

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 0135-1710

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ

**Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

Выпуск 158

Харьков
2012

СОДЕРЖАНИЕ

КИРИЧЕНКО Л.О.

ВЕЙВЛЕТ-ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА ПО ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ
СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ЦИКЛИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.....4

ШАРГОРОД А.Ю., ЛОЖКИН Г.В.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ САД-СИСТЕМ.....13

**МУРАД АЛИ АББАС, ХАХАНОВ В.И., ЛИТВИНОВА Е.И.,
ЧУМАЧЕНКО С.В., ГОРОБЕЦ А.А.**

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕСТИРОВАНИЯ И РЕМОНТА
ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛАХ.....18

ЗЕМЛЯК А.М.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ
СТРАТЕГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ
УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЕКТОРА.....36

ПАРТЫКА С.А.

МЕТОД УСКОРЕННОЙ КОРРЕКЦИИ SPT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДИНАМИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ.....42

ХАХАНОВА И.В.

TLM-МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОРА АНАЛИЗА ЛОГИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ.....48

ЛЯХОВЕЦ А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ
ЛИНЕЙНО НЕРАЗДЕЛИМЫХ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ
МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ХАМЕЛЕОН.....55

НОВИКОВА О.Б.

АПРОКСИМАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ КРИВЫХ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЛАЙНІВ.....63

ГУРИН В.Н., ЯШКОВ И.О., ГУРИН Д.В.

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СЕЛЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ
И КОНСТРУКЦИИ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛООВОГО КОЛЛЕКТОРА
С РЕКОМЕНДАЦИЯМИ ПО ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ.....68

ЛОЩИЦКИЙ П.П., МИНЗЯК Д.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
СВОЙСТВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ.....72

АРТЮХ Р.В., БОЖИНСКИЙ И.А.

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ВАРИАНТОВ
ПЛАНОВ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ В ПРЕЦЕДЕНТНОЙ СИСТЕМЕ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....78

РЕФЕРАТЫ.....84

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА.....88

ВЕЙВЛЕТ-ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА ПО ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ЦИКЛИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Предлагается метод вейвлет-оценивания показателя Херста, основанный на использовании пакетного преобразования. Применение разработанного метода позволяет определять степень самоподобия для рядов небольшой длины, обладающих существенными трендовыми и циклическими компонентами.

1. Введение

В настоящее время стало общепризнанным, что многие информационные, биологические, физические, технологические процессы имеют сложную фрактальную структуру. Фрактальный анализ используется для моделирования, анализа и контроля сложных систем в различных областях науки и техники. В частности, в геологии – для прогнозирования сейсмической активности и цунами, определения возраста геологических пород; в биологии и медицине – для диагностики заболеваний и физиологического состояния по записям ЭКГ и ЭЭГ, при исследовании мутаций и изменений на генетическом уровне; в экономике – для прогнозирования кризисных ситуаций и оценивания риска по финансовым рядам; в физике – для исследования турбулентности и термодинамических процессов [1-4].

Оценка степени самоподобия (показателя Херста) по экспериментальным данным играет важнейшую роль в изучении процессов, имеющих фрактальные свойства. Степень самоподобия стохастического процесса, который определяется показателем Херста, является показателем сложности динамики и корреляционной структуры временного ряда.

Для оценки показателя Херста по временному ряду существует ряд методов [5-6]. Однако большинство методов применимы только к стационарным рядам, в то время как множество природных, технических и информационных процессов являются нестационарными. Типичным нарушением стационарных свойств, которые встречаются на практике, является наличие трендовой и циклической составляющей ряда. Эффективным инструментом исследования структуры нестационарных временных рядов является аппарат вейвлет-анализа, который позволяет выделять структурные компоненты ряда. В частности, методы, основанные на дискретном вейвлет-преобразовании, позволяют оценивать степень самоподобия для нестационарных рядов [7-9].

Однако стандартный метод вейвлет-оценивания не позволяет получить адекватные оценки показателя Херста при наличии значительных циклических компонент временного ряда [10, 11]. Целью представленного исследования является разработка метода оценивания показателя Херста для рядов с существенными трендовыми и циклическими компонентами, основанного на применении пакетного вейвлет-преобразования.

2. Декомпозиция временных рядов с помощью дискретного вейвлет-преобразования [7-9,12]

Вейвлет-преобразование временного ряда – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла по системе базисных функций

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

полученных из материнской вейвлет-функции $\psi(t)$ за счет операций сдвига во времени b и изменения временного масштаба a . В дискретном вейвлет-преобразовании (ДВП) параметры масштаба и сдвига задаются обычно в виде степенных функций: $a = 2^{-m}$, $b = k_0 \cdot 2^{-m}$, $m, k_0 \in Z$. Дискретные вейвлеты используются, как правило, в паре со связанными с ними дискретными скейлинг-функциями. Скейлинг-функции имеют с вейвлетами общую об-

ласть задания и определенное соотношение между значениями. При заданных материнском вейвлете $\psi(t)$ и соответствующей скейлинг-функции $\varphi(t)$ аппроксимирующие коэффициенты $\text{apr}(j, k)$ и детализирующие коэффициенты $\text{det}(j, k)$ ДВП для процесса $X(t)$ определяются следующим образом:

$$\text{apr}(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)\varphi_{j,k}(t)dt, \quad \text{det}(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)\psi_{j,k}(t)dt,$$

где j – параметр масштаба; k – параметр сдвига ($j, k \in Z$) и базисные функции равны:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\varphi(2^{-j}t - k),$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - k).$$

Декомпозиция временного ряда, выполняемая с помощью ДВП, заключается в разбиении исследуемого ряда на две составляющие: аппроксимирующую и детализирующую, с последующим аналогичным дроблением аппроксимирующей до заданного уровня разложения. Временной ряд $X(t)$ представляется в виде суммы аппроксимирующей компоненты $\text{approx}_N(t)$ и детализирующих компонент $\text{detail}_j(t)$:

$$X(t) = \text{approx}_N(t) + \sum_{j=1}^N \text{detail}_j(t) =$$

$$= \sum_{k=1}^{N_a} \text{apr}(N, k)\varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{N_j} \text{det}(j, k)\psi_{j,k}(t),$$

где N – выбранный максимальный уровень разложения; N_j – количество детализирующих коэффициентов на уровне j ; N_a – количество аппроксимирующих коэффициентов на уровне N .

Выбор типа вейвлет-функции и количества уровней разложения является важным вопросом при выполнении ДВП. Обычно вейвлет-функция подбирается в зависимости от временных и частотных характеристик каждого анализируемого сигнала. Максимальный уровень разложения зависит от того, какие частотные диапазоны необходимо исследовать.

В обычном алгоритме ДВП при переходе с масштабного уровня m на уровень $m+1$ функция аппроксимирующих коэффициентов $\text{apr}(m, k)$ разделяется на низкочастотную $\text{apr}(m+1, k)$ и высокочастотную $\text{det}(m+1, k)$ части спектрального диапазона. При дальнейшем увеличении масштабных уровней разложению подвергаются только низкочастотные аппроксимирующие функции, детализирующие коэффициенты далее не анализируются (рис. 1 слева)).

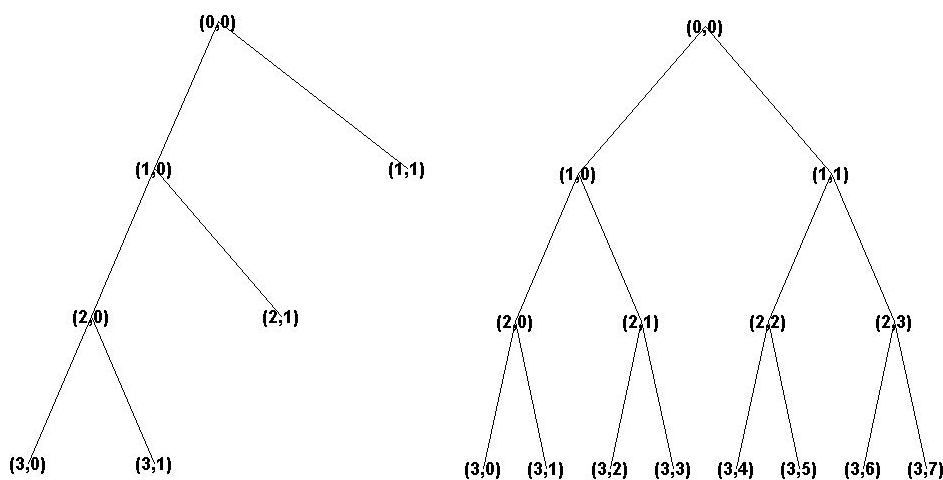


Рис. 1. Дерево обычного ДВП (слева) и пакетного ДВП (справа)

Идея пакетного вейвлет-анализа состоит в том, чтобы раскладывать детализирующие функции, используя тот же самый метод разложения. В пакетном алгоритме ДВП операция последовательного частотного расщепления применяется как для низкочастотных аппроксимирующих, так и для высокочастотных детализирующих коэффициентов. Таким образом пакетное ДВП способствует лучшей частотной локализации. В результате возникает дерево разложения, пример которого показан на рис. 1 справа. При разложении данных некоторого узла ниже слева находятся аппроксимирующие коэффициенты, а справа – детализирующие.

Каждый узел дерева пакетного ДВП содержит набор вейвлет-коэффициентов, соответствующих определенному частотному диапазону. Временной ряд может быть однозначно восстановлен по пакетным вейвлет-коэффициентам, находящимся в терминальных узлах дерева.

3. Оценивание самоподобия стохастических процессов с помощью ДВП [7-10]

Стохастический процесс $X(t)$ является самоподобным с параметром самоподобия H , если процесс $a^{-H}X(at)$ описывается теми же конечномерными законами распределений, что и $X(t)$: $\text{Law}\{X(t)\} = \text{Law}\{a^{-H}X(at)\}$, $\forall a > 0, t > 0$.

Параметр H , $0 < H < 1$, называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия и меру долгосрочной зависимости стохастического процесса.

Метод оценивания степени самоподобия базируется на свойствах детализирующих вейвлет-коэффициентов, полученных в результате декомпозиции процесса. Если случайный процесс $X(t)$ является самоподобным, то детализирующие коэффициенты на каждом уровне разложения также обладают свойством самоподобия:

$$\text{Law}\{\text{det}(j, k)\} = \text{Law}\{2^{j(H+1/2)} \text{det}(0, k)\}, \quad (1)$$

где $\text{det}(j, k)$ – k -й детализирующий коэффициент уровня разложения j , $k = 1, 2, \dots, N_j$; N_j – количество вейвлет-коэффициентов на уровне разложения j ; H – показатель Херста. Это свойство вытекает из свойств вейвлет-базиса, полученного путем масштабирования материнских вейвлетов.

Если для самоподобного процесса $X(t)$ существуют моменты 2-го порядка, то для вейвлет-коэффициентов, полученных в результате декомпозиции данного процесса, выполняется следующее равенство:

$$M|\text{det}(j, k)|^2 = M|\text{det}(0, k)|^2 2^{-j(2H+1)}. \quad (2)$$

Величина вейвлет-энергии $M|\text{det}(j, k)|^2$ на уровне j вычисляется следующим образом:

$$E_j = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} \text{det}^2(j, k). \quad (3)$$

Метод вейвлет-оценивания степени самоподобия H базируется на свойствах детализирующих вейвлет-коэффициентов, полученных на разных уровнях декомпозиции исследуемого временного ряда. Основу данного метода составляет положение, следующее из (1)-(2), о том, что изменение значений вейвлет-энергии на масштабном уровне j подчиняется скейлинговому отношению:

$$E_j \propto 2^{(2H+1)j}. \quad (4)$$

График зависимости $\log_2(E_j)$ от j представляет собой прямую линию, аппроксимированную методом наименьших квадратов. Значение параметра H можно найти, оценив тангенс угла наклона прямой. На рис. 2 представлен типичный спектр вейвлет-энергии самоподобного процесса (вверху) и зависимость $\log_2(E_j)$ от номера уровня разложения j (внизу).

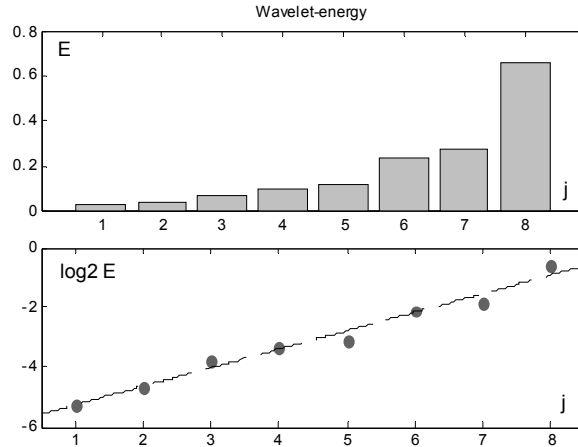


Рис. 2. Спектр вейвлет-энергии самоподобного процесса (вверху) и зависимость $\log_2(E_j)$ (внизу)

Одной из важных характеристик вейвлет-функции $\psi(t)$ является наличие нулевых моментов высокого порядка: $\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, \quad k = \overline{0, p-1}$. Число нулевых моментов p характеризует способность вейвлет-преобразования анализировать мелкомасштабные флуктуации и особенности высокого порядка, игнорируя регулярные полиномиальные составляющие степени $m < p$.

4. Моделирование реализаций фрактального процесса

Одной из наиболее известных и простых моделей стохастической динамики, обладающих фрактальными свойствами, является фрактальное броуновское движение (ФБД), которое широко применяется в физике, химии, биологии, экономике и теории сетевого трафика [1-4].

Гауссовский процесс $X(t)$ называется фрактальным броуновским движением с параметром $H, 0 < H < 1$, если приращения случайного процесса $\Delta X(\tau) = X(t + \tau) - X(t)$ имеют распределение вида:

$$P(\Delta X < x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0\tau^H}} \cdot \int_{-\infty}^x \text{Exp} \left[-\frac{z^2}{2\sigma_0^2\tau^{2H}} \right] dz,$$

где σ_0 – коэффициент диффузии.

ФБД с параметром $H = 0,5$ совпадает с классическим броуновским движением. Приращения ФБД называются фрактальным гауссовским шумом (ФГС), дисперсия которого подчиняется соотношению $D[X(t + \tau) - X(t)] = \sigma_0^2 \tau^{2H}$.

Существует несколько методов построения ФБД для случая дискретного времени. Эти модели имеют определенные недостатки, одним из которых является занижение (завышение) степени самоподобия процесса при малых или больших теоретических значениях параметра Херста и небольшой длине модельной реализации [13].

Одним из методов, направленных на преодоление указанных недостатков, является построение ФБД с помощью биортогональных вейвлетов [14-15]. В этом случае построение реализации ФБД осуществляется с помощью дискретного вейвлет-преобразования, где детализирующие вейвлет-коэффициенты на каждом уровне являются независимыми нормально распределенными случайными величинами, а аппроксимирующие вейвлет-коэффициенты получены с помощью фрактального процесса авторегрессии и скользящего среднего FARIMA:

$$B_H(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Phi_H(t-k) S_k^{(H)} + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2^{-jH} \Psi_H(2^j t - k) \varepsilon_{j,k} - b_0,$$

где Ψ_H – биортогональная базовая вейвлет-функция; Φ_H – соответствующая Ψ_H скейлинг-функция; $S_k^{(H)}$ – стационарный гауссовский процесс FARIMA с параметром дробного дифференцирования $d = H - 0,5$; $\varepsilon_{j,k}$ – независимые стандартные нормальные случайные величины; b_0 – константа, такая что $B_H(0) = 0$.

На рис.3 приведены реализация ФБД (вверху) и соответствующий ряд ФГШ (внизу), полученные описанным выше методом. Длина реализации равна 1024 значениям, теоретический показатель Херста $H=0.8$.

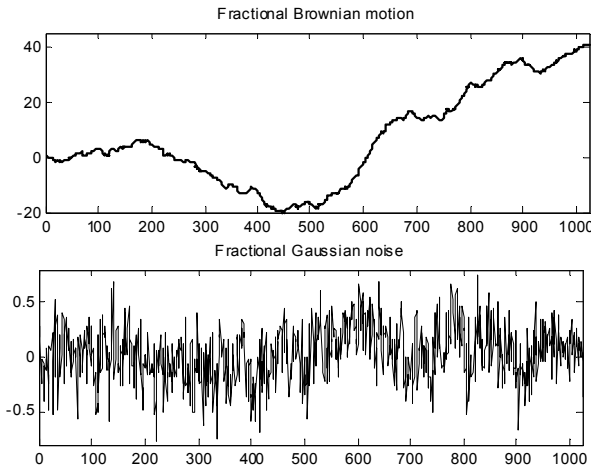


Рис.3. Реализация ФБД (вверху) и ФГШ (внизу)

5. Оценивание самоподобия временных рядов с циклическими составляющими

В работе использовались различные модельные сигналы – временные реализации, представленные суммой ФГШ с заданным показателем Херста и периодической составляющей. Суммарный сигнал $X(t)$ можно представить как

$$X(t) = P(t) + fgn(t),$$

где $P(t)$ – циклический тренд; $fgn(t)$ – фрактальный шум. Соотношение циклического тренда и модельного фрактального шума можно определить как

$$\text{Ratio} = \frac{S_{\text{trend}}}{S_{\text{noise}}},$$

где S_{trend} – среднее квадратическое отклонение тренда; S_{noise} – среднее квадратическое отклонение фрактального процесса.

Для оценивания показателя H были выбраны вейвлет-функции семейства Добеши (db2-db20), которые обладают необходимым числом нулевых моментов (соответственно 2-20). При небольших значениях отношения тренда к ФГШ ($\text{Ratio} \leq 2$) метод вейвлет-оценивания (4) позволяет получить адекватные оценки показателя Херста при использовании вейвлет-функций с большим числом нулевых моментов. На рис. 4 приведены периодическая составляющая $P(t)$, суммарный сигнал $X(t)$ и спектр вейвлет-энергии суммарного сигнала. В данном случае теоретический показатель $H=0,8$, величина $\text{Ratio} = 0.7$. Применена вейвлет-функция db20 и получена оценка показателя $\hat{H} = 0.808$.

Однако с увеличением значения Ratio и числа периодов во временной реализации требуются вейвлет-функции с все большим числом нулевых моментов, что сложно реализуемо на практике. Кроме того, использование вейвлет-функций, обладающих большим числом нулевых моментов, приводит к менее точному оцениванию показателя H [16].

В работах [11,17] предложен метод корректного оценивания параметра H , если соотношение тренда и фрактального шума является значительным, т.е. значение $Ratio=1$. В этом случае необходимо предварительно провести анализ спектра вейвлет-энергии сигнала. Если сигнал содержит значительную трендовую или циклическую составляющую, спектр вейвлет-коэффициентов демонстрирует большие значения E_k на соответствующих уровнях разложения k , и при оценивании показателя H преобладающие в сигнале трендовые составляющие подавляют все остальные. Для этого случая предложено при оценке наклона графика функции $\log_2(E_j)$ не учитывать значения трендовой составляющей E_k , тогда оценка показателя Херста будет корректной. На рис. 5 представлены модельный сигнал ($Ratio = 4$), спектр вейвлет-энергии, полученный с помощью вейвлет-функции db4, и зависимость $\log_2(E_j)$ с аппроксимирующими прямыми, построенными с учетом и без учета значений E_k при значении $k = 8$.

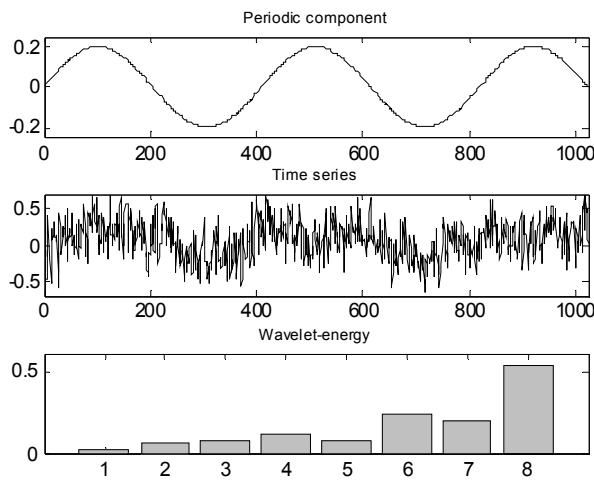


Рис. 4. Периодическая компонента, суммарный сигнал и спектр вейвлет-энергии суммарного сигнала

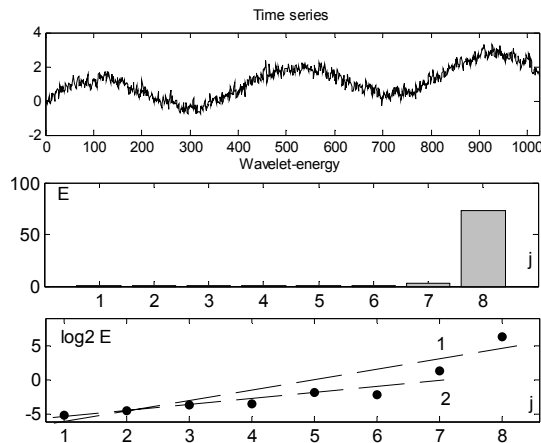


Рис. 5. Сигнал, спектр вейвлет-энергии, зависимость $\log_2(E_j)$ и аппроксимирующие прямые с учетом (1) и без учета (2) значений E_8

Однако такой подход не приемлем для временных рядов небольшой длины или в случае, когда циклические компоненты попадают сразу в несколько уровней вейвлет-разложения и удаление нескольких значений вейвлет-спектра E_k может привести к неправильному оцениванию показателя Херста. В данной работе предложен метод вейвлет-оценивания пока-

зателя Херста для временных рядов со значительными трендовыми или циклическими составляющими, основанный на использовании пакетного вейвлет-преобразования. Рассмотрим его на примере сигнала, показанного на рис. 6. В данном случае теоретический показатель Херста $H=0,8$, величина $Ratio = 3$. Спектр вейвлет-энергии получен с использованием вейвлет-функции $db10$. Непосредственное вычисление значения H приводит к некорректной завышенной оценке показателя $\hat{H} = 1.04$.

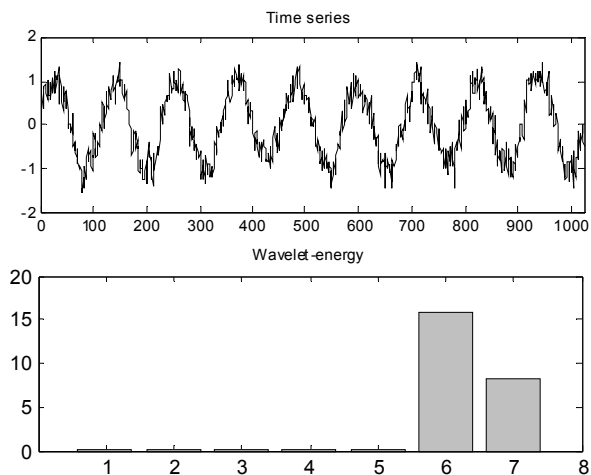


Рис. 6. Сигнал и спектр вейвлет-энергии

Очевидно, что основные циклические составляющие попадают в 6-й и 7-й уровни вейвлет-разложения. Детализируем эти уровни, применяя пакетное вейвлет-преобразование с той же вейвлет-функцией $db10$. Часть дерева пакетного вейвлет-разложения, соответствующая узлам 6-го и 7-го уровней, представлена на рис.7.

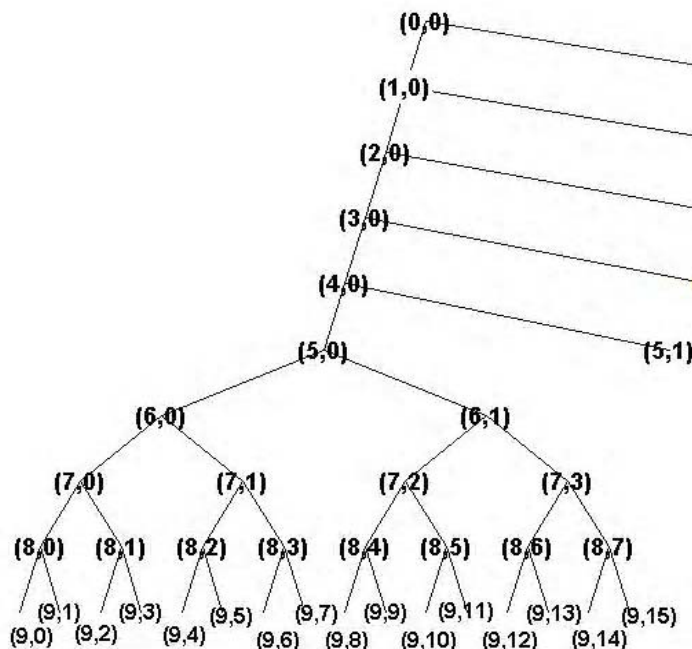


Рис.7. Дерево пакетного вейвлет-разложения сигнала, показанного на рис.6

Узел 6.1 дерева пакетного ДВП содержит набор вейвлет-коэффициентов, соответствующих частотному диапазону 6-го уровня разложения обычного ДВП. Узлы 8,4-8,7 пред-

ставляют частотные поддиапазоны с интервалом частот в четыре раза уже диапазона узла 6,1. По формуле (3) рассчитаем значения вейвлет-энергии в узлах 8,4-8,7. Среднее значение этого спектра соответствует значению вейвлет-энергии в узле 6,1, т.е. 6-му уровню разложения ДВП:

$$E_6 = \frac{1}{2}(E_{7,2} + E_{7,3}) = \frac{1}{4}(E_{8,3} + E_{8,4} + E_{8,5} + E_{8,6}).$$

Аналогичные расчеты выполнены для узла 7,1, т.е. 7-го уровня разложения ДВП. Значения спектра вейвлет-энергии представлены на рис.8. Очевидно, что основная энергия 6-го уровня сосредоточена в узлах 8,5-8,6, а энергия 7-го уровня - в узлах 9,3-9,4. Для наглядности восстановленные компоненты сигнала, которые соответствуют узлам 8,5-8,6, представлены в нижней части рис.8.

