_p(x^s) e^{-d^2(b,p)}}{\sum_{p=1}^P e^{-d^2(b,p)}}.$$

Поскольку здесь знаменатель является константным, его для удобства реализации в нейробазисе целесообразно внести внутрь суммы числителя. Также заметим, что в числителе потенциал, наводимый остатальными блоками на данный блок, является константным для каждого из блоков в том смысле, что меняется только f_p . Для упрощения реализации в нейробазисе выделим динамическую часть (зависящую от распознаваемого экземпляра) и статическую часть (независящую от распознаваемого экземпляра), которую заменим константой $\omega_{b,p}$. С учетом данных замечаний запишем правило для определения f_b :

$$f_b(x^s) = \sum_{p=1}^P \omega_{b,p} f_p(x^s), \quad \omega_{b,p} = \frac{e^{-d^2(b,p)}}{\sum_{p=1}^P e^{-d^2(b,p)}},$$

где $\omega_{b,p}$ – константный потенциал, наводимый p -м блоком на b -й.

По аналогии с первым способом, рассмотренным выше, переопределим константные потенциалы для того, чтобы учесть различные критерии выбора моделей:

– критерий максимума объема обучающего множества:

$$\omega_{b,p} = \frac{S_p e^{-d^2(b,p)}}{\sum_{q=1}^P S_q e^{-d^2(b,q)}}.$$

где S_p – количество экземпляров обучающей выборки, попавших в область p -го блока пространства признаков, по которым построена модель f_p .

– комбинированный критерий минимума ошибки – максимума объема обучающего множества:

$$\omega_{b,p} = \frac{S_p e^{-E_p d^2(b,p)}}{\sum_{q=1}^P S_q e^{-E_q d^2(b,q)}}.$$

– комбинированный критерий минимума расстояния, ошибки, числа используемых переменных и сложности – максимума объема обучающего множества:

$$\omega_{b,p} = \frac{S_p e^{-E_p d^2(b,p)}}{N_{f_p} \sum_{q=1}^P \frac{S_q}{N_{f_q}} e^{-E_q d^2(b,q)}}.$$

Другие критерии при необходимости можно определить подобным образом.

Для блоков, в которые попал всего один экземпляр, задать правило определения частной регрессионной модели можно одним из трех способов.

Первый способ заключается в том, чтобы рассматривать все значения внутри блока как константные, равные выходу единственного экземпляра (сингтон):

$$f_b(x^s) = \left\{ y^h \mid x^h \in B_b, x^s \in B_b \right\}.$$

Второй способ заключается в том, чтобы формировать функцию аналогично блокам, в которые не попал ни один экземпляр.

Третий способ – комбинированный:

$$f_b(x^s) = \begin{cases} y^h, x^h \in B_b, x^s \in B_b, e^{-d(x^h, x^s)} > 0,5; \\ f_b(x^s) = \sum_{p=1}^P \omega_{b,p} f_p(x^s), x^h \in B_b, \\ x^s \in B_b, e^{-d(x^h, x^s)} \leq 0,5. \end{cases}$$

Для тех блоков, в которые попало более двух экземпляров, но требуемой точности не удалось достичь, можно выполнить дополнительное разбиение на подблоки, удалив разбиваемый блок и добавив новые. После чего для каждого нового блока следует построить отдельную частную модель аналогичным образом.

5 НЕЙРО-НЕЧЕТКАЯ СЕТЬ

На основе сформированного разбиения и построенных частных моделей представляется возможным синтезировать нейро-нечеткую сеть, схема которой изображена на рис. 1. Сеть состоит из четырех слоев

и является сетью прямого распространения сигнала (связи между нейронами внутри каждого слоя, обратные связи, а также связи нейрона с самим собой отсутствуют).

Внешний входной сигнал поступает на входы нейронов первого скрытого слоя сети.

Определим общее число термов всех признаков для сформированного разбиения как $z = \prod_{i=1}^N N_i$. Тогда

первые z нейронов первого слоя представляют собой функциональные элементы, определяющие принадлежность распознаваемого экземпляра к нечетким термам интервалов значений признаков (на рис. 1 обозначены треугольниками, обращенными прямым углом влево), что предлагается реализовать на основе трапециевидной функции принадлежности:

$$\mu_{i,j}(x_i^s) = \begin{cases} 0, & x_i^s < L_{i,j} - \delta_i; \\ \frac{x_i^s - L_{i,j} + \delta_i}{\delta_i}, & L_{i,j} - \delta_i \leq x_i^s < L_{i,j}; \\ 1, & L_{i,j} \leq x_i^s \leq R_{i,j}; \\ \frac{R_{i,j} - x_i^s}{\delta_i}, & R_{i,j} < x_i^s \leq R_{i,j} + \delta_i; \\ 0, & x_i^s > R_{i,j} + \delta_i, \end{cases}$$

где δ_i – некоторая небольшая неотрицательная константа (в простейшем случае, $\delta_i = 0$).

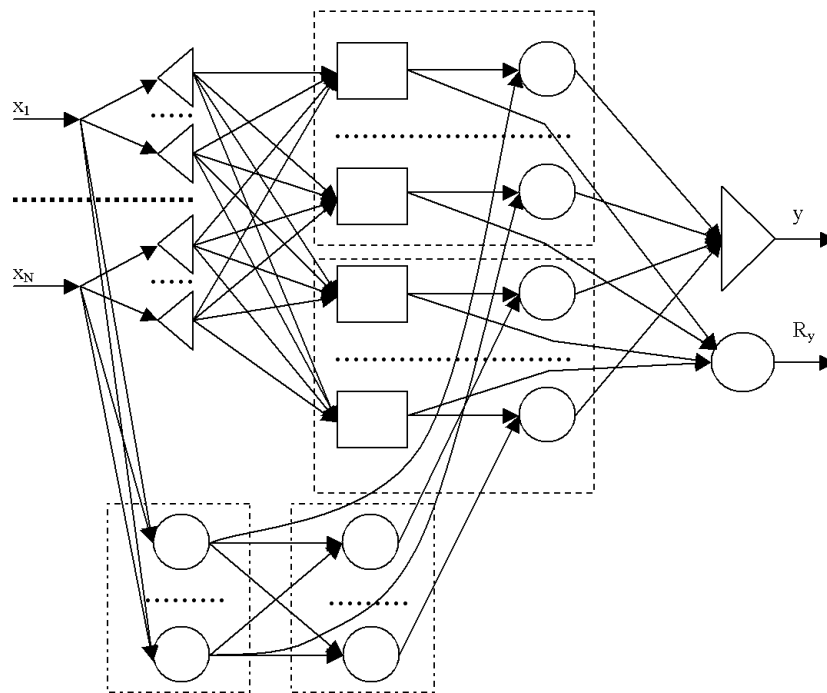


Рис. 1. Схема нейро-нечеткой сети

Остальные P нейронов первого слоя (обозначены окружностями, заключенными в штрихпунктирный блок) реализуют частные регрессионные модели для соответствующих блоков разбиения пространства признаков, в которые попали экземпляры обучающей выборки.

Второй слой сети содержит две группы нейронов: одна группа нейронов (обозначены на рис. прямоугольниками) определяет принадлежность распознаваемого экземпляра к блокам разбиения пространства признаков; другая группа нейронов (обозначена окружностями) комбинирует регрессионные модели для оценивания выходного значения для тех блоков пространства признаков, куда не попали экземпляры обучающей выборки.

Предпоследний (третий) слой сети содержит нейроны, выполняющие селекцию частной модели для каждого из блоков разбиения пространства признаков.

Выходной (четвертый) слой сети содержит два нейрона: первый (показан треугольником, обращенным прямым углом вправо) осуществляет дефаззификацию и выдает на выходе четкое значение выходного признака, рассчитанное сетью; второй нейрон (показан окружностью) выдает R_y – субъективную оценку уверенности сети в принимаемом решении.

Первые z нейронов первого слоя будут реализовывать расчет принадлежности распознаваемого экземпляра к нечетким термам признаков.

При использовании первого способа определения функций для блоков дискриминантные функции нейронов сети будут определяться по формулам:

$$\varphi^{(1,i)}(w^{(1,i)}, x^{(1,i)}) = \sum_{j=1}^N w_j^{(1,i)} x_j^{(1,i)} + w_0^{(1,i)},$$

$$i = z + 1, z + 2, \dots, z + P;$$

$$\varphi_j^{(2,i)}(w_j^{(2,i)}, x_j^{(2,i)}) = \max(w_j^{(2,i)}, x_j^{(2,i)}),$$

$$i = 1, 2, \dots, B; j = 1, 2, \dots, z;$$

$$\varphi^{(2,i)}(w^{(2,i)}, x^{(2,i)}) = \sum_{j=1}^P w_j^{(2,i)} x_j^{(2,i)} + w_0^{(2,i)},$$

$$i = B + 1, B + 2, \dots, 2B - P;$$

$$\varphi^{(3,i)}(w^{(3,i)}, x^{(3,i)}) = \prod_{j=1}^2 w_j^{(3,i)} x_j^{(3,i)},$$

$$i = 1, 2, \dots, B; j = 1, 2;$$

$$\varphi^{(4,1)}(w^{(4,1)}, x^{(4,1)}) = \sum_{j=1}^B w_j^{(4,1)} x_j^{(4,1)} + w_0^{(4,1)},$$

$$\varphi_j^{(4,2)}(w_j^{(4,2)}, x_j^{(4,2)}) = \min(w_j^{(4,2)}, x_j^{(4,2)}),$$

$$j = 1, 2, \dots, B,$$

функции активации нейронов будут задаваться формулами

$$\psi^{(1,i)}(\alpha) = \Phi_i(\alpha), \quad i = 1, 2, \dots, P$$

(для линейных моделей примем: $\Phi_i(\alpha) = \alpha$);

$$\psi^{(2,i)}(\varphi^{(2,i)}) = \min_{j=1,2,\dots,z} \{\varphi_j^{(2,i)}\}, \quad i = 1, 2, \dots, B;$$

$$\psi^{(2,i)}(\alpha) = \alpha, \quad i = B + 1, B + 2, \dots, 2B - P;$$

$$\psi^{(3,i)}(\alpha) = \alpha, \quad i = 1, 2, \dots, B;$$

$$\psi^{(4,1)}(\alpha) = \alpha; \quad \psi^{(4,2)}(\varphi^{(4,2)}) = \max_{j=1,2,\dots,B} \{\varphi_j^{(3,i)}\},$$

а весовые коэффициенты сети будут задаваться по формуле

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} 0, \eta = 1, i = z + 1, z + 2, \dots, z + P, j = 0; \\ \beta_{bj}, \eta = 1, b = (i - z), i = z + 1, \\ \quad z + 2, \dots, z + P, j = 1, 2, \dots, N; \\ \omega_{(i-B),j}, \eta = 2, i = B + 1, B + 2, \dots, \\ \quad 2B - P, j = 1, 2, \dots, P; \\ 0, \eta = 2, i = B + 1, B + 2, \dots, 2B - P, j = 0; \\ 0, \eta = 2, x_{m,g} \in B, i = 1, 2, \dots, B, j = z(x_{m,g}), \\ \quad m = 1, 2, \dots, N, g = 1, 2, \dots, N_m; \\ 1, \eta = 2, x_{m,g} \notin B, i = 1, 2, \dots, B, j = z(x_{m,g}), \\ \quad m = 1, 2, \dots, N, g = 1, 2, \dots, N_m; \\ 1, \eta = 3, i = 1, 2, \dots, B, j = 1, 2; \\ 0, \eta = 4, i = 1, j = 0; \\ 1, \eta = 4, i = 1, j = 1, 2, \dots, B; \\ 1, \eta = 4, i = 2, j = 1, 2, \dots, B, \end{cases}$$

где $w_j^{(\eta,i)}$ – весовой коэффициент j -го входа i -го нейрона слоя сети, $z(x_{m,g}) = g + \sum_{t=1}^{m-1} N_t$.

При использовании второго способа определения функций для блоков параметры нейронов сети будут определяться так же, как и в предыдущем случае, кроме весов части нейронов второго слоя, для которых константы $\omega_{b,p}$ будут приниматься равными единице для тех p , которые удовлетворяют выбранному критерию, и равными нулю – для остальных p .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью автоматизации построения численных моделей количественных зависимостей в работе решена актуальная задача построения нейро-нечетких аппроксиматоров.

Научная новизна работы заключается в том, что:

– получил дальнейшее развитие нерекуррентный метод потенциальных функций, который модифицирован путем введения комбинации критериев минимума расстояния, ошибки, числа используемых переменных и сложности вычислений функции – макси-

муна об'єму навчаючого множення частної регресійної моделі, що дозволило реалізувати обобщення частних моделей для оцінювання вихідного признака в непокритих навчаючій виборкою областях признакового пространства;

– вперше запропоновано метод синтезу і модель нейро-нечеткої мережі, дозволяють будувати нейро-нечеткі регресійні моделі апроксимованої залежності, що мають здатності до обобщення і суб'єктивному оцінюванню достовірності результату.

Дальніші дослідження можуть бути зосереджені на дослідженні впливу критерію об'єднання регресійних моделей, розробці методів дообучення синтезованих нейро-нечетких моделей на основі методу зворотного розповсюдження помилки, еволюційних і мультиагентних методів.

Робота виконана в рамках госбюджетної теми кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету «Інформаційні технології автоматизації розпізнавання образів і прийняття рішень для діагностики в умовах неопределенності на основі гібридних нечіткологічних, нейросетевих і мультиагентних методів висхідного інтелекту» (номер державної реєстрації 0109U007673).

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Айвазян С. А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных : справочное издание / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
2. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 296 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

5. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник / С. О. Субботін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с.
6. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федюлов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
7. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
8. Айзерман М. А. Метод потенциальных функций в теории обучения машин / М. А. Айзерман, Э. М. Браверман, Л. И. Розоноэр. – М. : Наука, 1970. – 384 с.
9. Фор А. Восприятие и распознавание образов / А. Фор; Пер. с фр. А. В. Серединского; под ред. Г. П. Катгса. – М. : Машиностроение, 1989. – 272 с.

Надійшла 18.08.2009

С. О. Субботін

МЕТОД СИНТЕЗУ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ КІЛЬКІСНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

З метою автоматизації побудови чисельних моделей кількісних залежностей у роботі вирішено актуальне завдання побудови нейро-нечітких апроксиматорів. Запропоновано метод синтезу і модель нейро-нечіткої мережі, що дозволяють будувати нейро-нечіткі регресійні моделі апроксимованої залежності та мають здатності до узагальнення і суб'єктивного оцінювання вірогідності результату.

Ключові слова: діагностика, нейро-нечітка мережа, апроксимація.

S. A. Subbotin

METHOD OF NEURO-FUZZY MODEL SYNTHESIS OF QUANTATIVE DEPENDENCES FOR DIAGNOSTICS AND PREDICTION PROBLEMS SOLVING

The problem of neuro-fuzzy approximator constructing has been solved with the aim to automate the construction of numerical models of quantitative relationships. The neuro-fuzzy network model and method of synthesis are proposed. It allows to build a neuro-fuzzy regression model of approximated dependence with the ability of generalization and subjective evaluation of the result certainty.

Key words: diagnostics, neuro-fuzzy network, approximation.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 681.324

Баркалов А. А.¹, Зеленева И. Я.², Гриценко А. А.³¹Д-р техн. наук, профессор Донецкого национального технического университета²Доцент Донецкого национального технического университета³Магистр Донецкого национального технического университета

СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В данной работе предлагается метод синтеза управляющих автоматов, основанный на использовании параллельных или распределенных систем. Задача синтеза управляющих автоматов в данном случае подразумевает поиск оптимального решения, его верификацию и собственно синтез для заданной элементной базы. Такая трактовка значительно повышает сложность рассматриваемой задачи, однако позволяет получить эффективное решение, что компенсирует затраты на его поиск.

Ключевые слова: оптимизация, верификация, синтез, параллельная система, распределенная система, управляющий автомат.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент существует множество алгоритмов оптимизации управляющих автоматов [1, 2]. Некоторые из этих алгоритмов являются ортогональными, поэтому могут использоваться совместно, образуя при этом различные комбинации. Для того, чтобы оценить эффективность применения того или иного алгоритма оптимизации или их комбинации, необходимо иметь информацию о структуре управляющего автомата и информацию об используемой элементной базе. При этом только информация о структуре управляющего автомата заведомо является предопределенным параметром, в то время как информация об элементной базе может представлять собой набор альтернативных вариантов.

Опираясь на вышесказанное, предлагаемый метод определяет следующие стадии решения задачи синтеза управляющего автомата: сбор информации о возможных вариантах оптимизации (в том числе о комбинациях ортогональных подходов), верификация каждого предположения об оптимизации, сбор статистических данных о предполагаемых результатах синтеза управляющего автомата с использованием заданной элементной базы и принятие решения о синтезе. В процессе выполнения всех стадий, кроме окончательной стадии принятия решения, предполагается решение большого количества однотипных и взаимно-независимых задач, откуда следует практическая необходимость использования параллельных или распределенных систем. Эта необходимость обусловлена как возрастающей сложностью алгоритмов

© Баркалов А. А., Зеленева И. Я., Гриценко А. А., 2010

и увеличивающимся объемом анализируемых данных, так и необходимостью в полной мере использовать ресурсы современных систем. Поэтому в основе предлагаемого метода лежит декомпозиция работ, выполняемых в процессе синтеза управляющего автомата, позволяющая эффективно использовать возможности современных систем.

В данной работе проводится анализ эффективности использования параллельных и распределенных систем для решения задачи синтеза управляющих автоматов. На первом этапе рассматривается выбор модели декомпозиции работ, на основе которой формируется архитектура системы, а также определяются интерфейсы взаимодействия ее компонент. На втором этапе рассматривается задача синтеза управляющего автомата, иллюстрирующая детали применения предлагаемого метода. Результатом анализа является формирование архитектуры параллельной или распределенной системы синтеза управляющих автоматов и рассмотрение ее структурных и поведенческих аспектов.

Ключевым аспектом является то, что метод разработан с использованием объектно-ориентированного подхода [3]. Это проявляется как в способе проведения анализа и проектирования [3, 4], так и в способе документирования полученных решений с использованием унифицированного языка моделирования [5, 6]. Несмотря на то, что рассмотрение вопросов проектирования и конструирования конкретных приложений выходит за рамки данной работы и будет рассмотрено в дальнейшем, все предложенные решения протестированы с использованием языка программирования C++ и механизмов, описанных в [7].

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Первоначальная структура модулей рассматриваемой системы основана на декомпозиции работ с использованием модели делегирования (или иерархической модели) [7]. Данная модель предполагает наличие единого модуля управления (*administrative module*) и нескольких подчиненных модулей (*subordinate modules*) (рис. 1).

Модуль управления распределяет задачи, которые необходимо решить в процессе синтеза управляющего автомата, между подчиненными модулями и управляет процессом их выполнения. После завершения выполнения всех задач модуль управления принимает решение об эффективности применения того или иного метода оптимизации при условии использования той или иной элементной базы. При этом задачи, распределяемые между подчиненными модулями и, как следствие, определяющие их назначение, предлагается разделять на три основных класса.

К первому классу относятся задачи оптимизации, которые отвечают за анализ заданной структуры управляющего автомата и формирование данных, необходимых для выполнения оптимизации. Формируемые данные должны, в первую очередь, обладать свойствами полноты и элементарности. Ко второму классу относятся задачи верификации, которые дают гарантии корректности и непротиворечивости оптимизированных структур управляющих автоматов, что особенно важно для оптимизированных структур управляющих автоматов, полученных в результате применения комбинации ортогональных алгоритмов оптимизации. К третьему классу относятся задачи синтеза, которые выполняют анализ оптимизированной структуры управляющего автомата и генерируют статистические данные, позволяющие оценить эффективность реализации в заданном элементном базисе. Важным аспектом является то, что задача синтеза не обязательно выполняет физический синтез с использованием заданной элементной базы.

К первому классу относятся задачи оптимизации, которые отвечают за анализ заданной структуры управляющего автомата и формирование данных, необходимых для выполнения оптимизации. Формируемые данные должны, в первую очередь, обладать свойствами полноты и элементарности. Ко второму классу относятся задачи верификации, которые дают гарантии корректности и непротиворечивости оптимизированных структур управляющих автоматов, что особенно важно для оптимизированных структур управляющих автоматов, полученных в результате применения комбинации ортогональных алгоритмов оптимизации. К третьему классу относятся задачи синтеза, которые выполняют анализ оптимизированной структуры управляющего автомата и генерируют статистические данные, позволяющие оценить эффективность реализации в заданном элементном базисе. Важным аспектом является то, что задача синтеза не обязательно выполняет физический синтез с использованием заданной элементной базы.

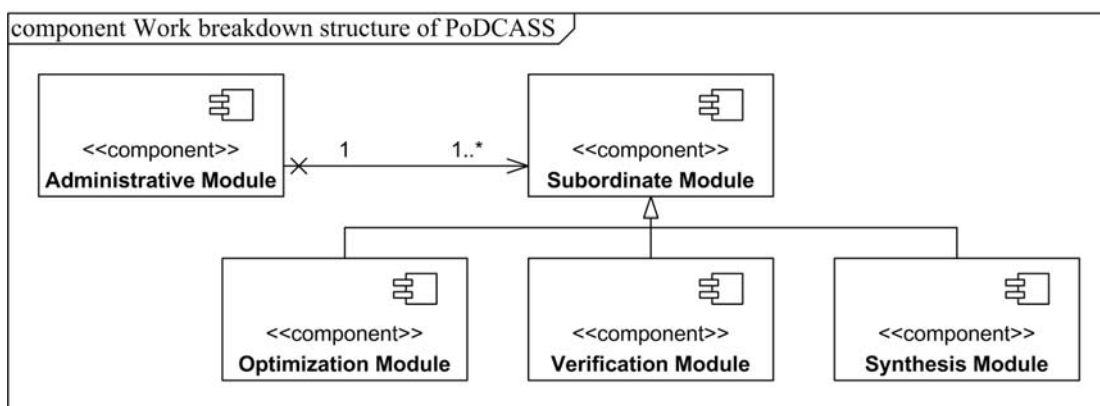


Рис. 1. Модульная структура системы синтеза управляющих автоматов

Она должна в первую очередь предоставить данные о предполагаемых результатах такого синтеза. Следовательно, генерируемые статистические данные должны обладать свойствами полноты и достоверности.

Подчиненные модули могут одновременно решать задачи различных классов, однако более эффективным с точки зрения проектирования подходом является четкое распределение обязанностей между подчиненными модулями [3, 4], как показано на рис. 1.

Предлагаемое разделение модулей и выполняемых ими задач, с точки зрения архитектуры параллельных и распределенных систем, соответствует модели MIMD (*Multiple Programs, Multiple Data*) [7].

СТРУКТУРА МОДУЛЕЙ, ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И РАЗВЕРТЫВАНИЕ

В рамках предлагаемого метода формирование структуры подчиненных модулей может быть отложено до этапа проектирования, в то время как структура модуля управления имеет архитектурные особенности, в частности, предполагает наличие внутренних подсистем двух типов. К первому типу относится подсистема анализа, которая отвечает за выбор алгоритмов оптимизации, формирование альтернативных оптимизированных структур управляющего автомата, выбора элементной базы (или определение множества альтернативных вариантов), сбор и анализ статистических данных синтеза и принятие решения. Ко второму типу относится подсистема управления подчиненными модулями, которая отвечает за определение порядка решения задач, их распределение между подчиненными модулями и управление процессом их выполнения. Такое разделение подсистем позволяет отделить логику синтеза управляющего автомата от деталей управления подчиненными модулями, которые определяются используемым механизмом параллельной или распределенной обработки.

На рис. 2 показан порядок взаимодействия различных модулей и их подсистем между собой в процессе решения задачи синтеза управляющего автомата. Согласно диаграмме деятельности [3, 5, 6], показанной на рис. 2, на начальном этапе подсистема анализа модуля управления отвечает за выбор алгоритмов оптимизации и формирование альтернативных оптимизированных структур синтезируемого управляющего автомата. Результатом выполнения этих действий является формирование сценария синтеза, который является основой для работы подсистем управления подчиненными модулями. Сценарий син-

теза управляющего автомата определяет потоки управления задачами, выполняемыми в процессе синтеза управляющего автомата, и потоки данных, формируемые этими задачами.