Теперь для оценивания показателя Херста в соответствии с отношением (4) в качестве пересчитанных значений энергий 6-го и 7-го уровней возьмем значения

$$E_6 = \frac{1}{2}(E_{8,3} + E_{8,4}), \quad E_7 = \frac{1}{2}(E_{9,5} + E_{9,6}).$$

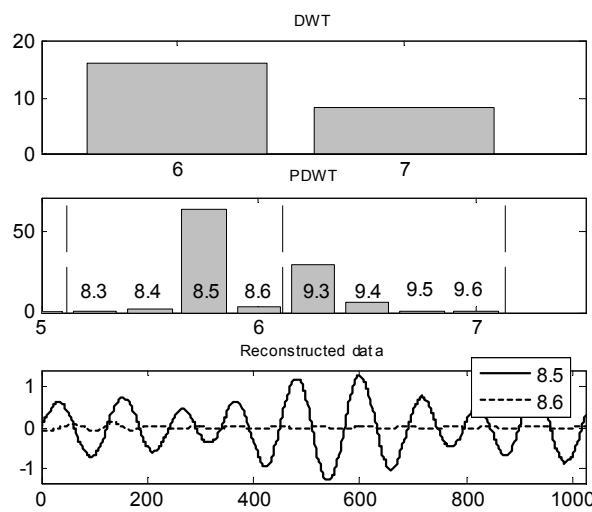


Рис.8. Часть спектра вейвлет-энергии ДВП, вейвлет-энергия узлов 6,1 и 7,1 пакетного ДВП, восстановленные сигналы узлов 8,5-8,6

На рис. 9 представлен спектр вейвлет-энергии исследуемого сигнала (см. рис. 6) с пересчитанными значениями 6-го и 7-го уровней и полученная зависимость $\log_2(E_j)$ от номера уровня разложения j . Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой позволяет оценить параметр H как $\hat{H} = 0.784$, что согласуется со статистическими характеристиками вейвлет-оценок показателя Херста по временным рядам аналогичной длины [16,17].

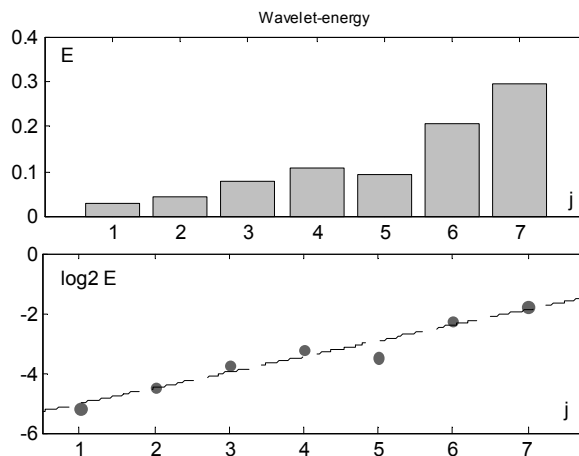


Рис. 9. Пересчитанный спектр вейвлет-энергии и соответствующая зависимость $\log_2(E_j)$

Предложенный метод можно применять к любому узлу дерева пакетного ДВП с разной степенью детализации. Таким образом можно получать вейвлет-оценки параметра Херста для самоподобных временных рядов со значительными трендовыми и циклическими составляющими, не теряя значений спектра вейвлет-энергии. Однако надо отметить, что не существует универсального подхода к определению уровня детализации пакетного вейвлет-дерева. Выбор подходящей вейвлет-функции и количества уровней разложения зависит от временных и частотных характеристик каждого анализируемого сигнала, а также от параметров циклических компонент.

Выводы

Предложен новый метод оценивания показателя Херста, основанный на использовании пакетного вейвлет-преобразования. Применение разработанного метода позволяет определять степень самоподобия для рядов небольшой длины, обладающих существенными трендовыми и циклическими компонентами.

Практическая значимость метода состоит в том, что он основан на алгоритме быстрого вейвлет-преобразования, а это позволяет с минимальными затратами времени и объема информации определять степень самоподобия сложных сигналов, что, в частности, важно для работы в режиме реального времени.

Литература: 1. *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с. 2. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с. 3. *Шелухин О. И.* Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О. И. Шелухин, А. В. Осин, С. М. Смольский. М.: Физматлит, 2008. 368 с. 4. *Шредер М.* Фракталы, хаос и степенные ряды. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 528 с. 5. *Clegg R.G.* A practical guide to measuring the Hurst parameter / R.G. Clegg // Computing science technical report. 2005. – № CS–TR–916. 6. *Kantelhardt J.W.* Fractal and Multifractal Time Series. 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/abs/0804.0747>. 7. *Малла С.* Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с. 8. *Abry P.* Scaling, Fractals and Wavelets / P. Abry, P. Goncalves, J. L. Veitch. – London: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 464 p. 9. *Abry P.* Self-similarity and long-range dependence through the wavelet lens / P. Abry, P. Flandrin, M. S. Taqqu // Theory and applications of long-range dependence. Birkhuser, 2003. P. 34–38. 10. *Abry P.* Wavelet analysis of long-range dependent traffic / P. Abry, D. Veitch // IEEE/ACM Transactions Information Theory. 1998. № 1 (44). P. 2–15. 11. *Дейнеко Ж. В.* Оценивание параметра Хёрста для временных рядов с трендом методом вейвлет-преобразования / Ж. В. Дейнеко, Л. О. Кириченко // Системи управління, навігації та зв'язку. 2010. Вип. 4 (16). С. 85–89. 12. *Смоленцев Н.К.* Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB // Н.К. Смоленцев. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с. 13. *Jeongy H.-D. J.* A Comparative Study of Generators of Synthetic Self-Similar Teletraffic / H.-D. J. Jeongy, D. McNickle, K. Pawlikowski // Department of Computer Science and Management, University of Canterbury, 1998. 14. *Abry P.* The wavelet-based synthesis for the fractional Brownian motion proposed by F. Sellan and Y. Meyer: Remarks and fast implementation / Abry P., Sellan F. // Appl. and Comp. Harmonic Anal. V. 3(4). 1996. P. 377-383. 15. *Misiti M.* Wavelet Toolbox for use with MATLAB / M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-M. Poggi // The MathWorks Inc. 941 p. 2000. 16. *Кириченко Л. О.* Оценивание самоподобия стохастического временного ряда методом вейвлет-анализа / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2009. № 4 (38). С. 99–105. 17. *Kirichenko L.* Comparative Analysis for Estimating of the Hurst Exponent for Stationary and Nonstationary Time Series / L. Kirichenko, T. Radivilova, Zh. Deineko // Information Technologies & Knowledge. 2011. Vol. 5, № 4. P. 371–388.

Поступила в редколлегию 12.03.2012

Кириченко Людмила Олеговна, канд. техн. наук, доцент каф. ПМ ХНУРЕ. Научные интересы: вейвлеты, самоподобные и мультифрактальные случайные процессы, хаотическая динамика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, ludmila@kture.kharkov.ua

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ САД-СИСТЕМ

Рассматриваются способы автоматизации САД-систем посредством интеграции систем управления данными об объекте (изделии) в системы автоматизированного проектирования. Предлагается метод интеграции электронных таблиц в САХ-системы с использованием интерактивных, двухсторонних, ассоциативных связей. Исследуются преимущества предлагаемого метода и области его применения.

1. Введение

В условиях жесткой конкуренции перед современной проектной организацией все более остро стоят задачи снижения сроков выхода готовой проектной документации, повышения качества проектной продукции, снижения её стоимости и т.д. Целесообразность комплексного подхода к решению данных задач, при котором необходимо учитывать все процессы жизненного цикла изделия, ни у кого не вызывает сомнения.

В то же время, несмотря на четко выбранное направление развития САПР, в современной терминологии все чаще можно встретить абсолютно ненаучное понятие «лоскутной автоматизации», т.е. некомплексного подхода к построению системы автоматизации, а также, вопреки, казалось бы, здравому смыслу, использование ряда несогласованного ПО [1]. Ниже рассмотрены причины, которыми обусловлена эта ситуация, и существующие пути ее разрешения. Целью данной работы является анализ способов автоматизации обработки графических показателей САД-систем для разработки метода интеграции электронных таблиц в САД-системы, позволяющего расширить функциональность САД-систем при обработке данных графических объектов.

2. Анализ существующих подходов к автоматизации управления данными САД-систем

На сегодняшний день существует ряд подходов к задаче обработки и управления данными САД-систем (англ.: *Computer-Aided Design*). Информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий (ИПИ) — русскоязычный аналог понятия CALS (англ.: *Continuous Acquisition and Life cycle Support* — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла) — современный подход к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоёмкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и современных информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия [2].

Основа технологии ИПИ — создание единого информационного пространства (ЕИП), которое в свою очередь основывается на интеграции систем управления данными об изделии – PDM (англ.: *Product Data Management*) и систем автоматизированного проектирования (САД) [3].

Существует международный стандарт, специально предназначенный для обмена данными модели изделия — STEP (англ.: *STandard for Exchange of Product model data*). Он позволяет описать весь жизненный цикл изделия, включая технологию изготовления и контроль качества продукции [4].

Разработчики САХ, PDM систем предлагают комплексные решения по внедрению ИПИ, основанные на связи конкретных программных продуктов. При этом модели взаимодействия данных систем могут быть различными в зависимости от используемого ПО, глубины автоматизации процессов, а также выбора общих подходов к решению данной задачи. Количество различных схем, иллюстрирующих возможные типы организации ИПИ, настолько обширно, что на сегодняшний день можно говорить не об общей модели или методе построения ЕИП, а скорее о различных представлениях по данному вопросу.

При подробном рассмотрении можно смело говорить о ряде существующих проблем, характерных для большинства современных стратегий:

1) Отсутствие гибкости/универсальности. При разработке ИПИ необходимо учитывать довольно большой ряд ограничений и стандартов оформления конструкторской документации (например, ЕСКД, СПДС и др.), необходимо принимать во внимание требования системы качества и, несомненно, учитывать специфику конкретной отрасли/предприятия. В итоге ряд международных систем не соответствует требованиям нашего рынка и при этом не обладает механизмами адаптации.

2) Закрытый исходный код. Большинство продуктов данной области коммерческое. Это приводит к ряду проблем, одной из них является сложность или невозможность внесения изменений не только в исходный код, но и в ряд текущих документов или отчетов.

3) Сложность систем. Требования универсальности, производительности, высокой эффективности влекут за собой неизменно высокую сложность общей модели, а также её внедрения, что, в свою очередь, требует наличия высокоспециализированного персонала.

4) Высокая стоимость. Наличие средств автоматизации управления данными проектов более характерно для старшего ряда САД и предполагает использование PDM, в то время как подавляющее большинство отечественных проектных предприятий применяет дешевые аналоги САД, для которых характерны минимальные наборы функций автоматизации. Высокая стоимость современных технологий на сегодняшний день является одной из основных проблем для отечественной промышленности на пути к автоматизации.

В условиях ограниченных возможностей построения полноценных комплексных решений в настоящее время предприятия применяют различные альтернативные решения. Используются возможности интерфейсов современных программных комплексов разработки проектной продукции, которые зачастую обладают первичными средствами обработки данных. Разработано большое количество надстроек для решения узкоспециализированных задач обработки данных. Существует ряд применений интеграции электронных таблиц и САД-систем. Например, создание спецификаций в системе Solidworks может выполняться при помощи Microsoft Excel. Также большое количество продуктов позволяет создавать двухстороннюю ассоциативную связь между таблицами САД-систем и аналогичными таблицами в программах электронных таблиц, позволяющих управлять параметрами определенных групп графических объектов.

В публикациях Д. Эспинозы-Алагуара [5] по интеграции систем AutoCAD, Microsoft Excel и Microsoft Access описывается технология интеграции, организованная с применением VBA, которая позволяет гибко управлять данными САД-систем. Автор, в свою очередь, говорит о ряде преимуществ и приводит примеры, иллюстрирующие возможности данной интеграции. Эта технология во многом созвучна с предлагаемым подходом, описанным ниже.

Тем не менее, стоит заметить, что основная идея использования электронных таблиц для большинства предложенных вариантов ограничивается автоматизацией процессов обработки текстовой информации чертежа и частично управлением атрибутами блоков или свойствами объектов, что, очевидно, не может обеспечить комплексный подход к стратегии организации и применения подобных способов автоматизации. Большинство продуктов автоматизировано для решения конкретных задач (использует готовые формы заполнения) и ориентировано на применение с конкретными версиями ПО, что приводит к потере свойства универсальности и гибкости.

3. Предлагаемый метод интеграции табличных процессоров в САД-системы

Предлагается интегрировать табличный процессор в САД-систему. При этом обеспечивается возможность создавать (или разрывать) двухстороннюю ассоциативную связь между свойствами объектов САД-систем и данными электронных таблиц. Эти связи устанавливаются пользователем в интерактивном режиме, что дает возможность, в первую очередь, учитывать отчасти творческий характер ряда задач, связанных с принятием проектных решений, не имеющих в большинстве своем формальных способов решения, а также позволяет добиться получения связи всех необходимых параметров различных объектов с различными областями данных в электронных таблицах.

Основной идеей описываемого подхода является паритетное использование CAD-систем и электронных таблиц. Таким образом, пользователь CAD-систем (вне зависимости от её базовых возможностей) получает функциональность систем электронных таблиц для работы с табличными, текстовыми данными, свойствами графических объектов и пр. Также данный подход дает возможность пользователям CAD-систем получить гибкость и производительность электронных таблиц, что, в свою очередь, способствует решению ряда перечисленных выше проблем автоматизации обработки данных.

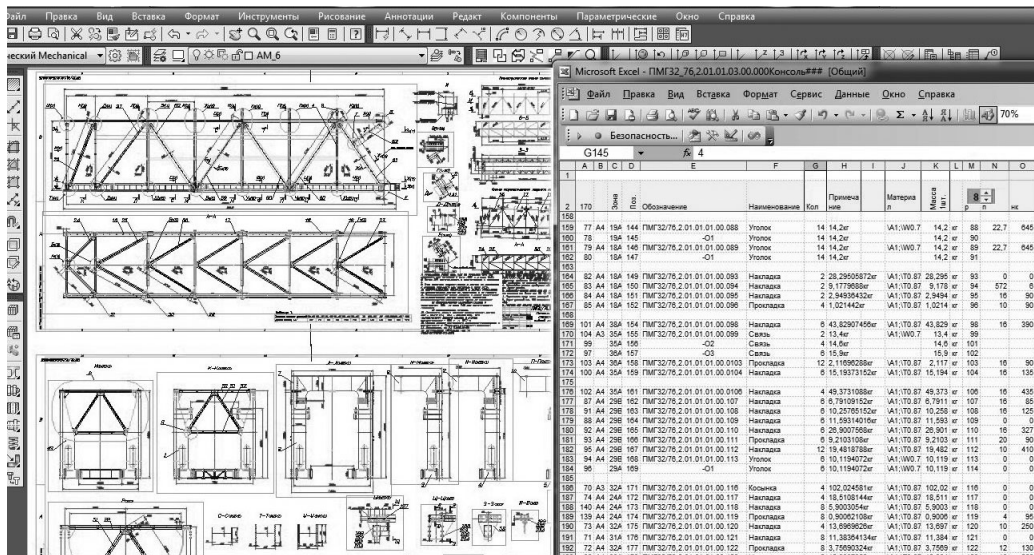


Рис. 1. Представление объекта в CAD и его соответствие в табличном процессоре

На рис. 1 изображен чертеж погрузочной машины на листе AutoCAD и связанный с ним по изложенному выше принципу лист Excel, содержащий информацию о позициях чертежа, их наименованиях, материале, массе и т.д. Построение графических объектов конструктор выполняет в среде CAD-системы, а обработку данных графических объектов (параметров, атрибутов блоков и т.д.), очевидно, эффективно проводить в среде табличного процессора, пользуясь более мощными средствами обработки данных с уже привычным интерфейсом. При этом все внесенные изменения, проведенные вычисления соответствующим образом (описанным при создании связей) отображаются на чертеже.

Можно говорить о целом ряде преимуществ, получаемых в результате применения данного подхода:

1) Интерфейс/Наглядное представление. Интерфейс электронных таблиц специализирован для работы с табличными данными. Структурированное представление данных позволяет пользователю легче и быстрее ориентироваться в массивах табличной информации. Привычный интерфейс для большинства пользователей дает возможность самостоятельной обработки данных. Наличие двухсторонней ассоциативной связи CAD-систем и электронных таблиц позволяет пользователю независимо работать с графическими объектами или табличными данными, выбирая по необходимости более удобную среду, не беспокоясь о соответствии данных.

2) Обработка данных. Мощные инструменты и методы анализа табличных данных, встроенные в электронные таблицы, позволяют более эффективно их обрабатывать (сортировать, выполнять запросы, использовать формулы, строить графики и пр.) Таким образом, пользователю не требуются навыки программирования для построения достаточно сложных связей, расчетов, запросов и т.д. В таком случае можно предположить возможность более индивидуальной (глубокой) автоматизации каждого рабочего места в зависимости от потребностей пользователя.

3) Внешние данные. Электронные таблицы позволяют подготавливать и публиковать данные во внешние системы, например расчетные программы, оборудование с ЧПУ, базы данных и пр.

4) Широкий спектр ПО. К важным достоинствам предложенного подхода можно также отнести универсальность среды использования, так как речь идет не о связи конкретных электронных таблиц и CAD-систем, а о возможности интеграции любых подобных систем с открытой объектной средой.

4. Построение графических объектов по данным из электронных таблиц

Кроме управления текстовой информацией на поле чертежа, к типам задач, решаемых при помощи рассматриваемого подхода, можно отнести построение графических объектов по данным, содержащимся в электронных таблицах, а также построение модульных или сложных типовых элементов с набором различных параметров, указанных в таблицах.

Наглядной иллюстрацией применения данного подхода является программная реализация автоматизации построения оптоволоконных схем, где существенная часть проектной продукции представляет собой связки типовых объектов, которые легко поддаются параметризации. Для каждого вида объектов были описаны принципы их формирования. Далее проектировщик заполняет таблицу по заданному стандарту, а программа автоматически выполняет чертеж. Например, на рис. 2, в отоброжен чертеж распределительной муфты, выполненный автоматически программой в среде BricsCad по данным из рис. 2, б в соответствии с заданными принципами формирования объекта (рис. 2, а).

Таким образом, возможные области применения существенно расширяются. Среда электронной таблицы выступает в роли первичного средства разработчика в процессе построения чертежа. При этом существенно сокращается время, затрачиваемое на построение чертежа, сокращается количество ошибок и время на их устранение, появляется возможность параметризовать отдельные характеристики объектов средствами табличного процессора, не прибегая к программированию, использовать внешние данные и т.д. Однако применение такого подхода более узко специализировано и требует написания дополнительных процедур.

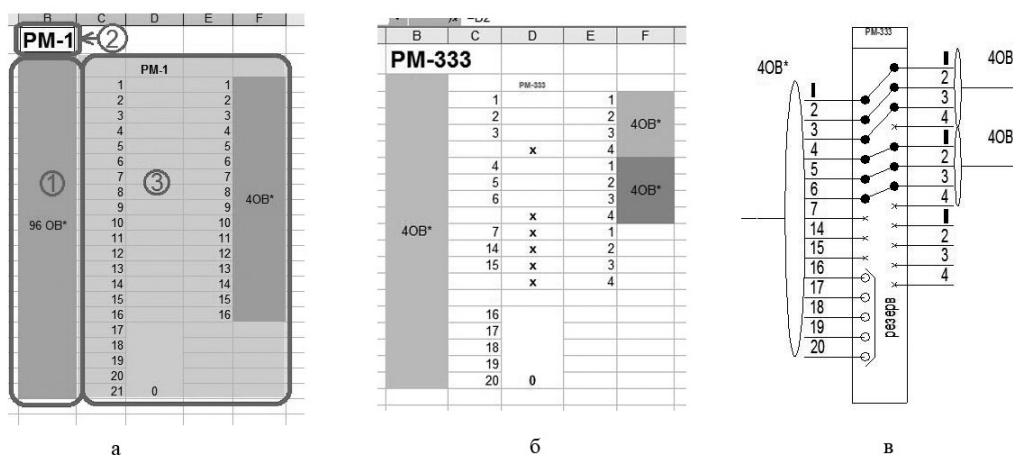


Рис. 2. Принципы построения графического объекта по табличным данным

Интеграция электронных таблиц в CAD-системы позволяет пользователю самостоятельно строить связи для своих моделей отношений графических и табличных объектов, что, в свою очередь, позволяет существенно расширить функциональность системы и возможности автоматизации процессов проектирования в целом. При этом стоит говорить о векторе автоматизации в рамках рабочей группы, предприятия и, в итоге, об обобщенных моделях и методах автоматизации. Гибкость на местах может привести к разобщенной автоматизации в целом и несовместимости получаемых результатов. Поэтому существенное преимущество данного подхода — его гибкость является, по существу, основной проблемной частью. Таким образом, одной из важных задач, кроме непосредственно построения принципов данной технологии, является построение моделей работы по данной технологии.

5. Области применения предлагаемого метода

Одним из очевидных применений для предложенного подхода является оформление конструкторской документации, создание спецификаций. На базе проектного института с учетом «Укркранэнерго» был создан и внедрен опытный образец системы «Спецификатор», реализующий принципы описанной интеграции (COM (англ.: *Component Object Model* — объектная модель компонентов [6]) система построена на базе интеграции AutoCAD и Microsoft Excel). Основной ее задачей являлось построение спецификаций. Однако в процессе опытной эксплуатации, кроме успешного решения центральной задачи, были выявлены существенные преимущества системы, связанные с возможностью управления различными данными чертежа и в целом с использованием возможностей Excel в среде AutoCAD.

Дальнейшее развитие подхода при проектировании показало целесообразность построения этой интеграции для решения задач управления данными. На сегодняшний день создан ряд программных реализаций с использованием описанной технологии. Проводилось успешное тестирование интеграции ПО AutoCAD и Microsoft Excel, Bricscad и Excel, а также Bricscad и OpenOffice. Таким образом, показана возможность описанной интеграции для большинства CAD-систем с открытой объектной средой.

6. Выводы

За последние годы различные разработчики CAD-систем пришли ко множеству общих решений, которые впоследствии стали стандартами работы. Для большинства систем наличие пространства модели и пространства листа уже стало естественным подходом, обусловленным потребностями пользователей. По нашему мнению актуально расположить в одном ряду с пространством модели и пространством листа пространство данных, использующее функционал табличного процессора. Являясь логическим продолжением нашего метода, такая модернизация позволит существенно расширить возможности CAD-систем, избежав проблем, связанных с адаптацией разнородных систем. Такой подход может быть обусловлен общей тенденцией нового уровня автоматизации работы с данными CAD-систем, которую демонстрируют современные подходы: построение ИПИ, организация ЕИП, PDM/PLM и пр.

Технология применения электронных таблиц в управлении данными CAD-систем имеет ряд очевидных преимуществ. Наряду с техническими преимуществами описанного подхода, одним из основополагающих достоинств является возможность автоматизации младших (дешевых) представителей CAD-систем, что, очевидно, должно явиться предпосылкой для развития данной стратегии. Тем не менее, для успешной реализации этой технологии или даже для частичной (лоскутной) автоматизации любых процессов проектирования на её основе необходимо построение полноценной модели автоматизации, общей стратегии развития и стандартов применения. Также следует понимать, что в целях масштабирования задач управления данными CAD-систем для получения более эффективных результатов необходимо применение современных технологий управления базами данных и использование web-интерфейса [7], что, в свою очередь, выдвигает ряд новых требований к построению систем автоматизации.

Список литературы: 1. Чурсина М. Лоскутное одеяло машиностроителей не согреет // Уральский рынок металлов. 2004. №9. С. 24. 2. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия // СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург. 2010. 3. Голицына Т. Д. Проблемы интеграции PDM- и CAD-систем. Унифицированный подход // Исследования в области информационных технологий. Труды молодых ученых: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. Вып. 39. С. 164-168. 4. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с. 5. Espinosa-Aguilar D. Integrating Microsoft Excel and Access with AutoCAD VBA // <http://www.lukewarmcoffee.com/cad/AUGI%20-%20Fundamentals%20of%20AutoLISP.pdf>. 6. Панаас К., Мюппей У. Эффективная работа: Visual C++.NET. // BHV Питер, 2002. 816 с. 7. Ткачук Н.В., Кужленко Д.В. Применение концепции SCADA-систем для интеллектуального реинжиниринга данных в АСУ ТП // АСУ и приборы автоматизации. 2002. Вып. 121. С. 129-136.

Поступила в редколлегию 17.03.2012

Шаргород Алексей Юрьевич, аспирант (без отрыва от производства) лаб. МКМ ХНУРЭ, начальник БКТ ПАО «НПТИ «Укркранэнерго». Научные интересы: комплексная автоматизация процессов проектирования. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-09-69, 050-651-60-11.

Ложкин Геннадий Владимирович, начальник конструкторского отдела ВАТ «Регион». Научные интересы: автоматизация процессов проектирования, программирование CAD-систем. Адрес: Украина, 61100, Харьковский р-н, пос. Песочин, ул. Квартальная, 14, 13, тел. 742-25-44.

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕСТИРОВАНИЯ И РЕМОНТА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛАХ

Описываются перспективы развития квантовых вычислений в ближайшем будущем, определяющие направления дальнейшего совершенствования технологий проектирования, валидации и обеспечения качества (quality assurance) систем на кристаллах и в пакетах кристаллов.

Последние исследования в области квантовых вычислений [1-33] говорят о том, что уже в ближайшем будущем квантовый компьютер позволит решать задачи криптографии, быстрого поиска в базах данных, моделирования физических процессов на микроуровне, создания искусственного интеллекта и квантовых информационных технологий, реализации квантовой телепортации и квантовой криптографической связи.

Цель исследования – аналитический обзор квантовых технологий тестирования, ремонта и диагностирования цифровых систем на кристаллах при их проектировании и верификации, ориентированный на существенное увеличение выхода годной продукции и уменьшение времени ее выхода на рынок микроэлектроники. Для достижения цели необходимо решить задачи, связанные с обзором квантовых вычислений, кубитных моделей и структур данных.

Научные источники: квантовые вычисления [1-13]; применение квантовых вычислений к решению задач синтеза логических схем, тестирования и диагностики [11-33]; квантовые вентили [4, 13, 31]; неисправности квантовых логических схем [14, 18, 32]; технологии выявления дефектов [14, 16, 17].

1. Квантовые вычисления

Квантовые вычисления (quantum computing) являются быстро развивающейся областью исследований в последнее десятилетие [1-13], через 80 лет после создания Максом Планком в 1900 году квантовой механики.

Квантовый компьютер – это вычислительное устройство, использующее при работе квантовомеханические явления: суперпозицию состояний (superposition), квантовую запутанность (entanglement), интерференцию (interference), параллелизм (parallelism) и обратимость вычислений (reversible computation) [4], что позволяет преодолеть ограничения по быстрдействию классических компьютеров.

В классических электронных цифровых вычислительных машинах единицей информации является бит, который может принимать одно из двух возможных значений 0 или 1 и определяется как различимое различие (a difference that makes a difference) [12]:

$$\text{one bit} \in \{0,1\}. \quad (1)$$

Следовательно, информация основывается на различиях, отличительных признаках и возможности распознавания (различительной способности).

Единицей информации квантовой системы является квантовый бит, или кубит [4], который соответствует состояниям $|\psi\rangle$ квантовой сущности, пространство состояний которой представляет собой комплексное двумерное векторное пространство $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^2$. Таким образом, кубит определяется следующим бесконечным количеством классической информации:

$$\text{one qubit} = |\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \in \mathbb{C}^2, \quad (2)$$

где $|0\rangle, |1\rangle \in \mathbb{C}^2$ обозначают ортонормальный базис; комплексные числа $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ удовлетворяют выражению

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (3)$$

Однако поскольку состояния $|\psi\rangle$ и $e^{i\eta}|\psi\rangle$ для всех $\eta \in [0, 2\pi]$ эквивалентны с квантово-механической точки зрения, то α, β обладают вместе только двумя степенями свободы. Так, мы можем принять:

$$\alpha = \cos \theta; \beta = e^{i\eta} \sin \theta; \eta, \theta \in [0, 2\pi]. \quad (4)$$

Таким образом, по сравнению с классическим битом (1) кубит (2) - (4) обладает более широкими возможностями и позволяет хранить в одном кубите фактически бесконечный в обе стороны классический информационный контент, в то время как один бит может содержать минимальный неочевидный конечный информационный контент.

Здесь проявляется одно из странных квантовых явлений, которое является предметом знаменитой загадки «кошки Шредингера». С одной стороны, квантовый компьютер может эффективно обрабатывать бесконечную в обе стороны информацию, которая находится в кубите, благодаря таким квантовым явлениям, как суперпозиция, параллелизм, интерференция, запутанность. Но при этом обработка одного кубита осуществляется с помощью простой базовой операции, так же как и обработка классического бита в обычной электронной цифровой вычислительной машине.

С другой стороны, для формирования информационного содержания кубита необходимо выполнить измерения в соответствующей квантовой системе. В общем случае это приводит к разрушению (свертыванию) соответствующей волновой функции, которая определяет состояние $|\psi\rangle$ кубита (2). Таким образом, классическая информация, которую можно получить, находится только в одном обычном бите. Например, данные о том, что соответствующая квантовая система находится в состоянии $|0\rangle$ или $|1\rangle$, причем каждое из двух состояний появляется с соответствующей вероятностью

$$|\alpha|^2, |\beta|^2. \quad (5)$$

Важно отметить, что, несмотря на появление вероятностей (5), в случае с кубитами (2)-(5) рассматривается не классическая вероятностная система, которая имеет два состояния А и В, появляющиеся с соответствующими вероятностями р и q. Классическая вероятностная система всегда находится в одном и только в одном из состояний А или В. Вероятностный аспект проявляется только в том, что мы не знаем, в каком именно из этих двух состояний она будет находиться. Типичным примером такой классической вероятностной системы является бросание монеты.

В общем случае с кубитом (2) - (5) квантовая система не находится ни в одном из возможных состояний $|0\rangle$ или $|1\rangle$, а одновременно находится в обоих состояниях $|0\rangle$ и $|1\rangle$ (суперпозиция двух состояний). Благодаря этому квантовый компьютер может легко и просто управлять кубитами, которые несут бесконечную в обе стороны классическую информацию.

При классической обработке информации можно получить только один единственный бит, и в общем случае сделать это можно только с определенной вероятностью.

Различия между квантовыми компьютерами и обычными электронными цифровыми машинами становятся еще более явными, когда необходимо обрабатывать любое конечное число $n \geq 1$ кубитов. Число n можно определить также как количество классических битов, необходимых для получения одного целого $1 \leq m \leq 2^n$. Благодаря квантовой суперпозиции, определение n кубитов дает возможность получить одновременно не менее чем 2^n целых чисел (в действительности значительно больше). Этот факт дает представление об удивительных возможностях квантовых компьютеров.

Однако необходимо подчеркнуть, что квантовые компьютеры имеют не только достоинства, но и недостатки. В обычной электронной цифровой вычислительной машине при считывании числа m не требуется никаких дополнительных операций над n битами, которые определяют его однозначно. В квантовом компьютере при считывании контента из n кубитов, находящихся в суперпозиции, работают аксиомы о квантовом измерении, и происходит изменение нескольких соответствующих кубитов путем свертки.

1.1. Простые квантовые вентили

По аналогии с обычным электронным цифровым компьютером, вентиль квантовой вычислительной системы может обрабатывать один или несколько кубитов [4,13]. Квантовая система имеет входные и выходные состояния, определяемые (задаваемые) одним или несколькими кубитами. Система преобразует их в соответствии с аксиомами квантовой механики. Состояния квантовой системы преобразуются с помощью унитарных, обратимых (инвертирующихся) операторов. Следовательно, квантовые вентили должны иметь одинаковое количество входных и выходных кубитов.

Простой квантовый вентиль A , преобразующий один входной кубит в один выходной кубит, представлен на рис. 1.



Рис. 1 Квантовый вентиль

Здесь предполагается, что в квантовом вентиле поток информации направлен слева направо, поэтому стрелки на рис. 1 не показаны. Данное упрощение графического представления квантового вентиля стало возможным благодаря тому факту, что квантовые вентили преобразуют кубиты с помощью унитарных обратимых операторов. В этом случае графическое представление логических вентилях, преобразующих классические биты в электронном цифровом компьютере, не является удобным для квантовых вентилях.

На рис. 1 $|\psi\rangle, |\chi\rangle \in \mathbb{C}^2$ – кубиты; $A: \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}^2$ – унитарный линейный обратимый оператор. Удобно использовать матричное представление квантовых вентилях:

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix},$$

где для кубитов $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, |\chi\rangle = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle$, для которых $A|\psi\rangle = |\chi\rangle$, справедливо:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Пример квантового вентиля NOT, задаваемого унитарной матрицей:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Нетрудно заметить, что в этом случае выражение (6) преобразуется к виду:

$$X(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle.$$

Другими словами, вентиль NOT представляет собой переключатель между состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$.

Другой пример квантовых вентилях, описываемых унитарными матрицами:

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

которые действуют на данный кубит в соответствии с выражениями:

$$Y(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = -i(-\beta|0\rangle + \alpha|1\rangle), Z(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle.$$

X, Y и Z называют матрицами Паули.

Вентиль Адамара осуществляет самообратимую операцию формирования суперпозиции состояний и определяется унитарной матрицей [4,13]:

$$H = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Справедливо следующее выражение $X^2 = Y^2 = Z^2 = H^2 = I$, которое означает, что каждый вентиль X, Y, Z и H определяется с помощью корня квадратного единичной матрицы и соответствующего квантового вентиля I .

1.2. Многокубитные квантовые вентили

В многокубитном вентиле должно быть одинаковое количество кубитов на входе и выходе [4].

Двухкубитные вентили соответствуют операциям поворота в гильбертовом пространстве двух взаимодействующих кубитов, которые не могут быть представлены в виде прямого произведения независимых однокубитовых операций [13].

Основным двухкубитовым вентилем является обратимый контролируемый инвертор или оператор «контролируемое НЕ» (CNOT) с двумя входными и двумя выходными кубитами (рис. 2), который функционирует в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} |00\rangle &\mapsto |00\rangle, & |01\rangle &\mapsto |01\rangle, \\ |10\rangle &\mapsto |11\rangle, & |11\rangle &\mapsto |10\rangle. \end{aligned}$$

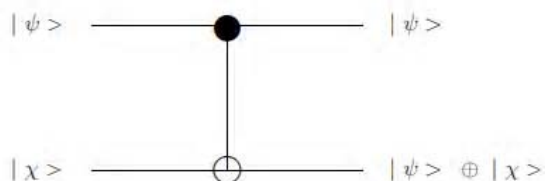


Рис. 2. Контролируемое НЕ

Когда $|\psi\rangle = |0\rangle$, то $|\psi\rangle \oplus |\chi\rangle = |\chi\rangle$; для $|\psi\rangle = |1\rangle$ справедливо $|\psi\rangle \oplus |\chi\rangle = X|\chi\rangle$. Вентиль CNOT описывается матрицей:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \delta \\ \gamma \end{pmatrix},$$

где $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\chi\rangle = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle$.

Кубит $|\psi\rangle$ является контролирующим, кубит $|\chi\rangle$ – контролируемым, над которым производится операция NOT при условии, что первый кубит находится в состоянии $|1\rangle$.

Двухкубитовый оператор обмена состояниями кубитов SWAP может быть реализован путем последовательного выполнения трех операций CNOT (рис. 3) [13] и описывается матрицей:

$$\text{SWAP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

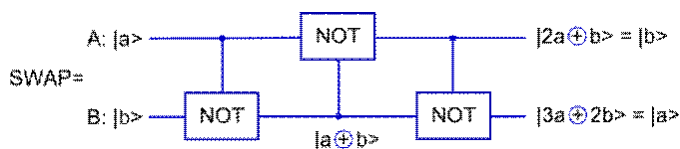


Рис. 3. Оператор SWAP

Трехкубитовый вентиль Тоффли (CCNOT) представлен на рис. 4 и содержит два управляющих кубита А и В, а также один управляемый С.

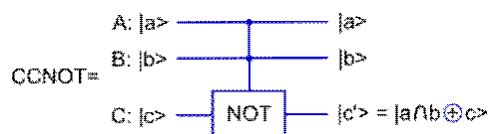


Рис. 4. Вентиль Тоффли

Вентиль Тоффоли описывается матрицей 8×8 в базисных состояниях $|0,0,0\rangle, |0,0,1\rangle, |0,1,0\rangle, |1,0,0\rangle, |0,1,1\rangle, |1,0,1\rangle, |1,1,0\rangle, |1,1,1\rangle$:

$$CCNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Данная операция может быть также реализована в виде пяти двухкубитовых операций. N -битный обобщенный вентиль Тоффоли описывается как $(k_1, k_2, \dots, k_n) \rightarrow (k_1, k_2, \dots, (k_1, k_2, \dots, k_{n-1}) \oplus k_n)$ [18]. Вентиль NOT является частным случаем вентиля Тоффоли, для которого $n = 1$, вентиль CNOT – частным случаем, когда $n = 2$.

Расширенный $n+1$ -битный вентиль Тоффоли (extended Toffoli gate, ETG) с двумя управляемыми линиями (o_n, o_{n+1}) показан на рис. 5. ETG имеет входной вектор $(k_1, k_2, \dots, k_n, k_{n+1})$ и выходной вектор $(o_1, o_2, \dots, o_n, o_{n+1})$, где $o_j = k_j$ для $j = \overline{1, (n-1)}$, $o_n = k_1, k_2, \dots, k_{n-1} \oplus k_n$, $o_{n+1} = k_1, k_2, \dots, k_{n-1} \oplus k_{n+1}$. Первые $n-1$ битов являются управляемыми, последние два бита – управляемыми.

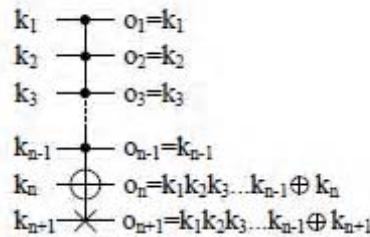


Рис. 5. $n+1$ -битный вентиль Тоффоли

2. Применение квантовых вычислений к решению задач тестирования и диагностики

2.1. Методы синтеза обратимых логических схем

Существует множество методов синтеза обратимых логических схем, среди которых метод преобразований, использование выражений Риды-Мюллера положительной полярности (positive polarity Reed-Muller expressions, PPRM), нормальной дизъюнктивной формы (exclusive-or sum-of-products, ESOP) и методов принятия решений [18-27].

Один из подходов заключается в представлении реализуемого теста (benchmark) в формате ESOP, в котором традиционный оператор ИЛИ (OR) заменяется исключаящим ИЛИ (EXOR).

Метод преобразований предполагает анализ таблицы истинности обратимой функции и выявление преобразований, соответствующих поведению обратимого вентиля, которые могут быть применены к таблице истинности в целях преобразования входных наборов в соответствии с выходными наборами. Применение этих преобразований может быть реализовано в виде каскада вентилях. Если преобразования ограничены только Тоффоли вентилями, результирующий каскад также будет состоять только из Тоффоли вентилях.

Методология онлайн построения тестопригодных обратимых схем основана на трех обратимых вентилях R1, R2 и R [18]. Каждый вентиль имеет по 4 входа и 4 выхода, как R1 (рис. 6, а), и предназначен для реализации операций NAND, OR, EXOR и XNOR путем подачи различных значений на входы. Вентиль R1 имеет выход контроля четности (parity output) q . R2 (рис. 6, б), передает входные сигналы на выходы, вычисляя значение s . Для построения тестопригодного блока (ТВ) вентиля R1 и R2 соединяются в виде каскада

путем подключения первых трех выходов R1 к первым трем входам R2. При этом создается тестопригодный блок с двумя выходами контроля четности, значения на которых можно сравнивать для выявления ошибки.

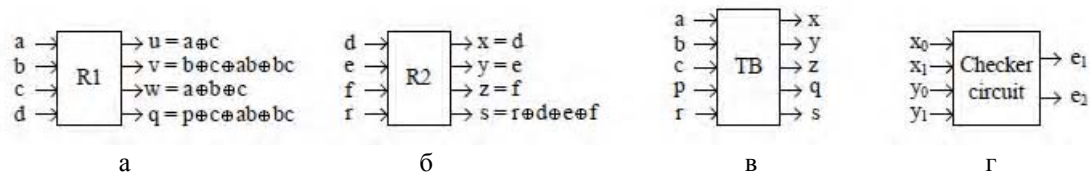


Рис. 6. Вентили R1 (а), R2 (б), тестопригодный блок (в) и две пары двухканальных проверочных схем (г)

На рис. 6, в показана структурная схема тестопригодного блока ТВ, который используется для реализации обратимых схем. Так как каждый ТВ генерирует два выхода проверки четности, две пары проверочных схем необходимы для их тестирования. Проверочная схема (рис. 2, г) построена с использованием восьми R вентилях. Если схема содержит более двух тестопригодных блоков, необходим каскад проверочных схем.

Тестопригодная схема для функции $f = ab + \bar{c}$ приведена на рис. 7.

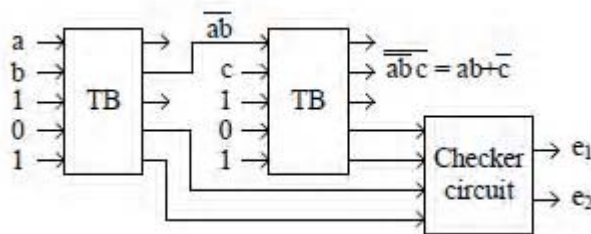


Рис. 7. Тестопригодная схема для функции $f = ab + \bar{c}$

Первый ТВ реализует операцию \overline{ab} , результат которой затем подается на вход c второго ТВ, формирующего на выходе результат: $f = \overline{\overline{abc}} = ab + \bar{c}$. Два выхода контроля четности каждого ТВ подключены к проверочной схеме, анализ выходов которой позволяет обнаружить неисправность. Недостатком метода является возможность обнаружения не всех одиночных ошибок. Если неисправность находится между двумя ТВ, она не может быть обнаружена. Блоки ТВ генерируют значение выходов проверки четности, которые тестируются с помощью проверочной схемы, обнаруживающей неисправности только в ТВ. Появление любой неисправности за пределами ТВ остается незамеченным.

Модификация описанного метода [18] предполагает замену каждого вентиля схемы тестопригодным блоком, который генерирует два значения контроля четности, и использование улучшенной проверочной схемы. Однако неисправность соединений двух блоков при этом также не обнаруживается. Другой подход использует набор из 4×4 двухканальных обратимых вентилях для обнаружения неисправностей онлайн. Каждый двухканальный вентиль имеет две пары входов. Два входа каждой пары представлены в форме dual rail и являются дополнением друг к другу (01 или 10). Если на выходах появляются dual rail значения, то это свидетельствует об отсутствии ошибки. Однако наличие на выходах значений 11 или 00 говорит об одиночной ошибке. Для генерации тестопригодных схем двухканальные вентили объединяются в каскады, а неисправность транспортируется на выход схемы. Ошибка обнаруживается путем проверки выходов. Тестирование промежуточных вентилях при этом не требуется.

В работе [18] предложен подход, ориентированный на схемы, состоящие только из вентилях Тоффоли. Для создания тестопригодной схемы в нее добавляется несколько CNOT вентилях и линия четности L, которая инициализируется значением 0. Предполагается, что схема имеет p входов, p выходов и соответственно p линий. CNOT вентиль добавляется на все линии до L в начало схемы (рис. 8). Затем каждый n-битный вентиль Тоффоли заменяется (n + 1)-битным ETG. Соединения первых n бит ETG остаются такими

же, как в n -битном вентиле Тоффли. Последние биты ETG подключаются к линии L . Вентили NOT, находящиеся на линиях, сохраняются. Если количество вентилях NOT в схеме нечетное, дополнительный вентиль NOT добавляется в конец линии L , в противном случае никаких дополнительных вентилях NOT не добавляется. Вентили CNOT добавляются на все линии до L в конец схемы.

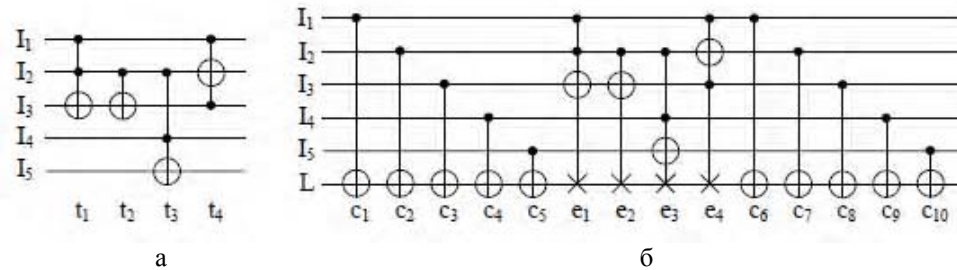


Рис. 8. Схема Тоффли (а) и тестопригодная схема (б)

Описанный подход требует в общей сложности дополнительно $2p$ вентилях CNOT и не более одного дополнительного вентиля NOT для построения онлайн тестопригодной схемы. Если одна ошибка обнаружена в любой линии (в том числе L), значение L меняется с 0 на 1. Если ошибок нет, значение L остается 0. Таким образом, ошибка обнаруживается путем проверки одного бита L в конце схемы. Метод работает также для любых схем, состоящих из вентилях Тоффли с инвертированным управлением.

Методы маскирования неисправностей мажоритарных обратимых схем представлены в работе [19]. Нефункциональные выходы схем используются для диагностирования неисправностей, в то время как неисправность маскируется на функциональном выходе. Множество обратимых модулей позволяет обеспечить регулируемую глубину диагностирования. При этом уменьшается сложность формирования теста и обеспечивается возможность восстановления работоспособности устройства. Основным преимуществом предложенного метода является устойчивость к одиночному отказу и возможность обнаружения неисправностей типа «пропущенный вентиль» (Missing Gate Fault, MGF) и «повторяющийся вентиль» (Repeated Gate Fault, RGF).

Логические модели неисправностей, основанные на концепции пропущенного и повторяющегося вентиля, ориентированы на логический уровень и являются более предпочтительными для обратимой логики по сравнению с традиционными СБИС (VLSI) моделями неисправностей (например, одиночными константными неисправностями). Эти модели называются одиночный пропущенный вентиль (Single Missing Gate Fault, SMGF), многократно пропущенный вентиль (Multiple Missing Gate Fault, MMGF), частично пропущенный вентиль (Partial Missing Gate Fault, PMGF) и повторно пропущенный вентиль (Repeated Gate Fault, RGF). SMGF представляет собой модель, когда обратимый вентиль полностью удален из схемы. MMGF предполагает более одного последовательно расположенного вентиля, удаленного из схемы полностью. RGF означает, что вентиль заменен двумя последовательными копиями. PMGF описывает неисправность, когда часть вентиля была удалена.

В статье [19] рассматриваются две различные реализации мажоритарных схем с тремя выбираемыми выходами. Эти модули обеспечивают маскирование и диагностирование неисправностей в рамках тройной модульной избыточности (Triplicated Modular Redundancy, TMR), схема которой показана на рис. 9.

Устройство состоит из трех входов данных (I_1, I_2, I_3), и двух управляющих линий на входах модуля (C_1, C_2), генерирует значения на трех выходах данных O_1, O_2, O_3 и двух неиспользуемых выходах (D_1, D_2). Выбор осуществляется на входах данных и результат формируется на выходах данных. Мажоритарная схема формирует все 0 или все 1 на трех выходах данных. Другими словами, два сочетания из восьми возможных перестановок значений на выходах используются в процессе реализации. С другой стороны, обратимость требует однозначного соответствия между перестановками на входах и выходах. Таким образом, по крайней мере, два неиспользуемых выхода необходимы для сохранения обратимости. Так как в обратимой схеме разветвление соединений невозможно, в предложенной схеме имеется три копии выбираемых выходов для эффективной реализации распределенных TMR архитектур. Кроме того, тройные выходы могут быть реализованы таким образом, что исключают проблему появления одиночной неисправности.

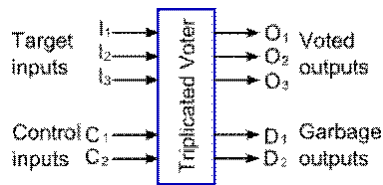


Рис. 9. Обратимая мажоритарная схема с тремя выбираемыми выходами

Минимальная тройная мажоритарная схема (Minimal Triplicated Voter, MTV) показана на рис. 10. Основной целью ее реализации является использование минимального количества этапов. Приведенная реализация предполагает выполнение 4 шагов (4 обратимых вентиля). Соотношение между $I_i (1 \leq i \leq 3)$ и $O_i (1 \leq i \leq 3)$, а также влияние неисправного входа на выходы D_1, D_2 приведены в таблице на рис. 10.

Анализ MTV. Примененная модель неисправностей включает пропущенный и повторяемый вентили. На транспортирование бита по сигнальным линиям (в том числе со входов схемы) также может влиять отсутствие или повторение вентиля. Одиночная неисправность приводит к появлению трех видов ошибок: 1) маскируемые ошибки, которые могут быть не заметны или приводят к ошибке на неиспользуемых линиях и не влияют на функционирование схемы; 2) восстанавливаемые ошибки, когда ошибочный результат транспортировки бита на один из трех выбираемых выходов может быть исправлен схемой на последующем шаге TMR. Действие этой ошибки может быть исправлено при условии, если нет других неисправностей, проявляющихся на данном этапе; 3) неустраняемые ошибки, которыми является любая неисправность, изменяющая значение на более чем одном выбираемом выходе, и которая не является ни маскируемой, ни восстанавливаемой.

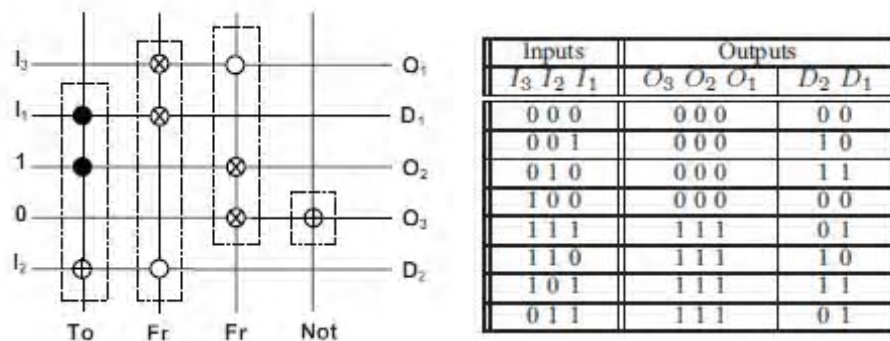


Рис. 10. Минимальная тройная мажоритарная схема

Любая одиночная неисправность на входах MTV маскируется. Кроме того, одиночная неисправность внутри MTV приводит к маскируемым или восстанавливаемым ошибкам. Однако MTV не является устойчивым к неисправностям типа пропущенный и повторяющийся вентиль, которые возникают в схеме, когда имеется неисправность на входных линиях. Кроме того, диагностическая информация схемы не является достаточной для определения неисправного входа. В целях повышения надежности схемы, а также увеличения диагностической информации предложена другая реализация устройства.

Предлагаемая робастная тройная мажоритарная схема (Robust Triplicated Voter, RTV) показана на рис. 11. Отношение между входами и выходами приведено в таблице (рис. 11). Значение на выходе определяется на основе значений на входах. Затем генерируются три копии выхода. В отличие от реализации MTV, в RTV каждая копия значения выхода формируется независимо, прямо из входов. После того, как RTV сформировал три независимые копии большинства входных битов, уменьшается количество случаев возникновения дефектов, приводящих к неустраняемым ошибкам. Кроме того, большинство одиночных неисправностей RTV являются маскируемыми, а не восстанавливаемыми. Описанный модуль обеспечивает полное диагностирование одиночных неисправностей. Данное преимущество достигается за счет увеличения площади и задержки схемы.