Подсистема управления подчиненными модулями анализирует сценарий синтеза, формирует на его основе предполагаемый порядок выполнения задач, распределяет их между подчиненными модулями и управляет процессом их выполнения. Подсистема управления также отвечает за эффективное управление имеющимися ресурсами, в частности, она гарантирует, что в процессе выполнения задач не будут использованы избыточные ресурсы. В то же время подсистема управления не интересуется семантикой выполняемых задач. После завершения выполнения сценария синтеза подсистема управления предоставляет все данные, полученные в результате выполнения задач, подсистеме анализа, которая использует их для принятия решения. Единственным семантическим аспектом, который может интересовать подсистему управления, являются результаты выполнения задач верификации. Нельзя предложить общее решение этой проблемы, поэтому данный аспект должен детально рассматриваться в процессе последующего проектирования.

Способ развертывания системы синтеза зависит от используемого механизма параллельной или распределенной обработки [3, 4, 7] (на рис. 3 показана диаграмма развертывания [3, 5, 6] предлагаемой системы с использованием многопроцессорной архитектуры). То есть, способ развертывания не является основополагающим функциональным фактором предлагаемого механизма и может рассматриваться как ограничение, которое, к тому же, может быть как статическим, так и динамическим. Это ограничение затрагивает лишь подсистемы управления подчиненными модулями и интерфейсы взаимодействия с подчиненными модулями, то есть те архитектурные элементы, которые не касаются логики предметной области. Следовательно, в рамках предлагаемой архитектуры элементы, реализующие логику анализа, оптимизации, верификации и синтеза, не зависят от ограничений, налагаемых механизмом обеспечения параллельной или распределенной обработки.

ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим порядок синтеза управляющего автомата с использованием предложенного метода. На рис. 4 показан вариант исходной структуры синтезируемого управляющего автомата и отмечены основные точки межмодульной оптимизации. Основное отличие межмодульной оптимизации заключается в

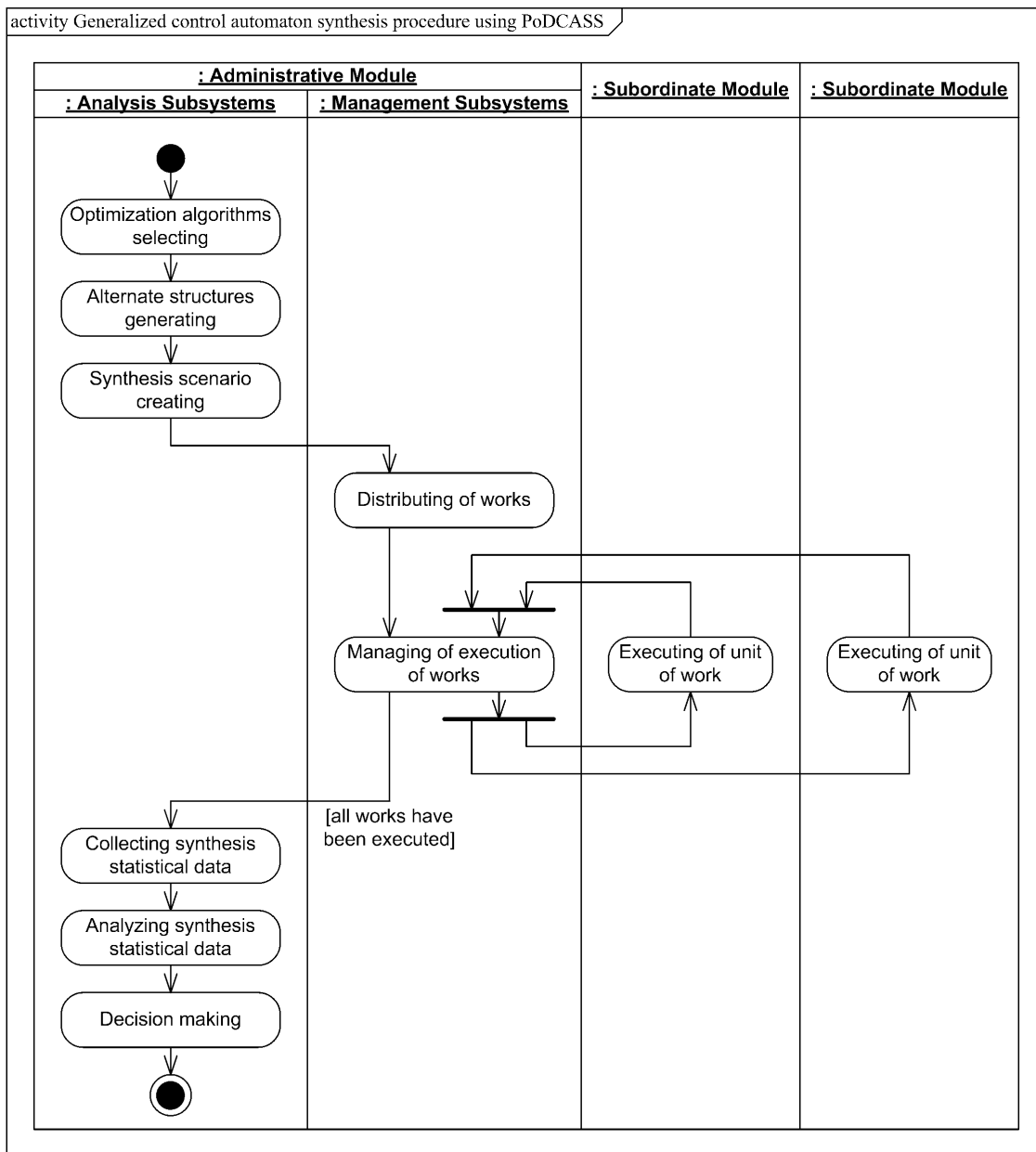


Рис. 2. Разделение задач между различными модулями системы синтеза управляющих автоматов

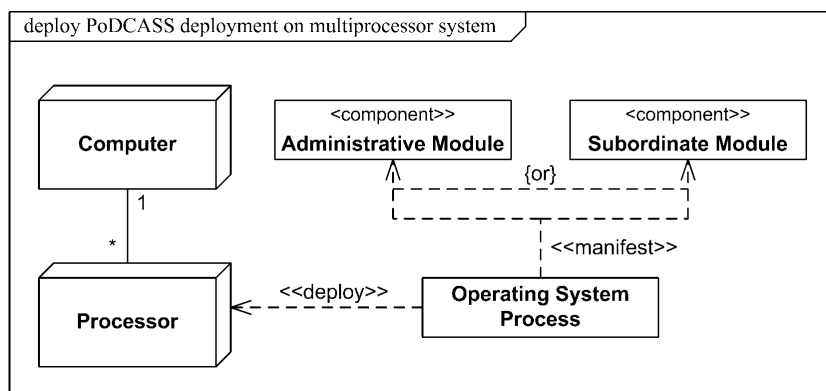


Рис. 3. Схема развертывания системы синтеза на многопроцессорной системе

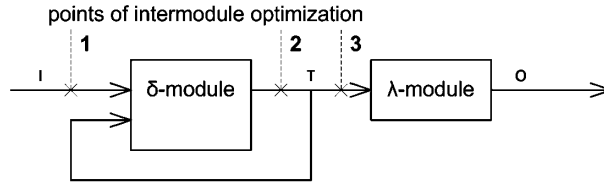


Рис. 4. Исходная структура синтезируемого управляющего автомата

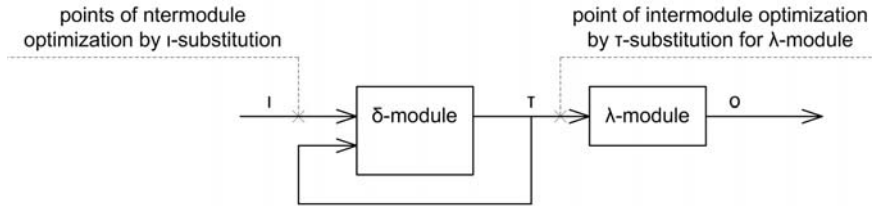


Рис. 5. Точки применения алгоритмов оптимизации

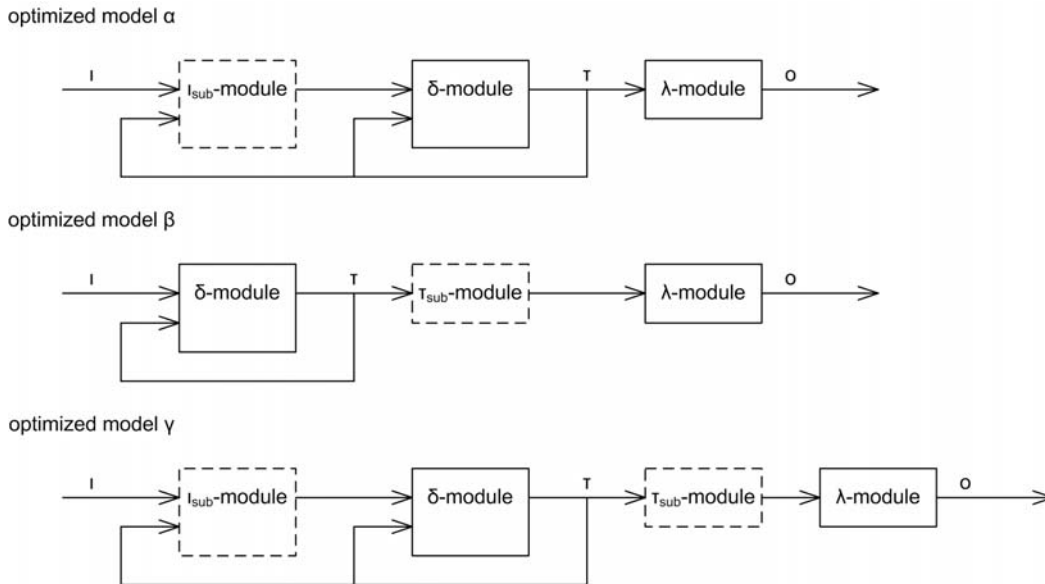


Рис. 6. Альтернативные варианты структуры синтезируемого управляющего автомата

том, что результатом ее применения является появление новых модулей при неизменности существующих, в структуре управляющего автомата.

В данном примере будет рассматриваться применение двух ортогональных алгоритмов [1, 2] (рис. 5): оптимизация замещением входных состояний в точке 1 и оптимизация бинарным кодированием внутренних состояний в точке 3 исходной структуры.

Так как выбранные алгоритмы оптимизации ортогональны, на основе исходной структуры синтезируемого управляющего автомата будет сформировано три альтернативных оптимизированных варианта

структуры управляющего автомата: два тривиальных и один, полученный комбинированием. Все перечисленные варианты синтезируемого управляющего автомата показаны на рис. 6.

Схемы, показанные на рис. 5 и рис. 6, в общем виде представляют результаты выполнения стадий выбора алгоритма оптимизации и формирования альтернативных вариантов оптимизированной структуры управляющего автомата, рассмотренных выше (рис. 2).

Последним этапом предварительного анализа является формирование сценария синтеза управляюще-

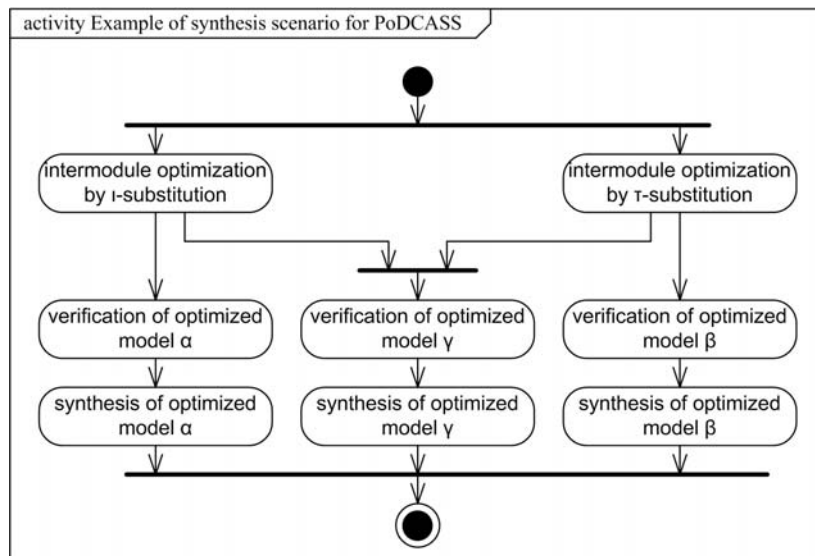


Рис. 7. Пример сценария синтеза управляющего автомата

го автомата. Этот сценарий должен включать выполнение следующих операций: получение результатов оптимизации для выбранных алгоритмов оптимизации, верификацию сформированных альтернативных вариантов структуры управляющего автомата и сбор статистических данных синтеза для этих структур. Существует большое количество вариантов представления потоков управления и потоков данных [3], однако в данном случае была выбрана диаграмма активности [3, 5, 6] (рис. 7), использование которой позволяет сконцентрировать внимание на наиболее важном в данном случае аспекте параллелизма выполнения рассматриваемого сценария.

Созданный сценарий передается подсистемам управления подчиненными модулями, которые отвечают за распределение решаемых задач и контроль их выполнения. Следует обратить внимание на наличие двух важных свойств. Во-первых, сценарий, показанный на рис. 7, определяет зависимости между отдельными видами решаемых задач, но не определяет конкретный порядок их выполнения. То есть, не имея знаний о деталях работы подсистем управления подчиненными модулями, нельзя однозначно сказать, какая задача будет решена раньше: задача синтеза одной из оптимизированных структур или задача верификации комбинированной структуры. Во-вторых, анализ данного сценария позволяет сказать, что для эффективного решения всех задач необходимо наличие двух физических подчиненных модулей. Однако предположение об использовании физических ресурсов конкретизируется только на уровне подсистемы управления подчиненными модулями. Наличие этих

свойств подтверждает высказанное ранее утверждение о строгом распределении обязанностей между подсистемами административного модуля и инкапсуляции аспектов их работы [3, 4]: подсистема анализа реализует логику предметной области (синтеза управляющих автоматов), в то время как подсистема управления подчиненными модулями обеспечивает эффективную реализацию механизма параллельной или распределенной обработки.

Дальнейшее рассмотрение предлагаемого метода требует предварительного решения вопросов выбора конкретного механизма параллельной или распределенной обработки данных и вопросов выбора элементной базы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен метод параллельного или распределенного синтеза управляющих автоматов, разработанный с использованием объектно-ориентированного подхода [3, 4]. Мотивацией для создания предложенного метода является, во-первых, необходимость эффективного практического использования современных систем, во-вторых, необходимость получения эффективных и обоснованных решений задачи синтеза управляющих автоматов с использованием современных алгоритмов оптимизации.

В данной работе рассматривается только анализ предложенного механизма, результатом выполнения которого является предложенная архитектура системы. Рассмотрение и исследование эффективности приложений предложенной архитектуры относительно

конкретных механизмов параллельной и распределенной обработки данных и конкретных алгоритмов оптимизации является основным направлением дальнейшей работы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баркалов О. О. Синтез пристроїв керування на програмованих логічних пристроях / Баркалов О. О. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – 262 с.
2. Barkalov A. A. Synthesis of operational and control automata / Barkalov A. A., Titarenko L. A. – Donetsk : TechPark DonNTU UNITECH, 2009. – 256 pp.
3. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений : пер. с англ. / Буч Г., Максимчук Р. А., Энгл М., Янг Б., Коналлен Д., Хьюстон К. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2008. – 720 с.
4. Мейер Б. Объектно-ориентированное конструирование программных систем : пер. с англ. / Мейер Б. – М. : Русская Редакция, 2005. – 1232 с.
5. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя : пер. с англ. / Буч Г., Рамбо Д., Якобсон И. – 2-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 496 с.
6. Буч Г. UML. Классика CS : пер. с англ. / Буч Г., Якобсон И., Рамбо Д. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 736 с.
7. Хьюз К. Параллельное и распределенное программирование на C++ : пер. с англ. / Хьюз К., Хьюз Т. – М. : Вильямс, 2004. – 672 с.

Надійшла 13.04.2009

УДК 519.816:004.414.3

Баркалов О. О., Зеленьова І. Я., Гриценко А. О.

СИНТЕЗ КЕРУЮЧИХ АВТОМАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗПОДІЛЕНИХ ТА ПАРАЛЕЛЬНИХ СИСТЕМ

В даній роботі запропоновано метод синтезу керуючих автоматів, заснований на використанні паралельних або розподілених систем. Задача синтезу керуючих автоматів в даному випадку включає пошук оптимального рішення, його верифікацію та безпосередньо синтез для обраної елементної бази. Таке трактування значно підвищує складність постановки задачі, проте дозволяє отримати ефективне рішення, що компенсує витрати на його пошук.

Ключові слова: оптимізація, верифікація, синтез, паралельна система, розподілена система, керуючий автомат.

Barkalov A. A., Zelenyova I. J., Grytsenko A. A.

PARALLEL AND DISTRIBUTED SYNTHESIS OF CONTROL AUTOMATA

The method of control automata synthesis within the parallel or distributed systems is proposed in this paper. Solving of the synthesis problem implies, in this case, search of the optimal solution, its verification and actually synthesis on the basis of the specific platform. Such interpretation increases complexity of the considered synthesis problem, but brings us to obtaining an effective solution. In the general case, advantages of the found solution compensate costs for its searching.

Key words: optimization, verification, synthesis, parallel system, distributed system, control automaton.

Дубровин В. І.¹, Колпакова Т. А.², Козлов А. В.³

¹Канд. техн. наук, професор Запорозького національного технічного університета

²Студент Запорозького національного технічного університета

³Студент Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЕКТАМИ

Рассмотрена проблема принятия решений в управлении строительными проектами; проведен анализ существующего программного обеспечения для управления проектами и поддержки принятия решений; обоснована необходимость разработки специализированной СППР для использования в управлении строительными проектами. Поставлены требования к функционированию и реализации СППР для использования в управлении строительными проектами.

Ключевые слова: принятие решений, управление проектами, строительное проектирование, СППР.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях возрастающей конкуренции в сфере управления строительством для получения успешных результатов необходимо применять методы планирования ресурсов и управления проектами.

© Дубровин В. И., Колпакова Т. А., Козлов А. В., 2010

Для совершенствования проектной деятельности можно либо улучшать качество управления каждым отдельным проектом, т. е., например, повышать квалификацию сотрудников, либо повышать качество управления всеми проектами предприятия, создать систему управления проектами и научить сотрудников грамотно ею пользоваться.

Проект – это временное предприятие, предназначенное для создания уникальных продуктов, услуг или результатов [1]. Иначе говоря, проектом считается группа взаимосвязанных задач, выполняемых в рамках выделенного бюджета с целью получения запланированного результата специально созданной для этого командой, причем начало и окончание проектных работ четко определены.

Проекты бывают простыми и сложными, кратко- и долгосрочными, с ограниченным и солидным бюджетом, рискованными и с вполне управляемыми рисками, и результаты их могут довольно серьезно различаться.

Управление проектами (project management) – это область деятельности, которая определяется объемом работ, финансовыми, материальными, человеческими и временными ресурсами, качеством и рисками, в ходе которой определяются и достигаются четкие цели, ведущие к достижению определенного результата.

Функции управления проектом включают: планирование, контроль, анализ, принятие решений, составление и сопровождение бюджета проекта, мониторинг, оценку, отчетность, экспертизу, проверку, бухгалтерский учет, администрирование [2].

Корпоративные системы управления проектами [3, 4] реализуют поддержку большинства вышеперечисленных функций и таким образом обеспечивают руководство компании оперативной информацией о ходе выполнения проектов, о влиянии проектов друг на друга, о прогнозе завершения работ по проектам. Они позволяют вовремя принимать оптимальные управленческие решения, избегать разного рода противоречий и проблем, реагировать на изменения.

Принятие решений – это выбор наиболее предпочтительного варианта достижения поставленной цели из некоторого множества допустимых альтернатив. С помощью методов принятия решений чаще всего решаются задачи выбора наилучших вариантов при проектировании систем в условиях ограниченных ресурсов.

Обоснованность принимаемых решений во многом определяет эффективность деятельности компании, однако наличие большого количества политических, экономических, социальных, юридических и моральных факторов серьезно влияет на принимаемое решение [5]. При принятии действительно сложных решений есть смысл привлекать экспертов – специалистов в рассматриваемой области знаний [6]. Но в этом случае перед руководителем возникают новые вопросы, например, каких экспертов следует пригласить, какие вопросы перед ними поставить и как использовать их знания для принятия оптималь-

ного решения. При этом окончательное решение всегда принимает именно руководитель, поставивший проблему [7].

Чтобы облегчить процесс выбора оптимального решения с учетом заданных критериев и многочисленных факторов, используются математические методы, воплощенные в современных информационных системах поддержки принятия решений (СППР).

Область применения СППР – это, прежде всего, слабоструктурированные проблемы. Для задач, относящихся к области применения СППР, характерна неопределенность, делающая практически невозможным отыскание единственного объективно наилучшего решения [8, 9].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе управления строительными проектами постоянно возникают ситуации, в которых необходимо принимать решения. От некоторых из принятых решений часто зависит направление развития всего проекта, например, выбор исполнителя всего проекта либо отдельных его этапов. В подобной задаче альтернативами являются кандидаты, подавшие заявки на участие в тендере, а критериями – предложения этих кандидатов по стоимости проекта, времени его реализации и т. д. [10]

На рынке программного обеспечения (ПО) присутствует широкий выбор систем, которые можно использовать в сфере управления проектами в целом и непосредственно для решения поставленной задачи.

Существуют две основные возможности выбора ПО для решения задачи принятия решений:

- 1) использовать специализированное ПО на каждом этапе, где требуется производить выбор из набора альтернатив согласно заданным критериям (альтернативы и критерии вводятся вручную);
- 2) использовать встроенные возможности программ для управления проектами. При этом все данные по альтернативам и критериям извлекаются непосредственно из информации о проекте.

Следует отметить, что первый способ требует разработки ПО, специально нацеленного на решение конкретной задачи, так как в большинстве СППР не предусмотрена гибкость и адаптируемость к предметной области. Например:

– IBM Tivoli Risk Manager – приложение ориентировано на внедрение в систему безопасности предприятия [11];

– OPTIMUM 1.0 – используется в случае, когда проблема может быть представлена в виде математи-

ческой функции с возможностью нахождения оптимумов [12];

– RS-Bank V.6 – ориентировано на использование в банковских системах [13];

– Prime Expert – обеспечивает финансовое моделирование и анализ инвестиционных проектов [14];

– MPRIORITY 1.0 – позиционируется как универсальная СППР, но обладает ограниченностью возможностей, недостаточно дружественным интерфейсом и отсутствием справочной литературы либо технической поддержки [15].

Использование таких систем может быть эффективным, если однотипные проблемы, требующие принятия решения, многократно возникают в течение развития проекта. Если же проблемы принятия решения возникают нечасто, либо различны по своей сути, то лучше пользоваться встроенными возможностями того ПО, которое используется для управления проектом в целом. Ниже приведен обзор основных программных продуктов, наиболее популярных в сфере управления проектами.

ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

1С: Управление Проектной Организацией

(Разработчик «1С» и «ITLand Group»)

Возможности [16]:

Управление проектами и портфелями проектов (РМО):

– управление портфелями проектов и программами проектов;

– проектное управление трудовыми и материальными ресурсами предприятия;

– управление финансами портфелей проектов и отдельных проектов;

– управление жизненным циклом, содержанием и расписанием проекта;

– оперативное управление проектными работами;

– управление знаниями.

Управление ресурсами предприятия (ERP):

– мониторинг и анализ показателей деятельности предприятия;

– управление финансами;

– управление продажами;

– управление закупками;

– управление запасами (складом);

– управление производством;

– управление персоналом, включая расчет заработной платы;

– управление основными средствами и ремонтами.

Управление отношениями с заказчиками, поставщиками и подрядчиками (CRM/SRM)

Сервисные функции

Программный пакет Artemis Views

(Разработчик Artemis International [17])

Artemis ViewPoint:

– планирует и отслеживает ход выполнения проектов;

– управляет ресурсами;

– ведет учет и контроль рабочего времени;

– рассылает ролевые напоминания и предупреждения;

– управляет рисками и портфелем проектов;

– предоставляет доступ к персонифицированной информации в соответствии с системными настройками ролей пользователей.

Artemis ProjectView:

– возможность установления четких взаимосвязей между различными проектами;

– качественное улучшение наглядности информации по текущему состоянию проектов;

– координирование всех существующих направлений развития бизнеса.

Artemis PortfolioDirector:

– управление портфелем проектов;

– позволяет получать обзорную информацию о направлениях инвестирования, состоянии различных проектов внутри всей организации;

– получать регулярные, надежные и полные данные по соответствию инвестиций и методологии ведения бизнеса;

– помогает увидеть как финансовые, так и иные преимущества от предполагаемых инвестиций;

– позволяет прогнозировать окупаемость инвестиционного проекта.

Artemis MSP Client:

– пользователи ViewPoint могут получать полный доступ к функциональности MS Project. Пользователи MS Project могут работать с любой комбинацией проектов и ресурсов хранящейся в централизованной базе данных ViewPoint.

Artemis Enterprise Collaboration:

– выполнен в форме Web-приложения и служит корпоративной базой знаний, хранилищем и средством работы над общими документами.

jProject

(Разработчик CSBI-Zirvan [18])

Возможности:

– организация эффективной работы с проектами;

– предоставление развитых средств календарного и ресурсного планирования;

– организация защищенного проектного документооборота;

– контроль исполнительской дисциплины;

- анализ и контроль качества процессов управления проектами;
- подготовка и получение разноплановой отчетности.

Instant Business Network

(Разработчик Mediachase)

Возможности [19]:

- составление календарного плана работ;
- управление ресурсами и стоимостью;
- настраиваемая система финансов;
- система учета рабочего времени;
- отслеживание хода проекта;
- управление портфелем проектов;
- проектная отчетность и статистика.

Microsoft Office Project 2003 Professional

(Разработчик Microsoft)

Возможности [20, 21]:

- управление портфелем проектов в соответствии с корпоративной стратегией;
- принятие обоснованных бизнес-решений на основе анализа портфеля проектов;
- оценка рисков выполнения проектов на основе моделирования портфеля проектов;
- управление проектами и ресурсами;
- планирование и контроль выполнения проектных работ;
- единая методология управления процессами в организации;
- удобное ведение отчетности;
- интеграция с календарем Outlook 2003;
- оптимизация ресурсов предприятия;
- централизованное управление ресурсами;
- создание эффективных проектных команд;
- анализ загрузки ресурсов;
- совместная работа над проектами;
- интеграция с корпоративными информационными системами.

Пакет Microsoft Office Project 2007

(Разработчик Microsoft [22])

Microsoft Office Project Профессиональный 2007 [23]:

- доступны все возможности Microsoft Office Project 2003;
- содержит надежные средства управления проектами;
- получение информации, управление проектными работами, планами и финансами и сохранение согласованности работы команды;
- повышение производительности благодаря интеграции с известными программами системы Microsoft Office, управляемому планированию, мастерам и шаблонам;

- при подключении к серверу Microsoft Office Project Server 2007 становятся доступны возможности EPM.

Microsoft Office Project Server 2007:

- реализована поддержка возможностей решения Office EPM в областях управления ресурсами, планирования, отчетности и совместной работы;
- позволяет организациям централизованно хранить информацию о проектах и ресурсах в согласованном виде;
- может быть интегрирован со службами Microsoft Windows SharePoint Services 3.0 для поддержки управления файлами и совместной работы;
- в зависимости от своей роли пользователи могут получить доступ к данным и функциям через Интернет с помощью Microsoft Office Project Web Access.

Microsoft Office Project Portfolio Server 2007:

- сквозное решение в области управления портфелями, помогающее организациям в максимальной степени реализовать свой потенциал путем определения, подбора и формирования портфелей, соответствующих их бизнес-стратегии;
- интегрируется с Office Project Server 2007, предоставляя в распоряжение организаций законченное решение по управлению портфелем проектов с доступом из Microsoft Office Project Portfolio Office Project Web Access.

Open Plan Professional

(Разработчик Welcom)

Возможности [24]:

- открытое, масштабируемое решение для всего предприятия;
- мощные средства мультипроектного планирования и контроля;
- средства организации многопользовательского режима работы с проектами, распределенного географически и по уровням управления;
- гибкие средства структуризации проектов, стандартизации среды и функций управления проектами, настройка на задачи конкретного пользователя

Пакет Primavera Project Planner Professional [25]

(Разработчик Primavera)

Project Manager:

- инструмент, который обеспечивает планировщиков и контрольно-диспетчерскую группу всеми инструментами, необходимыми для осуществления эффективного оперативного планирования и контроля проектов, позволяет назначать ответственных и распределять бюджеты, отслеживать ресурсы, использовать структуры кодов проектов, ресурсов и работ, назначать стоимость работ и ресурсов, контролировать

статті затрат, документооборот в рамках одного проєкта.

Methodology Manager:

– база знань по управленню проєктами, хранилище типових фрагментів графіків, власних нароботок і отраслевих стандартів, називаємих методологіями.

Portfolio Analysis:

– приложеніє, предназначене для контролю проєктів і портфельів проєктів. В Portfolio Analysis можна проводити аналіз проєктів с деталізацією до уровня пакетів работ по различным срезам информации: по срокам, стоимости, использованию ресурсов.

Project Tracking

(Разработчик РЕЛЭКС)

Возможности [26]:

- планирование работ по проекту или несколькими параллельными проектами;
- оперативный учет выполнения работ по каждому проекту в режиме реального времени;
- анализ выполненных работ, информирование о возникающих проблемах;
- оперативное внесение изменений в планы работ по проектам на любых уровнях;
- ведение истории изменений всех данных каждого проекта;
- получение отчетности о трудозатратах, как по всему предприятию, так и по отдельным проектам, сотрудникам;
- систематизированное хранение документации (технической, организационной и любой другой), а также быстрый поиск и доступ к ней.

Spider Project

(Разработчик Spider Management Technologies [27])

Возможности:

- неограниченное количество операций;
- неограниченное количество ресурсов;
- неограниченное количество календарей;
- любое количество иерархических структур работ в каждом проекте;
- любое количество иерархических структур ресурсов в каждом проекте;
- любое количество иерархических уровней в каждой из иерархических структур;
- любое количество статей доходов и затрат;
- любое количество центров затрат и материалов;
- любое количество версий проекта и возможность сравнивать текущую версию проекта с любой другой версией и проектом;
- оптимизация расписания исполнения работ при ограниченных ресурсах, при заданных графиках поставок и финансирования;

- мультипроектное управление;
- стоимостной анализ по методике NASA (Earned Value Analysis);
- возможность сравнения между собой любых двух версий проекта;
- любое количество базовых версий;
- диаграммы Ганта для работ и ресурсов;
- гистограммы загрузки ресурсов;
- графики затрат и потребности в материалах;
- построение графиков и гистограмм по любым показателям отчетов;
- моделирование как расходов, так и доходов;
- моделирование поставок и расходов материалов;
- моделирование производства ресурсов;
- составление расписания исходя из объемов работ, квалификации и производительности ресурсов;
- три вида сетевых диаграмм;
- организационные диаграммы для представления иерархий работ и ресурсов;
- плавное масштабирование диаграмм;
- табличные и графические отчеты;
- встроенная система учета.

ИНТАЛЕВ: Корпоративные проекты

(Разработчик ИНТАЛЕВ)

Возможности [28]:

- планирует и контролирует планы и бюджеты проектов с использованием современных систем управления проектами и современных методик на основе стандарта PMBOK Guide;
- стандартизирует процессы разработки и контроля календарных планов, бюджетов и иных показателей проектов;
- стандартизирует портфели проектов единой системой финансовых и нефинансовых показателей, что позволяет единообразно оценивать эффективность отдельных проектов, менеджеров, портфельів проєктів и всей проектной деятельности;
- контролирует и лимитирует расход ресурсов по отдельным проектам, портфелям или иным группировкам (корпоративный пул ресурсов);
- консолидирует финансовые потоки от проектной и непроектной деятельности в единую информационную систему и автоматизирует процессы разработки отдельных и консолидированных бюджетов.

Mind Manager

(Разработчик MindJet [29])

Возможности:

- управление временем;
- управление проектами;
- планирование деловых встреч, совещаний, переговоров;
- принятие решений;

- разработка планов;
- экспорт в форматы HTML, MS PowerPoint, MS Word;
- поддерживает связь и синхронизацию с MS Outlook и MS Project;
- импорт MS Word;
- поддерживает коллективную работу над ментальными картами.

Следует отметить, что в возможностях всех вышеперечисленных приложений поддержка принятия решений не указана в числе основных функциональных возможностей. То есть, они предоставляют полные подробные статистические данные, проанализировав которые, эксперт должен сам принять решение. Из этого следует, что необходимо разработать такую программу, которая бы проводила анализ собранных статистических данных и с определенной достоверностью указывала пользователю лучший вариант из всех предложенных.

ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ СППР В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЕКТАМИ

Основным требованием к разрабатываемой системе является минимизация неконтролируемых потерь и методологических искажений агрегируемой информации и достоверность ответа. Основным способом реализации указанного требования является поэтапное агрегирование информации об анализируемых объектах.

В целях решения задач сравнения и выбора наилучших альтернативных вариантов решений либо для распределения ресурсов разрабатываемая СППР должна уметь формировать рейтинги этих вариантов.

Разрабатываемая система должна реализовывать следующие функции:

- фильтрацию анализируемых объектов по области допустимых значений показателей;
- ранжировку объектов с использованием абсолютных оценок;
- определение относительной приоритетности объектов методом попарных сравнений;
- представление результатов на плоскости типа «выгоды – издержки» и предъявление их лицу, принимающему решения (ЛПР);
- проведение операций по итоговому выбору наилучшего решения, либо по итоговому определению относительных приоритетов анализируемых объектов с вычислением достоверности принятого решения.

Данные в СППР – это обособленная база, содержание которой получено либо от эксперта, либо как статистическая информация, собираемая по опре-

деленным правилам в течение некоторого промежутка времени.

Система должна хранить все данные по каждой решаемой задаче для повторного использования и редактирования, что должно обеспечиваться наличием средств:

- создания и ведения баз данных с возможностью экспорта/импорта данных;
- ведения каталога ранее решавшихся задач со средствами их редактирования.

Решение задач многокритериальной оценки должно обеспечиваться возможностью работы как с количественными, так и с качественными, как с абсолютными, так и с относительными оценками анализируемых объектов. Работа с относительными оценками позволяет решать задачи распределения ресурсов, работа с абсолютными оценками позволяет решать задачи оценки степени соответствия анализируемых объектов комплексу предъявляемых требований и предпочтений. Это позволит системе получать многокритериальные оценки как для большого числа анализируемых объектов, так и для единственного объекта.

Экспертные оценки анализируемых объектов задаются с помощью:

- прямого ввода с клавиатуры абсолютных или относительных числовых оценок анализируемых объектов в базу данных (в помощь эксперту предлагается специальная словесная шкала);
- вычисления системой относительных оценок анализируемых объектов по частным критериям в результате диалоговой процедуры парных сравнений;
- загрузки из базы статистических данных.

Результаты парных сравнений сопровождаются оценками последовательности суждений эксперта, что позволяет обеспечить требуемую достоверность результатов анализа.

В принятии решения может участвовать группа экспертов. Это требует обеспечения обобщения мнений группы экспертов следующими способами:

- ведения списка экспертов, участвующих в решении текущей задачи;
- усреднения группы мнений экспертов из указанного списка с оценками степени согласованности их мнений, с возможностью изменения состава группы по результатам оценки согласованности.

Требования к программной реализации:

- наличие средств импорта данных из внешних источников;
- возможность масштабируемости и модифицируемости системы согласно изменяющимся условиям и задачам управления проектами;

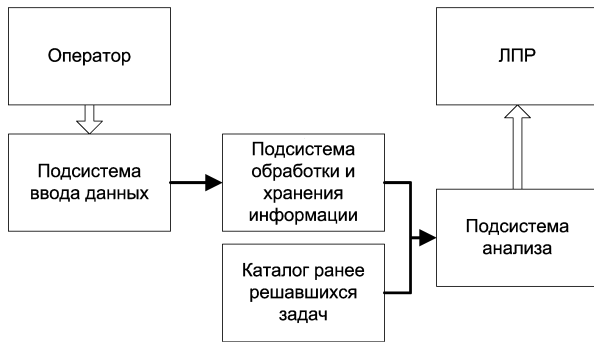


Рис. 1. Структурная схема СППР

– поддержка Web-технологий как наиболее перспективных и дешевых средств построения информационных систем;

– возможность усовершенствования алгоритмов и моделей системы в связи с изменением характера и условий работы.

Требования к интерфейсу и удобству использования СППР:

– использование «интуитивного» графического интерфейса, ориентированного на непрофессионала в области поддержки принятия решений;

– использование интуитивно понятных методов принятия решений;

– взаимодействие с ЛПР и экспертами на понятном им языке (не требует знаний в программировании);

– наличие демонстрационно-обучающего информационного наполнения системы;

– встроенная справочная система стандарта Windows;

– возможность использования СППР без прямого участия разработчиков.

Структурная схема разрабатываемой программы представлена на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное обеспечение для принятия решений в управлении строительными проектами, в настоящее время представленное на рынке, имеет достаточно серьезные недостатки, в основном заключающиеся в слабой реализации функций поддержки принятия решений, в недостаточной гибкости и в высокой стоимости.

Проблема выбора исполнителя проекта и отдельных подпроектов в силу узкой специализации слишком сложна для реализации стандартными средствами. Из этого следует, что целесообразнее разработать специальную СППР, ориентированную на оптимальное решение поставленной задачи.

В данном случае разработка подобной программы будет включать анализ методов принятия решений и

выбор лучшего из них, либо разработку нового метода; разработку архитектуры системы; создание удобного пользовательского интерфейса программы, доступного для понимания людьми, не являющимися специалистами в сфере программного обеспечения.

Подобная система будет востребована как государственными организациями, проводящими строительные тендеры, так и частными строительными компаниями, нанимающими исполнителей для выполнения различных этапов проекта.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Хелдман К. Профессиональное управление проектом / К. Хелдман [Пер. с англ.]. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 517 с.
2. Мазур И. И. Управление проектами: Учебное пособие / И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге ; под общ. ред. И. И. Мазура. – М. : Omega-L, 2004. – 664 с.
3. Дурняк Б. В. Анализ теоретических средств функционально ориентированных методов принятия решений / Б. В. Дурняк, Я. Равецки // Моделивання та інформаційні технології. – 2009. – № 50. – С. 24–32.
4. Устенко С. В. Интеллектуальні системи прийняття рішень в організаціях / С. В. Устенко, О. П. Степаненко // Моделивання та інформаційні системи в економіці. – 2008. – № 78. – С. 28–35.
5. Choong Nyoung Kim. Human decision-making behavior and modeling effects / Choong Nyoung Kim, Kyung Ho-onyang, Jaekyung Kim. – Decision Support Systems, Volume 45, Issue 3, 2008. – P. 517–527.
6. Qiping Shen. A group decision support system for value management studies in the construction industry / Qiping Shen, Jacky K. H. Chung. – International Journal of Project Management, Volume 20, Issue 3, 2002. – P. 247–252.
7. Фланнес С. У. Навыки работы с людьми для менеджеров проектов / Стивен У. Фланнес, Джинджер Левин [Пер. с англ.]. – М. : Технологии управления Спайдер, 2004. – 380 с.
8. Литвак Б. Г. Экспертные технологии в управлении / Б. Г. Литвак. – М. : «Дело», 2004. – 400 с.
9. Голіков І. В. Управління інвестиційними проектами виробництва в умовах невизначеності: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.22 [Електронний ресурс] / І. В. Голіков. – Електрон. дан. – Миколаїв, 2007. – 20 с. – Загл. с экрана.
10. Перевертун І. М. Інформаційні технології комплексного організаційно-технологічного моделювання проектно-орієнтованих виробництв (на прикладі серійного будівництва): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 [Електронний ресурс]. / І. М. Перевертун. – Електрон. дан. – К., 2007. – 22 с. – Загл. с экрана.
11. Enterprise Risk Management Software – Tivoli Risk Manager [Електронний ресурс]. – Електрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www-01.ibm.com/software/tivoli/products/risk-mgt/>. – Загл. с экрана.
12. Программные системы поддержки принятия оптимальных решений To Make Choice. OPTIMUM 1.0 [Електронний ресурс]. – Електрон. дан. – 2008. – Режим доступа: <http://www.tomakechoice.com/optimum.html>. – Загл. с экрана.
13. RS-Bank v. 5.5. Описание продукта [Електронний ресурс]. – Електрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.softlab.ru/solutions/RS-Bank/>. – Загл. с экрана.
14. Prime Expert – планирование и принятие инвестиционных решений. Актуальный подход [Електронний ресурс]. – Електрон. дан. – 2009. – Режим доступа: http://www.expert-systems.com/financial/Prime_Expert/. – Загл. с экрана.
15. Программные системы поддержки принятия оптимальных решений To Make Choice. MPRIORITY 1.0

- [Електронний ресурс]. – Електрон. дан. – 2008. – Режим доступу: <http://www.tomakechoice.com/mpriority.html>. – Загл. с екрана.
16. «1С: Управление Проектной Организацией» [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: http://v8.1c.ru/solutions/product.jsp?prod_id=46. – Загл. с экрана.
 17. Integrated Portfolio And Project Management Solutions. Project Portfolio Management for Investment Planning and Control [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.artemisintl.com/>. – Загл. с экрана.
 18. CSBI-Зирван – информационные технологии и консалтинг. Автоматизация банков и предприятий. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.csbi-zirvan.ru/>. – Загл. с экрана.
 19. Instant Business Network. Веб-портал для работы над общими проектами, задачами и инцидентами [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://pmbbox.ru/>. – Загл. с экрана.
 20. Справка Project 2003 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://office.microsoft.com/ru-ru/project/>. – Загл. с экрана.
 21. *Поморцева Е. Е.* Разработка бизнес-плана с использованием специализированного программного обеспечения / Е. Е. Поморцева // Системы обработки информации. – 2009. – № 3. – С. 166–170.
 22. Microsoft Office Project 2007 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://office.microsoft.com/ru-ru/project/>. – Загл. с экрана.
 23. *Шкрыль А.* MS Project 2007. Современное управление проектами / А. Шкрыль. – Спб. : БХВ-Петербург, 2007. – 256 с.
 24. Deltex Open Plan Enterprise Project Management Software [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.welcom.com/products/open-plan/>. – Загл. с экрана.
 25. Primavera Project Planner Professional [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.pmonline.ru/software/primavera/>. – Загл. с экрана.
 26. Возможности Project Tracking [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://linter.ru/ru/other/pt/possibilities/>. – Загл. с экрана.
 27. Спайдер Проджект: Управление Проектами [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.spiderproject.ru/>. – Загл. с экрана.
 28. ИНТАЛЕВ: Корпоративные проекты [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.intalev.ru/index.php?id=22623>. – Загл. с экрана.
 29. Mindjet: Personal Productivity and Collaboration Solutions that Visually Connect Ideas, Information and People [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – 2009. – Режим доступа: <http://www.mindjet.com/>. – Загл. с экрана.

Надійшла 03.09.2009

Дубровін В. І., Колпакова Т. О., Козлов О. В.

ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УПРАВЛІННІ БУДІВЕЛЬНИМИ ПРОЕКТАМИ

Розглянуто проблему прийняття рішень в управлінні будівельними проектами; проведено аналіз існуючого програмного забезпечення для управління проектами та підтримки прийняття рішень; обґрунтовано необхідність розробки спеціалізованої СППР для використання в управлінні будівельними проектами. Поставлено вимоги до функціонування та реалізації СППР для використання в управлінні будівельними проектами.

Ключові слова: прийняття рішень, управління проектами, будівельне проектування.

Dubrovin V. I., Kolkakova T. A., Kozlov A. V.

DECISION-MAKING IN THE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION PROJECTS

The problem of decision-making in the management of construction projects was considered; existing software support for project management and decision support was analyzed; the necessity of development of a specialized decision support system for use in the management of construction projects was justified. The requirements for operation and implementation of the decision support system for use in the management of construction projects were set.

Key words: decision-making, project management, construction project, DSS.

УДК 004.5

Скрупский С. Ю.¹, Маркин А. Г.², Скрупская Л. С.³¹Магістрант Запорозького національного технічного університета²Старший преподаватель Запорозького національного технічного університета³Ассистент Запорозького національного технічного університета

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ РАБОЧИХ СТАНЦИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Проанализированы методы подготовки рабочих станций в локальных вычислительных сетях. Получены значения затрат времени для разных методов, сформулирован наиболее эффективный метод.

Ключевые слова: рабочая станция, пакетный файл, образ, GHOST, клонирование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительная часть учебного процесса в ВУЗах выполняется при помощи компьютеров – рабочих станций: лабораторные и прак-

тические работы, демонстрации видеофильмов и др. Ежегодно перед каждым преподавателем, связанным с такими работами, возникает вопрос о подготовке рабочих станций компьютерных классов в локальных

вычислительных сетях. Это подразумевает установку (или переустановку) операционной системы, ее настройку и установку необходимого пакета программ. Как правило, это рутинная работа, требующая повышенного внимания и затрат времени, так как рабочих станций в компьютерных классах много и требуется проделывать схожие операции на разных компьютерах.

В учебном процессе, связанном с компьютерными сетями, студенты получают полный доступ к операционной системе для выполнения лабораторных работ. В процессе работы студенты вносят изменения в настройки операционной системы. Для выполнения аналогичных работ другими студентами необходимо исходное состояние операционной системы. Для подготовки рабочих станций преподавателю приходится практически ежедневно переустанавливать и реконфигурировать ОС. Поэтому вопрос автоматизации подготовки рабочих станций в локальных вычислительных сетях особенно актуален в ВУЗах.

Рассмотрим основные методы подготовки рабочих станций в локальных вычислительных сетях, выполним их сравнение, сделаем выводы о наиболее эффективных методах.

МЕТОДЫ ПОДГОТОВКИ РАБОЧИХ СТАНЦИЙ В ЛВС

Рассмотрим «ручной» метод, в котором преподаватель выполняет все необходимые процедуры вручную последовательно. Будем считать время установки операционной системы равным N_o минут, настройки – N_s минут, установки необходимого пакета программ – N_p минут. Таким образом, суммарное время подготовки одной рабочей станции составляет

$$N_1 = N_o + N_s + N_p. \quad (1)$$

Суммарное время подготовки всего класса составит

$$N_t = N \times N_1. \quad (2)$$

Средний компьютерный класс включает в себя 20 компьютеров. На практике при использовании среднестатистических компьютеров (Intel Pentium 4, 1 GB DDR, HDD IDE) $N_o = 40$ минут, $N_s = 20$ минут, $N_p = 30$ минут. Следовательно, $N_t = 20 \times (40 + 20 + 30) = 1800$ минут или 30 часов. Безусловно, затраты времени на подготовку рабочих станций в «ручном» режиме слишком велики и возникает потребность в автоматизации этого процесса.

Другой метод подготовки рабочих станций к учебному процессу, назовем его полуавтоматическим, предполагает однократное выполнение ручного метода, а затем применение сторонних программ клонирования раздела жесткого диска [1]. Наиболее распространенной программой клонирования разделов жесткого диска является Symantec GHOST, она позволяет сделать образ необходимого раздела и при необходимости выполнить обратную операцию – восстановить раздел из образа. В этом случае преподавателю необходимо запустить Symantec GHOST и, используя графический интерфейс пользователя, выполнить несложные действия по восстановлению раздела с образа. Тогда суммарное время подготовки одной рабочей станции будет равно времени настройки GHOST (N_{ghost}) и времени выполнения GHOST'ом операции клонирования ($N_{execute}$):

$$N_1 = N_{ghost} + N_{execute}. \quad (3)$$

На практике при использовании среднестатистических компьютеров $N_{ghost} = 3$ минуты, время $N_{execute} = 3$ минуты. Подставим N_1 в (2) и получим $N_t = 20 \times (3 + 3) = 120$ минут или 2 часа. Такой результат значительно приемлемее результата, полученного с помощью ручного метода.