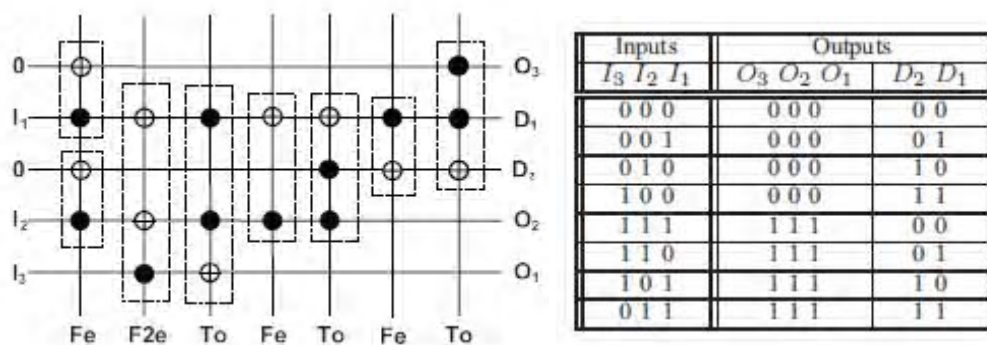


Рис. 11. Робастная тройная мажоритарная схема

2.2. Неисправности квантовых логических схем

Агравал В.Д. исследовал вероятность обнаружения неисправностей в логических схемах с использованием принципа максимума энтропии общей термодинамики. На основании принципа максимума энтропии он показал, что можно получить высокий уровень достоверности тестирования, если выходная энтропия системы максимальна [14]. Максимальный результат достигается, когда выходная информация в измененных битах/последовательностях совпадает с входной информацией.

Patel K.N. показал, что обратимые схемы требуют меньше тестовых векторов для обнаружения кратных неисправностей на основе константных моделей по сравнению с классической схемой. В обратимой логике, количество тестовых векторов растет логарифмически в зависимости от количества входов/выходов и числа вентилях [14].

В общем случае функция является обратимой, если существует однозначное соответствие между входами и выходами функции (и наоборот) [18]. В любой обратимой функции существует возможность восстановления входных значений в зависимости от заданных выходных значений. Традиционный инвертор (вентиль NOT) является обратимым. Вентиль обратимый, если булева функция вычисляется биективно и корректно сформированная обратимая логическая схема является ациклической комбинационной логической схемой, в которой все вентили обратимы и соединены между собой связями без разветвлений.

Уникальным свойством процесса тестирования обратимой логики есть то, что любой тестовый набор, который может обнаруживать все одиночные неисправности в обратимой логической схеме, будет также обнаруживать все кратные константные неисправности. Это свойство не может быть достигнуто в необратимой логике, где обнаружение кратных константных неисправностей является значительно более сложным, чем обнаружение одиночных константных неисправностей.

Лишь отдельные существующие модели неисправностей традиционной логики могут быть распространены на квантовую логику. Например, при синтезе квантовой логики не используется поведенческий уровень [14]. Неисправности, связанные с задержками и дефектами, не имеют аналогов в области квантовой логики. Модели неисправностей логического уровня, ориентированные на описание соединений квантовых вентилях, должны быть адаптированы к квантовым схемам. Под неисправностями логического уровня в квантовой логике понимают неисправности уровня RTL (register transfer level).

Наиболее широко используемыми моделями неисправностей уровня RTL являются константные неисправности. В обычной логике они моделируются путем присвоения фиксированного логического значения (0 или 1) определенной точке тестируемой схемы. Для квантовых схем предложены две модели, первая – для двоичных перестановочных схем, вторая – для квантовых вентилях. В первой модели для выявления замыкания проводника определяется многозначное состояние цепи $\{|0\rangle, |1\rangle, |V_0\rangle$ и $|V_1\rangle\}$. Основное различие между двумя моделями заключается в необходимости использования вероятностных тестов при появлении на выходах схемы комплексных значений.

В традиционной логике часто используются специальные модели неисправностей, которые могут применяться и для квантовых схем. Предложено семейство моделей неисправностей логики для обратимых схем, основанных на k -входном элементе «контролируемое НЕ» (k -CNOT) и относящихся к модели неисправностей, определяемой как полное удаление вентиля – single missing-gate fault model (MGF) [15].

Неисправности stuck-open и stuck-short используются для моделирования специфических проблем транзистора в структуре КМОП вентиля.

Интересным и уникальным аспектом тестирования квантовых схем является необходимость различия вероятностных и детерминированных тестов. Очевидно, что для детерминированных тестов требуются множественные итерации.

Неисправности утечки очень важны в традиционной цифровой логике. Предполагается, что кубит функционирует в полной изоляции в двумерном гильбертовом пространстве H_2 . Так, при появлении ошибки кубит может либо взаимодействовать с окружающей средой, либо непредсказуемо разворачиваться в двумерном пространстве. Утечка в квантовых схемах происходит, когда кубит просачивается из двумерного гильбертова в большее пространство. Тестирование неисправностей утечки квантовых схем – это сложная задача. Неисправности, проявляющиеся в поворотах кубита, могут быть смоделированы как непреднамеренное включение одного кубита в вентиль Паули, что вызывает лишь изменение фазы кубита, которым можно пренебречь, поскольку направление, которое он указывает в гильбертовом пространстве, является только частью информации кубита.

Квантовый компьютер может быть смоделирован как физическое перемещение кубитов из зоны хранения в зону обработки и обратно в зону хранения в течение каждого цикла вычислений [15]. Модель неисправностей канала передачи квантовой схемы заимствована из модели неисправностей обычного двоичного симметричного канала (рис. 12). Она предполагает одинаковые вероятности p для перевода кубита из состояния $|0\rangle$ в $|1\rangle$ и из $|1\rangle$ в $|0\rangle$.

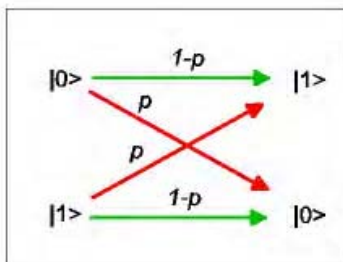


Рис. 12. Модель неисправностей двоичного симметричного канала

Поскольку $n \times n$ обратимые логические схемы представляют собой взаимно-однозначное соответствие между входами и выходами, они должны иметь максимальное количество выходов. В этом случае обнаружение неисправностей в обратимых логических схемах будет более простым.

Для решения проблем транспортирования и декогерентности в квантовых схемах необходимо использовать коды коррекции квантовых ошибок (QECC, quantum error correction codes).

2.3. Технологии выявления дефектов при тестировании клеточных автоматов на квантовых точках (QCA, quantum cell automata)

Фундаментальным элементом QCA является ячейка, состоящая из четырех квантовых точек (Quantum Dots, QD), находящихся в вершинах квадрата (рис. 13) [16]. Каждая ячейка содержит пару избыточных электронов, которые стремятся занять ее противоположные углы. Два возможных варианта поляризации ячейки позволяют кодировать двоичную информацию (рис. 14). Ячейка переключается с одной поляризации на другую, когда электроны квантомеханически туннелируют с одного набора квантовых точек на другой.

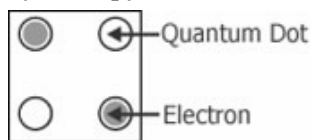


Рис. 13. Ячейка клеточного автомата на четырех точках

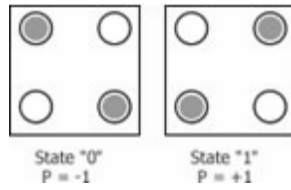


Рис. 14. Два возможных состояния ячейки клеточного автомата

Вариант ячейки QCA на 6-ти QD, в котором центральная точка служит пунктом туннелирования, показан на рис. 15. Два электрона в ячейке электростатически отталкиваются, что разводит их по диагонали квадрата и дает два энергетически эквивалентных состояния ($E_1 = E_2$), т.е. бит информации.

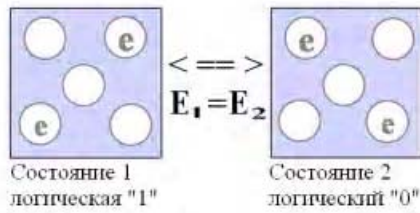


Рис. 15. Ячейка клеточного автомата на шести точках

QCA-провод представляет собой расположенные рядом ячейки. Переключение одной ячейки из одного состояния в другое вызывает в соседней ячейке перемещение электрона (за счет наведенного кулоновского потенциала), что приводит к беспроводной передаче информации. Ячейки также могут быть смещены на S длины или повернуты на 45° относительно друг друга (рис. 16). Разместив ячейки в определенном порядке можно реализовать логическую функцию «отрицание».

Элемент majority представляет собой ячейку, окруженную с четырех сторон другими, причем три из них принудительно приводятся в некоторое состояние, а 4-я транслирует на «выход» состояние центральной ячейки, которое принимает энергетически выгодное значение, физически зависящее от суммы состояний соседей. Два «входа» являются информационными, а третий – контрольный (рис. 17). Условно-графическое обозначение этого элемента воплощает две базисные функции «И (-НЕ)» и «ИЛИ» (рис. 18). Элемент majority является базисом для QCA-схемной реализации полного одноразрядного сумматора (рис. 19), мультиплексора, демультиплексора и D-триггера [16]. Элемент majority необратим в вычислительном смысле, но его переключение происходит адиабатически.

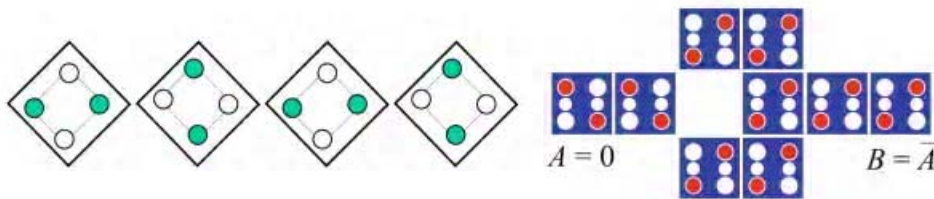


Рис. 16. QCA-провод из четырех ячеек, повернутых на 45° , и инвертор из ячеек на шести точках

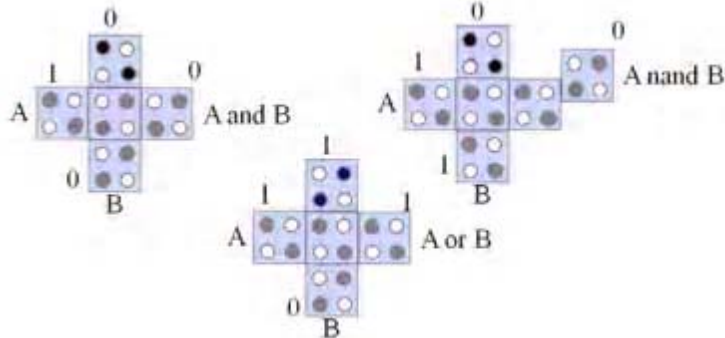


Рис. 17. Элемент majority для вычисления булевых функций $A \wedge B$, $A \vee B$, $\neg(A \wedge B)$

Отдельные ячейки QCA являются обратимыми в силу своей квантовой природы. Тем не менее, QCA схемы не обратимы, поскольку QCA ячейки подвергаются воздействию электрических или магнитных полей. Как следует из постулатов квантовой механики, для обратимости квантового состояния необходима замкнутая система. Следовательно тестирование QCA отличается от тестирования обратимых квантовых схем QC.

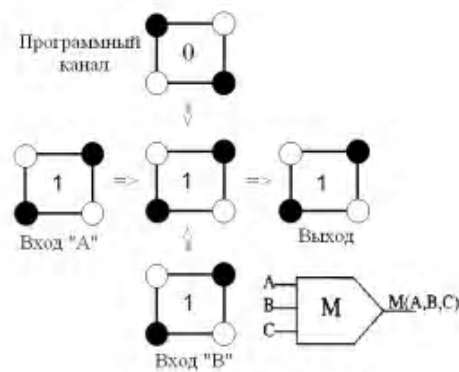


Рис. 18. Схема элемента majority и его условно-графическое обозначение

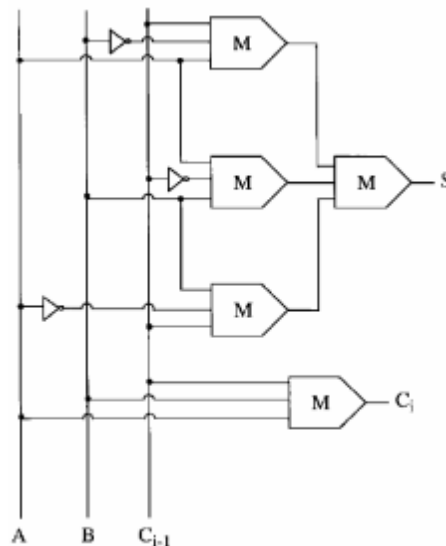


Рис. 19. QCA-схемная реализация полного одноразрядного сумматора

Tahoogi M.V. [14] предложил методику тестирования, для которой требуется постоянное количество тестовых векторов для достижения 100% покрытия неисправностей. Разработана также технология тестопригодного проектирования, которая позволяет генерировать существенно меньшее количество тестовых наборов при практически 100% покрытии.

Gupta P. [14] обнаружил, что тестовые наборы для константных неисправностей QCA схем не гарантируют обнаружение всех дефектов. Поэтому предложено генерировать дополнительные тестовые векторы для обнаружения неисправностей межсоединений.

2.4. Обнаружение частично-избыточной обратимой и необратимой логики

Вентиль или сегмент логики является избыточным, если он может быть удален из схемы без ущерба для ее функциональности. Вентиль или сегмент логики является частично-избыточным, если он может быть изменен без ущерба для функциональности схемы. Обнаружение частично-избыточной логики в любом проекте, обратимом или необратимом, важно для логического синтеза, верификации, тестопригодного проектирования (design for testability, DFT) [14,17].

В логическом синтезе, частично-избыточная логика может использовать ценные ресурсы схемы и ее устранение может обеспечить более эффективное функционирование устройства, в то время как в необратимой логике часто применяются инструменты синтеза для уменьшения времени/размера схемы и ее сложности. Частично-избыточная логика может также уменьшить эффективность структурной верификации проекта или даже маскировать некоторые его недостатки. При тестопригодном проектировании частично-избыточная логика как правило повышает наблюдаемость и управляемость контрольных точек. Известно, что для необратимых (классических) логических схем частично-избыточная логика или внутренние безразличные сигналы могут быть невидимыми, поскольку они не влияют на общую функциональность из-за наличия внутренних безразличных условий [14,17].

Обнаружение частично-избыточной логики проекта, обратимой или необратимой, важно для логического синтеза, верификации проекта, тестопригодного проектирования.

Обратимый вентиль/схема отображает каждый входной набор на уникальный выходной набор и, следовательно, не приводит к стиранию информации. В работах Беннетта, Фейнмана, Фридкина и Тоффоли [17] исследованы возможности обратимой логики для создания схем, в которых теоретически достигнут нулевой уровень внутренней рассеиваемой мощности. Схемы обратимой логики формируются путем объединения вентилях в каскады с использованием различных методов синтеза, направленных на минимизацию неиспользуемых выходов и вспомогательных входов. Простой каскад из четырех вентилях и четырех переменных приведен на рис. 20. Каждая вертикальная линия представляет собой вентиль Тоффоли на t переменных с $t-1$ управляющими линиями (темные точки) и одной управляемой линией (незаполненные окружности). Для каждого вентиля значение на управляемой линии инвертируется, если и только если на всех $t-1$ управляющих линиях появляется 1.

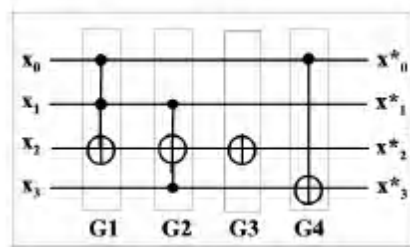


Рис. 20. Каскад из четырех вентилях и четырех переменных

Вентиль Тоффоли с t переменными можно обозначить как $\text{TOF}(x_1, x_2, \dots, x_n; x_i)$, где управляемая линия x_i отделена знаком «;» от управляющих линий. Каждый вентиль является частью каскада, который должен включать вентиль и все неподключенные линии, проходящие через него. В целом матрица преобразований S этого каскада получается путем перемножения матриц преобразований четырех вентилях в обратном порядке: $S = G_4 \times G_3 \times G_2 \times G_1$.

Тривиально тождественный вентиль – это обратимый вентиль, который реализует тождественное преобразование матрицы I (диагональная матрица со всеми ненулевыми элементами, равными 1). Любой обратимый вентиль с матрицей преобразования, которая отличается от единичной матрицы, не является тривиально тождественным.

Идентичные вентилях тривиальны в том смысле, что они не изменяют матрицу преобразований схемы и могут быть игнорированы в функциональном смысле. Далее при рассмотрении обратимых каскадов используются только нетривиальные вентилях.

Известно, что обнаружение неисправностей наиболее эффективно, когда выходной информационный контент тестируемой схемы максимален [17]. Обратимые схемы, которые реализуют взаимно-однозначные функции, являются максимизированными. В обратимых схемах для выявления кратных неисправностей на основе константной модели требуется меньшее количество тестовых векторов по сравнению с классическими схемами.

В работе [17] предложена структура Quantum Multiple-Valued Decision Diagrams (QMDD) для описания и моделирования обратимых квантовых логических схем. Матрица M раз-

мерности $[2n \times 2n]$ может быть разложена на четыре матрицы M_0, \dots, M_3 с основанием

$$r = 2 : M = \begin{bmatrix} M_0 & M_1 \\ M_2 & M_3 \end{bmatrix}.$$

Разбиение выполняется таким же образом, как и в упрощенной упорядоченной диаграмме двоичных решений (Reduced Ordered Binary Decision Diagram, ROBDD) [2] с применением разложения Шеннона. Выполняется упорядочение фиксированных переменных и разделение общих структур (подматриц). QMDD имеет одну конечную вершину со значением 1, и каждое ребро, в том числе ребро, указывающее на начальную вершину, имеет комплексный вес (complex valued). Матрица M комплексных значений размерностью $r^n \times r^n$ имеет уникальное (с точностью до изменения порядка переменных или их переобозначения) QMDD представление.

Две схемы являются идентичными, если они составлены из одинаковых вентилях и имеют одинаковый список цепей. Две схемы являются функционально-эквивалентными, если они реализуют одинаковую функцию. Обратимые логические схемы, идентичные и эквивалентные, представляются одной уникальной матрицей преобразований.

Две $r^n \times r^n$ матрицы M комплексных значений являются идентичными, если и только если они имеют одинаковое начальное ребро с одинаковым весом в QMDD представлении.

Стратегия модификации схемы предполагает выполнение повторяющихся проверок эквивалентности теста (benchmark) и его копии для управляемых схемных модификаций. Исчерпывающие структурные тесты, которые сканируют все вентиля эталона, используются только для небольших схем. Для больших схем применяется случайный выбор тестов. На рис. 21 приведен алгоритм выявления частично-избыточной логики.

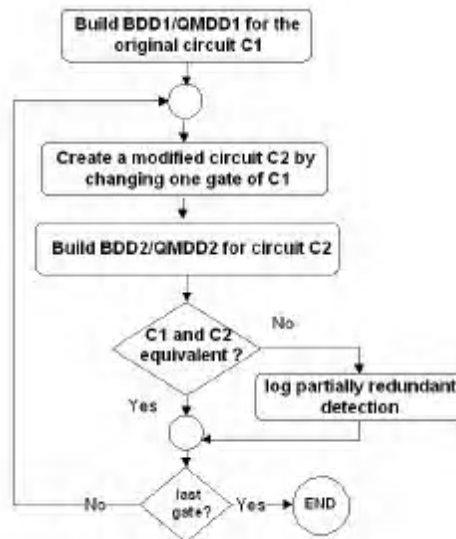


Рис. 21. Алгоритм выявления частично-избыточной логики

В работе [28] исследованы особенности тестирования квантовых логических схем, построенных с помощью библиотеки универсальных обратимых вентилях: квантовое НЕ, контролируемое НЕ (CNOT), трехкубитный вентиль Тоффли (CCNOT) и вентиль Адамара.

Проблема тестирования логики рассматривается как NP-полная, однако она упрощается при тестировании итеративных логических массивов (iterative logic arrays, ILA) [28]. Под ИЛА понимается C-тестопригодный массив (C-testable, constant-testable array), проверяемый с помощью постоянного количества тестовых наборов, или M-тестопригодный массив, проверяемый с помощью постоянного минимального количества тестовых наборов.

Обычно для проверки массивов используется ячеечная модель одиночных неисправностей Cell Fault Model (CFM). В работе [28] введены два допущения для моделей неисправностей, применяемых при тестировании квантовых булевых схем и квантовых итеративных логических массивов.

Во-первых, неисправность на уровне ячейки может быть либо константным 0 либо константной 1, что свидетельствует об использовании константной модели неисправностей. Константная неисправность влияет на логическое состояние линии логической схемы. Правильное значение неисправной линии преобразуется в константное логическое значение: логический 0 (stuck-at-0, SA0) или логическую 1 (stuck-at-1, SA1). В квантовой логической схеме, которая реализует изменение квантовых битов во времени, любой квантовый вентиль выполняет унитарный и логически обратимый процесс. Обратимость и взаимная однозначность квантовых булевых схем приводит к тому, что константная неисправность будет распространяться от вентиля к вентилю и от ячейки к ячейке. Поэтому без ограничения общности можно рассматривать константные неисправности как постоянные (не зависящие от времени) ошибки линий логических ячеек, которые всегда могут наблюдаться на первичных выходах массива.

Данное предположение имеет смысл для квантовых вычислений в полупроводниковых системах. В нанометровой области дефект может быть вызван любой крошечной пылинкой или отклонением формы геометрической фигуры. Несовершенство процесса изготовления компонентов устройства также может приводить к дефектам. Изменения производственного процесса влияют на пороговое напряжение и длину канала транзисторов, а также на ширину и толщину металлизированных межсоединений. Дефекты в случайных местах приводят к появлению коротких замыканий между элементами топологии или разрывов металлизированных линий. Любой из этих дефектов может привести к появлению константных неисправностей.

Во-вторых, функциональная верификация ячейки включает генерацию управляющего входа и транспортирование неисправностей из ячейки на наблюдаемые выходы. Это значит, что для тестирования массива достаточно проверить функции каждой ячейки. Описанная модель называется ячейечной моделью неисправностей. Для функциональной верификации логической ячейки квантовой схемы необходимо сгенерировать управляющий вход и транспортировать неисправности схемы до выполнения квантового измерения.

В основном ошибки квантовой схемы вызываются дефектами, вызванными взаимодействием с окружающей средой. Как только произошел отказ, неисправность фиксируется и транспортируется на выходы аналогично классической схеме без квантовых свойств. Во многих реализациях квантового компьютера, оптических или полупроводниковых, могут возникать постоянные неисправности, такие как короткие замыкания или утечки сигнала, вызванные несовершенством материалов или физическими дефектами проводников.

Любая классическая схема может быть преобразована в квантовую версию с минимальным количеством входных/выходных линий путем использования только квантовых NOT, CNOT, CCNOT вентилях. Поскольку все вентили являются биективными (взаимно-однозначными), квантовые схемы также биективны. Вентили могут быть применены для построения массивов итеративной логики с минимальным числом тестовых наборов, которое не зависит от размера M-проверяемого массива.

В отличие от квантовых логических схем, преобразование классической схемы в массив C/M-тестопригодной итеративной логики является сложной задачей. Для классической схемы с m-битовым входом и n-битовым выходом (m=128, n=100) потребуется слишком много тестовых наборов для всех возможных отображений (2^m на 2^n). Количество тестовых наборов растет экспоненциально с ростом количества входов. Хотя количество тестовых наборов является постоянной величиной, исчерпывающее тестирование требует выполнения 2^m входных наборов для тестирования константных неисправностей.

Использование квантовых свойств, таких как преобразование Уолша-Адамара, для достижения квантового параллелизма $H^{\otimes m} |0\rangle^{\otimes m} = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_{x=0}^{2^m-1} |x\rangle$ и

$H^{\otimes m} \left(\frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_{x=0}^{2^m-1} |x\rangle \right) = |0\rangle^{\otimes m}$ позволяет тестировать весь массив схем с помощью одного тестового набора $|000\dots 0\rangle$. В этом случае массив называется «1-тестопригодным» («1-

testable») не потому, что для него достаточно только одного тестового набора. Количество тестовых наборов не зависит от количества входов и размера массива.

В работе [28] приведен пример построения квантовой системы встроенного самотестирования (Quantum Built-In Self-Test, QBIST) на основе использования свойства «1-тестопригодности» (рис. 1.22). При включении в тестовом режиме первичные выходы устанавливаются в нулевое состояние. Эта операция выполняется путем инициализации кубитов или создания резервной копии предыдущего состояния первичных входов в нормальном режиме. Контролируемый нулем вентиль NOT может быть использован для проверки требуемых входов (установлены ли они все в ноль). Контролируемый вентиль Адамара используется здесь как генератор квантовых тестовых наборов (QTPG). Все 2^m комбинаций тестовых наборов подвергаются суперпозиции и могут быть одновременно использованы для тестирования. Тестируемая схема (CUT) проверяется с использованием только одного тестового набора. Благодаря свойству «1-тестопригодности» для выполнения исчерпывающего тестирования не требуются двоичный счетчик и линейный сдвиговый регистр с обратной связью, используемые в классических BIST. После проверки схемы информация передается на квантовый анализатор откликов (quantum output response analyzer, QORA), как это делается в классической BIST. Преимуществом является то, что в данном случае нет необходимости выполнять сжатие данных и сложный сигнатурный анализ.