Еще один метод, назовем его автоматизированным, предполагает применение пакетного программирования для ускорения времени настройки GHOST (N_{ghost}) [2]. Пакетные файлы имеют расширение «bat» и выполняются на любом компьютере с любой версией Windows. Напишем такой пакетный файл для Symantec GHOST (назовем его Script.bat):

```
@echo off
if not exist путь_к_образу GOTO MET
echo Файл образа найден
C:\GHOST8\GHOST32.exe -clone, mode =
pload, src = путь_к_образу:1, dst = 1:
номер_раздела_назначения -sure
echo Клонирование успешно завершено
GOTO END
: MET echo Файл образа не найден
: END @pause
```

Блок-схема пакетной программы автоматизации запуска GHOST приведена на рис. 1. В случае применения автоматизированного метода преподавателю необходимо лишь запустить пакетный файл на выполнение. Время подготовки одной рабочей станции будет равно $N_{execute}$, то есть времени выполнения GHOST'ом операции клонирования. Тогда $N_t = 20 \times 3 = 60$ минут или один час. Недостаток данного метода в том, что он выполняется последовательно, то

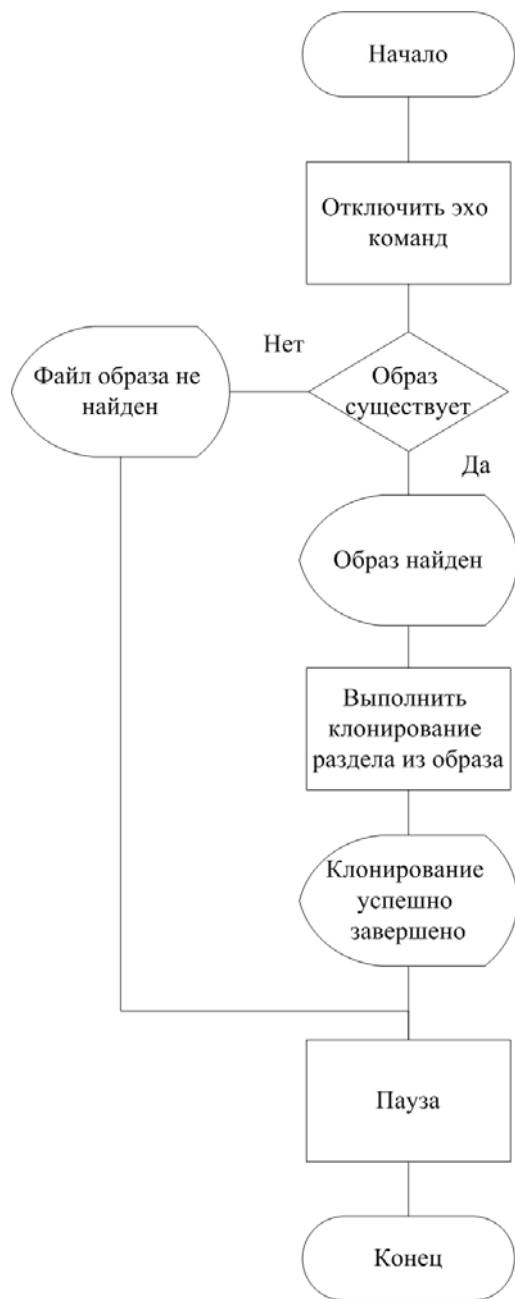


Рис. 1. Блок-схема пакетной программы

есть, запустив пакетный файл на одном компьютере, преподаватель приступает к другой рабочей станции последовательно, это требует обхода всех компьютеров.

Автоматический метод предполагает одновременный запуск процесса клонирования разделов на всех рабочих станциях, вызываемый преподавателем с одной из рабочих станций. Применение программы PSEXEC из пакета PSTOOLS позволяет реализовать автоматический метод. Синтаксис команды запуска имеет следующий вид:

```

PSEXEC.exe \\ip_адреса_рабочих_станций_
перечисленные_через_запятую
путь_к_файлу_Script.bat
  
```

В результате на всех рабочих станциях одновременно будет выполнен Script.bat. Благодаря параллельности выполнения пакетного файла, вызывающего клонирование разделов жесткого диска, суммарное время подготовки всего компьютерного класса составит $N_t = N_1 = 3$ минуты.

ВЫВОДЫ

Получены практические результаты затрат времени на подготовку рабочих станций в локальных вычислительных сетях (табл. 1). Применение программ клонирования разделов жесткого диска существенно сокращает затраты времени и сил на подготовку компьютерных классов. Использование базовых функций пакетного программирования позволяет автоматизировать запуск программ клонирования разделов жесткого диска и сводит весь процесс подготовки к запуску пакетного файла на каждом компьютере. Наиболее эффективен автоматический метод, внедренный авторами статьи в компьютерных классах ЗНТУ, позволяющий подготовить весь компьютерный класс в среднем за 3 минуты.

Таблица 1. Затраты времени на подготовку рабочих станций к учебному процессу

Затраты	Метод	Ручной	Полуавтоматический	Автоматизированный	Автоматический
Установка ОС – N_o , мин		40	0	0	0
Настройка – N_s , мин		20	0	0	0
Установка пакета программ – N_p , мин		30	0	0	0
Настройка GHOST – N_{ghost} , мин		0	3	0	0
Выполнение клонирования – $N_{execute}$, мин		0	3	3	3
Подготовка одной рабочей станции – N_1 , мин		90	6	3	3
Подготовка 20 компьютеров – N_t , мин		1800	120	60	3

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. *Олифер В. Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 3-е изд. – СПб. : Питер, 2007. – 958с.
2. Клонирование мастер-диска как метод стандартизации рабочих мест в среде Active Directory // Электронный журнал IXBT. – Режим доступа: <http://www.ixbt.com/comm/prac-attack-of-clones.shtml/>. – 11.04.2006. – Загл. с экрана.

Надійшла 07.06.2009
Після доробки 10.09.2009

Скрупський С. Ю., Маркін О. Г., Скрупська Л. С.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДГОТОВКИ РОБОЧИХ СТАНЦІЙ В ЛОКАЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Виконано аналіз методів підготовки робочих станцій в локальних обчислювальних мережах. Отримано значення витрат часу для різних методів, сформульовано найбільш ефективний метод.

Ключові слова: робоча станція, пакетний файл, образ, GHOST, клонування.

Skrupsky S. Y., Markin A. G., Skrupskaya L. S.

AUTOMATIZATION OF WORKSTATIONS PREPARATION IN LOCAL COMPUTER NETWORKS

Methods of workstations preparation in local computer networks are analyzed. Time expenditure for different methods is calculated, the most effective method is determined.

Key words: workstation, batch file, image, GHOST, cloning.

УДК 004.75

Юрич М. Ю.

Ассистент Запорозького національного технічного університету

АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЯМИ В РАМКАХ GRID

В данной статье проводится анализ наиболее распространенных и действующих на данный момент систем управления пакетной обработкой заданий (СУПО). Приведено множество ссылок на Интернет-ресурсы, по которым можно найти более подробную информацию о той или иной СУПО. В результате проведенного анализа построена сводная таблица, отображающая сравнительную характеристику рассмотренных СУПО, а также их взаимосвязь с распространенным на данный момент внешним планировщиком заданий Maui. Также определено место СУПО в составе программного обеспечения grid-систем и при использовании на локальном уровне.

Ключевые слова: система управления пакетной обработкой заданий, промежуточное программное обеспечение, grid-система, балансировка нагрузки, планировщик, задание.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается бурный рост числа и вычислительных мощностей компьютерной техники. Это дало возможность объединять компьютеры для решения сложных и ресурсоемких задач. Такие объединения возможны как в рамках одной компьютерной организации или нескольких небольших организаций, так и в географически распределенном диапазоне. Идея создания огромной вычислительной пространственно распределенной сети легла в основу создания grid-систем.

Для управления компьютерными системами в настоящее время используется различное программное обеспечение (ПО). В частности, если рассматривать распределенные системы, а именно grid-системы, то стоит отметить, что наряду с операционными системами в них используется промежуточное программное обеспечение (middleware) и дополнительные

программные средства, направленные на оптимизацию выполнения заданий в системе, так называемые системы управления пакетной обработкой (СУПО). Двухуровневая модель управления заданиями в grid использует СУПО на локальном уровне – в качестве отдельного используемого ПО и/или в качестве одной из компонент, входящих в состав определенного middleware (глобальный уровень).

Одной из наиболее весомых функций СУПО является обеспечение механизма планирования распределения заданий. Данная функция может быть реализована непосредственно разработчиками конкретной СУПО, либо при помощи внешних планировщиков – отдельно разработанных программных средств (к примеру, планировщика Maui).

В основе каждого планировщика лежит алгоритм, от которого во многом зависит эффективность управления заданиями в целом.

© Юрич М. Ю., 2010

Выбранный middleware для конкретной из grid-систем в основном становится стандартом de facto в пределах этой системы. А вот выбор СУПО, особенно на локальном уровне – это проблема, решаемая каждый раз по-своему для конкретно организованной локальной сети, кластера, виртуальной организации и т. д., в зависимости от технических характеристик и предъявляемых требований, а потому является актуальной задачей.

Таким образом, целью работы была поставлена задача проанализировать наиболее свежие версии распространенных на данный момент СУПО.

1. MIDDLEWARE

Основополагающими grid-системами стали EGEE (www.eu-egee.org), NorduGrid (www.nordugrid.org), Open Science Grid (www.opensciencegrid.org) и TeraGrid (www.teragrid.org). Естественно, как и в любой другой организации, для существования и функционирования grid-систем необходимы эффективные средства управления – соответствующее программное обеспечение. Одной из составляющих ПО является промежуточное программное обеспечение (ППО).

Под промежуточным программным обеспечением понимается совокупность Grid-сервисов, независимых от ресурсов и приложений и обеспечивающих аутентификацию, авторизацию, размещение и распределение ресурсов, получение результатов выполнения задач, статистику и служебную информацию, удаленный доступ к данным, стратегию и способы обнаружения неисправностей. Middleware дает пользователем удаленный доступ к Grid-ресурсам. Зачастую в среде Grid используется промежуточное программное обеспечение для организации доступа, хотя есть и другие технологии, такие, как Grid-порталы, WebSphere из IBM, предназначенный для поддержки развития приложений, основанных на Web-сервисах [1].

Примером ППО могут служить ARC, NorduGrid, AliEn, LCG, EDG, DataGrid (www.datagrid.org), Alchemi, Unicore (www.unicore.org), gLite (www.gLite.org). Однако все они имеют много общего, поскольку построены на базе системы Globus Toolkit (www.globus.org).

В общем случае компонентами middleware grid-систем являются:

- Security Infrastructure (инфраструктура безопасности);
- Information System (информационная система);
- Computing Element (вычислительный элемент);

- Job Management System (система управления заданиями);
- Data Management System (система управления данными);
- Monitoring Accounting (учет контроля);
- другие.

Остановимся более подробно на системе управления заданиями (Job Management System). Ранее, до возникновения grid-систем, подобные модули было принято называть системами управления пакетной обработкой (СУПО), а также системами пакетной обработки (СПО), Cluster Management Software (CMS), Batch System (BS), Resource Management System (RMS). С появлением grid-систем появились новые названия, к примеру, Resource Allocation Manager, Workload Management System, Job Management System. Однако от этого функции и назначение систем не поменялись. Единственное отличие – это их использование в составе определенного middleware для grid-систем или в виде отдельной программной компоненты – в остальных случаях.

В основе работы любой СУПО лежат планировщики нагрузки (также называемые диспетчерами задач, балансировщиками нагрузки), которые, используя определенный алгоритм, размещают задачи, поступающие для решения в вычислительной системе, на определенный вычислительный узел. Место СУПО в общей структуре комплекса рассматриваемого ПО более наглядно представлено на рис. 1, *а* – в составе middleware для grid-систем, *б* – при использовании на локальном уровне.

Рассмотрим далее более подробно СУПО, их разновидности и особенности каждой из них.

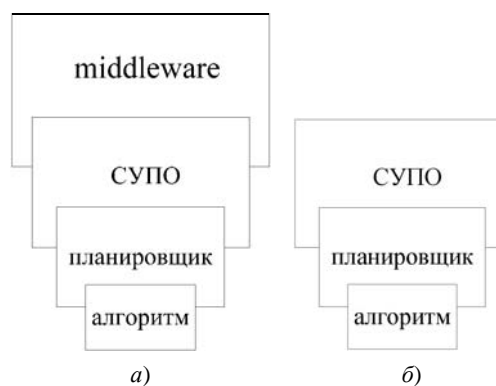


Рис. 1. Место СУПО:

а – в составе middleware для grid-систем;
б – при использовании на локальном уровне

2. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАКЕТНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАДАНИЙ

Как уже было отмечено ранее, организация вычислений в распределенной среде компьютеров – это задача систем управления пакетной обработки заданий. Под заданием в распределенной вычислительной сети будем понимать запрос, вычислительную задачу или подзадачу, любое другое подобное действие со стороны пользователя системы. На данный момент известно более десятка действующих СУПО.

В общем случае обработка заданий в распределенной среде предусматривает выполнение следующих функций [2]:

- централизованное управление заданиями;
- пост/пре доставка файлов на исполнительный узел;
- пересылка стандартных файлов на компьютер, с которого произведен запуск задания;
- мониторинг задания;
- установка зависимостей между заданиями;
- автоматическое восстановление задания после сбоя СУПО или исполнительного узла (перезапуск с контрольной точки);
- гарантированное выделение ресурсов, требующихся заданию при исполнении, и контроль лимитов ресурсов.

Процесс диспетчеризации в СУПО производит распределение заданий по исполнительным узлам в соответствии с некоторой политикой, которая зависит от конкретной установки и реализуется средствами конфигурирования. Диспетчеризация решает две задачи – временную и пространственную. Первая – это порядок, в котором задания будут запускаться на счет. ОС работают в режиме разделения времени, и все введенные команды с разу запускаются. Такой режим годится для коротких интерактивных задач с характерным временем ответа порядка секунды. Временная диспетчеризация пакетных заданий учитывает, что параллельный счет нескольких задач вычислительного характера ведет к удлинению времени завершения каждой из них, накладным расходам на свопинг и переключение процессов. Поэтому в СУПО ввод задания пользователем и запуск его на счет могут быть разделены значительным временным интервалом. В период ожидания задание находится в спуле [3]. Под пространственной диспетчеризацией заданий понимают размещение их по исполнительным узлам вычислительного комплекса.

Рассмотрим особенности последних версий наиболее распространенных СУПО. Информация, предо-

ставленная о каждой из СУПО, основывается на данных, опубликованных на официальных сайтах разработчиков. По каждой из СУПО ссылки на «полезные» сайты будут указаны при описании конкретной системы.

2.1. Platform LSF

Platform LSF (Load Sharing Facility) разработана компанией Platform Computing Corporation. LSF – это решение в отрасли управления высокопродуктивными вычислительными системами для планирования пакетной и интерактивной нагрузки для вычислительно емких и больших по объему данных приложений для кластеров и grid-систем. Разработка для крупномасштабных, сложных и критических высокопродуктивных вычислительных систем. Она позволяет:

- максимизировать использование существующей IT-инфраструктуры таким образом, чтобы было выполнено как можно больше заданий с наименьшими затратами ресурсов;
- повысить пользовательскую производительность, давая возможность выполнить больше заданий в единицу времени;
- выполнять задания быстрее и с более высоким качеством, получая более надежные результаты.

Система также поддерживает работу с внешним планировщиком Maui.

Эффективность работы LSF более наглядно показана на рис. 2 [4].

Более подробную информацию можно найти официальном сайте продукта www.platform.com. А также по ссылкам [4, 5].

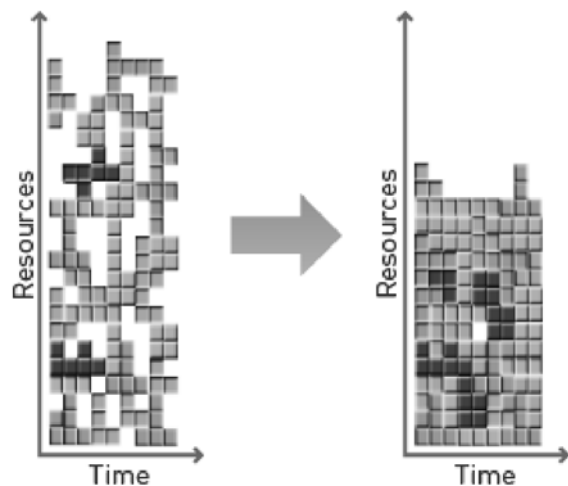


Рис. 2. Эффективность работы LSF

2.2. Windows Compute Cluster Server

Это линейка программных продуктов от Microsoft Corporation для управления высокопродуктивными вычислениями (High Performance Computing, HPC). Первая реализация получила название Windows Compute Cluster Server 2003, следующая, наиболее свежая на данный момент версия – Windows HPC Server 2008. Она делает возможности высокопроизводительных вычислительных систем общедоступными, повышает эффективность работы пользователей и облегчает задачу администратора кластера. Windows HPC Server 2008 позволяет достичь максимальной продуктивности работы с HPC-системами за счет интеграции с остальной инфраструктурой организации, а также увеличить скорость вычислений на 30 % по сравнению с предыдущей версией решения – Windows Compute Cluster Server 2003.

При создании Windows HPC Server 2008 особое внимание было уделено аспектам управления системами, системе хранения, планирования заданий, сетевой подсистеме и Microsoft MPI (Message Passing Interface). Основными особенностями Windows HPC Server 2008, которые позволяют эффективно использовать систему на кластерах с большим количеством узлов, являются новая высокоскоростная технология NetworkDirect RDMA, эффективные и масштабируемые инструменты управления кластером, сервисно-ориентированная архитектура (SOA) планировщика заданий и полная совместимость за счет соответствия спецификации High Performance Computing Basic Profile (HPCBP), предложенной Open Grid Forum (OGF). Более подробная информация по ссылкам [6–8] и на официальном сайте компании <http://www.microsoft.com/hpc>.

2.3. PBS

Portable Batch System (PBS) – система, которая в процессе развития была «разбита» на две ветви: бесплатную версию OpenPBS и коммерческое решение PBS Professional (PBS Pro). На основе OpenPBS создана усовершенствованная версия TORQUE (Terascale Open-source Resource and QUEUE Manager), разработанная Cluster Resources Inc..

OpenPBS – первоначальная версия Portable Batch System, система организации очередей, разработанная для NASA в начале 1990-х. OpenPBS оперирует с UNIX-системами.

Важнейшим достоинством системы OpenPBS является достаточно удобная и эффективная поддержка вычислительных узлов разной конфигурации и архитектуры. Система OpenPBS обеспечивает управление

выполнением заданий на широком наборе конфигураций вычислительных узлов:

- на рабочих станциях с режимом разделения времени между задачами;
- на многопроцессорных системах как SMP, так и MPP архитектур;
- на кластерных системах с одним или несколькими процессорами на вычислительных узлах;
- на произвольных комбинациях перечисленных выше систем.

Кроме этого, следует отметить простоту и удобство работы с диспетчерской системой как для администратора системы, так и для конечных пользователей [9].

Однако на данный момент последняя и действующая до сих пор версия датирована 2001 годом.

В то же время, усовершенствованная и обновленная 1200 патчами версия TORQUE наиболее свежую реализацию выпустила в январе 2010, v. 2.4.4.

TORQUE – это менеджер ресурсов с открытым кодом, обеспечивающий управление пакетными заданиями и распределенными вычислительными ресурсами. Он может быть интегрирован с Moab Workload Manager и планировщиком Maui.

В отличие от предыдущих двух версий, PBS Pro является коммерческой. Особенностью последней версии (v. 10.0) является возможность принимать, отклонять или изменять наступающее действие в определенных точках при выполнении PBS Pro, что обеспечивает фильтрацию заданий без изменения исходного кода.

Более подробную информацию об OpenPBS, PBS Pro и TORQUE можно прочитать по ссылкам [10–14].

2.4. Condor

Condor – специализированная система управления распределения заданий, требующих объемных вычислений. Подобно другим пакетным системам, Condor обеспечивает механизм организации очереди заданий, политику планирования, приоритетную схему, мониторинг ресурсов и управление ресурсами. Пользователи представляют их последовательные или параллельные задания системе Condor, она размещает их в очередь, выбирает, когда и где выполнить задания, основанные на политике, тщательно контролирует их продвижение и, в конечном счете, сообщает пользователю о завершении.

Особенностью системы Condor является возможность использования для управления кластера из специализированных вычислительных узлов, к примеру, кластера «Beowulf». Кроме того, уникальные механизмы дают возможность системе Condor

эффективно использовать незадействованную мощность центрального процессора настольных рабочих станций. Например, Condor может быть сконфигурирован таким образом, чтобы использовать компьютеры, когда клавиатура и мышь простаивают. Если Condor обнаруживает, что компьютер больше не доступен (к примеру, была нажата клавиша клавиатуры), Condor отмечает контрольную точку и перемещает задание на другой компьютер, который простаивает. Condor не требует файлов с общим доступом: он может пересылать файлы данных задания от имени пользователя, или может переадресовать запросы ввода-вывода всех заданий назад на предоставленный компьютер. Таким образом, Condor может использоваться для объединения вычислительной мощности всей организации в один ресурс [15]. Более подробную информацию можно найти на сайте <http://www.cs.wisc.edu/condor/>.

2.5. SGE

Sun Grid Engine (SGE) – система управления распределенными ресурсами, разработанная для максимизации использования ресурсов, учитывающая входящую нагрузку доступных ресурсов, согласно требованиям к нагрузке и ценовой политике. Особенностью системы, по сравнению с аналогичными системами, является поддержка очень большого количества платформ и операционных систем. SGE – это программный продукт, разработанный компанией Sun Microsystems, Inc.. Однако с 27 января 2010 г. данный продукт является собственностью компании Oracle Corp., купившей компанию Sun. Более подробно можно прочитать на сайте <http://www.oracle.com/us/sun/index.htm>

В последней версии SGE (v. 6.2, update 5, январь 2010 г.) реализована возможность распределять приложения, чувствительные к топологии центрального процессора (ЦП), увеличивая производительность и сокращая время выполнения, в некоторых случаях, более чем на 50 %.

Сегодня Sun Grid Engine 6.2 поднимает планку масштабируемости, производительности и простоты управления. В числе новых функций можно также отметить следующие:

- мульти-кластеризация и Service Domain Manager – позволяет достичь гибкости хостов;
- улучшенное резервирование – запрос и резервирование ресурсов сети заранее;
- масштабируемость – до 63 000 ядер/процессоров;
- поддержка распараллеливания задач по тысячам ядер ЦП [16].

Более детальную информацию можно найти по ссылкам [17, 18].

2.6. LoadLever

Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler – система планирования параллельных заданий, которая позволяет пользователям выполнять задания быстрее, согласно требованиям каждого задания и приоритетам с учетом доступных ресурсов, таким образом максимизируя использование ресурса. LoadLeveler также обеспечивает восстановление выполнения задания с контрольной точки и предлагает детальный учет использования системы для корректировки балансировки нагрузки с наилучшими показателями.

Задания, предоставленные LoadLever, не обязательно выполняются в порядке поступления. LoadLever распределяет задания, основываясь на их приоритете, требованиях ресурсов и определенных инструкциях. Например, администраторы могут определить, что время выполнения задания превысило ожидаемое, и сменить приоритетность некоторых пользователей или групп. Кроме того, сами ресурсы строго контролируются: личные компьютеры могут использоваться в ограниченных пределах времени или использоваться только, когда клавиатура и мышь неактивны.

LoadLever обеспечивает интерфейс как при помощи командной строки, так и графический интерфейс в дополнение к API. LoadLever также проводит мониторинг существующих компьютеров, чтобы не распределить задание на неисправный компьютер. Более подробная информация по ссылкам [19–22].

2.7. MOSIX

MOSIX – система управления, предназначенная для высокопродуктивных вычислений на x86 Linux-кластерах, мультикластерах и облачных вычислений. MOSIX поддерживает как интерактивные параллельные процессы, так и пакетные задания. Она включает автоматическое обнаружение ресурса и динамическое распределение нагрузки, как правило, для многопроцессорных компьютеров.

С 2002 по 1 марта 2008 года существовала еще одна реализация – бесплатная версия с открытым кодом – OpenMOSIX. Это система была использована многими пользователями и разработчиками, однако на данный момент можно скачать только ее первоначальную версию на сайте <http://openmosix.sourceforge.net/>, позволяющую объединить обыкновенные компьютеры в кластер. Более подробную информацию об уже закрывшемся на данный момент проекте

OpenMOSIX можно найти на сайте <http://www.openmosix.org/>.

Вернемся к описанию существующей на данный момент реализации. MOSIX реализована как слой программного обеспечения, позволяющего приложениям работать на удаленных узлах как на локальных. Пользователи могут запустить последовательное и параллельное приложение на одном узле, в то время как MOSIX, автоматически найдя ресурсы, переместит процессы для выполнения на других узлах. Нет никакой надобности изменять или компилировать приложения с какой-либо библиотекой, копировать файлы или входить в систему удаленных узлов, или распределять процессы на различные узлы – это все сделано автоматически. Миграция контролируется целым набором алгоритмов, которые контролируют состояние ресурсов и пытаются улучшать общую производительность динамическим распределением ресурсов, например балансировкой нагрузки.

Уникальная особенность MOSIX в том, что он оперирует на уровне процессов, в отличие от других систем, которые оперируют на уровне заданий. Это означает, что система перераспределяет нагрузку, когда число процессов задания (и/или их спрос) изменяется (используется «fork» и «exit»), что особенно полезно для параллельных заданий. Более подробную информацию можно найти на официальном сайте компании <http://www.mosix.org/>.

3. ВНЕШНИЙ ПЛАНИРОВЩИК MAUI

С развитием grid-технологий вопросу управления распределенными вычислительными системами уделяется огромное внимание. И как показали исследования, на данный момент одним из наиболее перспективных (в силу эффективности достижения результатов) алгоритмов, позволяющих производить планирование нагрузки вычислительной системы, является алгоритм Backfill. Данный алгоритм реализован в составе внешнего планировщика Maui, который во многом именно благодаря этому алгоритму стал очень распространенным.

Maui – планировщик заданий с открытым кодом для использования в кластерах и суперкомпьютерах. Он улучшает управляемость и эффективность компьютеров, начиная с кластеров с несколькими процессорами и заканчивая мульти-терафлопсными суперкомпьютерами.

Преимущества Maui:

- оптимизация использования ресурсов дополнительно на 35 %;

- концентрация ресурсов на приоритетах организации;

- управление трудностями совместного использования и планированием использования общедоступных ресурсов;

- гарантированное качество сервисных гарантий;
- предписание политики использования.

Поддерживает следующие операционные системы: Linux, AIX, OSF/Tru-64, Solaris, HP-UX, IRIX, FreeBSD. Также поддерживает следующие СУПО: TORQUE, Open PBS, PBSPro, SGE, LoadLeveler, LSF, Bproc/Scyld, SSS-RM. Более подробную информацию можно найти на сайте www.clusterresources.com и по ссылке [23].

Одной из новейших разработок, основанных на базе Maui, является программное обеспечение, разработанное Cluster Resources Inc. – Moab Workload Manager. Более подробную информацию можно найти по ссылке [24]. Отметим следующие особенности данного продукта в аспекте совместимости. MOAB поддерживает следующие операционные системы: Linux, Mac OS X, Windows, AIX, OSF/Tru-64, Solaris, HP-UX, IRIX, FreeBSD и другие UNIX-платформы. Также поддерживает следующие СУПО: TORQUE Resource Manager, OpenPBS, PBSPro, Sun Gridengine (SGE), SGE Enterprise Edition (SGEE), LoadLeveler, LSF, BProc/Scyld, Scalable System Software (SSS-RM), или Quadrics RMS.

Хотя MOAB имеет значительные преимущества относительно Maui (более подробно можно прочитать по ссылке [25]), на данный момент более распространенным является пока еще планировщик Maui. Возможно, на данном этапе развития это лишь вопрос времени. Сейчас уже существует механизм перехода от использования планировщика Maui к использованию MOAB. Процедура перехода детально описана в [26].

Учитывая все приведенные выше данные и информацию, взятую из указанных выше источников, построим сводную таблицу (см. табл. 1) с указанием сравнительных характеристик рассмотренных в данной статье СУПО и отобразим в ней их взаимосвязь с внешним планировщиком Maui.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной статье проанализированы наиболее распространенные СУПО. Также приведены краткие характеристики систем и ссылки на источники интернет-ресурсов, по которым можно найти более подробную информацию об интересующей системе или скачать предоставляемое ПО.

Однозначного ответа, какая из СУПО лучше, найти невозможно, поскольку для каждого конкретного случая будет индивидуальный ответ в зависимости от

Таблиця 1. Сравнительная характеристика СУПО

Показатели	СУПО	Platform LSF	Windows Compute Cluster Server 2008	TORQUE	OpenPBS	PBS Pro	Condor	SGE	LoadLever	MOSIX
Открытый код	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-
Бесплатное использование в некоммерческих целях	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-
Поддержка Unix-платформ	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Поддержка Windows	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
Поддержка MPI	+	+	+, MS-MPI	+	+	+	+	+	+	+
Восстановление выполнения задания после сбоя	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Миграция заданий	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Поддержка Maui	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-
Производитель	Platform Computing Corporation	Platform Computing Corporation	Microsoft Corp.	Cluster Resources Inc.	Altair Engineering, Inc.	Altair Engineering, Inc.	The Condor Team	Sun Microsystems, Inc.*	IBM Corp.	A. Barak
Дата и номер последней версии	2009, LSF 7	2009, LSF 7	2008, Windows HPC Server 2008	Январь, 2010, v.2.4.4	Июнь, 2001 v.2.3.16	Июль, 2008 v.10.0	Январь, 2010, v.7.5.0	Январь, 2010, v.6.2, update5	Ноябрь, 2009, v.4.1	Январь, 2010 v.2.28.0.0
Опыт фирмы в отрасли	17 лет	17 лет	7 лет	4 лет	20 лет	20 лет	18 лет	16 лет	5 лет	27 лет

*С 27 января 2010 г. владельцем SGE является компания Oracle Corp., выкупившая компанию Sun Microsystems, Inc.

требований, предъявляемых системе. Поэтому в статье построена сводная таблица для исследуемых СУПО, в которой указаны основные характеристики, влияющие на выбор той или иной СУПО.

Также в работе очерчено место и значение СУПО для grid-систем и при использовании их на локальном уровне.

Результаты проведенного анализа систем управления заданиями позволяют получить сравнительную характеристику исследуемых систем и сократить время, потраченное на выбор СУПО, для специалистов и начинающих специалистов в области высокопродуктивных вычислений, а также получить более подробную информацию о конкретной СУПО по приведенным ссылкам и предоставленным сведениям, особенно с точки зрения новизны версий и действия СУПО на данный момент (январь 2010 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Организация доступа для пользователей в grid (Труды XVI Всерос. научно-методич. конф. «Телематика'2009») [Электронный ресурс] / Ла Мин Хтут // Сборник трудов – 2009. – Режим доступа: <http://tm.ifmo.ru/tm2009/src/180ds.pdf>.
2. Метод опережающего планирования для grid [Электронный ресурс] / В. Н. Коваленко, Е. И. Коваленко, Д. А. Корягин, Э. З. Любимский // Препринт ИПМ. – 2005. – № 112. – Режим доступа: http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep112/prep2005_112.html. – Загл. с экрана.
3. Пакетная обработка заданий в компьютерных сетях [Электронный ресурс] / Е. И. Коваленко, В. Н. Коваленко // Открытые системы. – 2000. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2000/07-08/178074/>. – Загл. с экрана.
4. The industry-leading high performance computing solution [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Platform Computing Corporation – Режим доступа: <http://www.platform.com/workload-management/high-performance-computing>. – Загл. с экрана.
5. Platform LSF 7 Update 6. An Overview of New Features for Platform LSF Administrators [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Platform Computing Corporation – 2009. – Режим доступа: http://www.platform.com/workload-management/whatsnew_lsf7u6.pdf. – Загл. с экрана.
6. Microsoft Windows Compute Cluster Server 2003 [Электронный ресурс] // Руководство пользователя – 2006. – Режим доступа: https://msdb.ru/Downloads/WindowsServer2003/CCS/CCS2003_Guide_Rus.pdf. – Загл. с экрана.
7. Оптимизация рабочего процесса [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Microsoft Corp. в России. – Режим доступа: <http://www.microsoft.com/rus/hpc/#datasheets>. – Загл. с экрана.
8. Microsoft представила в России Windows HPC Server 2008 [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Microsoft Corp. в России – 2008. – Режим доступа: <http://www.microsoft.com/rus/news/issues/2008/11/hpcserver.mspx>. – Загл. с экрана.
9. Букатов А. А. Программирование многопроцессорных систем / А. А. Букатов, В. Н. Дацок, А. И. Жегуло. – Ростов-на-Дону : Издательство ООО «ЦВВР», 2003. – 208 с.
10. TORQUE Resource Manager Guide [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Cluster Resources Inc. – Режим доступа: <http://www.clusterresources.com/products/torque-resource-manager.php>. – Загл. с экрана.
11. PBS Works [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Altair Engineering, Inc. – Режим доступа: <http://www.pbsworks.com/>. – Загл. с экрана.
12. PBS Works 10 Enabling On-Demand Computing [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Altair Engineering, Inc. – 2009. – Режим доступа: http://www.pbsgridworks.com/images/solutions-en-US/PBS_10.2Highlights_letr_REVISE-WEB.pdf. – Загл. с экрана.
13. Commercial-grade HPC workload and resource management [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Altair Engineering, Inc. – Режим доступа: <http://www.pbsgridworks.com/Product.aspx?id=1>. – Загл. с экрана.
14. Resource Library [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Altair Engineering, Inc. – Режим доступа: http://www.pbsgridworks.com/ResLibSearchResult.aspx?keywords=openpbs&industry=All&product_service=All&category=Free%20Software%20Downloads&order_by=date_submitted. – Загл. с экрана.
15. What is Condor? [Электронный ресурс] // Официальный сайт продукта Condor - Режим доступа: <http://www.cs.wisc.edu/condor/description.html>. – Загл. с экрана.
16. Sun Grid Engine 6.2 – что Opensource может сделать для Вас? [Электронный ресурс] / В. Porras // Личная страница пользователя – Режим доступа: http://blogs.sun.com/bobp/entry/sun_grid_engine_ru. – Загл. с экрана.
17. Sun Grid Engine 6.2 Update 5 [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Oracle Corp. – Режим доступа: <http://www.sun.com/software/sge/index.xml>. – Загл. с экрана.
18. Sun Grid Engine [Электронный ресурс] // Википедия – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Sun_Grid_Engine. – Загл. с экрана.
19. IBM Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «Интерфейс» – 2007. – Режим доступа: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=6283>. – Загл. с экрана.
20. Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler library [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании IBM Corp. – Режим доступа: <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/clresctr/vxxr/index.jsp?topic=/%20com.ibm.cluster.load.doc/lbooks.html>. – Загл. с экрана.
21. Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler. Using and Administering [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании IBM Corp. – 2009. – Режим доступа: <http://publib.boulder.ibm.com/epubs/pdf/c2366810.pdf>. – Загл. с экрана.
22. Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании IBM Corp. – Режим доступа: <http://www-03.ibm.com/systems/clusters/software/loadleveler/index.html>. – Загл. с экрана.
23. Maui Scheduler Administrator's Guide [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Cluster Resources Inc. – Режим доступа: <http://www.clusterresources.com/products/maui/docs/index.shtml>. – Загл. с экрана.
24. Moab Workload Manager [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Cluster Resources Inc. – Режим доступа: <http://www.clusterresources.com/products/maui/docs/a.kmoabcomp.shtml>. – Загл. с экрана.
25. Maui Scheduler Administrator's Guide. Appendix K: Maui-Moab Differences Guide [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Cluster Resources Inc. – Режим доступа: <http://www.clusterresources.com/products/maui/docs/a.kmoabcomp.shtml>. – Загл. с экрана.
26. Moab Workload Manager Administrator's Guide. Appendix K: Migrating from Maui 3.2 [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Cluster Resources Inc. – Режим доступа: <http://www.clusterresources.com/products/mwm/docs/a.kmauimigrate.shtml>. – Загл. с экрана.

Надійшла 11.08.2009

Юрич М. Ю.

АНАЛІЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЗАВДАННЯМИ
В КОНТЕКСТІ GRID

У даній статті проводиться аналіз найбільш поширених, що діють на цей час, систем управління пакетної обробки завдань (СУПО). Наведено безліч посилань на Інтернет-ресурси, за якими можна знайти більш детальну інформацію про ту чи іншу СУПО. У результаті проведеного аналізу побудовано зведену таблицю, що відображає порівняльну характеристику розглянутих СУПО, а також їх взаємозв'язок з поширеним на цей час зовнішнім планувальником завдань Maui. Також визначено місце СУПО у складі програмного забезпечення grid-систем і при використанні на локальному рівні.

Ключові слова: система управління пакетної обробки завдань, проміжне програмне забезпечення, grid-система, балансування навантаження, планувальник, завдання.

Yurich M. Yu.

ANALYSIS OF JOB MANAGEMENT SYSTEMS IN THE
CONTEXT GRID

In this article analysis of the most common and active at the moment Resource Management Systems (RMS) is presented. We give a lot of references to Internet-resources by which you can find more information about those RMS. As a result a summary table has been compiled that shows comparative characteristics of the considered RMS and their relationship with the currently used Maui external job scheduler. RMS position in the grid-systems software is determined and when used at the local level.

Key words: Resource Management System, middleware, grid system, load balancing, scheduler, job.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 62-55:681.515

Гостев В. И.

Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Государственного университета информационно-коммуникационных технологий, г. Киев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИДЕНТИЧНЫХ КОЛОКОЛООБРАЗНЫХ ФУНКЦИЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Получены аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных колоколообразных функциях принадлежности, изложены вопросы проектирования нечеткого регулятора и предложена практическая схема нечеткого регулятора.

Ключевые слова: автоматическое управление, нечеткий регулятор, проектирование, нечеткая логика, функции принадлежности, MATLAB.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование нечетких регуляторов осуществляется на основе пакета нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox с использованием мощного средства моделирования и исследования систем управления с обратной связью Simulink интерактивной системы MATLAB. Метод проектирования на основе пакета нечеткой логики системы MATLAB достаточно подробно изложен, например, в работах [1, 2]. В работе [3] предложен новый метод проектирования одного класса нечетких регуляторов, основанный на полученных аналитических выражениях для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при симметричных треугольных, возведенных в степень треугольных, экспоненциальных, колоколообразных и гауссовых функциях принадлежности с двумя термами. Представлена функциональная схема нечеткого регулятора, на базе которой возможна реализация нечетких регуляторов программным или аппаратным способом. При проектировании нечетких регуляторов предложенным ме-

тодом нет необходимости в использовании пакета нечеткой логики системы MATLAB и процедура проектирования нечетких регуляторов упрощается. Нечеткий регулятор представляется в виде последовательного соединения трех блоков (см. рис. 1): 1 – формирователя величин $A(t)$ и $B(t)$, 2 – блока сравнения величин $A(t)$ и $B(t)$ и расчета u_c (u_c – ненормированное управляющее воздействие на выходе нечеткого регулятора на оси универсального множества $U = [0, 1]$), 3 – блока нормировки выходной величины. Блочное построение регуляторов позволяет

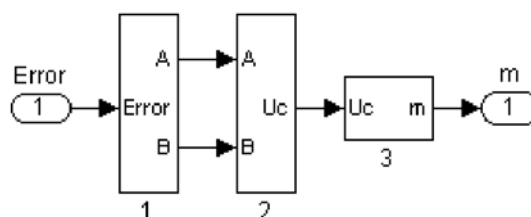


Рис. 1

выбирать и использовать различные блоки *формирователей величин* $A(t)$ и $B(t)$, *блоки сравнения величин* $A(t)$ и $B(t)$ и *расчета* u_c , а также оптимизировать процессы в системах управления.

Ниже изложено проектирование нечеткого регулятора при идентичных колоколообразных функциях принадлежности.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

1. Аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных колоколообразных функциях принадлежности

Рассмотрим нечеткий регулятор, на вход которого поступают ошибка системы θ , скорость изменения (первая производная) ошибки $\dot{\theta}$, ускорение (вторая производная) ошибки $\ddot{\theta}$. Нечеткий регулятор практически реализуется на микроЭВМ (или микропроцессоре) и работает в дискретном режиме, поэтому на входе регулятора включается аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а на выходе – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). АЦП квантует непрерывную ошибку системы управления $\theta(t) = u(t) - x(t)$ с шагом квантования h . В качестве первой и второй производных от ошибки обычно вычисляют первую и вторую разность по формулам

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= [\theta(k) - \theta(k-1)]/h; \\ \ddot{\theta}(k) &= [\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1)]/h = \\ &= [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)]/h^2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\theta(k)$ – квантованная ошибка на выходе АЦП. ЦАП представляет собой, как правило, фиксатор нулевого порядка с передаточной функцией $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$.

Пусть на универсальном множестве $U = [0, 1]$ заданы два нечетких подмножества, функции принад-

лежностей (ФП) которых для каждой лингвистической величины определяются по формулам (см. рис. 2)

$$\mu_1(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu_2(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-1}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1].$$

При поступлении на нечеткий регулятор в какой-то фиксированный момент времени значений входных переменных θ^* , $\dot{\theta}^*$ и $\ddot{\theta}^*$ с шагом квантования h осуществляется пересчет входных переменных в переменные u_1^* , u_2^* , u_3^* на универсальном множестве $U = [0, 1]$ и расчет значений ФП для этих переменных (см. рис. 2). Точками на универсальном множестве отмечены возможные для какого-то момента времени значения переменных u_1^* , u_2^* , u_3^* .

Для упрощения нормировки (пересчета значений сигналов в значения элементов единого универсального множества) диапазоны изменения входных сигналов (параметров нечеткого регулятора) принимаем симметричными, а именно

$$\begin{aligned} A_m &= \theta_{\max} = -\theta_{\min}, \quad B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}, \\ C_m &= \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}. \end{aligned}$$

Тогда формулы для нормировки (пересчета) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} u_1^* &= (\theta^* + A_m)/(2A_m); \\ u_2^* &= (\dot{\theta}^* + B_m)/(2B_m); \\ u_3^* &= (\ddot{\theta}^* + C_m)/(2C_m). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Лингвистическое правило управления нечеткого регулятора формулируется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{Если } (\theta^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \\ \text{то } (m^* = a_c^j), \quad j = \overline{1, 2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где a_1^j , a_2^j и a_3^j – лингвистические оценки ошибки, первой производной ошибки и второй производной ошибки, рассматриваемые как нечеткие терм-множества, определенные на универсальном множестве, $j = \overline{1, 2}$; a_c^j – лингвистические оценки управляющего воздействия на объект, выбираемые из терм-множества переменной m . Лингвистические оценки выбираются из терм-множеств лингвистических переменных θ^* , $\dot{\theta}^*$, $\ddot{\theta}^*$ и m^* :

$$a_i^j \in \{\text{отрицательная (1), положительная (2)}\}.$$

Другими словами, все сигналы (определенные выше лингвистические переменные) характеризуются как отрицательные ($j = 1$) или положительные ($j = 2$).

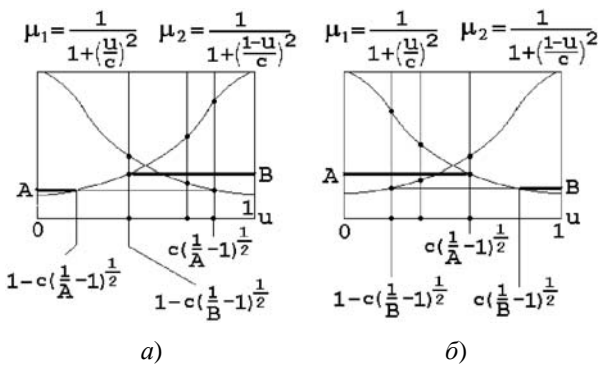


Рис. 2

Функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству «отрицательный» определяется из системы нечетких логических уравнений

$$\mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) = \mu_1(x_1) \wedge \mu_1(x_2) \wedge \mu_1(x_3). \quad (4)$$

Функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству «положительный» определяется из системы нечетких логических уравнений

$$\mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3) = \mu_2(x_1) \wedge \mu_2(x_2) \wedge \mu_2(x_3). \quad (5)$$

Результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия в соответствии с рабочим правилом ИР записывается в виде

$$\mu^m(x_1, x_2, x_3) = \mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) \vee \mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3). \quad (6)$$

В выражениях (4)–(6) \wedge – логическое «и», \vee – логическое «или».

В соответствии с лингвистическими правилами управления функция принадлежности управляющего воздействия $\mu_c^1(u)$ нечеткому множеству «отрицательный» ограничена сверху значением

$$A = \min[\mu_1(u_1^*), \mu_1(u_2^*), \mu_1(u_3^*)]; \quad (7)$$

функция принадлежности управляющего воздействия $\mu_c^2(u)$ нечеткому множеству «положительный» ограничена сверху значением

$$B = \min[\mu_2(u_1^*), \mu_2(u_2^*), \mu_2(u_3^*)]. \quad (8)$$

Результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия на основании выражения (6) определяется как

$$\mu_c(u) = \mu_c^1(u) \vee \mu_c^2(u), \quad (9)$$

т. е. получается формированием максимума

$$\mu_c(u) = \max[\mu_c^1(u), \mu_c^2(u)]. \quad (10)$$

Для определения конкретного значения управляющего воздействия m^* формируется «результирующая фигура», ограниченная результирующей ФП и производится поиск абсциссы «центра тяжести результирующей фигуры» u_c .

Отметим весьма существенный факт. Какие бы значения не принимали переменные u_1^* , u_2^* , u_3^* на универсальном множестве $U = [0, 1]$, в зависимости от соотношений величин A и B «результирующая фигура» может принимать только две конфигурации: при $A \leq B$ первая конфигурация показана на рис. 2, а; при $A \geq B$ вторая конфигурация показана на рис. 2, б.

Общая формула для определения абсциссы «центра тяжести результирующей фигуры» записывается в виде

$$u_c = \frac{\int_0^1 u \mu(u) du}{\int_0^1 \mu(u) du}. \quad (11)$$

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при $A \geq B$ определяется по формуле

$$u_c = \frac{A \int_0^{1-\frac{1}{\sqrt{A}-1}} u du \int_{1-\frac{1}{\sqrt{B}-1}}^1 \frac{1}{1-\frac{1-u}{c}} u du + B \int_{1-\frac{1}{\sqrt{B}-1}}^1 u du}{A \int_0^{1-\frac{1}{\sqrt{A}-1}} u du \int_{1-\frac{1}{\sqrt{A}-1}}^1 \frac{1}{1-\frac{1-u}{c}} du + B \int_{1-\frac{1}{\sqrt{B}-1}}^1 du} \quad (12)$$

при $A \leq B$.

После несложных вычислений находим

$$u_c = \frac{\frac{A}{2} - c \left[\sqrt{A-A^2} - \sqrt{B-B^2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{B}-1} - \arctg \sqrt{\frac{1}{A}-1} \right] - \frac{c^2}{2} \left[\left(A - B - \ln \frac{c^2}{B} + \ln \frac{c^2}{A} \right) \right]}{A - c \left[\sqrt{A-A^2} - \sqrt{B-B^2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{B}-1} - \arctg \sqrt{\frac{1}{A}-1} \right]} \quad (13)$$

при $A \leq B$.

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при $A \geq B$ определяется по формуле

$$u_c = \frac{A \int_0^{1-\frac{1}{\sqrt{A}-1}} u du \int_{\frac{c}{\sqrt{A}-1}}^{1-\frac{1}{\sqrt{B}-1}} \frac{1}{1-\frac{u}{c}} u du + B \int_{\frac{c}{\sqrt{B}-1}}^1 u du}{A \int_0^{1-\frac{1}{\sqrt{A}-1}} u du \int_{\frac{c}{\sqrt{A}-1}}^1 \frac{1}{1-\frac{u}{c}} du + B \int_{\frac{c}{\sqrt{B}-1}}^1 du} \quad (14)$$

при $A \geq B$.

После несложных вычислений находим

$$u_c = \frac{\frac{B}{2} - \frac{c^2}{2} \left[A - B - \ln \left(\frac{c^2}{B} \right) + \ln \left(\frac{c^2}{A} \right) \right]}{B + c \left[\sqrt{A-A^2} - \sqrt{B-B^2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{B}-1} - \arctg \sqrt{\frac{1}{A}-1} \right]} \quad (15)$$

при $A \geq B$.

Полученное значение u_c затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления (при симметричном диапазоне изменения выходного сигнала $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$)

$$m^* = m_{\min}(1 - 2u_c) = 2D_m u_c - D_m. \quad (16)$$

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов.

При $A = 0,2, B = 0,4, c = 0,3 \Rightarrow u_c = 0,5834$. При $A = 0,4, B = 0,2, c = 0,3 \Rightarrow u_c = 0,4166$.

2. Принципиальная схема нечеткого регулятора с идентичными колоколообразными функциями принадлежности

Выполненная с использованием интерактивной системы MATLAB принципиальная схема нечеткого регулятора с идентичными колоколообразными функциями принадлежности, представлена на рис. 3.