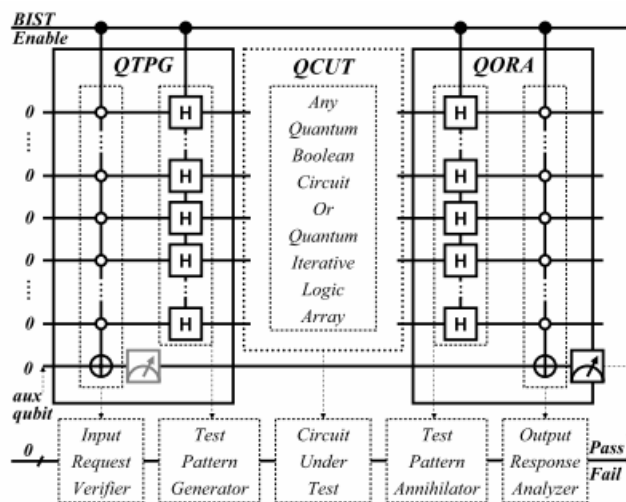


Рис. 22. Квантовая система встроенного самотестирования

В QORA контролируемое преобразование Уолша-Адамара используется в качестве тестового набора «annihilator». После этого подвергнутые суперпозиции тестовые наборы возвращаются в начальное состояние 0, если исправная схема находится в процессе тестирования. В противном случае, состояние 1, результат будет измеряться на выходах. Вместо измерения всех m кубитов контролируемый нулем вентиль CCNOT используется как анализатор откликов в целях экономии энергии. Вспомогательный целевой бит будет инвертирован только если все первичные выходы равны нулю. Таким образом, наблюдая за целевым битом, можно определить, появилась ли неисправность.

3. Заключение

Анализ квантовых технологий тестирования и ремонта цифровых систем на кристаллах, выполненный в данной работе, дает основания сформулировать актуальные на рынке электронных технологий направления в области Design and Test. Квантовые вычисления в последние годы становятся практически интересными и актуальными, особенно для анализа кибернетического пространства, создания новых Интернет-технологий и сервисов, благодаря их некоторой альтернативности существующим моделям вычислительных процессов. Рыночная привлекательность квантовых или кубитных моделей основывается на высоком параллелизме решения практически всех задач дискретной оптимизации, распоз-

навания текстов и образов, факторизации и минимизации булевых функций, эффективного сжатия, компактного представления и телепортации данных, отказоустойчивого проектирования из-за существенного повышения аппаратных затрат. Но такая плата в настоящее время вполне допустима, поскольку нанoeлектронные технологии предоставляют разработчикам аппаратуры мощные площади силиконового кристалла, содержащие до 1 миллиарда вентилях при толщине пластины, равной 5 микрон. При этом современные технологии допускают создание пакета или «сэндвича», содержащего до 7 кристаллов, что соизмеримо с объемом нейронов головного мозга человека. Практически «беспроводное» соединение таких пластин, основанное на технологической возможности сверления порядка 10 тысяч сквозных отверстий (vias) на 1 квадратном сантиметре, обеспечивает минимальные задержки линий связи, а значит высокое быстродействие системы в пакете. Наполнить полезной функциональностью – интеллектом, соответствующим мозгу человека, предоставляемый объем вентилях на кристалле к 2020 году возможно только путем объединения усилий ученых, университетов и компаний. Поэтому можно и нужно использовать «жадные» к аппаратуре модели и методы для создания быстродействующих средств параллельного решения практических задач, упомянутых выше. Имея в виду дискретность и многозначность алфавитов описания информационных процессов, свойства параллелизма, заложенные в квантовых вычислениях, являются особенно востребованными при создании: 1) эффективных и интеллектуальных нечисловых «движков» для быстрого и точного поиска данных в киберпространстве или Интернете; 2) средств синтеза отказоустойчивых цифровых примитивов и систем; 3) проектирования и тестирования цифровых систем на кристаллах; 4) технологий защиты информации и компьютерных систем; 5) мозгоподобных моделей вычислительных процессов для анализа и синтеза языковых конструкций.

Направление дальнейших исследований будет связано с разработкой кубитных или квантовых моделей данных и вычислительных процессов для существенного повышения быстродействия при решении задач дискретной оптимизации, суперпозиционного метода синтеза кубов функциональностей для имплементации в структурные компоненты программируемых логических устройств, аппаратно-ориентированных моделей параллельного вычисления булеана для решения задач покрытия и минимизации булевых функций за счет реализации процессорной Хассе-структуры, модели комбинационного устройства, ориентированной на автономное и встроенное восстановление работоспособности компонентов логических устройств благодаря использованию автоматов переадресации дефектных примитивов, аппаратного прототипа квантового вычислителя на основе программируемой логики для оптимального решения задач тестирования.

Список литературы: 1. *Thibodeau P.* IBM's new future: Quantum computing / Patrick Thibodeau // Электронный ресурс http://www.computerworld.com/s/article/9217669/IBM_s_new_future_Quantum_computing?source=rss_keyword_patrick+thibodeau 2. *Benenti G., Casati G., Strini G.* Principles of Quantum Computation and Information. Volume 1: Basic Concepts. World Scientific. 2004. 256 p. 3. *Vedral V., Plenio M.B.* Basics of Quantum Computation. 1998. 28 p. Электронный ресурс: arXiv:quant-ph/9802065 v1 25 Feb 1998 <http://www.tfp.uni-karlsruhe.de/~cuevas/Lehre/SS04/9802065.pdf> 4. *Rosinger E.E.* Basics of Quantum Computation (Part 1). 2004. 87 p. Электронный ресурс: arXiv:quant-ph/0407064 v1 8 Jul 2004 <http://chaos.swarthmore.edu/courses/TSG/2004d.pdf> 5. *Stenholm S., Suominen K.-A.* Quantum approach to informatics. A John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2005. 249 p. 6. Imai Hiroshi, Hayashi Masahito. Quantum Computation and Information. From Theory to Experiment. Springer. 2006. 234 p. 7. *Nielsen M.A., Chuang I.L.* Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press. 2010. 710 p. 8. *Mikio Nakahara.* Quantum computing: an overview // Mathematical Aspects of Quantum Computing. 2007. 53 p. <http://www.worldscibooks.com/physics/6851.html> 9. *Whitney M.G.* Practical Fault Tolerance for Quantum Circuits. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Computer Science in the Graduate Division of the University of California, Berkeley. 2009. 206 p. 10. *DiVincenzo D.P.* The Physical Implementation of Quantum Computation // IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598 USA. 9 p. Электронный ресурс: arXiv:quant-ph/0002077 v3 13 Apr 2000. http://www.unifiedfieldtheories.com/0002077_DiVincenzo_Phys_Imp.pdf 11. *Svore K.M., Terhal B.M., DiVincenzo D.P.* Local Fault-Tolerant Quantum Computation // Электронный ресурс: arXiv:quant-ph/0410047v2 6 Jun 2005. <http://research.microsoft.com/pubs/143764/local2005.pdf> 12. *Бейтсон Г.* Шаги в направлении экологии разума / Г. Бейтсон. М.: КомКнига. 2005. 248 с. 13. *Валиев К.А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность / К.А.Валиев, А.А.Кокин. Ижевск: ПХД. 2001. 352 с. 14. *Feinstein D.D.Y.* Computer-Aided-Design Methods

for Emerging Quantum Computing Technologies / D.D.Y. Feinstein. BiblioLabsII. 2011. 184 p. **15.** Hayes J.P. Testing for Missing-Gate Faults in Reversible Circuits / John P. Hayes, Ilia Polian, Bernd Becker // Proc. Asian Test Symposium. Taiwan. November, 2004. **16.** Матюшкин И.В. Квантовые клеточные автоматы / И.В. Матюшкин // Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». 2011. С. 367-392. Электронный ресурс <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/029.pdf>. **17.** Feinstein D.Y. Partially Redundant Logic Detection Using Symbolic Equivalence Checking in Reversible and Irreversible Logic Circuits / D.Y. Feinstein, M.A. Thornton, D.M. Miller // Design, Automation and Test in Europe, DATE'08. 2008. P. 1378 – 1381. **18.** Nayeem N.M. Online Fault Detection in Reversible Logic / N.M. Nayeem, J.E. Rice // Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT). 2011. P.426-434. **19.** Zamani M. Fault Masking and Diagnosis in Reversible Circuits / M. Zamani, N. Farazmand, M.B. Tahoori // 16th IEEE European Test Symposium (ETS). 2011. P.69-74. **20.** Hongyan Z. Improved Fault Diagnosis for Reversible Circuits / Zhang Hongyan, R. Wille, R.Drechsler // 20th Asian Test Symposium (ATS). 2011. P. 207 – 212. **21.** De Vos A. The Roots of the NOT Gate / A. De Vos, S. De Baerdemacker // 42nd IEEE Intern. Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL). 2012. P. 167 – 172. **22.** Kerntopf P. Synthesis of multipurpose reversible logic gates / P. Kerntopf // Proceedings of the Euromicro Symposium on Digital System Design (DSD'02).2002. P. 259 – 266. **23.** Boykin P.O. Reversible Fault-Tolerant Logic / Boykin, P.O.; Roychowdhury, V.P. // Proceedings of the 2005 Intern. Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN'05). 2005. P. 444 – 453. **24.** Wille R. Equivalence Checking of Reversible Circuits / R. Wille, D. Grosse, D.M. Miller, R. Drechsler // 39th International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2009. P. 324 – 330. **25.** Patel K.N. Fault testing for reversible circuits / K.N. Patel, J.P. Hayes, I.L. Markov // Proc. of the 21st IEEE VLSI Test Symposium (VTS 03). 2003. Vol. 23, Iss. 8. P. 1220 – 1230. **26.** Chakraborty A. Synthesis of reversible circuits for testing with universal test set and C-testability of reversible iterative logic arrays / A. Chakraborty // Proc. of the 18th Intern. Conf. on VLSI Design (VLSID'05).2005. P. 249 – 254. **27.** Miller D.M. A synthesis method for MVL reversible logic [multiple value logic] / D.M. Miller, G.W. Dueck, D. Maslov // Proc.of the 34th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL'04). 2004. P. 74 – 80. **28.** Chou Yao-Hsin QBIST: Quantum Built-In Self-Test for any Boolean Circuit / Yao-Hsin Chou, Sy-Yen Kuo, I-Ming Tsai // 26th IEEE VLSI Test Symposium. 2008. P. 261 – 266. **29.** Perkowski M. Test generation and fault localization for quantum circuits / M. Perkowski, J. Biamonte, M. Lukac // Proc. of the 35th Intern. Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL'05). 2005. P. 62 – 68. **30.** Paler A. Tomographic Testing and Validation of Probabilistic Circuits / A. Paler, A. Alaghi, I. Polian, J.P. Hayes // Sixteenth IEEE European Test Symposium (ETS). 2011. P. 63 – 68. **31.** Golubitsky O. A Study of Optimal 4-bit Reversible Toffoli Circuits and Their Synthesis / O. Golubitsky, D. Maslov // IEEE Transactions on Computers. 2011. P. 1-14. **32.** Feinstein D.Y. Advances in Quantum Computing Fault Tolerance and Testing / D.Y. Feinstein, V.S.S. Nair, M.A. Thornton // 10th IEEE High Assurance Systems Engineering Symposium. 2007.– P. 369 – 370. **33.** Lukac, M. Quantum Finite State Machines as Sequential Quantum Circuits / M. Lukac, M. Perkowski / 39th Intern. Symposium on Multiple-Valued Logic. 2009. P. 92 – 97.

Поступила в редколлегию 21.03.2012

Мурад Али Аббас, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем и сетей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Хаханов Владимир Иванович, д-р техн. наук, декан факультета КИУ, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Литвинова Евгения Ивановна, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: автоматизация диагностирования и встроенный ремонт компонентов цифровых систем в пакете кристаллов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-421. E-mail: kiu@kture.kharkov.ua.

Чумаченко Светлана Викторовна, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование, теория рядов, методы дискретной оптимизации. Увлечения: путешествия, любительское фото. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: ri@kture.kharkov.ua.

Горобец Александр Александрович, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: мозгоподобные вычисления, облачные вычисления и социальные сети. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, e-mail: gorobetsu@gmail.com.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВЕКТОРА

Описывается методология проектирования аналоговых цепей, разработанная на основе применения теории оптимального управления, которая используется для определения структуры вектора, управляющего процессом оптимизации. Анализ структуры управляющего вектора производится путем применения концепции функции Ляпунова процесса проектирования. Исследуется поведение этой функции и ее временной производной, что позволяет определить оптимальные точки переключения управляющего вектора. Подобный подход дает возможность минимизировать полное процессорное время проектирования цепи путем коррекции структуры управляющего вектора по характеристикам начального периода проектирования. Численные результаты процесса оптимизации цепей с транзисторами показывают возможность управления процессом проектирования для минимизации общего процессорного времени.

1. Введение

Решение задачи сокращения времени оптимизации электронных цепей позволяет повысить качество проектирования в целом. Помимо традиционных подходов, связанных с техникой разреженных матриц и декомпозиции, в работах [1-3] был предложен путь сокращения времени проектирования цепей, позволяющий сформулировать задачу проектирования, отказавшись от соблюдения законов Кирхгофа в процессе оптимизации. Этот подход развит в работах [4-5] на основе переформулирования задачи проектирования аналоговых цепей в терминах теории управления. Построенная методология позволяет искать среди множества различных стратегий проектирования одну или несколько стратегий, обладающих минимальным процессорным временем. Традиционная стратегия проектирования (ТСП), включающая анализ цепи на каждом шаге процедуры оптимизации, не является оптимальной по времени, и выигрыш во времени проектирования для некой оптимальной стратегии по сравнению с ТСП возрастает при увеличении размеров и сложности проектируемой цепи [4]. Процесс проектирования электронной цепи был определен как динамическая управляемая система [5]. Эта система определяется дифференциальными или разностными уравнениями для переменных состояния и системой ограничений, в качестве которых выступает математическая модель электронной цепи.

2. Формулировка задачи

В соответствии с обобщенной методологией [5] процесс проектирования электронной цепи определим как задачу минимизации обобщенной целевой функции $F(X, U)$ на основе векторного уравнения:

$$X^{s+1} = X^s + t_s \cdot H^s \quad (1)$$

с ограничениями, в качестве которых выступает математическая модель электронной цепи:

$$(1 - u_j)g_j(X) = 0, \quad j=1,2,\dots,M, \quad (2)$$

где $X \in \mathbb{R}^N$, $X = (X', X'')$, $X' \in \mathbb{R}^K$ есть вектор независимых переменных и $X'' \in \mathbb{R}^M$ есть вектор зависимых переменных; M – число зависимых переменных электронной цепи, K – число независимых переменных; N – общее число переменных ($N=K+M$) и t_s – итерационный параметр. Функции $g_j(X)$ для всех j являются уравнениями модели цепи. Функция $H \equiv H(X, U)$ определяет направление уменьшения обобщенной целевой функции $F(X, U)$, U есть вектор управляющих функций $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$, где $u_j \in \Omega$, $\Omega = \{0,1\}$.

Обобщенная целевая функция процесса проектирования $F(X, U)$ определяется следующим аддитивным выражением:

$$F(X, U) = C(X) + \psi(X, U), \quad (3)$$

где $C(X)$ есть неотрицательная функция цели задачи проектирования и $\psi(X, U)$ есть дополнительная штрафная функция, определяемая выражением:

$$\psi(X, U) = \frac{1}{\varepsilon} \sum_{j=1}^M u_j \cdot g_j^2(X). \quad (4)$$

Такая формулировка задачи проектирования позволяет перераспределять затраты процессорного времени между решением задач (1) и (2). Вектор U при этом является основным инструментом описанной методологии и управляет динамическим процессом приведения целевой функции $C(X)$ к минимуму за возможно минимальное время проектирования. В данной постановке поиск оптимальной по времени стратегии проектирования формулируется как типичная задача минимизации функционала, каковым является процессорное время, путем поиска оптимального управляющего вектора U . В непрерывной форме основное уравнение процедуры оптимизации (1) может быть записано как следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(X, U), \quad i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Система (5) совместно с уравнениями (2)-(4) задает непрерывную форму процесса проектирования. Правые части системы (5) определяют направление поиска минимума обобщенной целевой функции $F(X, U)$. Структура функций $f_i(X, U)$ определяется методом оптимизации и, например, для градиентного метода имеет вид:

$$f_i(X, U) = -\frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U), \quad i = 1, 2, \dots, K, \quad (6)$$

$$f_i(X, U) = -u_{i-K} \frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U) + \frac{(1 - u_{i-K})}{dt} [-x_i' + \eta_i(X)], \quad i = K + 1, K + 2, \dots, N. \quad (6')$$

Поиск оптимальной структуры управляющего вектора U является ключевым моментом в построении оптимальной стратегии проектирования. В такой постановке процесс проектирования электронной цепи мыслится как управляемая динамическая система и вектор U является основным инструментом, реализующим оптимальное управление.

В работе [6] для анализа динамических свойств процесса проектирования было введено понятие функции Ляпунова процесса проектирования. Показано, что имеется определенная корреляция между процессорным временем проектирования и свойствами функции Ляпунова процесса проектирования. Согласно [7] функцию Ляпунова можно определить на основе обобщенной целевой функции посредством следующих формул:

$$V(X, U) = [F(X, U)]^r, \quad (7)$$

$$V(X, U) = \sum_i \left(\frac{\partial F(X, U)}{\partial x_i} \right)^2, \quad (8)$$

где степень $r > 0$. Подобные определения функции Ляпунова могут быть заменены другими, так как достаточно построить функцию, удовлетворяющую ее стандартным свойствам.

В соответствии с теорией прямого метода Ляпунова информация об устойчивости траектории, а в нашем случае и процессорное время оптимизации цепи, связаны с производной по времени от функции Ляпунова. В работе [7] показано, что функция Ляпунова процесса проектирования и ее производная по времени могут служить достаточно информативным источником для поиска перспективных, с точки зрения минимального процессорного времени, стратегий проектирования. Изменяя управляющий вектор U , можно менять процессорное время проектирования цепи и при этом анализировать поведение функции Ляпунова и ее производной. Это позволяет связать структуру управляющего

вектора с поведением функции Ляпунова и процессорным временем. Основным инструментом при поиске стратегии с минимальным процессорным временем служит управляющий вектор U , позволяющий изменять структуру функций $f_i(X, U)$ и, в соответствии с этим [8-9], изменять время переходного процесса динамической системы.

3. Численные результаты

Задача оптимизации транзисторного усилителя по постоянному току, рассмотренная ниже, была решена на основе формулировки процесса проектирования в непрерывной форме (5).

Рассмотренный пример соответствует исследованию двухкаскадного транзисторного усилителя, представленного на рис. 1.

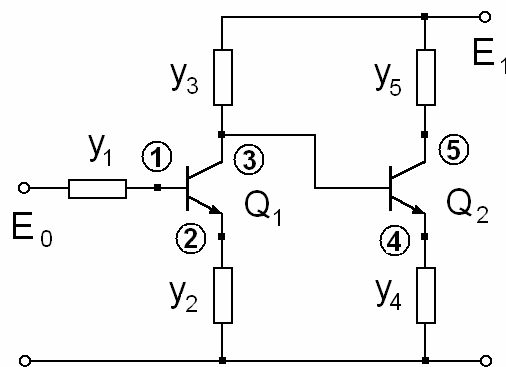


Рис. 1. Двухкаскадный транзисторный усилитель

Модель транзистора соответствовала статической модели Эберса-Молла, реализуемой в системе SPICE [10]. Целевая функция определена как сумма квадратов разностей между заранее заданными и текущими значениями напряжений на переходах транзисторов. Определены пять независимых переменных u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 ($K=5$) и пять зависимых переменных V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 ($M=5$) в случае ТСП. Алгоритм оптимизации включает систему 10 уравнений, а модель схемы определяется пятью нелинейными уравнениями. Базис стратегий проектирования содержит 32 различных стратегий, и управляющий вектор содержит пять компонент. Ранее было показано, что квазиоптимальную структуру управляющего вектора можно искать на основе двух различных стратегий проектирования. Первая стратегия выбирается из подмножества стратегий, имеющих структуру, подобную модифицированной традиционной стратегии проектирования (МТСП). Вторая выбирается из подмножества стратегий, имеющих структуру, подобную ТСП. В целях упрощения дальнейшего анализа в качестве первой стратегии выберем МТСП с управляющим вектором (11111), а в качестве второй стратегии выберем ТСП с управляющим вектором (00000). Поскольку ищется квазиоптимальная стратегия, то можно использовать минимальное количество точек переключения с одной стратегии на другую, равное одной или двум. Самый главный вопрос – об оптимальном расположении точек переключения исследуется ниже.

В данном примере использовались две точки переключения. Первая точка n соответствует переключению со стратегии МТСП на стратегию ТСП, а вторая соответствует шагу $n+4$ и переключению с ТСП на МТСП. Это означает, что ТСП с управляющим вектором (00000) использовалась на четырех шагах оптимизационной процедуры.

Поиск оптимального расположения точек переключения осуществлялся на основе анализа поведения функции Ляпунова $V(t)$ процесса проектирования и ее производной по времени $\dot{V}(t)$. Численные результаты проектирования при различных точках переключения управляющего вектора представлены в табл. 1.

Таблица 1

N	Точка переключ. 1	Точка переключ. 2	Число итераций	Процессорное время (сек)
1	8	12	4122	51,85
2	9	13	3716	46,74
3	10	14	3062	38,52
4	11	15	1043	13,12
5	12	16	5131	64,54
6	13	17	5805	73,02
7	14	18	6186	77,81

Стратегия, соответствующая траектории с номером 1, имеет первую точку переключения на 8 шаге оптимизационной процедуры, при этом вторая точка переключения приходится на 12 шаг, т.е. на 8 шаге управляющий вектор меняет значение с (1111) на (0000), а на 12 шаге – наоборот, с (0000) на (1111). Стратегия, соответствующая второй траектории, имеет точки переключения 9 и 13, третья – 10 и 14 и т.д. Из анализа результатов, представленных в этой таблице, можно сделать вывод, что стратегия номер 4 с точками переключения 11 и 15 имеет минимальное число итераций оптимизационной процедуры и минимальное процессорное время, т.е. является квазиоптимальной. При этом точки переключения, соответствующие шагам 11 и 15, являются оптимальными.

Анализ поведения функции Ляпунова процесса проектирования и ее производной по времени оказалось удобным проводить в координатах $V(t)$ - $\dot{V}(t)$, где в качестве параметра выступает значение времени проектирования, соответствующее текущему шагу оптимизационной процедуры.

Поведение функции $\dot{V}(t)$ в зависимости от функции Ляпунова $V(t)$, где в качестве параметра выступает время проектирования, t приведено на рис. 2 для цепи, изображенной на рис. 1.

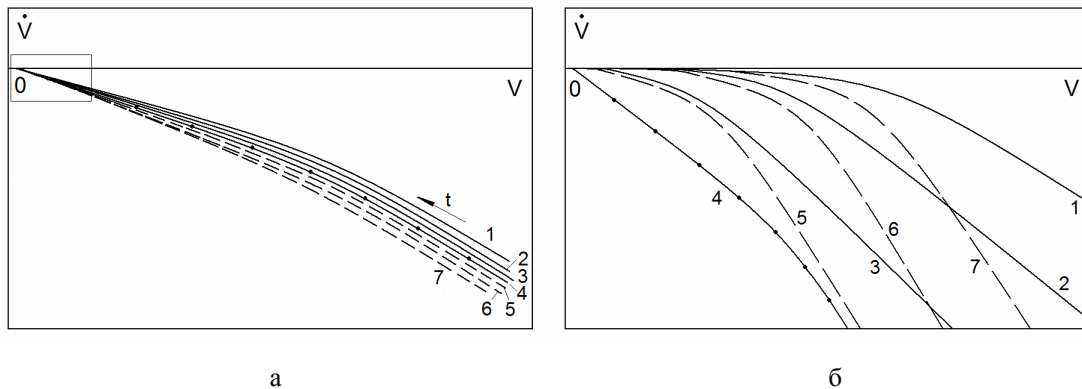


Рис. 2. Поведение функции $\dot{V}(t)$ в зависимости от функции Ляпунова $V(t)$ в течение всего процесса проектирования (а), то же – для второй части процесса проектирования (б)

Рис. 2,а соответствует полному процессу проектирования, в то время как рис. 2,б соответствует ограниченной области, выделенной прямоугольником. Траектории, изображенные на этих рисунках, соответствуют стратегиям табл. 1, имеющим семь последовательных значений точек переключения с 8 по 14.

Траектории, соответствующие точкам переключения до оптимальной, изображены сплошными линиями, а после оптимальной – пунктирными. Траектория 4, соответствующая оптимальной стратегии, выделена на рис. 2 точками. Из рис. 2,а видно, что все траектории идут как бы «параллельно», не пересекаясь, до определенного момента. Можно отметить,

что при значениях точки переключения меньших 8, с которой начинается табл. 1, соответствующие траектории также идут «параллельно», не пересекаясь, но имеют большее процессорное время. Начиная с некоторого значения текущего времени проектирования (текущего шага оптимизационной процедуры), появляются взаимопересечения между раз-

личными траекториями $V(t)-\dot{V}(t)$, при этом, начиная с некоторого момента, траектория 4 проходит ниже всех прочих, что видно из рис. 2(б). В этом случае мы можем констатировать, что стратегия 4 и соответствующая ей траектория, с одной стороны, является оптимальной по времени среди всех представленных, а с другой – в явном виде изолируется от всех прочих стратегий, начиная с некоторого шага оптимизационной процедуры.

Качественное изменение в поведении траекторий в координатах $V(t)-\dot{V}(t)$, т.е. отсутствие взаимопересечений до оптимальной точки переключения управляющего вектора и наличие этих взаимопересечений после оптимальной точки переключения является достаточным признаком, позволяющим найти оптимальную точку (или оптимальные точки) переключения управляющего вектора. Если рассматривать полное множество различных траекторий

проектирования при различных точках переключения в координатах $V(t)-\dot{V}(t)$ как поведение некоей динамической системы, то значение точки переключения является при этом параметром. Качественно различное поведение множества траекторий при значениях параметра до оптимального и после оптимального свидетельствует о том, что оптимальное значение параметра является, в некотором смысле, точкой бифуркации этой динамической системы. Однако эта точка выявляется не сразу после переключения управляющего вектора, что видно из рис. 2(а), а спустя некоторое время, т.е. по прошествии некоторого числа шагов оптимизационной процедуры. Интересно проследить, на каком шаге процедуры оптимизации происходит взаимопересечение траекторий. В табл. 2 приведена информация относительно точек взаимопересечений различных траекторий.