Формирователь величин $A(t)$ и $B(t)$ реализован на основе формул (1), (2), (7) и (8). Элементами ограничения (*Saturation*) моделируем универсальное множество $U = [0, 1]$, на которое поступают переменные $u_i, i = 1, 2, 3$. В блоках Fcn, Fcn1, Fcn2 записываем аналитические выражения для функций принадлежности $\mu_1(u)$, а в блоках Fcn3, Fcn4, Fcn5 – аналитические выражения для функций принадлежности $\mu_2(u)$. На выходе блоков Fcn, Fcn1, Fcn2 получаем переменные $\mu_1(u_i)$ (соответственно, $\mu_1(u_1), \mu_1(u_2),$

$\mu_1(u_3)$), а на выходе блоков Fcn3, Fcn4, Fcn5 получаем переменные $\mu_2(u_i)$ (соответственно, $\mu_2(u_1), \mu_2(u_2), \mu_2(u_3)$).

Блок сравнения величин $A(t)$ и $B(t)$ и расчета u_c реализован на основе формул (13) и (15). На выходе верхнего сумматора формируется числитель, а на выходе нижнего сумматора формируется знаменатель выражения (13) и на выходе делителя Product4 формируется величина u_c при $A \leq B$. Аналогичным способом на выходе верхнего сумматора формируется числитель, а на выходе нижнего сумматора формируется знаменатель выражения (15) и на выходе делителя Product5 формируется величина u_c при $A \geq B$. Переключатель Switch замыкает верхний контакт при условии $A \leq B$ (когда на среднем контакте сигнал положительный, в блоке Switch параметр Threshold = 0,000001). При условии $A \geq B$, когда на среднем контакте переключателя Switch сигнал отрицательный, переключатель замыкает нижний контакт. На выходе переключателя Switch получаем значение u_c .

Функции принадлежности в формирователе величин $A(t)$ и $B(t)$ называются входными, а в блоке срав-

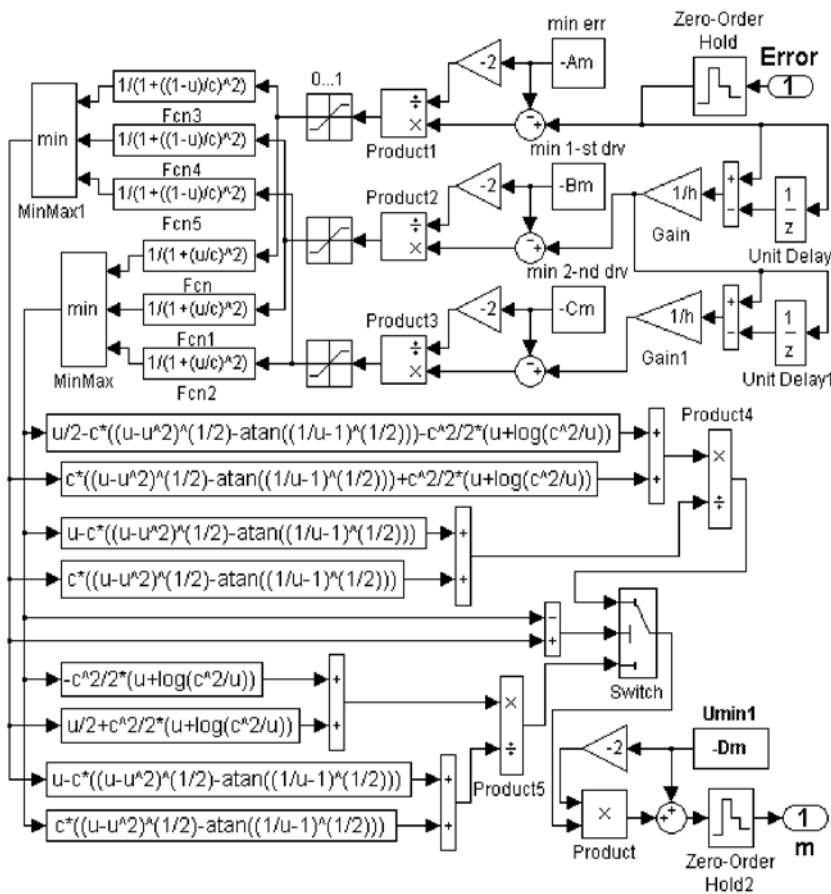


Рис. 3

нення величин $A(t)$ і $B(t)$ і расчета u_c називаються виходними. Для даного регулятора ці функції ідентичні.

Блок нормировки выходной переменной реалізований на основі формули (16).

3 Логика работы нечеткого регулятора

Логика работы нечеткого регулятора (см. рис. 3) для фиксированного момента времени отображена на рис. 4.

В формирователе величин $A(t)$ і $B(t)$ на входе нечеткого регулятора ошибка системы (Error) θ^* квантується АЦП (Zero-Older Hold), вичисляються перша (1-st drv) $\dot{\theta}^*$ і друга (2-nd drv) $\ddot{\theta}^*$ різниці від помилки з кроком квантування h і значення входних змінних θ^* , $\dot{\theta}^*$ і $\ddot{\theta}^*$ пересчитуються в змінні u_1^* , u_2^* , u_3^* по формулам (2). Производиться расчет значений входных функций принадлежности (см. рис. 4, а, б)

$$\mu_1(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu_2(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-1}{c}\right)^2}, \quad u \in [0, 1]$$

для змінних u_1^* , u_2^* , u_3^* і на виході блоків Min-Max і MinMax1 на основі алгоритма Мамдани визначаються, відповідно, величини А і В по формулам (7), (8).

Величини А і В поступають на блок сравнения величин $A(t)$ і $B(t)$ і расчета u_c , в якому проводиться расчет ненормированного выхода регулятора по формулам (13) і (15). Следует отметить, что блок сравнения реалізує вичислення ненормированного выхода регулятора u_c для вихідних функцій приналежності, які ідентичні входним (см. рис. 4, в, г), на основі формули (11), вичислення котрої при вихідних функціях приналежності, які ідентичні входним, приводить до остаточним формулам (13) і (15). Далі, отримане значення u_c в блоці нормировки выходной переменной пересчитується в вихідне напруга регулятора по формулі (16).

В динаміці на виході блоків Product, Product1, Product2 структурної схеми формирователя величин $A(t)$ і $B(t)$ отримуємо змінні u_i (відповідно, u_1 , u_2 , u_3). Вирази (7) і (8) на кожному кроці h вичисляються в блоках MinMax і MinMax1, на виході котрих отримуються значення змінних $A(t)$ і $B(t)$ і в блоці сравнения по формулам (13)

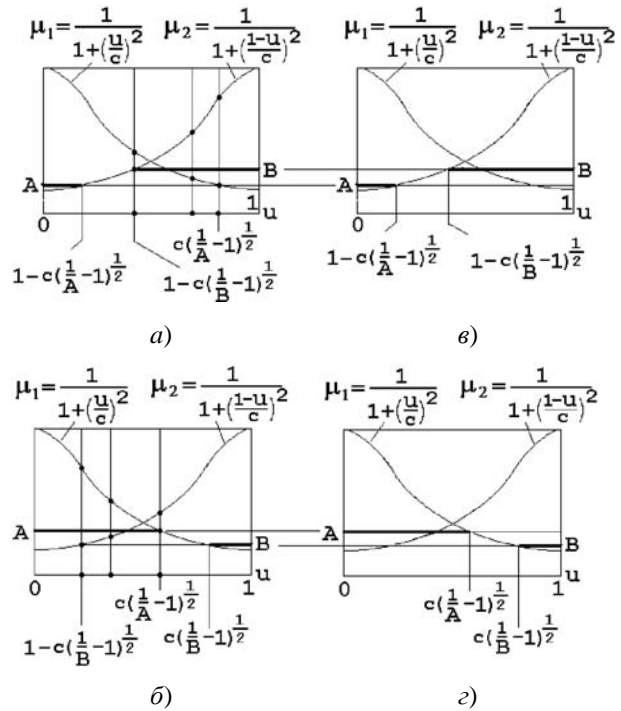


Рис. 4

і (15) вичисляються значення змінної $u_c(t)$, котрі преобразується блоком нормировки выходной переменной в значення управляющего воздействия на об'єкт управління $t(t)$.

В схемі формирователя величин $A(t)$ і $B(t)$ при настройці нечеткого регулятора перестраиваються граничні значення діапазонів $A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min}$, $B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}$, $C_m = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$. В блоці нормировки выходной переменной перестраиваються граничні значення діапазона $D_m = t_{\max} = -t_{\min}$.

ВЫВОД

Изложенные теория и практическая схема нечеткого регулятора с ідентичними колоколообразными функціями приналежності дають можливість використовувати такої регулятор в різних системах автоматичного управління і путем настройки параметрів регулятора добиватися високого якості систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / Дьяконов В., Круглов В. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.
2. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / Гостев В. И. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с.
3. Гостев В. И. Новый метод проектирования одного класса нечетких цифровых регуляторов / Гостев В. И. //

Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 6. – С. 73–84.

Надійшла 24.03.2009

Гостев В. И.

ПРОЕКТУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ІДЕНТИЧНИХ ДЗВІНОПОДІБНИХ ФУНКЦІЯХ ПРИНАЛЕЖНОСТІ

Отримано аналітичні вирази для керуючих впливів на виході нечіткого регулятора при ідентичних дзвоноподібних функціях приналежності, викладено питання проектування нечіткого регулятора та запропоновано практичну схему нечіткого регулятора.

Ключові слова: автоматичне керування, нечіткий регулятор, проектування, нечітка логіка, функції приналежності, MATLAB.

Gostev V. I.

DESIGNING OF THE FUZZY CONTROLLER AT IDENTICAL BELL-SHAPED MEMBERSHIP FUNCTIONS

Analytical expressions for control actions at the input of a fuzzy controller are derived at identical bell-shaped membership functions, fuzzy controller designing problems are discussed and practical design of a fuzzy controller is proposed.

Key words: automatic control, fuzzy controller, design, fuzzy logic, membership functions, MATLAB.

УДК.621.316.7

Зиновкин В. В.¹, Кулинич Э. М.²

¹Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

²Старший преподаватель Запорожского национального технического университета

КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА

Предложена структурно-алгоритмическая схема управления технологическим процессом приготовления газобетона. Управление осуществляется путем использования оптимизационных критериев градиентным методом по совокупности управляющих, контролируемых сигналов и исполнительных механизмов. Приведены результаты моделирования многопараметрической системы управления и испытаний в условиях работы установки на промпредприятии.

Ключевые слова: оптимальное управление, многопараметрический технологический процесс, структурно-алгоритмическая схема, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Технологическая установка производства газобетонов является многомерным, стохастическим, со сложными взаимосвязями между совокупностью управляющих сигналов, контролируемых параметров и состояния исполнительных механизмов, объектом автоматизированного управления. Необходимость оценки показателей качества готовой продукции и хода технологического процесса усложняет процесс автоматизации.

Ведущими зарубежными фирмами разработаны эффективные технологические линии по производству газобетонов с высоким уровнем автоматизации [1–4]. В них отмечается сложность и необходимость разработки систем автоматизированного управления технологическим процессом приготовления таких смесей, но методологические основы и принципы их построения практически отсутствуют [3, 5, 6].

Поэтому исследование и разработка многопараметрической системы управления технологическим процессом приготовления газобетонов представляются актуальными и востребованными промышленностью Украины [7].

ФОРМУЛИРОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Под многопараметрической системой автоматизированного управления технологическим процессом следует понимать совокупность управляемых программно управляющих блоков и алгоритмов, которые взаимодействуют между собой для обеспечения оптимального производственного цикла приготовления изделий из газобетона. Алгоритм включает совокупность программных предписаний, определяющих управление исполнительными механизмами для обеспечения необходимой последовательности выполнения полного цикла технологического процесса. В за-

© Зиновкин В. В., Кулинич Э. М., 2010

висимости от алгоритмов управления в работе используются замкнутые цепи воздействия на исполнительные механизмы. Поскольку управление технологическим процессом осуществляется по многим параметрам [8], отдельные из которых носят вероятностный характер, общее решение будет довольно громоздким, трудно реализуемым и управляемым. Для упрощения решения задачи совокупность сигналов сгруппируем по характерным признакам и назначению в управляющие, контролирующие и состояния исполнительных механизмов. Взаимосвязи между тремя каналами совокупности этих сигналов и технологическими элементами установки показаны на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1 – компьютер диспетчера; 3–5 – емкости известковых вяжущих; 17, 18 – емкости горячей воды; 25, 26 – емкости суспензии; 27 – емкость холодной воды; 13 – смеситель; 12, 28 – насосы подачи воды; 30, 32 – дозаторы-смесители отходов; 40, 41 – емкости цемента; 33 – емкость прямого шлама, 36, 37 – емкости возвратного шлама; 11 – дозатор горячей воды; 19 – дозатор суспензии; 22 – дозатор известковых вяжущих; 23 – дозатор цемента; 6, 20 – шнеки подачи сыпучих материалов; 31 – шибер перенаправления потока подачи технологических отходов; 42 – насос обратного шлама; 43 – конвейер порезки; 34, 3, 10 – программно-логические блоки управления.

Таким образом, в настоящей работе оптимизационный программно-аналитический поиск наиболее эффективного управления технологическим процессом приготовления газобетона будем отыскивать по трем обобщенным параметрам: алгоритмам совокупности сигналов управления, контроля хода технологического процесса и электротехнического состояния исполнительных механизмов.

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Критерии оптимизации электротехнологического режима отображают динамику системы автоматизированного управления [9]. Они обеспечивают наилучшие сочетания совокупности управляющих сигналов и качественных параметров, а также эффективность технологического процесса приготовления газобетона [10].

Совокупность этих сигналов должна удовлетворять следующему интегральному функционалу:

$$\xi(x, t) = \int_{t_1}^{t_2} \zeta(x, t) \cdot q(x, t) \cdot \rho(x, t) dt, \quad (1)$$

где $\zeta(x, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t)$ – совокупность сигналов управления; $q(\delta, t) = \sum_{j=1}^M \gamma_j(t)$ – параметры, контролирующие ход технологического процесса; $\rho(\delta, t) = \sum_{k=1}^K \chi_k(t)$ – сигналы исполнительных механизмов.

Обобщенный алгоритм управления изменяется, а за счет обратных связей постоянно корректируется до момента стабилизации технологического процесса. Корректировка параметров технологического процесса осуществляется градиентным методом. При этом программно-аналитический блок отыскивает оптимальное соотношение совокупности параметров, обеспечивающее переход всей системы управления в новое, более стабильное состояние. Сигналы управляющих воздействий для одного технологического этапа могут служить в качестве информационных для последующих этапов. Сигналы управляющих воздействий отражают обобщенную логическую информацию, которая соответствует оптимальному условию (1) в анализируемый момент времени технологического процесса. Сигналы исполнительных механизмов отображают их электротехнические параметры в данный момент времени и используются в качестве источника обратных связей. Их состояние отображается в виде изменения параметров относительно номинальных. При отклонении текущего состояния технологического процесса от номинального и в случае, когда исполнительные механизмы не обеспечивают его оптимальные условия, соответствующие программно-логические элементы детектируют это состояние и вырабатывают корректирующее воздействие в соответствии с новыми условиями.

Оптимизационный функционал от трех обобщенных подфункционалов позволяет отыскивать оптимальное сочетание совокупности параметров технологического процесса. Обобщенные сигналы в системе автоматизированного управления являются детерминированными функциями переменных параметров во времени. При изменениях информации о техпроцессе критерий оптимальности обеспечивается системой самонастройки за счет обратной связи. Положение экстремума определяется градиентным методом в соответствии с заданным алгоритмом программно-аналитического блока на основании поступающей информации от программно-аналитических подсистем, на которые информация поступает от исполнительных механизмов и датчиков техпроцесса.

Поиск оптимального управления технологическим процессом приготовления газобетона сводится

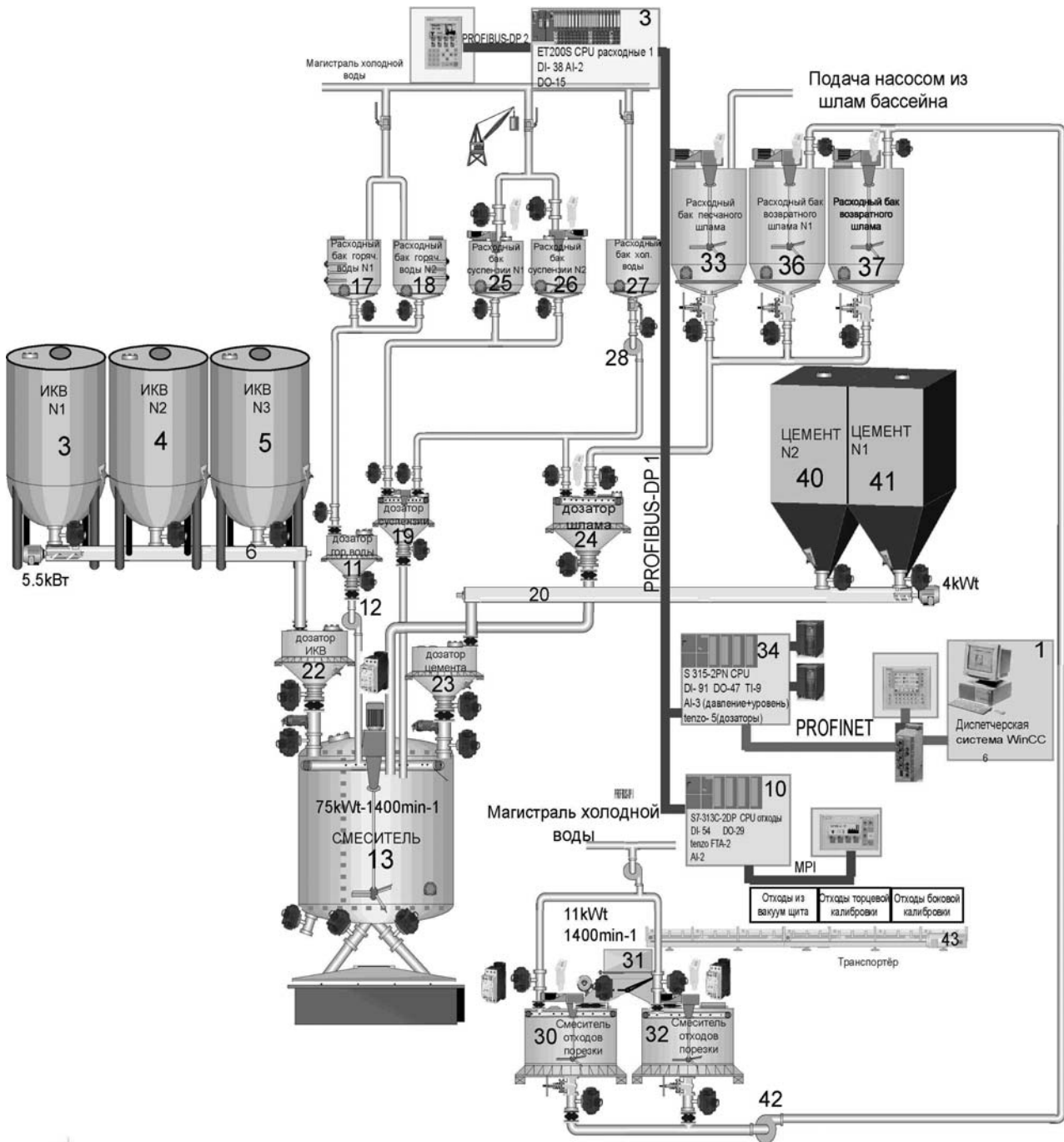


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи между управляющими, контролирующими сигналами, а также исполнительными и программно-логическими элементами технологической установки приготовления газобетона

к отысканию в фазовом пространстве совокупности параметров максимума следующего функционала:

$$\xi(t) = \int_0^T [\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t) \cdot (t_H + \Delta t)^{-1} dt] \Big|_{x = \text{const}}, \quad (2)$$

где T – время анализируемого этапа технологического процесса; t_H – время стабилизации режима; Δt – время подстройки отдельных параметров.

Оптимальному технологическому процессу соответствует максимум функционала (2) при соблюдении следующих условий:

$$\xi(x) = [\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t)] \cdot (t(x) + \Delta t)^{-1} dt \Big|_{x = \text{const}}, \quad (3)$$

$$T'(x) = \zeta'(x) \cdot [\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t)]^{-1}, \quad (4)$$

где $T'(x)$ – время интервала стабилизации режимов исполнительных механизмов; $\zeta'(x)$ – коэффициент,

зависящий от инерционности исполнительных механизмов и отработки логической информации.

Поскольку протекающий процесс рассматривается в системе фазовых координат, то оптимизационный поиск необходимо осуществлять при соблюдении следующих граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \zeta(x, t) < \zeta(x, t)_{\max}, \\ 0 \leq g(x, t) < g(x, t)_{\max}, \\ 0 \leq \rho(x, t) < \rho(x, t)_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Экстремальные значения уравнений (3), (4) в рамках (5) можно получить, решая следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial \zeta(x, t)} &= \frac{g(x, t) \cdot \rho(x, t) \cdot T(x)}{T + \Delta t} - G(t) \times \\ &\quad \times \frac{\zeta'(x)}{\zeta^2(x, t) \cdot g^y(x, t) \cdot \rho^z(x, t)} = 0; \\ \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial g(x, t)} &= \frac{\zeta(x, t) \cdot \rho(x, t) \cdot T(x)}{T + \Delta t} - G(t) \times \\ &\quad \times \frac{\zeta'(x)}{\zeta(x, t) \cdot g^{y+1}(x, t) \cdot \rho^z(x, t)} = 0; \\ \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial \rho(x, t)} &= \frac{\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot T(x)}{T + \Delta t} - G(t) \times \\ &\quad \times \frac{\zeta'(x)}{g(x, t) \cdot g^y(x, t) \cdot \rho^{z+1}(x, t)} = 0; \\ \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial T} &= \frac{\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t)}{(T + \Delta t)^2} - \lambda_m \times \\ &\quad \times T^{m-1} = 0; \\ \frac{G_{\zeta}}{\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot g^z(x, t)} - T^m &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $G(t)$ – характеристический множитель Лагранжа.

В соответствии с (1) условие Лагранжа в системе выражений (6) должно обеспечиваться при соблюдении следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \xi_n^{\circ}(x, t)}{\partial T^2(x)} < 0 \\ \frac{\partial^2 \xi^{\circ}(x, t)}{\partial \rho(x, t)} < 0 \\ \frac{\partial^2 \xi_n^{\circ}(x, t)}{\partial \zeta^2(x, t)} < 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

при этом функционал $\partial \xi_n^{\circ}(x, t)$ должен иметь максимум.

При этом для достижения оптимального автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона, одновременно с вы-

шеприведенными условиями необходимо обеспечить условия, при которых (вторые) вычитаемые параметры в системе (6) принимают наименьшие значения. Физически это означает, что постоянные времени системы управления должны быть минимальными. Для достижения большей точности управления параметры необходимо рассматривать как случайные функции технологического процесса. Однако это приведет к существенному усложнению решаемой задачи и ее практической реализации. Поэтому условия оптимального управления технологическим процессом, обеспечивающие максимум функционалу (2), следует выбирать по дискретным этапам приготовления газобетона. При этом в процессе поиска максимума компенсируется влияние вероятностных факторов за счет перехода изображающей точки слева или справа от экстремума. Необходимо отметить, что при разработке системы автоматизированного управления могут решаться линейные и нелинейные задачи. Для выбора эффективного управления технологическим процессом приготовления газобетона выполним анализ возможной реализации линейной и нелинейной задачи. В зависимости от этого системы управления классифицируются как самонастраивающиеся или системы стабилизации.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МНОГО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ФУНКЦИОНАЛ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ САУ

Оптимизационный многопараметрический функционал самонастраивающейся автоматизированной системы наиболее полно отражает ход управления технологическим процессом приготовления газобетона, когда все параметры управления исполнительными механизмами и передачи логической информации будут синхронными, а взаимосвязи – нелинейными.