Таблица 2

Номер стратегии	1	2	3	4	5	6
5	676	675	659	206		
6	637	545	208	157	133	
7	413	210	151	127	114	112

Первая строка соответствует номерам пересекаемых траекторий, в то время как первый столбец соответствует номерам траекторий, которые пересекают. Основной информацией является номер шага оптимизационной процедуры, который соответствует точке взаимопересечения. Понятно, что до оптимальной точки переключения управляющего вектора пересекающихся траекторий нет и первая траектория, которая пересекает другие, есть траектория с номером 5. В то же время пересекаемыми траекториями являются все, за исключением последней, потому что траектории, соответствующие первой точке переключения на шаге 15 и более, не представлены в данном анализе. Из табл.2 видно, что траектория 5, соответствующая первой точке переключения на шаге 12, пересекает оптимальную траекторию 4 на 206 шаге итерационной процедуры, в то время как полное число шагов этой оптимальной траектории равно 1043, как видно из табл. 1. Это означает, что для уверенной идентификации оптимальной траектории 4, как лежащей ниже всех прочих, необходимо пройти по ней 206 шагов, при этом сравнивая ее с соседней траекторией, что составляет менее 20% полного времени квазиоптимальной стратегии, т.е. потери времени, вызванные необходимостью идентификации оптимальной точки переключения управляющего вектора, составляют менее 20%. Можно отметить, что траектория номер 6 пересекает оптимальную траекторию 4 на шаге 157, а траектория 7 пересекает оптимальную на шаге 127, т.е. если анализировать сразу несколько соседних траекторий, что возможно например при параллельных вычислениях, то выявить оптимальную траекторию можно на более ранних шагах. Например, траектория 7 пересекает траекторию 6 на итерационном шаге 112, что составляет менее 11% полного времени квазиоптимальной

стратегии. Наличие хотя бы одного пересечения подобных траекторий свидетельствует о том, что текущая точка переключения управляющего вектора находится за оптимальной, что в свою очередь является идентификатором оптимальной точки переключения.

4. Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующий вывод: поведение временной производной функции Ляпунова процесса проектирования и анализ процедуры оптимизации в координатах $V(t) - \dot{V}(t)$ позволяют идентифицировать оптимальную точку (оптимальные точки) переключения управляющего вектора U , т.е. его структуру. Дополнительные операции и дополнительное время, необходимые для поиска оптимальной структуры управляющего вектора, не являются чрезмерными и составляют незначительную часть от времени проектирования, соответствующего квазиоптимальной стратегии. Таким образом, характеристики квазиоптимального алгоритма проектирования приближаются к характеристикам квазиоптимальной стратегии проектирования. Основным элементом квазиоптимальной стратегии проектирования, т.е. необходимой структурой управляющего вектора, может быть выявлен на ранней стадии процесса оптимизации цепи с незначительными потерями машинного времени.

Список литературы: 1. *Каширский И.С., Трохименко Я.К.* Обобщенная оптимизация электронных схем. Киев: Техника, 1979. 2. *Rizzoli V., Costanzo A., Cecchetti C.* Numerical optimization of broadband nonlinear microwave circuits // IEEE MTT-S Int. Symp. 1990. Vol. 1. P. 335-338. 3. *Ochotta E.S., Rutenbar R.A., Carley L.R.* Synthesis of high-performance analog circuits in ASTRX/OBLX // IEEE Trans. on CAD. 1996. Vol. 15, № 3. P. 273-294. 4. *Zemliak A.M.* Analog system design problem formulation by optimum control theory // IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2001. Vol. E84-A, № 8. P. 2029-2041. 5. *Земляк А. М.* Проектирование аналоговых цепей методами теории управления. I. Теория // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 2004. Т. 47, № 5. С. 18–28. 6. *Земляк А. М.* Проектирование аналоговой системы как управляемый динамический процесс // Нелинейный мир. 2006. № 11. С. 609–618. 7. *Земляк А. М.* Анализ динамических характеристик процесса проектирования аналоговых цепей // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 2007. Т. 50, № 11. С. 26–35. 8. *Барбашин Е. А.* Введение в теорию устойчивости. М.: Наука, 1967. 9. *Rouche N., Habets P., Laloy M.* Stability Theory by Liapunov's Direct Method. N.Y.: Springer-Verlag, 1977. 10. *Massobrio G., Antognetti P.* Semiconductor Device Modeling with SPICE. N.Y.: Mc. Graw-Hill, Inc., 1993.

Поступила в редколлегию 12.03.2012

Земляк Александр Михайлович, канд. техн. наук, доцент Физико-технического института, Национальный технический университет Украины «КПИ». Научные интересы: анализ и проектирование ВЧ и СВЧ электронных цепей, моделирование, анализ и оптимизация СВЧ приборов, оптимальное проектирование электронных систем. Адрес: Украина, 03056, Киев, пр. Перемоги, 37, корп. 11, тел. +038 044 4068104. E-mail: azemliak@mail.ru.

МЕТОД УСКОРЕННОЙ КОРРЕКЦИИ SPT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Предлагается модификация алгоритма D'Esopo-Pape с применением метода трансформации статических SPT алгоритмов в динамические. Отличительной особенностью данного метода является поддержка специальных структур данных для коррекции текущих значений длин маршрутов. Описываются зависимости числа операций сравнения от количества вершин графа для статических и динамических алгоритмов. Приводится краткий анализ полученных результатов.

1. Введение

В современной телекоммуникационной индустрии существует множество транспортных проблем, в частности проблем маршрутизации [1-3]. Загрузка и пропускная способность линий связи современных компьютерных сетей динамически меняются, что, в свою очередь, может приводить к относительно частой рассылке служебной информации об изменении маршрутов. Традиционно применяемые методы маршрутизации оказываются неэффективными. Изменения характеристик каналов связи, модификация структуры сети, включение в нее новых узлов и линий связи приводят к полному пересчету таблиц маршрутизации. Когда топология сети в области маршрутизации изменяется (например, происходит отказ канала или изменяется его стоимость), каждый маршрутизатор области уведомляется об изменении. После модификации базы данных состояния каналов каждый маршрутизатор повторно вычисляет свой SPT. В современных маршрутизаторах пересчет вызывает удаление текущего SPT с повторным его построением с помощью алгоритма поиска кратчайших путей, например алгоритма Дейкстры [4].

Разработка новых, более эффективных алгоритмов поиска кратчайших путей позволяет повысить быстродействие современных компьютерных сетей. Под ускоренной маршрутизацией понимается метод поиска оптимальных маршрутов для передачи пакетов данных от узла-отправителя к узлу-получателю в условиях динамически изменяющейся структуры сети и характеристик линий связи, позволяющий сократить трудоемкость построения таблиц маршрутизации путем частичного изменения дерева кратчайших путей с помощью дополнительной информации о конфигурации сети [5].

Цель исследования. Преобразование статических SPT алгоритмов с организацией очередей в виде связанных списков в динамические в целях снижения алгоритмической сложности путем использования доступной информации в SPT [6].

2. Метод преобразования алгоритмов

Пусть $G = (V, E)$ есть ориентированный граф, где V – набор узлов, а E – набор ребер в графе. Пусть N – общее количество узлов в V и E – общее количество ребер в E . Граф G состоит из корневого узла n_0 и всех других узлов n_1, \dots, n_{N-1} , доступных из корневого узла по ориентированным дугам в G . Каждое ребро e_i ($i = 0, \dots, E-1$) имеет положительный вес ω_i .

Для каждой дуги $e \in E$, пусть $W(e)$ обозначает вес, ассоциированный с e , а $S(e)$ и $E(e)$ обозначают начальный и конечный узел ребра e . Пусть дан ряд узлов $N \subseteq V$, который ассоциируется с двумя наборами ребер графа: $I(N) = \{e \in E \mid E(e) \in N\}$ (набор ребер направленных в узлы N) и $O(N) = \{e \in E \mid S(e) \in N\}$ (набор ребер направленных из узлов N). Пусть n_0 определяет корневой узел SPT.

Древовидная структура данных T поддерживается алгоритмом для того, чтобы следить за существующим деревом кратчайших путей. Пусть каждый узел графа G , наряду с его родительским атрибутом $P(n, T)$, имеет список потомков $C(n, T)$, а также атрибут расстояния. Структура данных T изменяется прогрессивно в течение вычисления, и когда работа алгоритма завершена, представляет собой SPT.

В дополнение к структуре данных T алгоритм также поддерживает связанный список Q , который временно содержит подмножество узлов вместе с двумя признаками. Каждый элемент Q имеет форму $\{n, (x, D)\}$, где x определяет потенциального родителя для узла n , а D определяет потенциальное расстояние к узлу n .

В случае смены родительского атрибута узла n процедура $B_{\text{par}}(n, T)$ переносит n из списка потомков родительского узла в соответствующий список потомков, а также производит коррекцию атрибута $P(n, T)$.

Инструкция $\text{EXTRACT}(Q)$ выбирает первый (верхний) элемент и удаляет его из очереди. Вспомогательная процедура $B_{\text{child}}(n, T)$ находит множество узлов (включая n), которые являются потомками n . Это множество можно легко вычислить, спускаясь непосредственно вниз по T .

3. Спецификация алгоритма

Шаг 1: Инициализация

(A) Статическая версия

$\forall (n \in V) \neq \text{root}(G)$

$P(n, T) \leftarrow (O)$

$D(n, T) \leftarrow \text{MaxInt}$

$C(n, T) \leftarrow (O)$

$\text{ENQUEUE}(Q\{\text{root}(G), (O, D)\})$

Go To Step 2

(B) Динамическая версия (при наличии старого SPT)

$\forall e_i \in \mathcal{E}^+ \text{ or } \mathcal{E}^-$

$N \leftarrow \emptyset$

$W(e_i) \leftarrow W(e_i) + \Delta_i$ (Ребро e_i изменяет свой вес на Δ_i):

if $S(e_i) = P(E(e_i), T)$

$N \leftarrow B_{\text{child}}(E(e_i), T)$

$\forall n \in N$

$D(n, T) = D(n, T) + \Delta_i$

Случай 1 (Ребро $e_i \in \mathcal{E}^-$ уменьшает свой вес на Δ_i):

$\text{ENQUEUE}(Q\{E(e), (S(e), D)\})$

Случай 2 (Ребро $e_i \in \mathcal{E}^+$ увеличивает свой вес на Δ_i):

$\forall e \in I(N)$

if $D(E(e), T) > D(S(e), T) + W(e)$

$D(E(e), T) = D(S(e), T) + W(e)$

$B_{\text{par}}(E(e), T)$

$\text{ENQUEUE}(Q\{E(e), (S(e), D)\})$

else

if $D(E(e_i), T) > D(S(e_i), T) + W(e_i)$

$B_{\text{par}}(E(e_i), T)$

$N \leftarrow B_{\text{child}}(E(e_i), T)$

$\forall n \in N$

$D(n, T) = D(n, T) + W(e)$

$\text{ENQUEUE}(Q\{E(e), (S(e), D)\})$

Go To Step 2

Шаг 2: Извлечение вершины

if $Q = \emptyset$

Terminate

else

$\{y, (x, D)\} \leftarrow \text{EXTRACT}(Q)$

Шаг 3: Обновление расстояний

$\forall e \in O(y)$

if $D(E(e), T) > D(y, T) + W(e)$

$D(E(e), T) = D(y, T) + W(e)$

$V_{\text{par}}(E(e), T)$

$D(n, T) = D(S(e), T) + W(e)$

$\text{ENQUEUE}(Q\{E(e), y, D\})$

Go To Step 2

В начале работы алгоритма происходит инициализация начальных установок для статической версии алгоритма, а также корректируются значения атрибутов затронутых изменениями весов ребер графа узлов для динамической версии. Предполагается, что в существующем SPT все узлы имеют родительский атрибут $P(n, T)$, имеют список потомков $C(n, T)$, а также атрибут расстояния $D(n, T)$.

В случае изменения веса ребра первоначально производится проверка на принадлежность ребра существующему SPT. Если условие выполняется, то выбирается узел $E(e_i)$ и все его потомки в существующем SPT. Все такие узлы включаются процедурой $V_{\text{child}}(n, T)$ в множество N для дальнейшего обновления их расстояний.

Случай 1 (вес ребра уменьшается). Узел – предок и все его потомки в старом SPT помещаются с помощью инструкции ENQUEUE в очередь для последующей обработки.

Случай 2 (вес ребра увеличивается). В этом случае для каждого ребра e , направленного в узел n , принадлежащий множеству N , производится сравнение текущего атрибута расстояния $D(n, T)$ с потенциально возможным расстоянием через $S(e_i)$. В случае, если потенциально возможное расстояние имеет меньшее значение чем $D(n, T)$, происходит коррекция атрибута $D(n, T)$, узел n удаляется из списка потомков $P(n, T)$ и добавляется к списку потомков $S(e)$. Также изменяется родительский атрибут $P(n, T)$ на $S(e)$:

$C(S(e_i), T) \leftarrow C(S(e_i), T) + \{E(e_i)\}$

$C(P(E(e_i), T), T) \leftarrow C(P(E(e_i), T), T) - \{E(e_i)\}$

$P(E(e_i), T) \leftarrow S(e_i)$

В дальнейшем выполняется инструкция ENQUEUE.

Если ребро, изменившее свой вес, не принадлежит существующему SPT, то производится сравнение текущего атрибута расстояния $D(n, T)$ с потенциально возможным расстоянием через $S(e_i)$. При необходимости производится коррекция родительского атрибута с помощью процедуры $V_{\text{par}}(n, T)$, выполняется процедура $V_{\text{child}}(n, T)$ и множество найденных потомков N помещается в очередь.

После шага инициализации на шаге 2 из списка Q извлекается первый элемент. Как было замечено ранее, формирование связанного списка Q происходит в соответствии с используемым статическим алгоритмом.

На шаге 3 рассматривается каждый узел $E(e_i)$, который присоединен к ребру e_i , направленному из узла y . Если потенциально новое расстояние $E(e_i)$ (которое является равным $W(e_i)$ плюс расстояние $D(y, T)$) является меньшим чем его старое значение, то происходит соответствующее корректирование атрибутов и $E(e_i)$ ставится в очередь в

список Q. После того, как этот шаг закончен, выполнение шагов 2 и 3 повторяется до тех пор, пока список Q не будет пуст.

Приведенный выше алгоритм использует трансформацию статических алгоритмов в динамические. Для дальнейшего снижения вычислительных затрат вводится обновление текущих кратчайших расстояний узлов – потомков на шаге 3с помощью процедуры

```

Bchild(n, T):
  ∀e ∈ O(y)
  if D(E(e), T) > D(y, T) + W(e)
  D(E(e), T) = D(y, T) + W(e)
  Bpar(E(e), T)
  N ← Bchild(E(e), T)
  ∀n ∈ N
  D(n, T) = D(S(e), T) + W(e)
  ENQUEUE(Q{E(e), y, D})
  Go To Step 2
  
```

В зависимости от реализуемого алгоритма очередь Q имеет различную организацию. В случае алгоритма Дейкстры организуется отсортированный связанный список. В случае алгоритма Беллмана-Форда каждый новый элемент помещается в конец очереди. Согласно D'Esopo-Pape новый элемент также помещается в конец очереди. Если n уже присутствует в очереди, то новые атрибуты заменяют старые. Если же узел уже ранее бывал в очереди, то помещается в начало связанного списка. Для модифицированного D'Esopo-Pape поддерживается два списка, с новыми элементами и уже ранее рассматриваемыми узлами.

4. Методика моделирования и анализ полученных результатов

Было проведено экспериментальное моделирование для подтверждения теоретических выкладок, изложенных выше, проверки эффективности предложенного метода преобразования статических алгоритмов поиска кратчайших путей на графах в динамические, а также для сравнительного анализа работы алгоритмов с точки зрения количества операций сравнения.

В ходе проведенного моделирования производилась генерация графов со случайной топологией в диапазоне числа вершин от 100 до 2000 с шагом в 100 вершин по методике, указанной в [5,6]. Средняя степень вершин составляла 10. Веса ребер графа устанавливались равными евклидовому расстоянию между вершинами.

Для каждого значения числа вершин графа генерировалось 50 различных топологий. Для статических алгоритмов на графе 300 раз случайным образом выбиралась начальная вершина. Для динамических версий алгоритмов по каждой топологии графа 300 раз случайным образом менялись наборы весов ребер (число ребер, одновременно меняющих свой вес, находилось в интервале 5–30).

На рис. 1 показаны полученные зависимости числа операций сравнения от количества вершин графа для статических алгоритмов.

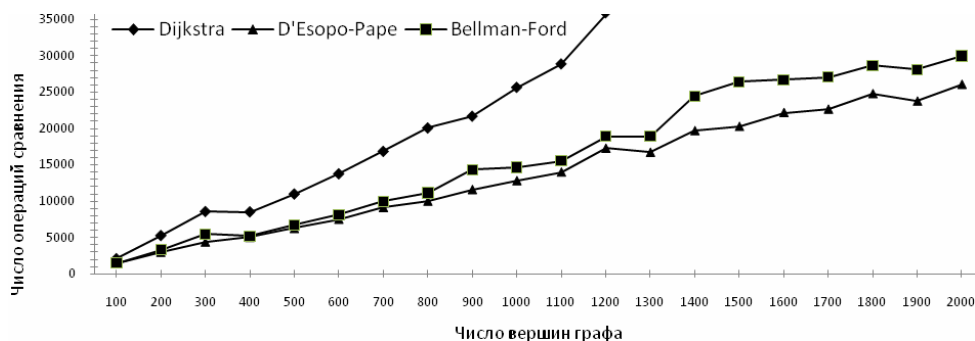


Рис. 1. Трудоемкость статических алгоритмов

Из графиков, приведенных на рис.1, следует, что алгоритмы Беллмана-Форда и D'Esopo-Pape, имеющие большую асимптотическую сложность, на практике работают намного эффективнее алгоритма Дейкстры, что связано с проведением моделирования на разреженных графах. Полученные результаты указывают на то, что D'Esopo-Pape имеет явные преимущества перед алгоритмами Беллмана-Форда и Дейкстры.

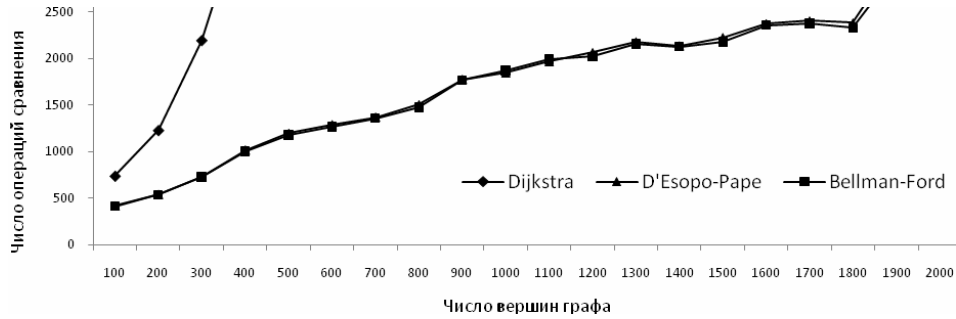


Рис. 2. Трудоемкость динамических алгоритмов при изменяющейся топологии графа

В случае изменения состояния связей (весов ребер графа), как и ожидалось, за счет поддержки древовидной структуры T происходит локализация областей графа, для которых требуется повторное построение SPT. Стоит обратить внимание на то, что данный подход позволяет добиться значительного снижения алгоритмической сложности (рис. 2). Кроме того, в отличие от статических алгоритмов, предложенный метод приводит к динамическим алгоритмам с сублинейной сложностью относительно размера сети.

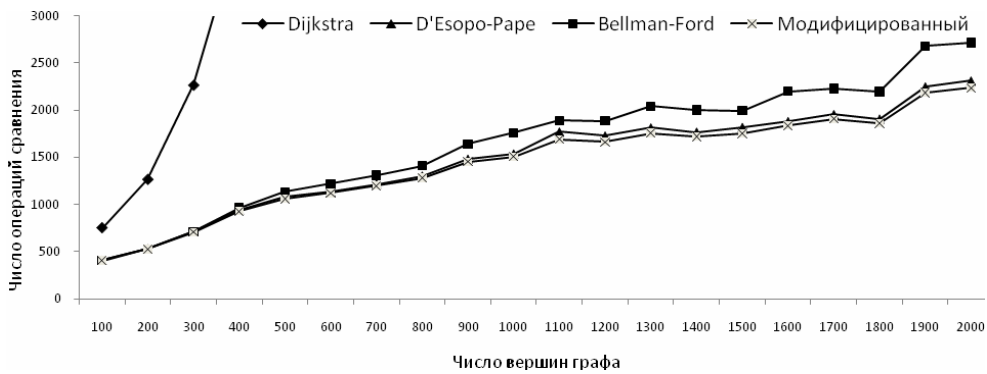


Рис. 3. Трудоемкость динамических алгоритмов при дополнительном обновлении процедурой $V_{child}(n, T)$

Как видно на рис. 3, использование дополнительного обновления текущих длин кратчайших путей на шаге 3 для узлов – потомков позволяет дополнительно снизить вычислительные затраты алгоритмов D'Esopo-Pape и Беллмана-Форда.

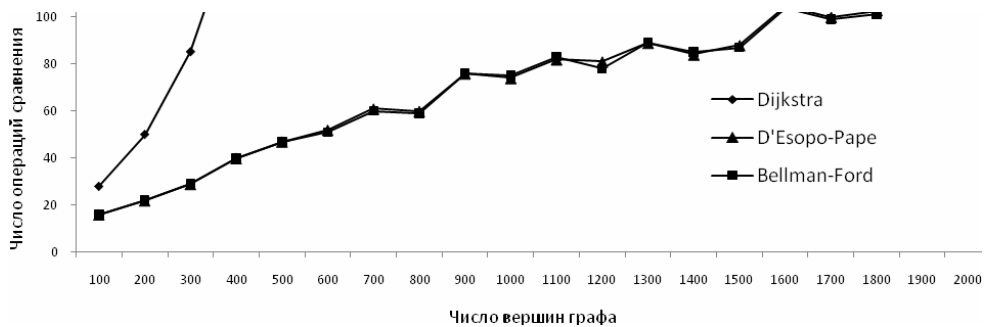


Рис. 4. Число операций сравнения на одно изменение ребра графа

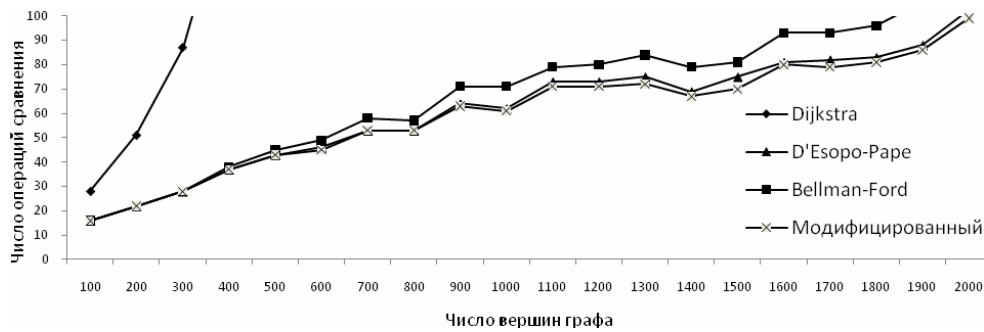


Рис.5. Число операций сравнения на одно изменение ребра графа с процедурой $V_{child}(n, T)$

На рис. 4 и 5 представлены зависимости среднего числа операций сравнения на одно изменение ребра графа для методов трансформации и дополнительного обновления соответственно.

5. Заключение

Научная новизна. Для преобразования статических версий SPT алгоритмов в динамические предложен метод, позволяющий добиться значительного снижения алгоритмической сложности. Приведенные иллюстрации показывают существенное сокращение вычислительных затрат при использовании динамических версий алгоритмов.

Практическое значение. Проведенный сравнительный анализ результатов моделирования для различных размерностей графов позволяет сделать вывод о том, что предложенные методы обновления текущих расстояний к узлам для случаев локальных изменений топологии графа позволяют добиться значительного эффекта экономии вычислительных ресурсов.

Список литературы: 1. *Narvaez P., Kai-Yeung Siu, Hong-Yi Tzeng.* New Dynamic SPT Algorithm Based on a Ball-and-String Model. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, Vol. 9, DECEMBER 2001. NO. 6. P. 706-718. 2. *T. Cormen, C. Leiserson, and R. Rivest.* Introduction to Algorithms.//Cambridge, MA: The MIT Press, 2001. 3. *R. Perlman, G. Varghese.* "Pitfalls in the design of distributed routing algorithms," in *Proc. SIGCOMM*, vol. Aug., 1988. P. 43-54. 4. *E. Dijkstra,* "A note two problems in connection with graphs." Numerical Mathemat. 1959. Vol. 1. P. 269-271. 5. *Завизистун Ю.Ю., Партыка С.А.* Метод преобразования статических SPT алгоритмов в динамические//АСУ и приборы автоматки. Вып. №153. Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки, 2010. Вып. 153. С.69-73. 6. *Завизистун Ю.Ю., Партыка С.А.* Метод снижения алгоритмической сложности динамического SPT алгоритма // Вестник ХНТУ. 2011. №2(41). С. 318-322.

Поступила в редколлегию 06.03.2012

Партыка Станислав Александрович, ассистент кафедры ЭВМ ХНУРЭ. Научные интересы: компьютерные сети, математическое моделирование. Увлечения: путешествия, туризм. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 80577021354. E-mail: stas_partyka@mail.ru

TLM-МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОРА АНАЛИЗА ЛОГИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ

Предлагается TLM-модель спецпроцессора, ориентированные на повышение быстродействия анализа логических отношений за счет аппаратной реализации векторных операций. Дается пример анализа прилагательных для образования словоформ в целях построения правильных языковых конструкций русского языка. Спецпроцессор реализован в качестве функционального блока цифровой системы в кристалле FPGA.

Введение

Увеличение функциональной сложности и частоты процессора требует больших затрат энергопотребления, времени проектирования, а также высокой стоимости реализации цифровых систем. Компромиссным решением может быть стратегия проектирования, связанная с делением задач между несколькими ядрами процессора, процессорами, что приводит к созданию параллельных систем, использующих взаимосвязанную совокупность специализированных вычислителей. Такие структуры позволяют повысить производительность решения вычислительных задач, а также уменьшить энергопотребление и стоимость аппаратной реализации цифровых систем.

Особый интерес со стороны рынка электронных технологий вызывают научно-технические направления формализации мыслительной деятельности человека для создания компонентов искусственного интеллекта. Такие интеллектуальные средства, как экспертные системы, распознавание образов и принятия решений нуждаются в гетерогенном подходе при создании эффективных и быстродействующих двигателей (мульти- или специализированных процессоров). Характерным примером предметной области, для которой необходим специализированный процессор, служит анализ и синтез естественных языковых конструкций. При этом одним из центральных моментов проектирования текстовых процессоров является отображение взаимосвязей компонентов, существующих при синтезе и анализе языковых конструкций, в соответствующую аппаратную реализацию.

Цель – разработка TLM-модели спецпроцессора для аппаратной реализации векторных операций.

Задачи:

1. Анализ публикаций в области проектирования специализированных логических процессоров [1-4].
2. Анализ синтаксических и семантических моделей обработки текстов, реализованных на естественных языках [5-6].
3. Разработка архитектуры специализированного процессора для обработки логической сети анализа языковых конструкций [6].
4. Аппаратная имплементация TLM-модели грамматического анализа имен прилагательных.

В качестве прототипа разработки используется, реализовано в FPGA, специализированное устройство, которое выполняло грамматический анализ имен прилагательных [6]. Предлагаемая ниже модель обладает универсальностью и позволяет обрабатывать любые логические сети синтаксических и семантических отношений. Применение TLM-моделей и методов проектирования позволило сделать акцент на порядке обработки и передачи данных, уйти от несущественных деталей RTL-уровня для сокращения средств проектирования.

1. TLM-модели функциональных модулей цифровых систем на кристаллах

Современные технологии проектирования требуют применения более абстрактных, по сравнению с RTL, моделей описания поведения устройств. Этим условиям удовлетворяют структуры уровня транзакций или TLM-модели, которые оперируют понятиями передачи

данных между подсистемами SoC. На протяжении всего цикла проектирования SoC TLM обслуживает три стратегии: ранняя разработка программного обеспечения, архитектурный анализ, функциональная верификация. В совокупности они позволяют существенно повысить производительность средств моделирования и уменьшить время моделирования системы.

Практически полезная классификация моделей, разработанная Данном Гайски (Dan Gajski) и Луцием Каем (Lucia Cai), была представлена на конференции CODES (HW/SW Co-design Conference) в 2003 г. [1]. Согласно этой классификации основной концепцией процесса проектирования является независимая разработка средств коммуникации и функциональных блоков (подсистем). При этом при описании коммуникаций и функциональностей становится инвариантным по отношению к понятию времени (un-timed - UT). Кроме того, может использоваться аппроксимированное время (approximately-timed - AT) или синхронизированное модельное время (cycle-timed - CT)(рис. 1).

На одном полюсе такой классификации находится модель регистровой передачи данных (RTL), которая описывает коммуникации и функционирование системы по тактам. На другом - системная архитектурная модель (SAM), в которой вообще не используется понятие времени при представлении коммуникаций и функций. В зависимости от требований к системе модель с аппроксимированным временем может применять статистическую оценку, расчетное время или основываться на временных параметрах подсистем.

Модель с потактовым описанием коммуникаций и аппроксимированной оценкой времени для блоков называется функциональной моделью шины (Bus Functional Model - BFM). Три остальные модели в классификации авторов получили названия:

1. Модель объединения компонентов – коммуникации без использования времени, функциональность с аппроксимированным временем.
2. Модель арбитража шины - коммуникации с аппроксимированным временем, функциональность с аппроксимированным временем.
3. Вычисления с точным временем - коммуникации с аппроксимированным временем, функциональность с точностью до такта.

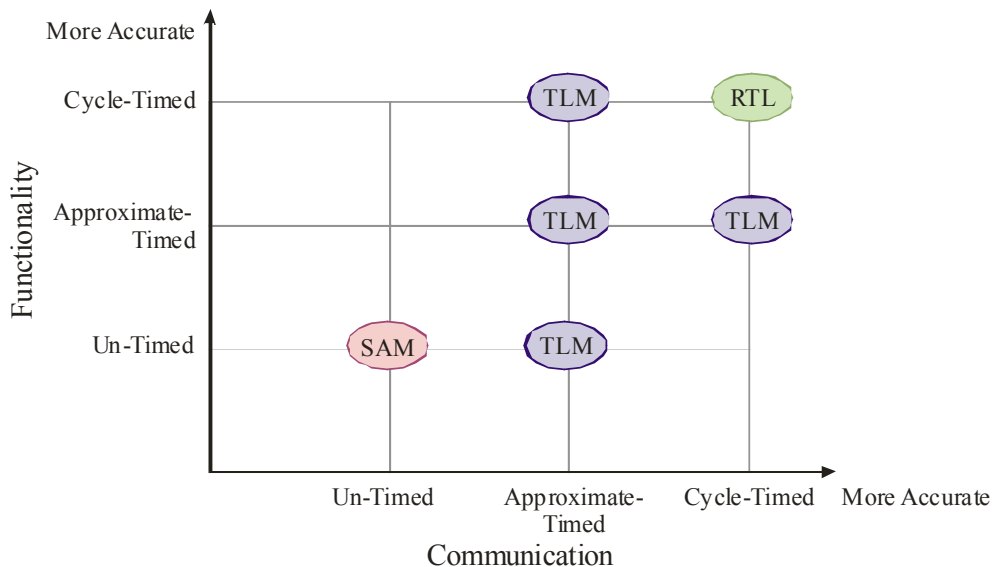


Рис. 1. Классификация моделей цифровых систем

Использование TLM для оценки возможностей SoC позволяет проектировщику выполнить начальный анализ системы до проектирования RTL или более точный анализ, имеющий место в описании временных параметров моделей. Ранняя оценка архитектуры и функциональности устройства дает возможность верифицировать реальное программное обеспечение на уровне TLM, до появления RTL-структуры, что позволяет уже на этих этапах выполнять существенную корректировку функциональных модулей hardware и software.

Для функциональной верификации системного уровня традиционно использовалось времязатратное моделирование Verilog или VHDL архитектур, в том числе и с применением стратегии эмуляции. По мере увеличения сложности проектируемых систем их обработка с помощью языков-симуляторов Verilog и VHDL существенно замедляет процесс проектирования. Поэтому моделирование уровня транзакций является решением задачи повышения быстродействия верификации.

Кроме того, использование классов в аппаратных языках дает возможность повысить производительность ручного построения моделей путем применения объектно-ориентированных методов.

2. Модель спецпроцессора обработки логических отношений

Спецпроцессор предназначен для обработки логической сети, где вершинами выступают множества признаков A, B, C (рис. 2,а), а дугами – функциональные отношения между признаками, заданные в табличной форме. Например, это могут быть отношения между признаками словоформ «ударность» - «тип основы» из логической сети прилагательных [6] (рис. 2,б), где множества $U = \{б, у\}$, $U1 = \{ветхий, куцый, синий, седой, слабый, сухой, рыжий\}$, а функциональное отношение между ними представлено двоичной таблицей:

	ветхий	куцый	синий	седой	слабый	сухой	рыжий
б	1	1	1	0	1	0	1
у	0	0	0	1	0	1	0

Структура специализированного спецпроцессора представлена на рис. 2,в и состоит из трех основных блоков: управляющего (Control), логического (LE) и блока памяти (Mem). В свою очередь, память включает блоки хранения команд (CM – command memory); функций (FM – function memory), множеств (SM – set memory).

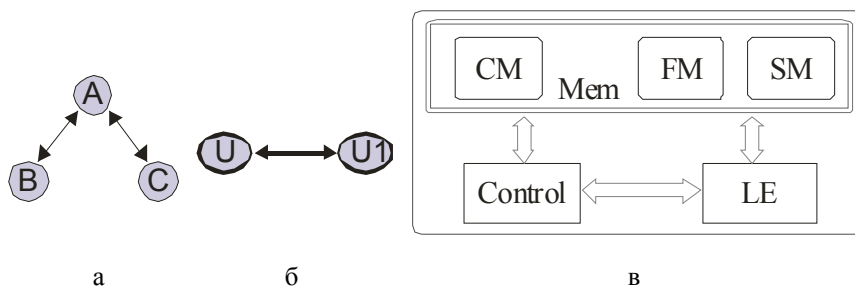


Рис. 2. Блок-схема спецпроцессора

Преимуществом предлагаемой архитектуры спецпроцессора является то, что он может обрабатывать логические сети любой размерности и не зависит от длины векторов множеств и размеров таблиц отношений. Ограничения связаны только физическими размерами памяти.

Логический блок принимает данные порциями фиксированного размера. Если таблица отношений или векторы множеств имеют большую длину, то они разбиваются на части. Таким образом, обработка всей таблицы отношений выполняется путем скроллинга данных с помощью окна (рис. 3), размер которого определяется разрядностью шины, передающей данные между памятью и логическим блоком. Обход таблицы начинается с левого верхнего угла и продолжается вправо вниз. Количество операций для реализации отношения при размерности окна обхода равной $N \times M$ определяется формулой $N_R = N_n \cdot N_m$. Каждая таблица отношений, поделенная на блоки в соответствии с размерностью окна обхода, записывается в память в форме одномерного вектора. Аналогично выполняется разбиение векторов множеств на отдельные слова памяти, при этом множества записываются в память фрагментами-словами (рис. 4). Два блока памяти, выделенных для хранения множеств и функций, дают возможность считывать за один такт фрагменты таблицы отношений и векторов множеств в целях последующего выполнения над ними элементарных логических операций.

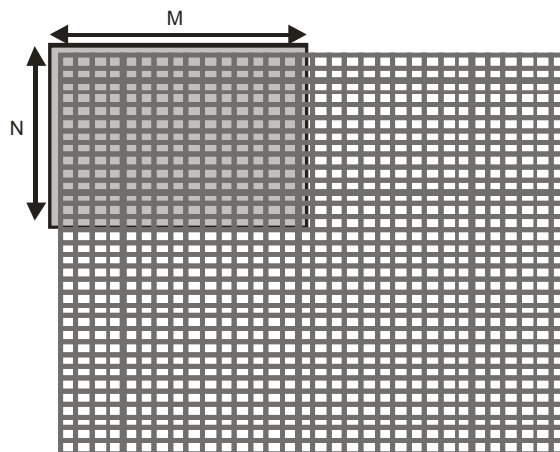


Рис. 3. Принцип обработки матрицы отношений

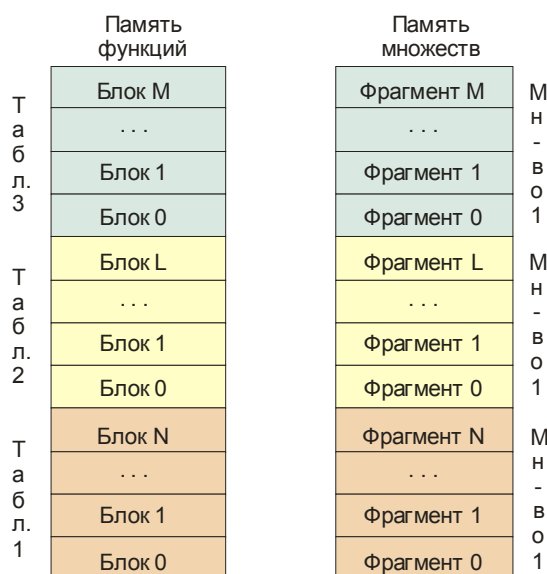


Рис. 4. Хранение информации о логической сети в памяти

Например, при окне обхода размерностью 4x4 таблица функции отношений «Окончание» – «классы окончаний» (x-y) логической сети анализа прилагательных [6] будет разбиваться на 28 блоков, как это показано на рис.5. Это означает, что для ее обработки потребуется выполнить 28 элементарных операций, составляющих цикл обработки таблицы.

Далее рассматривается анализ отношения между формами слов «ударность» - «тип основы». Пусть тип основы описывается множеством $R1 = \{ \text{ветхий, куцый, слабый, сухой, рыжий} \}$, а ударность – множеством $R2 = \{ \text{б} \}$. В блоке памяти множеств будет храниться двоичный вектор, соответствующий множеству признаков, где 1 означает присутствие элемента, а 0 – его отсутствие. Тогда при окне обхода размерностью 4x4 и учитывая, что длина векторов R1 и R2 равна 7 и 2 элементам, соответственно, вектор R1 будет занимать два слова памяти $R1 \mid 1 \mid 1 \mid 0 \mid 0 \mid 1 \mid 1 \mid 1 \mid \dots$, а вектор R2 – одно $R2 \mid 1 \mid 0 \mid \dots$. Для хранения системы отношений в пределах одной таблицы необходимо два слова памяти разрядностью 16 битов – таблица разбивается на два блока:

	ветхий	куцый	синий	седой	слабый	сухой	рыжий	
б	1	1	1	0	1	0	1	
у	0	0	0	1	0	1	0	
	1				2			

	ая	ого	ой	ое	ом	ому	ою	ую	ый	ые	ым	ыми	ых			
ого	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ому	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
ом	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
ое	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ой	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ою	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
его	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ему	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
ем	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
ее	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ей	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ею	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
ую	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0			
ая	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ым	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
ый	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0			
ые	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0			
ых	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
ыми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
им	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
ий	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0			
ие	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0			
их	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
ими	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
юю	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0			
яя	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

Рис. 5. Система отношений для множеств «Окончание» и «Классы окончаний»

Карта памяти для хранения векторов и множеств рассмотренного выше примера представлена на рис 6. Память команд имеет следующий формат слова данных:

size_W	size_H	addr_R0	addr_R1	addr_R2
--------	--------	---------	---------	---------

где size_W и size_H задают размер таблицы отношений, а addr_R0, addr_R1, addr_R2 – начальные адреса данных. Для представленного выше примера и согласно рис. 6 команда будет иметь вид

2	7	0	0	2
---	---	---	---	---

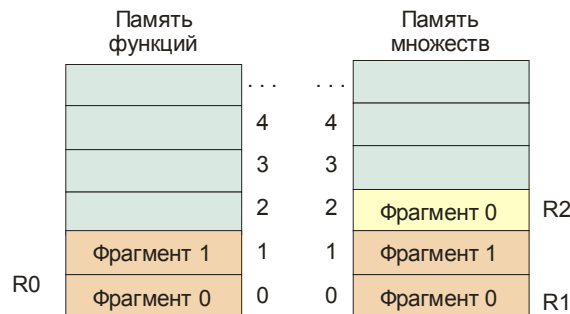


Рис. 6. Память для хранения данных об отношении «ударность» - «тип основы»

3. Создание TLM-модели процессора обработки логических отношений

По классификации [1] предлагаемая TLM-модель спецпроцессора имеет аппроксимированное время для передачи данных (для коммуникаций) и для внутренней работы блоков (функций) и, следовательно, является моделью с арбитражем шины.

Для разработки модели спецпроцессора был применен объектно-ориентированный подход. Отдельные блоки устройства описываются в виде классов, для связи между блоками используется виртуальный интерфейс. В процессе дальнейшего проектирования классы по отдельности могут быть заменены описанием RTL-уровня, а виртуальный интерфейс - обычным.

Для разработки TLM-модели используются объектно-ориентированные средства языка описания и верификации аппаратуры SystemVerilog. Структура классов представлена рис. 7.

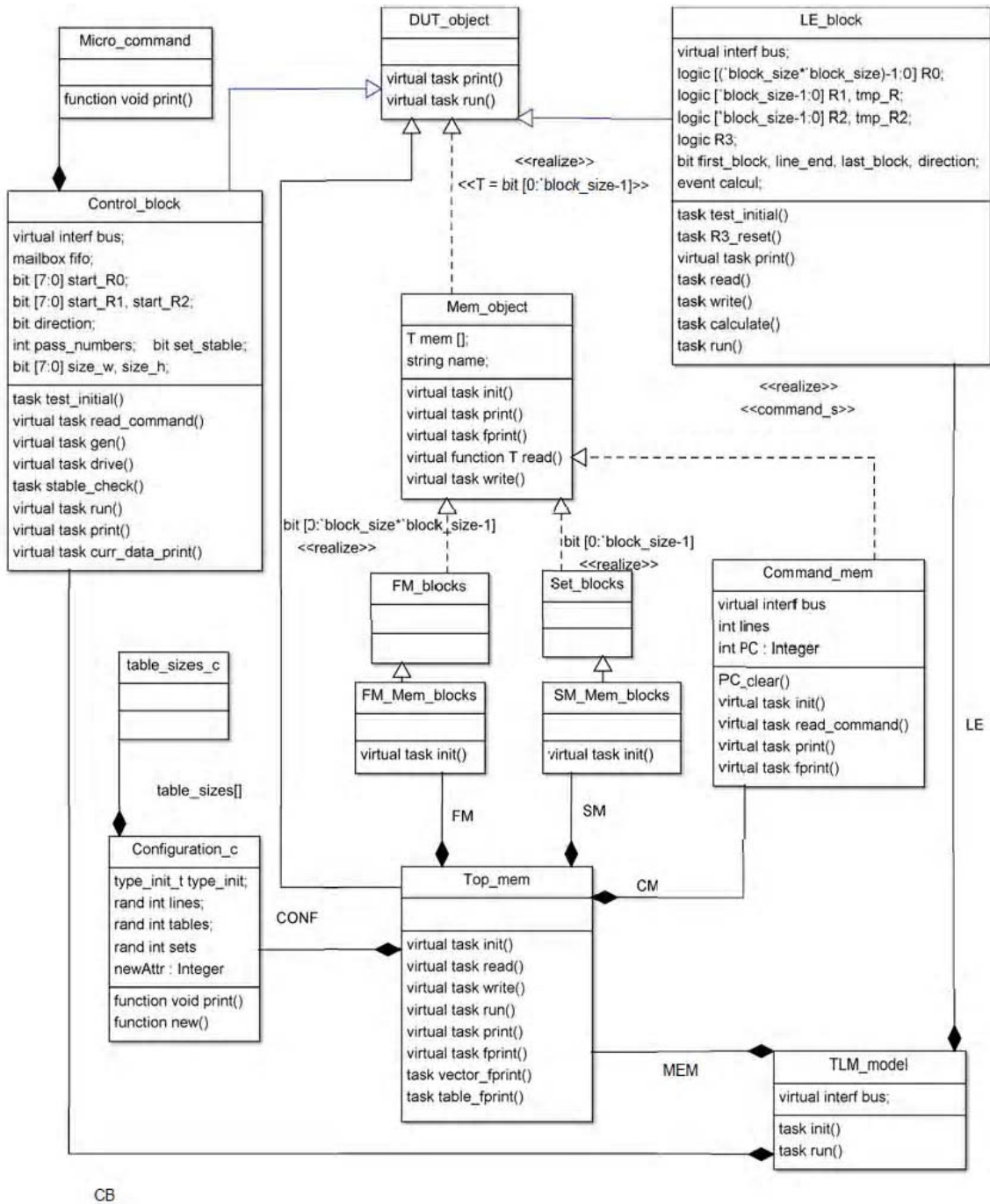


Рис.7. Структура классов

Класс TLM_model включает экземпляры объектов трех классов: Control_block, LE_block, Top_mem, которые соответствуют трем блокам структурной схемы устройства: управляющему (Control), логическому (LE) и блоку памяти (Mem) (см. рис. 2).

Базовым классом, от которого наследуются все остальные классы компонентов, является класс DUT_object. Класс Configuration предназначен для управления генерацией псевдослучайных тестовых данных, применяемых для отладки системы.

Класс Micro_command используется для представления команд процессора. Память строится на основе класса-шаблона Mem_object, который параметризуется типом дан-

ных T. Изменение типа данных при создании класса наследника позволяют создавать модели памяти различной конфигурации для создания трех блоков памяти модели спецпроцессора.

В классах, описывающих память, реализованы методы: инициализации исходного состояния экземпляра класса (read и write); вывода данных в консоль (print) и вывода данных в текстовый файл (fprint); запуска работы объекта. Кроме названных методов управляющий блок, представленный классом control_block, имеет также: чтение команды (read_command), генерация последовательности управляющих сигналов для памяти и логического блока (gen), передача управляющих сигналов в интерфейс (drive). Функция stable_check() проверяет момент завершения работы обработки сети.

Экземпляр класса TLM_model реализуется в модуле Top (листинг 1), который также подключает интерфейс bus, моделирующий работу шины специализированного процессора. SystemVerilog – код интерфейса представлен листингом 2. Он содержит поля для передачи данных, а также события, синхронизирующие работу отдельных блоков системы.

Листинг 1. Модуль верхнего уровня, реализующий TLM-модель устройства

```
Top.sv
#include "TLM_model.sv"
module Top;
//Interface
interf bus();
//Testbench(Memories)
TLM_model TLM;
initial begin
    TLM=new(bus);
    TLM.init();
    TLM.run();
end
endmodule
```

Листинг 2. SystemVerilog код интерфейса

```
interface interf;
    bit clk = 0;
    initial forever #5 clk = ~clk;
    //command
    event command_request;
    event command_resp;
    event PC_clear_e;
    event pass_end; // pass all commands
    event work_stop; //
    bit [7:0] size_r1, size_r2;
    bit [7:0] start_R0, start_R1, start_R2;
    clocking cb@(posedge clk);
    // output size_r1, size_r2;
    // output start_R0, start_R1, start_R2;
endclocking: cb
    always @(pass_end)
        $display("I pass command memmory have finished");
    // memmory
    event data_read, data_send, pass_start;
    bit [7:0] addr_R0, addr_R1, addr_R2;
    bit first_block, line_end, last_block, direction;
    logic [('block_size*'block_size)-1:0] R0;
    logic ['block_size-1:0] R1;
    logic ['block_size-1:0] R2;
    bit R3;
    event data_write;
    bit [7:0] addr_R2_w;
    logic ['block_size-1:0] R2_w;
    // stop
    event simul_finish;
endinterface
```

4. Выводы

Научная новизна. Разработана TLM-модель спецпроцессора для логического анализа имен прилагательных. Модель позволяет имплементировать в аппаратуру любой граф логических отношений анализа конструкций естественного языка. Данное устройство требует больше времени на обработку системы, чем представленное ранее [6], однако превосходит его в универсальности.

Для уменьшения времени проектирования функциональных модулей были использованы технологии объектно-ориентированного программирования языка SystemVerilog для создания модели TLM-уровня. Современный подход к разработке цифровых систем позволил существенно повысить производительность процесса проектирования.

Дальнейшие исследования связаны с созданием генераторов сложных архитектур логических отношений, обладающих возможностью объединения нескольких логических блоков для повышения быстродействия работы функциональности.

Список литературы: 1. *David C. Black, Jack Donovan.* SystemC: from the ground up. Kluwer Academic Publishers, 2004. 263 p. 2. *Bergeron, Janick.* Writing testbenches: functional verification of HDL models. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. 354 с. 3. Donald E. Thomas. Philip R. Moorby. The Verilog Hardware Description Language. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers. 2002. 404 p. 4. *Хаханов В.И., Хаханова И.В.* и др. Verilog&SystemVerilog. Харьков: Новое слово, 2010. 528с. 5. Общая алгебра. Справочник. Т.2. Под ред. Скорнякова. 1991. Глава 7. Категории. С.368-460. 6. *Bondarenko M.F., Hahanova I.V.* Logic networks application for computing process organization. Радиоэлектроника и информатика, 2003. С. 150-156.

Поступила в редколлегию 11.03.2012

Хаханова Ирина Витальевна, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и верификация цифровых систем и сетей, цифровая обработка сигналов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, E-mail: hahanova@mail.ru

УДК 519.7/007/004

А.В. ЛЯХОВЕЦ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЛИНЕЙНО НЕРАЗДЕЛИМЫХ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ХАМЕЛЕОН

Рассматриваются результаты работы модифицированного алгоритма Хамелеон. Иерархический многоуровневый алгоритм состоит из нескольких этапов: построение графа, округление, разделение и восстановление. На каждом этапе используются различные подходы и алгоритмы. Оптимизируется метод выбора k при построении k nn графа. Строится математическая модель выбора методов на каждом из этапов алгоритма, основываясь на характеристиках анализируемой выборки.

Введение

Существует много различных методов кластеризации, и каждым из них можно получить различные разбиения исходного множества. Выбор определенного метода зависит от типа желаемого результата. Производительность метода с определенными типами данных зависит от характеристик сервера и технических возможностей программного обеспечения, размера множества. В последнее время ведутся активные разработки новых алгоритмов кластеризации, способных обрабатывать сверхбольшие базы данных. В них основное внимание уделяется масштабируемости. Разработаны алгоритмы, в которых методы иерархической кластеризации интегрированы с другими методами. К наиболее актуальным алгоритмам относятся: BIRCH, CURE, CHAMELEON, ROCK [1,2]. Оптимизация и ускорение работы алгоритмов кластеризации является актуальной и востребованной задачей.

Цель данного исследования – разработка математической модели для ускорения и улучшения кластеризации посредством выбора алгоритмов на разных этапах модифицированного алгоритма Хамелеон, соответствующей исследуемым данным. Эта задача явля-

ется актуальной из-за необходимости организации на единых принципах и синхронизации выбора метода кластеризации на основании характеристик анализируемой выборки; потребности унифицировать технологии кластеризации и за счет этого сократить время на выбор метода; необходимости обеспечения пользователей качественным решением задачи анализа при различных исследуемых данных, необходимости анализа сложных выборок с пересекающимися и накладывающимися классами.