Самонастраивающаяся автоматизированная система приготовления газобетона позволяет более эффективно использовать электротехническое и технологическое оборудование линии с заданной производительностью. Структурная схема самонастраивающейся системы показана на рис. 2, а графическая интерпретация самонастраивающегося нелинейного алгоритма управления технологическим процессом – на рис. 3.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – обобщенный показатель технологического процесса; 2 – привод главного исполнительного механизма (шнека дозирования извести, цемента и т. д.); 3 – привод заслонок подачи сыпучих материалов; 4 – скорость подачи другого сырья; 5 – информационный блок о $g(x, t)$; 6 – датчик загрузки бункеров; 7 –

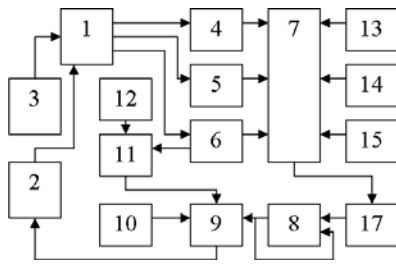


Рис. 2. Структурная схема самонастраивающейся многопараметрической системы автоматического управления технологическим процессом приготовления газобетона

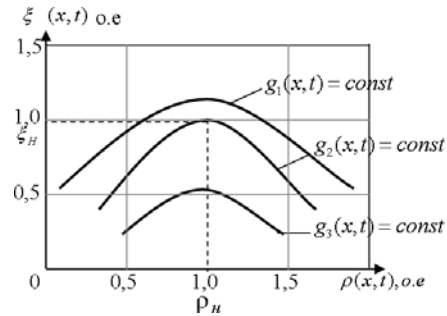


Рис. 3. Графическая интерпретация самонастраивающегося нелинейного алгоритма управления технологическим процессом приготовления газобетона

программно-преобразовательный блок; 8 – блок согласования; 9 – регулятор заслонок подачи сырья; 10 – программно-аналитический блок номинальной производительности технологической установки приготовления газобетона; 11 – устройство сопоставительного анализа; 12 – блок задания программно-аналитического режима технологического процесса; 13 – блок номинальных параметров; 14 – информационный блок текущих и обобщенных параметров; 15 – информационный блок технологического режима; 16 – блок усиления и стабилизации параметров; 17 – усредняющее устройство или фильтры среднего значения.

Аналитическая интерпретация самонастраивающейся системы с нелинейными взаимосвязями между параметрами основана на реализации градиентного метода. Оптимальное значение функционала соответствует точке, в которой производная изменяет свой знак на противоположный. Такой поиск экстремума в многопараметрической автоматизированной системе управления позволяет более эффективно управлять техпроцессом и свести к минимуму погрешности, возбуждаемые вероятностными параметрами.

Из рис. 2 и 3 видно, что для поиска оптимального технологического режима необходимо определиться с одним из обобщенных параметров, например $g(x, t)$. Для уменьшения погрешности в процессе работы технологической линии используются усредняющие устройства или фильтры среднего значения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Проверка многопараметрического управления технологическим процессом приготовления газобетона осуществлялась на модели с использованием алгоритма в логическом блоке Stateflow пакета MatLab и

в условиях работы технологической установки приготовления газобетона на промышленном предприятии. Согласование последовательной работы соответствующих исполнительных механизмов обеспечивалось путем использования разработанного годографа. Информацию о ходе технологического процесса и поступления технологических отходов на конвейер в каждый момент времени получали, используя блок Repeating Sequence Interpolated1. В качестве опорных данных в нем использовался директивный график технологического процесса. Поскольку заключительный этап технологического процесса является наиболее информационным, по нему осуществлялся анализ эффективности разработки. Результаты исследований объема технологических отходов от времени протекания технологического процесса приведены на рис. 4. Аналогичные результаты получены в реальных условиях работы технологической установки. Погрешность между смоделированными и реальными параметрами на окончательной фазе технологического процесса не превышает 6%. Варьирование наибольших и наименьших значений между собой поясняется возможными изменениями плотности технологических отходов и степени соответствия массива газобетона директивным требованиям и аппроксимацией опорных данных. На рис. 4 непрерывными кривыми обозначены смоделированные данные [11], а (○), (★), (△) – экспериментальные.

Имеющиеся отклонения соответствующих показателей между смоделированными и измеренными результатами в средней части технологического цикла поясняются проявлением вероятностного характера, что и предполагалось в постановочной части, и неоднородностью состава раствора в процессе дозирования, температурными градиентами, влияющими на показания ультразвукового датчика уровня и т. д. По

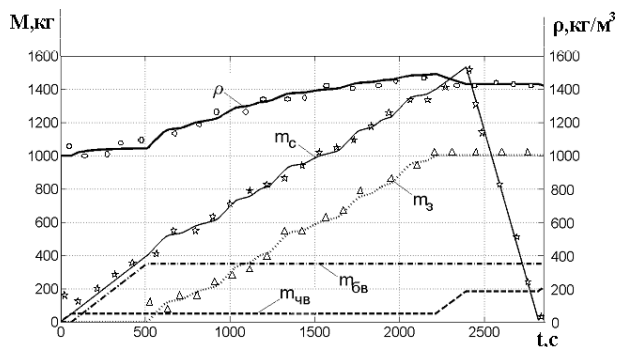


Рис. 4. Результаты исследований протекания технологического процесса приготовления газобетона

мере установления плотности и однородности эти погрешности уменьшаются, а на конечной стадии результаты моделирования и эксперимента практически совпадают.

Таким образом, анализ моделирования и экспериментальных исследований показал, что применение многопараметрической системы автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона позволило повысить эффективность технологической установки на 17 % по сравнению с установкой, использующейся ранее. Погрешность между экспериментальными и измеренными параметрами технологического процесса не превышает 6 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Большаков В. И.* Увеличение объемов производства и использования автоклавного газобетона – стратегический курс Украины в строительстве / Большаков В. И., Мартыненко В. А. // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 2. – С. 33–39.
2. Ворона А. Н. Производство и использование мелкоштучных изделий из ячеистого газобетона в Приднепровском регионе Украины / Ворона А. Н. // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 1. – С. 33–39.
3. *Сажнев Н. П.* Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика / Сажнев Н. П., Гончарик В. Н., Гарнашевич Г. С. и др. – Минск : Стринко, 2004. – С. 4–7.
4. *Филатов А. Н.* О производстве и применении изделий из ячеистого бетона в Украине / Филатов А. Н. // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 1. – С. 43–53.
5. *Сажнев Н. П.* Особенности производства ячеистого бетона по ударной технологии / Сажнев Н. П., Сажнев Н. Н. – 2006. – № 9–10. – С. 27–29.

6. *Царик А. М.* Как начать строительство завода по производству ячеистого бетона / Царик А. М. // Сборник трудов 3-го международного научно-практического семинара «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве». – Севастополь, 2007. – С. 15–17.
7. *Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 р. № 684 «Програма розвитку виробництва нідруюато-бетонних виробів та їх використання у будівництві на 2005–2011 роки»* // Строительные материалы и изделия. – 2004. – № 4. – С. 34–37.
8. *Зиновкин В. В.* Многопараметрическая система автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 3/3(39). – С. 38–43.
9. *В. В. Зиновкін.* Автоматизована система керування багатопараметричного технологічного процесу приготування газобетону / В. В. Зиновкін, Е. М. Кулинич, Ю. Н. Умеров, В. О. Мирний // Енергетика та системи керування – 2009 : тези доп. міжнар. конф., 14–16 травня 2009 р. – Львів, 2009. – С. 40–42.
10. *Зиновкин В. В.* Многокритериальная автоматизированная система управления технологическим процессом приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Матеріали міжнар. конференції «ISDMCI-2009» (Євпаторія, 19–22 травня). – 2009. – Т. 2. – С. 608–611.
11. *Зиновкин В. В.* Моделирование процесса утилизации отходов в технологии производства газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Матеріали міжнар. конференції (буде опубліковано у збірнику наукових праць 5-ї міжнародної наукової конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (6–13 червня 2009 р., Варна, Болгарія). – 2009. – Т. 2. – С. 176–179.

Надійшла 18.09.2009

Зиновкін В. В., Кулинич Е. М.

КРИТЕРІЇ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ПРИГОТУВАННЯ ГАЗОБЕТОНУ

Запропоновано структурно-алгоритмічну схему керування багатопараметричним технологічним процесом приготування газобетону. Керування виконується шляхом використання оптимізаційних критеріїв градієнтним методом за сукупністю керуючих, контролюючих сигналів та виконавчих механізмів.

Ключові слова: оптимальне керування, багатопараметричний технологічний процес, структурно-алгоритмічна схема, моделювання.

Zinovkin V. V., Kulynych E. M.

OPTIMAL CRITERIA OF MULTIPARAMETER AEROCRETE PREPARATION PROCESS CONTROL

The structure-algorithmic scheme of aerocrete preparation process control is proposed. Control is carried out using optimization criteria by the gradient method by a set of control and check signals and actuators. Results of multiparameter control system simulation and testing in the plant conditions are presented.

Key words: optimal control, multiparameter technological process, structurally-algorithmic scheme, modeling.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ У ВІБРОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Пропонується структура системи автоматизації керування технологічним процесом аерозольного нанокаталізу у віброзрідженому шарі для використання в системах екологічної безпеки знешкодження продуктів хлорорганічного синтезу з використанням сучасних програмно-технічних засобів. Описується функціональна і структурна організація системи, програмна реалізація, результати експериментальних досліджень програмної моделі.

Ключові слова: структура, система, технологічний процес, аерозольний нанокаталіз, програмно-технічні засоби.

ВСТУП

Ріст промислового виробництва, введення в експлуатацію нових ТП супроводжується вирішенням питань, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища. Актуальність питання екологічної безпеки зростає для регіонів, де скупчені підприємства нафтогазової, хімічної, металургійної промисловості [1].

Сучасні технологічні процеси (ТП) хлорорганічного синтезу неминуче призводять до накопичення відходів, що містять хлор, який в основній своїй масі характеризується високою токсичністю, хімічною стійкістю, важко піддається знешкодженню та є суттєвим фактором ризику для навколишнього середовища та здоров'я людини. Пріоритетним завданням промислової екології на сучасному етапі є кваліфікована переробка хлорорганічних відходів виробництва.

Пошук технології з широким спектром знешкодження відходів хлорорганічного синтезу привів до створення нової вітчизняної технології хімічних перетворень – аерозольного нанокаталізу у віброзрідженому шарі (Aerosol Nanocatalysis with Vibrating Bed – AnCVB), яка має переваги порівняно з традиційним каталізом на носіях, що забезпечує зростання швидкості реакції в 10^4 – 10^6 разів у розрахунку на масу каталізатора, зниження його кількості до 1–5 г/м³ реактора, збільшення продуктивності одиниці об'єму реактора у 3–10 разів, виключення використання газу в ТП, заощадження електроенергії за рахунок зменшення температури реакції [2].

© Рязанцев О. І., Кардашук В. С., 2010

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Екологічна безпека тісно пов'язана з безпекою функціонування складних хіміко-технологічних процесів і залежить від рівня ефективності автоматизації керування та надійності програмно-технічних засобів (ПТЗ). Більшість фаз керування ТП базується на діях оперативно-технічного персоналу, що є слабкою ланкою в системах екологічної безпеки.

Застосування ТП AnCVB в промислових масштабах стримується через відсутність ефективної системи автоматизації керування (САУ). Актуальною задачею в зв'язку з впровадженням САУ ТП AnCVB є подальший розвиток наукових досліджень в області нанокаталізу з застосуванням ПТЗ, розробка математичної моделі ТП AnCVB, методів керування, формування структури системи автоматизації керування (САУ) як складової частини системи екологічної безпеки.

Таким чином, створення ефективної САУ ТП AnCVB на основі розробки структури системи, методів керування, побудови математичної моделі, принципу параметричної адаптації, чіткої координації, динамічного програмування є науково-технічною проблемою, вирішення якої особливо актуальне в системах автоматизації керування складними хіміко-технологічними процесами.

ФУНКЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

САУ є складовою частиною системи екологічної безпеки хімічного підприємства та призначена для підвищення ефективності автоматизації процесу зне-

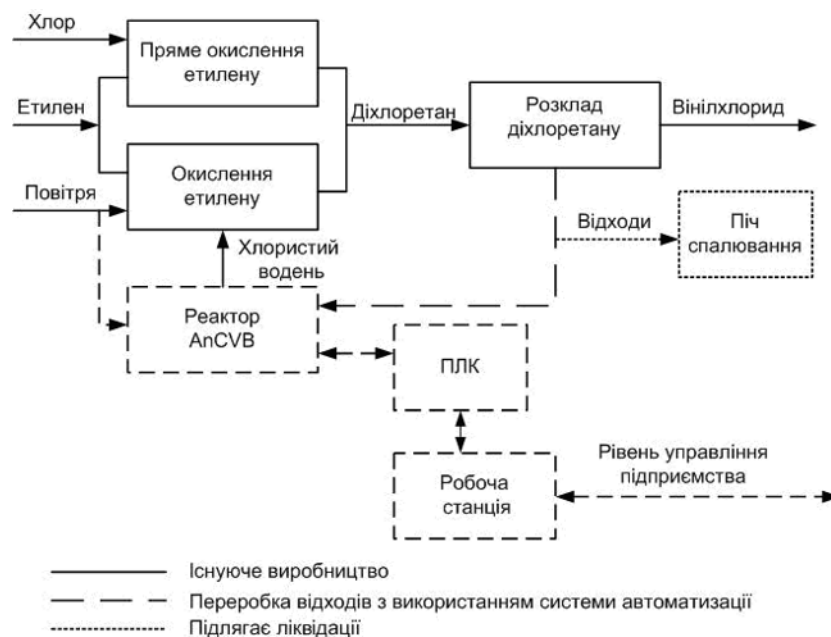


Рис. 1. Структурна схема модернізації виробництва вінілхлориду

шкодження відходів хімічного виробництва в різних агрегатних станах, що містять хлор (вінілхлорид, хлорбензол, капролактамі та ін.), за технологією AnCVB, забезпечення технічного персоналу оперативною інформацією про стан ТП та технологічних систем керування в обсязі, достатнім для прийняття рішення при відхиленні параметрів від технологічного регламенту (рис. 1).

При розробці системи використано об'єктно-орієнтований підхід, що використовує структуру інструментального середовища. Розроблена система містить в собі банк даних ТП, бібліотеку алгоритмічно-програмних модулів, графічний інтерфейс, що забезпечує гнучкість при зміні алгоритмів роботи ТП.

У відповідності з загальноприйнятими концепціями побудови САУ при розробці були враховані модульність, ієрархічність, інформаційна сумісність форматів даних, що дозволяє використовувати програмно-логічні контролери (ПЛК) та робочі станції (РС) різних виробників програмно-технічних засобів (ПТЗ).

Проектування системи проходило в декілька етапів: створення моделей підсистем ТП, розробка комплексного програмного забезпечення (ПЗ) та графічного інтерфейсу користувача. В системі реалізовано автоматичне та дистанційне керування виконавчими механізмами.

При реалізації САУ ТП AnCVB реалізуються задачі багатозв'язного керування:

- а) попередження при порушенні обмежень по вхідним та вихідним змінним;
- б) підтримка змінних та впливів в стабільному заданому стані;
- в) попередження недопустимих змін керуючих впливів;
- г) переведення технологічного режиму в найбільш вигідний стан.

Проведення операцій виміру і контролю даних в промислових умовах суттєво відрізняється від виконання таких же операцій в лабораторних умовах з визначеними зовнішніми умовами. Вплив багатьох побічних факторів в реальних промислових умовах призводить до спотворення результатів виміру.

Застосування нормалізаторів сигналів датчиків дозволили провести достовірні виміри та захистити технологічне обладнання від різного роду перешкод, які існують на промислових об'єктах і негативно впливають на параметри виміру. Застосування індивідуальної гальванічної розв'язки каналів прийому аналогової інформації дозволило ліквідувати вплив сигналів між каналами.

САУ ТП забезпечує традиційні для систем такого роду функції.

1. Автоматичний контроль та керування ТП.
2. Візуалізацію ТП AnCVB з використанням графічного інтерфейсу.
3. Автоматичний контроль стану модулів системи та виконавчих механізмів (датчики, крани) та ін.

СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

САУ ТП AnCVB є програмно-технічним продуктом, який складається з технічних засобів та ПЗ і забезпечує автоматизацію та контроль за станом вихідних параметрів ТП (концентрації CO, CO₂, HCl, Cl₂). Керування ТП на нижньому рівні здійснюється ПЛК (рис. 2) з необхідним набором апаратних та програмних модулів (табл. 1), який забезпечує збір, первинну обробку інформації, видачу сигналів керування.

Таблиця 1. Склад програмних модулів

Позначення	Характеристика
ASPIIN	Модуль ініціалізації АЦП
ASPID	Модуль АЦП з діагностикою
ASPIL	Модуль перетворення аналогового коду у фізичну величину
RAS16	Модуль розпаковки 16-розрядний
S_FILTER	Модуль фільтрації аналогового сигналу
MVDCK	Модуль МВДС з діагностикою
MFDSZD	Модуль формування стану дискретних каналів та діагностики його працездатності
RPID	Модуль ПІД-регулювання

Збір інформації з датчиків, керування виконавчими пристроями здійснюється з використанням модулів зв'язку з об'єктом. Кожна технологічна підсистема ТП AnCVB оснащена відповідними датчиками: температури, вібрації, переміщення, концентрації Cl₂, CO, CO₂, HCl. За результатами дослідження для розробки ПЗ системи визначено перелік аналогових та дискретних вхідних сигналів, дискретних та імпульсних вихідних сигналів.

Зв'язок з датчиками здійснюється через модуль нормалізації термопари/термоопору (МНТП/ТО) за допомогою стандартних рівнів сигналів. Попереднє з'єднання з МНТП/ТО, при подальшій подачі сигналів на аналогово-цифровий перетворювач інтегруючий (АЦП) забезпечує якісний прийом сигналів в умовах промислових перешкод. Виходи датчиків подаються в блок МНТП/ТО, де проводиться нормалізація сигналів, а потім в блок АЦП для перетворення аналогового значення сигналів в цифровий код. Якщо сигнал датчика нормалізований, то він безпосередньо подається на модуль АЦП.

Програмний елемент обробки аналогового сигналу ASPIL (рис. 3) забезпечує ввід цифрового коду з виходу модуля АЦП, що відповідає значенню напруги, перетворення його в фізичну величину та діагностику модуля.

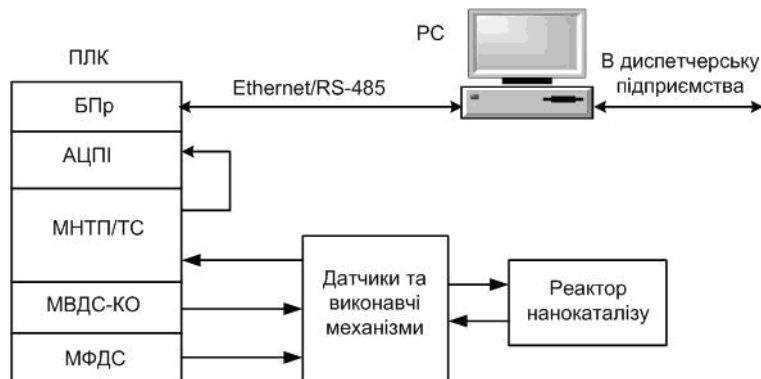


Рис. 2. Структурна схема ПЛК ТП AnCVB

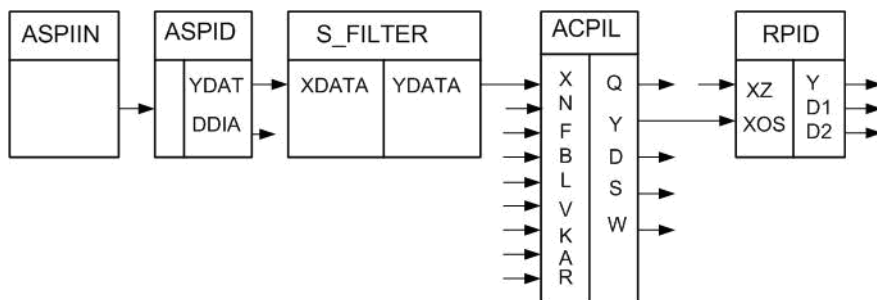


Рис. 3. Прийм аналогового сигналу та видача керування

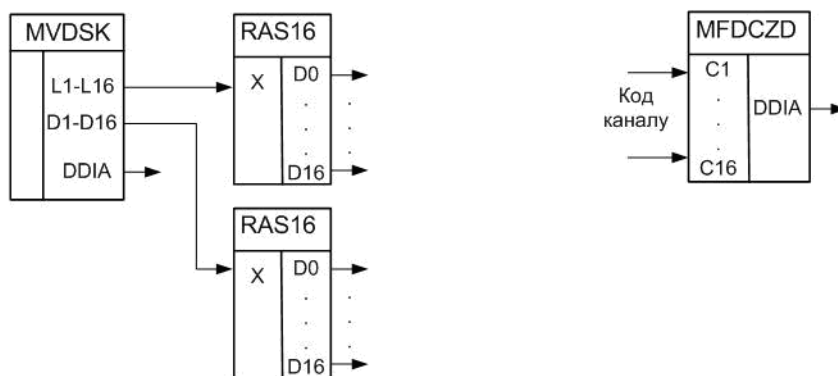


Рис. 4. Прийом та видача дискретного сигналу

Прийнятий з АЦП код перевіряється на допустимість наступним чином: якщо $x \leq 0$, то $x = 0$; якщо $x \geq 4096$, то $x = 4096$. Значення коду обчислюється за формулою

$$z = F \cdot x + (1 - F) \cdot G, \quad (1)$$

де x – значення коду після фільтра в діапазоні 0–4096, що вводиться з АЦП (12 розрядів); F – параметр фільтра (0,3–1); G – значення параметра після фільтра попереднього кроку (початкове значення $G = 1000$).

Розрахунок значення в одиницях параметра виміру виконується за формулою

$$Y = A + (R - A) \cdot \frac{z}{4096}, \quad (2)$$

де R – максимум діапазону виміру (в одиницях виміру фізичної величини), 10 В; A – мінімум діапазону виміру (в одиницях виміру фізичної величини), 0 В.

Виходи датчиків подаються в блок МНТП/ТО, де проводиться нормалізація сигналів, а потім в блок АЦП для перетворення аналогового значення сигналів в цифровий код. При розходженні сигналу від датчика та завдання ПД-регулятора виробляється відповідний вплив на керуючий орган.

Модуль MVDSK забезпечує ввід стану дискретних сигналів від виконавчих пристроїв та їх діагностику. Параметром налагодження модуля є базова адреса порту. У випадку виходу МФДС з ладу адреса порту програмно обнуляється, ввід з порту припиняється і дискретному виходу модуля MVDSK (вихід DDIA) присвоюється рівень логічної «1» (рис. 4).

Елемент RAS16 забезпечує перетворення вхідної аналогової інформації в n -розрядний позиційний код.

При прийомі дискретних сигналів вхідний сигнал відображається виразом

$$X = X_{n-1} \cdot 2^{n-1} + X_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + X_0 \cdot 2^0, \quad (3)$$

де n – кількість розрядів (1–16); $X_i \in \{0,1\}$.

Значення сигналу на виході D_i відповідає рівнянню $D_i = X_i$, $i \in 0, n-1$.

При видачі дискретного сигналу для керування виконавчими пристроями в програмний модуль MFDCZD заноситься відповідний код каналу та проводиться діагностика модуля (вихід DDIA логічна «1»).

Специфіка визначення середніх і сумарних значень в задачах керування обумовлена дискретним характером вхідної інформації. З цією метою в ланцюжку прийому аналогового сигналу запропоновано використати програмний модуль S_FILTER та алгоритм фільтрації аналогового сигналу, який забезпечує обчислення середнього значення останніх n значень. Перед початком роботи значення кількості вимірів n заноситься як параметр налагодження. Початкове значення $n = 5$, тобто за 5 вимірів, що становить 1 с, інформація в системі відображення при зміні параметру змінюється.

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Програмне забезпечення реалізоване на мові програмування Watcom C++ із застосуванням Photon microGUI. Для САУ ТП використана операційна система реального часу (ОС РЧ) QNX v. 4.25 фірми QSSL (QNX Software System Ltd.). САУ ТП – одна з традиційних областей застосування сімейства ОС РЧ QNX, а використання інтернет-технологій на сучасному етапі для віддаленого моніторингу та керування ТП є доповненням керування на локальному рівні.

Програмне забезпечення САУ ТП AnCVB складається з ПЗ ПЛК та ПЗ РС [3].

Зв'язок між ПЛК та РС здійснюється за допомогою мережевого інтерфейсу Ethernet (RS-485). ПЛК та РС функціонують під керуванням ОС РЧ QNX v. 4.25.

ПЗ ПЛК забезпечує:

1. Функціонування під керівництвом ОС РЧ QNX з тактом роботи 200 мс.
2. Реакцію системи на подію 200 мс.
3. Збір та первинну обробку від датчиків аналогових сигналів 0–10 В (4–20 мА).
4. Вибір середнього значення параметрів на інтервалі 5 тактів роботи системи (1 с).
5. Збір та первинну обробку від датчиків дискретних сигналів типу «сухий контакт», що містить інформацію про стан виконавчих механізмів.
6. Контроль стану технологічних параметрів та технологічного обладнання, контроль достовірності технологічних параметрів, передачу інформації системі відображення про недостовірність параметрів.
7. Регулювання температури реактора за законом ПД-регулювання, динамічне налаштування коефіцієнтів системи авторегулювання.
8. Видачу керуючих впливів 24 В в такті не більше 200 мс для виконавчих механізмів.
9. Передачу оперативної інформації по мережі Ethernet на РС для підсистеми відображення трендів, архівів, підсистеми діагностики стану ПТЗ.

ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ

Основним інструментом керування ТП є система відображення, в якій відображаються результати роботи і переключення між контурами керування (контур нагріву реактора, кранів подачі реагентів, вібрації і т. і.). Для розробки системи відображення використано Photon Application Builder (PhAB) фірми QSSL.

Для реалізації функцій керування в системі відображення ТП AnCVB екран оператора розділений на технологічні зони у відповідності з функціональним призначенням (рис. 5).

Графічний інтерфейс містить в собі загальну спрощену схему ТП, умовно розбиту на технологічні зв'язки. Перегляд даних здійснюється за допомогою закладок та написів на технологічній схемі. В нижній частині технологічної схеми відображається поточний стан ТП.

Журнал оперативних повідомлень про порушення технологічного процесу та несправності технологічного обладнання дозволяє відслідковувати події при ТП. Журнал (дані про хід ТП, показання приладів) заповнюється з інтервалом, обумовленим технологічним регламентом (200 мс), а по закінченню ТП або при переході дати створюється окремий файл.

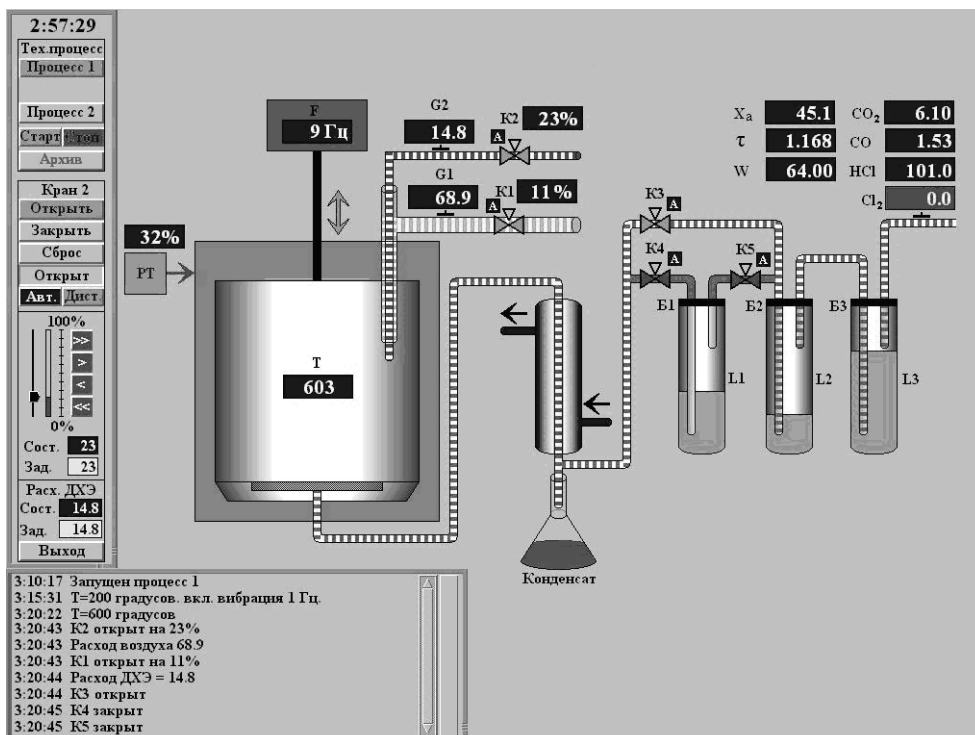


Рис. 5. Графічний інтерфейс ТП AnCVB

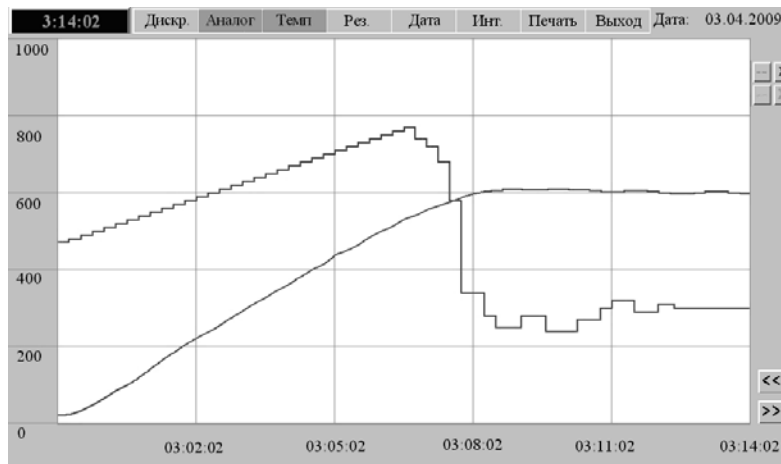


Рис. 6. Зміна температури під дією ПІД-регулятора

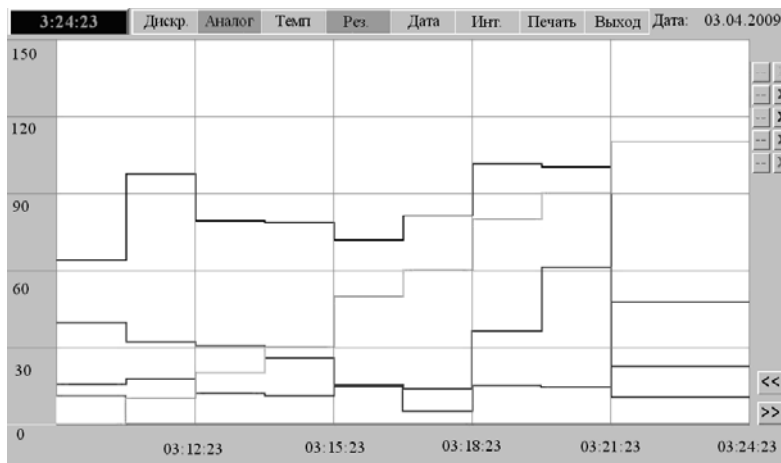


Рис. 7. Зміна вихідних продуктів ТП під дією вібрації

Для керування ТП реалізовано автономний та дистанційний режими роботи (АВТ/ДИС), а також ТП з різними вхідними продуктами, наприклад «Процес 1» – ДХЕ, «Процес 2» – хлорбензол. Передбачена можливість введення інших нових ТП.

Відображення оперативних трендів технологічних параметрів дозволяє відслідковувати динаміку ТП (рис. 6, 7).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНОЇ МОДЕЛІ

Основні теоретичні положення та розроблені методи та алгоритми перевірялись з використанням програмного моделювання з застосуванням ОС РЧ QNX v. 4.25, програми побудови алгоритмічних компонентів та програмних модулів PC-CAPS v. 4.51 з пакету P-CAD фірми Altium, мови програмування та транслятора Watcom C++, графічної оболонки Photon microGUI, системи відображення Photon Application

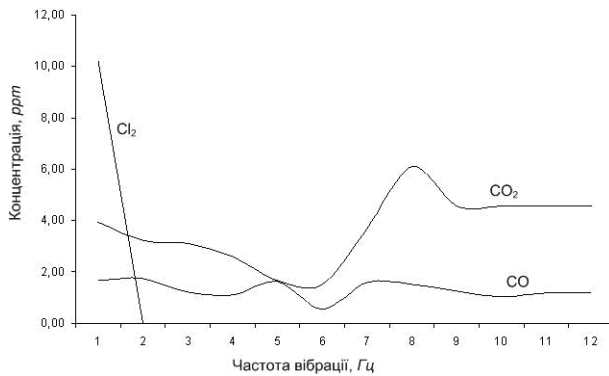
Builder (PhAB) фірми QSSL, SCADA-системи «Квантор-М», ПЛК Fastwell на базі процесора CPU686 фірми Octagon Systems. Проміжні результати моделювання отримані з використанням мови програмування VBA в програмі Excel з пакету MS Office 2003.

Експериментальні дослідження з використання ПТЗ проводились таким чином: в реактор подавалась визначена стехіометричним (мольним) відношенням суміш діхлоретану (ДХЕ) та повітря. Газова суміш на виході охолоджувалась водою. Проби газу на виході здійснювались за допомогою датчиків (табл. 2).

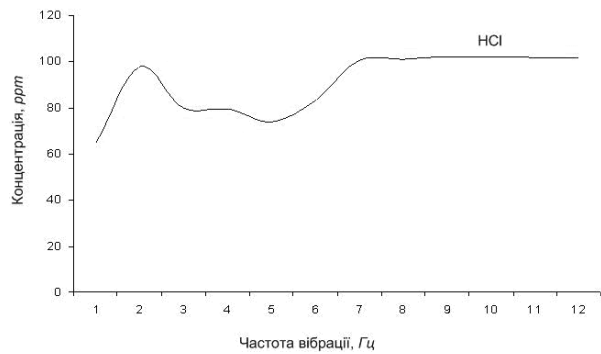
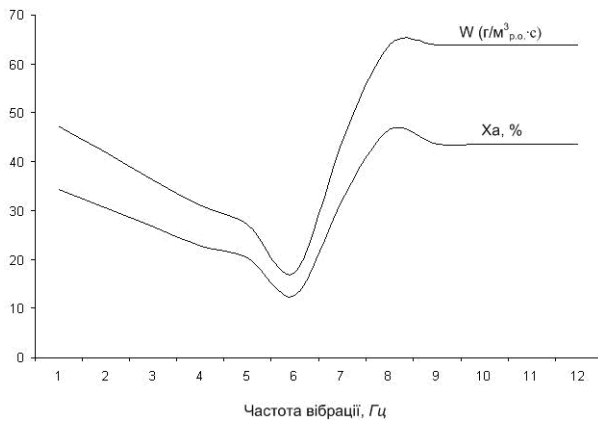
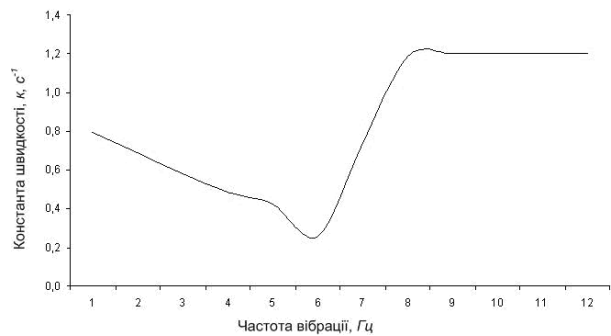
При вирішенні математичної моделі ТП з використанням ПТЗ досліджувався вплив продуктивності ТП на склад вихідної газової суміші, а також залежність виходу основного продукту від температури та вібрації. Температура реакційної зони вимірювалась за допомогою термопари ХА (К) з діапазоном виміру

Таблиця 2. Датчики для визначення концентрацій вихідних продуктів

Параметр контролю	Діапазон концентрацій, ppm	Виробник, країна
Cl ₂	0... 20	Membrapor, Цюрих, Швейцарія
HCl	0...200	
CO	0...1000	
CO ₂	0...20	Figaro Engineering Inc., Осака, Японія

**Рис. 8.** Залежність концентрації вихідних продуктів від частоти коливань реактора**Таблиця 3.** Вплив параметра фільтра на швидкодію та якість виміру аналогового сигналу

Значення параметра фільтра, F	Кількість тактів	Час, с	Похибка виміру, %
0,3	18	3,6	0,9
0,5	9	1,8	0,9
0,8	5	1	0,9
0,9	3	0,6	0,9

**Рис. 9.** Залежність концентрації HCl від частоти коливань реактора**Рис. 10.** Залежність ступеня перетворення (x_a) та швидкості реакції (W) від частоти коливань реактора**Рис. 11.** Залежність константи швидкості реакції від частоти коливань реактора

температур $-40...1100$ °С. Тиск в реакторі приймався рівним атмосферному.

Побудовані за результатами експериментів графіки (рис. 8–11) підтвердили ефективність та адекватність використання запропонованої математичної моделі, алгоритмів та програмно-алгоритмічних модулів, що були використані під час експериментальних досліджень.

В системі керування вимір технологічних параметрів виконується дискретно. Таким чином, виникає

задача відновлення значень параметрів в моменти часу, які не співпадають з точками вимірів. Для відновлення значень параметрів в попередні моменти часу, що передують останній точці виміру, пропонується скористатись виразами (1), (2).

Діапазон виміру – 0–10 В (шкала 0–4096), такт роботи системи – 200 мс. Після перетворення в програмному модулі ASPID обчислений цифровий код для вхідного сигналу 5 В склав $x = 2048$. Обчислення фізичного значення вхідного сигналу проводилось

згідно (1), (2). Проведений аналіз швидкодії системи та похибки виміру для кожного значення F після виходу системи на оптимальний режим виміру дозволили зробити висновок, що розроблені методи та алгоритми відповідають вимогам для системи (табл. 3).

Проведені експериментальні дослідження підтверджують адекватність створеної математичної моделі, що відобразилась в застосуванні відповідних ПТЗ. За ключовим параметром ТП – константою перетворення x_a відхилення склало 1 %.

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Підвищення ефективності та безпеки ТП AnCVB в результаті впровадження засобів автоматизації забезпечить:

а) якісне покращення процесу підготовки та прийняття рішення;

б) зменшення витрати часу на обробку та використання оперативних даних ТП, пошук несправностей та причин відхилень параметрів;

в) отримання оперативної автоматизованої підтримки даних про стан ТП.

На етапі організації робіт по проектуванню системи передбачалась можливість інтеграції системи в діючу систему автоматизації підприємства, чому сприяють стандартні канали передачі інформації Ethernet (RS-485) та використання об'єктно-орієнтованого підходу, що дозволяє представити кожен рівень керування як сукупність інформаційних, програмних, організаційних та інших компонент, які беруть участь в досягненні визначеної мети – від збору даних до видачі результату.

Враховуючи концепцію відкритості розподіленої ієрархічної системи, програмні та апаратні компоненти системи автоматизації відповідають вимогам переносу та можливості узгодженої роботи з іншими віддаленими компонентами.

Програмні та апаратні засоби розраховані на тривалу експлуатацію, нарощування можливостей та модернізацію.

Таким чином, створена САУ ТП AnCVB вирішує завдання підвищення ефективності та забезпечення екологічної безпеки підприємств хлороорганічного синтезу, а реалізація автоматизації процесу проектування системи керування дозволила скоротити строки створення проміжних та дослідно-конструкторських зразків системи автоматизації.

ВИСНОВКИ

Наукові дослідження та отримані результати розвивають новий перспективний напрямок використання нанотехнологій – підвищення ефективності ТП AnCVB за рахунок впровадження автоматизації керування з метою знешкодження широкого спектру хлороорганічних відходів з використанням сучасних ПТЗ [4–6].

Методи та теоретичні дослідження, використані при розробці алгоритмів та ПТЗ САУ ТП AnCVB, випробувані в процесі дослідної експлуатації. Це дозволило отримати такі наукові результати:

1. Запропоновано функціональну організацію САУ ТП AnCVB для реалізації задачі ефективного керування на основі розглянутих методів параметричної адаптації, жорсткої координації, динамічного програмування, математичної моделі. Визначено функції системи. Згідно з загальноприйнятими концепціями побудови при розробці системи враховані модульність, ієрархічність, інформаційна сумісність форматів даних, що дозволяє використовувати ПЛК та РС різних виробників ПТЗ.

2. Розроблено структурну організацію САУ ТП AnCVB, визначено склад модулів ПЛК, програмних модулів, необхідних для реалізації задач автоматизації керування та програмного моделювання. Визначено перелік сигналів від датчиків та виконавчих пристроїв. Для реалізації методів параметричної адаптації, жорсткої координації розроблено алгоритми та ПЗ модулів, ланцюжок виміру аналогових сигналів з видачею сигналу керування при відхиленні параметрів.

3. Розроблено графічний інтерфейс ТП AnCVB, що дозволяє спостерігати за перебігом ТП та реалізовувати задачі керування в режимі реального часу в автоматичному або в дистанційному режимі з внесенням необхідних налагоджень. Керування ТП виконавчими пристроями здійснюється безпосереднім викликом відповідного елемента графічного інтерфейсу.

4. Отримані за результатами експериментальних досліджень з використанням ПТЗ дані підтвердили адекватність та ефективність розроблених методів, математичної моделі, алгоритмів та програмно-алгоритмічних модулів згідно з вимогами до ТП AnCVB.

5. Запропоновано структуру та функції системи моделювання та налагодження з метою автоматизації процесу проектування САУ ТП AnCVB.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Рязанцев А. И.* Система экологического мониторинга окружающей среды / А. И. Рязанцев, В. С. Кардашук //

- Радіоелектроніка, інформатика, керування. – 2006. – № 2(16). – С. 128–132.
2. *Гликин М. А.* Оксидегидрохлорирование отходов. Аэрозольный нанокатализ с утилизацией хлора / М. А. Гликин, Л. А. Баранова, И. Н. Сологуб // Хімічна промисловість України. – 2006. – № 2. – С. 19–25.
 3. *Рязанцев А. И.* Программная реализация системы экологического мониторинга / А. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Информационные технологии в научных исследованиях и учебном процессе : II междунар. науч.-практ. конф., 14–16 ноября 2006 г. : сб. науч. трудов Донбасского государственного технического университета : спецвыпуск. – Алчевск : ДонГТУ ; Луганск : ЛНПУ, 2006. – С. 182–187.
 4. *Кардашук В. С.* Керування технологічним процесом аерозольного нанокаталізу у віброзрідженому шарі в умовах стохастичної невизначеності / В. С. Кардашук // Стратегія якості в промисловості і освіті : матеріали V міжнародної конф., 6–13 червня 2009 р., Варна, Болгарія. У 2 т. Т. 2. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 567–569.
 5. *Рязанцев А. И.* Система управления на базе современных программно-технических средств процессами утилизации отходов химических производств по технологии нанокатализа / А. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2008. – № 8(126). – Ч. 1. – С. 318–326.
 6. *Рязанцев А. И.* Математические методы исследования экспериментальных данных в системах управления процессами утилизации отходов химических производств по технологии нанокатализа / А. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – Ч. 1. – № 12(130). – С. 10–16.

Надійшла 23.09.2009

Рязанцев А. И., Кардашук В. С.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧЕСКИМ ПРОЦЕСОМ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛИЗА В ВИБРОСЖИЖЕНОМУ СЛОЕ

Предлагается структура системы автоматизации управления технологическим процессом аэрозольного нанокатализа в вибросжиженном слое для использования в системах экологически безопасного обезвреживания продуктов хлорорганического синтеза с использованием современных программно-технических средств. Приведены функциональная и структурная организация системы, программная реализация, результаты экспериментальных исследований программной модели.

Ключевые слова: структура, система, технологический процесс, аэрозольный нанокатализ, программно-технические средства.

Ryazantsev A. I., Kardashuk V. S.

SYSTEM OF AUTOMATIZATION OF TECHNOLOGY PROCESS CONTROL OF AEROSOL NANOCATALYSIS WITH VIBRATING BED

The author proposes an automatic control system for the process of aerosol nanocatalysis with vibrating bed to be used in environmentally appropriate systems of organic-chlorine synthesis products neutralization using modern program-technical means. Functional and structural organization of the system, its software support and results of software model experimental investigation are described.

Key words: structure, system, technological process, aerosol nanocatalysis, program-technical means.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (PIU) призначений для публікації найбільш значимих наукових і практичних результатів досліджень учених вищих навчальних закладів і наукових організацій.

Журнал включений у перелік наукових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на змагання вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук і фізико-математичних наук за фахом «Радіофізика».

Статті, що опубліковано в журналі, реферуються в реферативних журналах і базах даних ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Інтернет-сторінка журналу:

<http://journal.zntu.edu.ua/tic/index.php?page=index>.

Журнал видається два рази в рік і розповсюджується по підписці в Україні. Передплатний індекс 22914.

Для розгляду питання про публікацію статті в редакцію журналу необхідно вислати поштою або представити особисто наступне:

1) рукопис (роздруковку) статті, підписаний на останній сторінці всіма авторами, в двох екземплярах;

2) оригінал експертного висновку про можливість відкритого опублікування статті;

3) супровідний лист-клопотання з організації, де була виконана робота (або лист автора);

4) рецензію від фахівця в даній області з вченим ступенем доктора наук. Підпис рецензента обов'язково мусить бути завіреним.

5) диск з наступними файлами:

1) електронна версія статті, повністю ідентична роздруковці;

2) відомості про авторів;

3) рисунки у графічному форматі .tif.

Файли з матеріалами статті можна вислати електронною поштою або передати особисто на оптичному диску або USB-накопичувачі.

Вимоги до оформлення статті. Приймаються статті, набрані в редакторі Microsoft Word.

Параметри сторінки:

– розмір паперу – А4 (210x297);

– орієнтація – книжкова;

– шрифт – Times New Roman, розмір – 12 pt;

– міжрядковий інтервал – полуторний;

– верхнє поле – 20 мм, нижнє – 20 мм, ліве – 25 мм, праве – 15 мм.

Сторінки рукопису повинні бути пронумеровані. Не допускаються розбіжності рукопису з електронною версією статті. Текст рукопису не повинен мати рукописних виражень та позначок.

Послідовність розміщення матеріалу статті:

1) індекс УДК;

2) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова українською мовою (для громадян України);

3) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова російською мовою;

4) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова англійською мовою;

5) текст статті;

6) список літератури.

Текст статті. Приймаються статті російською, українською та англійською мовами. Розмір статті до 0,5 авторського аркуша. У статті слід уникати зайвої деталізації, про-

міжних формул і висновків; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць і ілюстрацій у тексті. Стаття не повинна мати граматичних або інших помилок, а також повинна відповідати тематиці журналу й вимогам ВАК щодо фахових видань. **Структура** тексту статті мусить містити такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному виді і її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато розв'язання даної проблеми, і на які опирається автор; виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, висновки по даному дослідженню й перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Матеріал публікації мусить бути розбитий на підрозділи не більше двох рівнів.

Рисунки розміщуються в тексті й додатково додаються в окремих файлах (формат .tif з роздільною здатністю 150–300 dpi, чорно-білі або у градаціях сірого). Розмір рисунків не повинен перевищувати ширини сторінки (17 см) або ширини колонки (8 см). Написи на рисунках бажано виконувати шрифтом Times New Roman, розмір 10. Рисунки нумерують і підписують унизу.

Формули виконуються за допомогою вбудованого в Word редактора Microsoft Equation. Формули нумерують у круглих дужках праворуч. Формули великого розміру записуються в кілька рядків.

Нумерація рисунків, формул і таблиць наскрізна однакова.

Обсяг **анотації** не повинен перевищувати 40 слів.

Ключові слова наводяться в називному відмінку у кількості до десяти слів.

Список літератури наприкінці статті подається мовою оригіналу і складається в порядку згадування посилань у тексті й відповідно до діючого стандарту на бібліографічний опис. Посилання на літературу в тексті нумеруються послідовно й позначаються цифрою у квадратних дужках.

У **відомостях про авторів** необхідно навести:

1) прізвище, ім'я, по батькові (повністю);

2) учений ступінь;

3) посаду;

4) місце роботи;

5) робочу чи домашню і електронну адресу;

6) робочий, домашній, мобільний телефон.

Статті, які не відповідають зазначеним вимогам, не приймаються до розгляду.

Всі статті проходять закриті рецензування і в разі потреби можуть бути повернуті автору на доробку. Редакція залишає за собою право на літературну редакцію тексту статті без повідомлення автору.

Рукописи й диски не вертаються, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу «PIU»

Тел.: (061) 7-698-2-96 – редакційно-видавничий відділ

(061) 7-644-6-62 – головний редактор

Факс: (0612) 64-21-41

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 1/2010

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук Піза Д. М.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Комп'ютерне моделювання та верстання

Новікова К. О.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

*Підписано до друку 09.02.2010. Формат 60x84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 20,1.
Тираж 300 прим. Зам. № 262.*

69063 м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64