1. Модификация алгоритма Хамелеон

Хамелеон – это новый иерархический алгоритм, который преодолевает ограничения существующих алгоритмов кластеризации. Данный алгоритм рассматривает динамическое моделирование в иерархической кластеризации. В нем можно выделить следующие стадии.

Построение графа. В данной работе рассмотрено 2 вида графов: симметричный k-nn граф и асимметричный k-nn граф. При построении графа в модифицированном алгоритме Хамелеон для каждой пары объектов измеряется «расстояние» между ними — степень похожести. Используются следующие меры: евклидово расстояние, квадрат евклидова расстояния, расстояние городских кварталов (манхэттенское расстояние), расстояние Минковского, расстояние Чебышева, степенное расстояние[3,4].

Для решения поставленной задачи построение графа k должно быть выбрано таким образом, чтобы соблюдалось условие его связности. При этом значение k последовательно увеличивается, пока граф не станет связным. Так как данная операция трудоемка и длительна, она нуждается в оптимизации. Для оптимизации выбора k в симметричном и асимметричном графах построены математические модели (рис. 1, а, б).

В качестве управляемых параметров для построения данных моделей зависимости, способных отобразить необходимые характеристики выборки данных, были выбраны количество компонент связности, максимальное расстояние между компонентами связности и количество элементов в компоненте связности. Вторая характеристика вычисляется следующим образом:

$$SetDist = \max\left(\frac{dist(avComponent_i, avComponent_j)}{\max\left(\frac{max ComponentOstovEdge_{ij}}{ComponentVertexNum_{ij}}\right)}\right), \quad (1)$$

где *avComponent*- центроид компоненты связности; *ComponentOstovEdge* – ребро, соединяющее вершины, которые принадлежат одной компоненте; *ComponentVertexNum* – количество вершин в компоненте.

Данные характеристики не трудоемки в расчете и существует зависимость между ними и значением k.

Математическая модель для оптимизации выбора начального значения k при построении асимметричного k-nn графа:

$$k = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_1^2 + e \cdot x_2^2 + f \cdot x_1 \cdot x_2 + g \cdot x_1^3 + h \cdot x_2^3 + i \cdot x_1 \cdot x_2^2 + j \cdot x_1^2 \cdot x_2, \quad (2)$$

и симметричного графа:

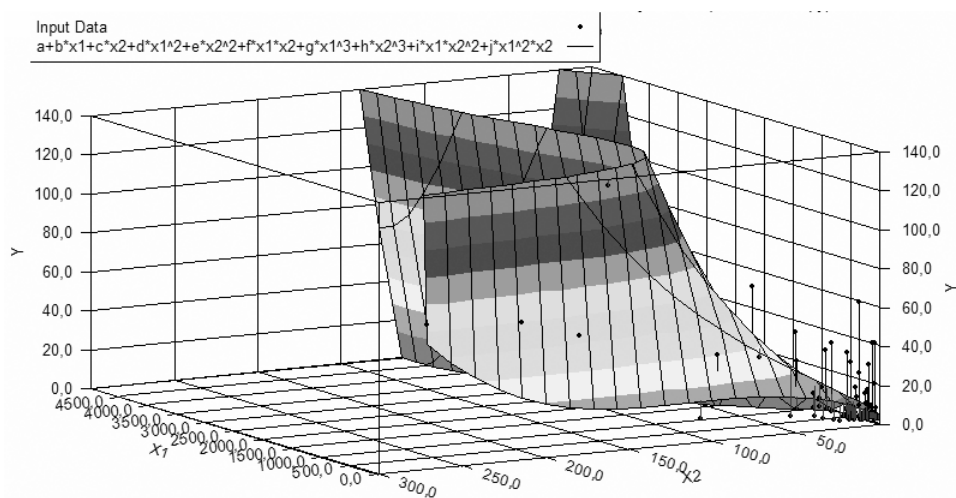
$$k = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2 + d \cdot x_1^3 + e \cdot x_2 + f \cdot x_2^2 + g \cdot x_2^3 + h \cdot x_2^4 + i \cdot x_2^5, \quad (3)$$

где x_1 – коэффициент расстояния; x_2 – количество компонент связности. Значения коэффициентов представлены в табл. 1.

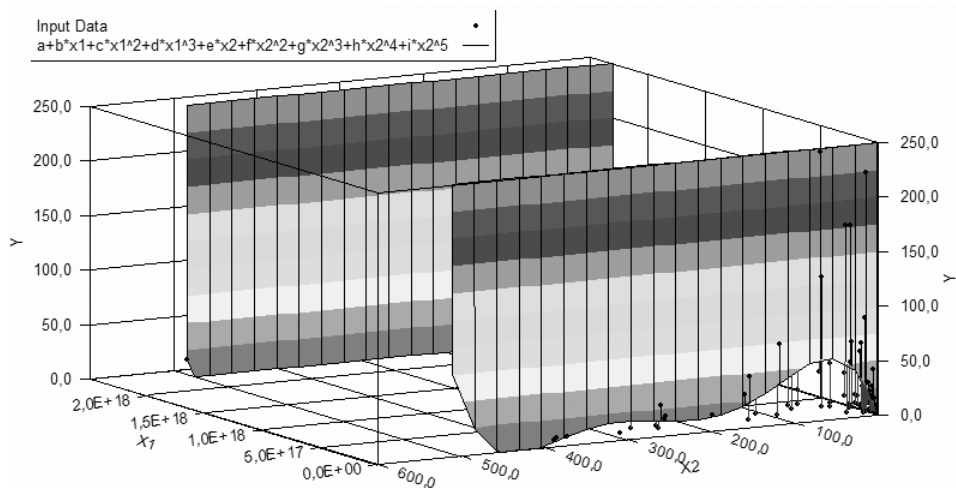
Применение подхода исследовалось на 285 выборках. Применение aknn модели улучшило время выполнения этапа построения графа в 62,45% случаев. В 37,55% случаев время выполнения ухудшилось. Оно ухудшилось лишь в тех случаях, когда k было меньше или равно 3 и время выполнения мало. Следовательно, ухудшение временного показателя несущественно сказывается на производительности метода в целом. Отрицательный результат применения модели получен в 7,71% случаев. В среднем время выполнения улучшилось на 161%. Отрицательным результатом считается при получении k существенно больше минимально необходимого для соблюдения условия связности, даже если время построения графа уменьшилось.

Таблица 1

	Aknn граф	Sknn граф
a	4,963024	-0,547360564
b	2,33E-02	-7,46E-14
c	0,42939	1,51E-29
d	-4,45E-05	-6,56E-48
e	-3,86E-03	2,323285358
f	4,18E-04	-3,09E-02
g	1,05E-08	1,55E-04
h	1,14E-05	-3,34E-07
i	1,19E-05	2,61E-10
j	-4,73E-07	



а



б

Рис. 1. Графическое представление описания данных математической моделью

Применение sknn модели улучшило время выполнения этапа построения графа в 69,23% случаев. В 20,51% случаев время выполнения ухудшилось. Отрицательный результат применения модели получен в 5,12% случаев. В среднем время выполнения улучшилось на 169%.

Огрубление графа. В процессе стадии огрубления строится последовательность меньших графов, каждый с меньшим количеством узлов. Огрубление графа может быть достигнуто различными способами [5-8]: случайное парасочетание, парасочетание из тяжелых ребер (HEM), модифицированный алгоритм парасочетания тяжелых ребер (Modified

Heavy Edge Matching - HEM*), паросочетание из наиболее тяжелых ребер (heaviest-edge matching), модифицированное паросочетание из наиболее тяжелых ребер HEM*+, паросочетание легких ребер (Light Edge Matching LEM), паросочетание из тяжелых клик (HCM), сочетание тяжелых треугольников (Heavy-triangle matching HTM), сочетание тяжелых схем (Heaviest Schema Matching HSM), сочетание гиперребер (Hyperedge Coarsening HEC), видоизмененное сочетание гиперребер (Modified Hyperedge Coarsening MHEC), сочетание лучшего (первого) выбора (First Choice Coarsening FCC).

Разделение графа. На данном этапе выполняется разделение огрубленного графа таким образом, чтобы было удовлетворено ограничение баланса и оптимизирована функция разделения (mincut). Разделение может быть выполнено как одновременным разделением на k частей, так и последовательно с помощью рекурсивной бисекции.

Разделение может быть выполнено следующими методами: покоординатное разбиение (Coordinate Nested Dissection (CND)), деление сети с использованием кривых, заполняющих пространство (Space-filling Curve Techniques), алгоритм возрастающего графа (GGP), алгоритм возрастающего графа с учетом выгод (GGGP), уровневое ячеечное разбиение (Levelized Nested Dissection - LND), Seed-Growth bisection, Kernighan-Lin Algorithm (KL), Fiduccia and Mattheyses.

Восстановление графа и улучшение разделения. Разделение огрубленного графа проецируется на следующий уровень исходного графа и выполняется алгоритм улучшения разделения (partitioning refinement algorithm) для улучшения целевой функции, не нарушая ограничение баланса.

Kernighan-Lin Algorithm (KL). KL алгоритм основан на понятии веса - величины, которая определяет выигрыш от перемещения вершины из одного подмножества в другое. Вес рассчитывается для каждой вершины как количество соединений вершины с другим подмножеством, минус количество соединений с подмножеством, в котором вершина находится. Пока есть вершины с положительным весом, алгоритм меняет вершины с максимальным весом местами с вершинами из другого подмножества.

Fiduccia and Mattheyses. По существу схема работы алгоритма такая же, но за один его шаг перемещается только одна вершина, вместо обмена пары вершин, после этого для каждой вершины пересчитывается вес.

Граничный KL и граничный FM (Boundary KL and Boundary FM). Эти алгоритмы в точности повторяют шаги, выполняемые в KL и FM, с тем единственным отличием, что вместо расчета выгоды для всех пар (u, v) в графе для KL или всех u и всех v для FM рассчитываются выгоды только для граничных вершин (т.е. вершин, сопряженных с вершинами из другого класса).

Ключевым шагом является поиск пары подклассов, которые наиболее похожи.

Относительная связность и относительная плотность. Этот метод комбинирует относительную связность и относительную плотность, для объединения выбирается пара кластеров, которые максимизируют полученную функцию.

Схожесть кластеров (Cluster Similarity CS). Данная мера основана на произведении количества ребер, которые соединяют два класса, по отношению к количеству ребер в меньшем классе[9].

2. Описание экспериментальных выборок

Для проверки работоспособности метода необходимо большое количество выборок. Отсутствие реального источника данных требуемого объема, разнообразия и качества вынуждает обратиться к альтернативному источнику. Так как при использовании различных входных данных с определенными статистическими характеристиками производительность и качество кластеризации может сильно отличаться, необходимо проводить анализ на синтетических выборках, созданных специально для данной задачи. Исследований в данной области немного и все они крайне специфичны для рассматриваемых задач.

Существует ряд методов генерации экспериментальных данных, позволяющих провести анализ кластеризации систематически и последовательно. Такие генераторы используют параметризованные модели, которые создают реалистичные данные. Эти генераторы обучены на реальных данных[10].

Helmerts и Bunke (2003) разработан для работы с образцами почерка. Baird (2000) и Baird (1993) работали с изображениями. Rogers и др. (2003) работал с 2D изображениями белка. Davidov и соавт. (2004) получали наборы данных, помечая текстовый контент из WWW. Srikant (1999), GSTD (Theodoridis и соавт., 1999) и Jeske и соавт. (2005) также занимались синтетическим созданием данных. GSTD моделирует броуновское движение. Существует ряд скрытых моделей Маркова (Hidden Markov Model -HMM) на основе генераторов данных. Rachkovskij и Kussul (1998) продемонстрировали более общий алгоритм генерации образцов из признаков в пространстве, включая фоновый шум. Pei и Zaiane (2006) занимались получением данных для неконтролируемого обучения и обнаружения выбросов. Van der Walt и Bernard(2007) демонстрируют полезность синтетических генераторов набора данных на основе различных плотностей.

В статье Vineet Chaoji, Mohammad Al Hasan, Saeed Salem и Mohammed J. Zaki «SPARCL: Efficient and Effective Shape-based Clustering» для тестов масштабируемости, а также для создания 3D-данных написан собственный генератор кластеров, основанный на фигурах. Для создания фигуры в 2D случайным образом выбирались точки на канве и добавлялись точки, которые формируют желаемую фигуру. Точкой отсчета для всех фигур была точка (0,0).

Чтобы получить сложные фигуры, использовались фигуры, полученные вращением и смещением (круг, прямоугольник, эллипс, круговые полосы). Генерация 3D фигуры построена на 2D фигуре. Случайным образом выбираются точки для третьей координаты - если координаты x и y удовлетворяют фигуре, случайным образом выбирается z -ось в пределах заданного диапазона.

Такой подход позволяет построить правдоподобные 3D фигуры, а не только несколько слоев 2D фигуры. Как и в случае 2D, комбинируется вращение и смещение 3D фигуры, чтобы получить более сложные фигуры - пример синтетических 3D данных. Как только созданы все фигуры, случайным образом добавляется шум (от 1 до 2%). Показанный на рисунке 3D набор данных имеет 100000 точек и 10 кластеров [11,12].

В данной работе создание 3D фигур выполняется посредством 3D s max studio. Это приложение позволяет сгенерировать трехмерную фигуру необходимой плотности и с необходимым количеством точек. Далее фигура может быть экспортирована. Статистические характеристики полученной выборки будут зависеть от характера фигур, их размера, плотности и расположения. Данные параметры подбираются при создании фигур. Добавление шума в выборку производится непосредственно перед проведением анализа.

Для проведения эксперимента указанным методом было сгенерировано 27 выборок с различными статистическими характеристиками. Выборки и их характеристики представлены в табл. 2. В процессе эксперимента каждая из выборок анализируется в 4 вариантах: без добавления шума, с добавлением 20% шума, 40 и 60% шума.

Также в работе было использовано 47 реальных выборок и 44 выборки, используемые другими авторами при решении задач кластеризации данных.

3. Построение математической модели

Для оптимизации работы модифицированного алгоритма Хамелеон необходимо построить математическую модель зависимости выбора алгоритмов на каждом их этапов модифицированного алгоритма Хамелеон от характеристик обрабатываемой выборки. Математическая модель будет построена на основе исследования 27 экспериментальных выборок и их модификаций посредством добавления шума.

В данной работе представлена модель, в которой используется асимметричный knn граф на этапе построения графа в связи с существенной разницей в трудоемкости по сравнению с симметричным knn графом. В качестве меры схожести при объединении пары подклассов использовалась Cluster Similarity, в качестве меры расстояния - евклидово расстояние.

Для каждой выборки было выполнено сравнение результатов кластеризации с использованием разных алгоритмов на разных этапах модифицированного алгоритма Хамелеон. Лучший результат выбирался на основании таких критериев качества как время выполнения алгоритма и качество кластеризации. Последнее оценивалось на основании следующих

метрик: относительная связность и относительная плотность, Cluster Similarity, SD индекс, PRD индекс, Conn индекс, Silhouette индекс, Dunn индекс.

Таблица 2

№ п/п	Кол-во точек	Maxdist	Кол-во компонент связности	Max матожидание	Min матожидание	Max дисперсия	Min дисперсия	Max разброс	Min разброс
1	266	20,14562	2	0,85	0	127567	22530,6	46,1	17,69
2	2224	30,50736	18	10,03	-0,08	27697655	1651098	49,29	34,09
3	804	161,1586	7	1,78	-0,9	1940398	131320,5	42	17,37
4	1446	197,5728	12	1,16	-1,2	7657729	4567690	52,24	45,78
5	1682	17,14317	39	0,02	-0,01	49026224	9001129	58,06	28,47
6	544	11,71731	32	0,02	-0,03	1791420	295287	46,4	6,47
7	1060	24,27535	28	1,13	-0,17	3032123	12291,01	43,47	5,1
8	682	33,09368	4	6,22	-4,09	649614,3	28661,65	50,51	11,31
9	2650	109,7907	25	0,11	-0,28	25251249	1328711	44,74	12,26
10	511	82,43001	6	0,03	-2,8	1059943	35515,61	72,52	38,78
11	738	211,9365	6	37,22	-0,48	1528520	246586,3	38,97	19,48
12	1250	134,3549	10	0,04	-0,07	2212431	463200,9	48,84	28,27
13	792	8,23338	39	0,09	0	2583547	1627816	69,34	34,57
14	722	0	1	7,08	-0,77	2387575	321328,1	72,31	52,44
15	782	8,956753	49	0	-0,67	6547451	82153,88	144,09	22,27
16	382	0	1	0,7	-0,31	1405572	77981,37	65,17	39,69
17	1292	14,19542	14	2,81	-0,1	10029280	349007,6	34,47	18,81
18	1928	161,9535	29	0,1	-1,01	10586689	4442635	38,43	30,71
19	770	71,53869	10	0,1	-0,21	1355198	46438,56	49,86	13,38
20	1466	218,1389	12	0,26	0	8548895	139608,8	104,86	13,38
21	1751	405,3506	3	0	-0,04	13130396	1260448	86,39	56,84
22	2447	451,3041	61	0	-0,06	26681767	2151437	86,39	59,17
23	84	7,549394	4	1,05	-3,57	20242,3	3634,21	45,11	13,84
24	1196	71,33776	48	73,83	-3,46	1080946	226207,8	29,48	25,78
25	1275	149,7968	34	205,13	-0,09	5886294	1663123	96,49	48,63
26	882	76,0138	5	0,17	-0,06	6779079	125142	83,74	58,52
27	1294	5,692696	107	0,01	0	17868393	9762847	60,01	41,37

В данной работе управляемыми параметрами являются характеристики выборки, такие как количество объектов, вычисляемая характеристика расстояний в выборке, минимальные и максимальные значения матожидания, дисперсии и разброса.

Результирующие значения для выбора алгоритмов на этапах модифицированного алгоритма Хамелеон были закодированы следующим образом: последовательно пронумерованы комбинации алгоритмов, составленные перебором, начиная с полного перебора алгоритмов огрубления, после разделения и восстановления.

В результате была получена следующая математическая модель:

$$k = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2 + d \cdot x_2 + e \cdot x_2^2 + f \cdot x_2^3 + g \cdot x_3^2 + h \cdot x_4 + i \cdot x_5 + j \cdot x_5 + \\ + l \cdot x_6 + m \cdot x_6^2 + n \cdot x_7 + n \cdot x_8, \quad (4)$$

где $x_1 - x_8$ соответствуют характеристикам выборок из табл. 2. Значения коэффициентов представлены в табл. 3.

4. Результаты экспериментов

Ключевые аспекты оценивания - это эффективность, надежность, простота и результативность. Расчет времени производился на 1.73 GHz Intel(R) Pentium(R) Dual CPU с 2GB памяти.

Таблица 3

a	324,765423	i	1,24E-07
b	33,1403	j	1,19E-07
c	0,245459	l	-1,73E-05
d	52,33	m	-1,43E-07
e	43,73	n	1,19E-08
f	4,42E-02	o	-3,75E-06
g	1,62 E-07	i	1,51E-08
h	4, 23	j	-4,77E-08

В данной работе представлена модель, в которой используется асимметричный knn граф на этапе построения графа в связи с существенной разницей в трудоемкости по сравнению с симметричным knn графом. В ходе эксперимента было выявлено, что трудоемкость построения симметричного графа может превышать трудоемкость при построении асимметричного графа в 200 раз.

На основании данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы: алгоритмы этапа огрубления графа не имеют существенного влияния на результат, для больших и не сильно сложных выборок хороший результат от CND, GGP, LND. Для сложных выборок есть смысл использовать FM, несмотря на то, что время выполнения возрастает, особенно на очень больших выборках данных. В этом случае время выполнения можно сократить посредством использования граничного алгоритма для восстановления графа.

Пример обработки одной из выборок представлен на рис 2, 3.

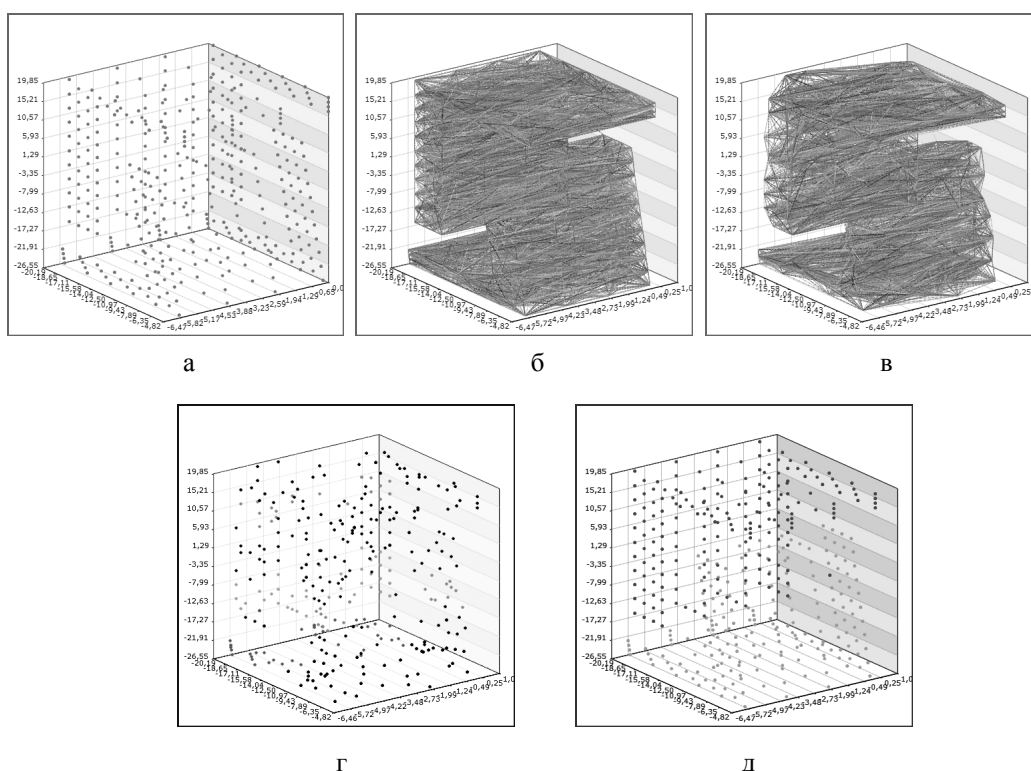


Рис. 2. Результат кластеризации выборки без добавления шума: а – выборка; б – построение графа; в – огрубление графа; г – разделение графа; д – восстановление графа

5. Заключение

В результате исследования на основе содержательного анализа предметной области и существующих решений сформулирована постановка задачи оптимизации процесса кластеризации линейно-неразделимых зашумленных данных.

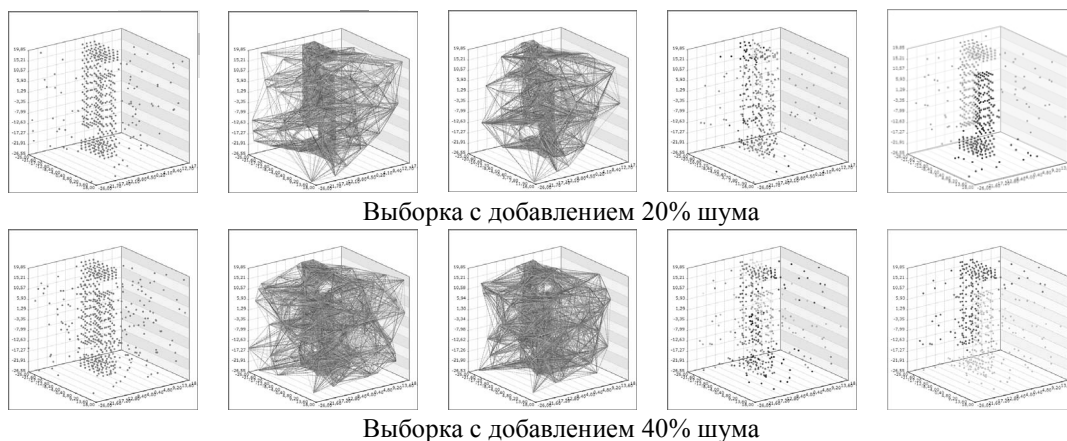


Рис. 3. Результат кластеризации выборки

Научная новизна. Построено две математические модели зависимости выбора k при построении асимметричного и симметричного графов в модифицированном алгоритме Хамелеон на основании характеристик выборки. Из набора исследуемых характеристик выделены такие: количество компонент связности и рассчитываемая характеристика отношения максимального расстояния между компонентами связности и количеством элементов в компоненте связности. В среднем время выполнения улучшилось на 161 и 169% для асимметричного и симметричного графа соответственно.

Построена математическая модель зависимости выбора алгоритмов на каждом из этапов алгоритма Хамелеон на основании характеристик выборки. Данная модель позволяет сократить время выполнения кластеризации без снижения качества посредством использования алгоритмов, подходящих данной конкретной исследуемой выборке.

На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод, что для различных выборок с разными статистическими характеристиками необходимо использовать различные алгоритмы для шагов модифицированного алгоритма Хамелеон. Использование модели особенно критично для больших выборок, где применение многих алгоритмов является дорогостоящим.

Практической значимостью полученных результатов служит подтверждение эффективности подхода при практическом применении результатов исследования на экспериментальных данных и реальных данных в медицинской сфере [13].

В дальнейшем планируется построение математической модели для анализа всех представленных алгоритмов на разных этапах модифицированного алгоритма Хамелеон.

Список литературы: 1. Чубукова И.А. Data Mining БИНОМ. Лаборатория знаний, Интернет-университет информационных технологий - ИНТУИТ. 2008 2. Osmar R. ZaĒ'ane, Andrew Foss, Chi-Hoon Lee, and Weinan Wang On Data Clustering Analysis: Scalability, Constraints and Validation 3. George Karypis, Eui-Hong (Sam) Han, Vipin Kumar, Chameleon: Hierarchical Clustering Using Dynamic Modeling, Computer. Vol. 32, no. 8. P. 68-75. Aug. 1999, doi:10.1109/2.781637 4. Han J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques Second Edition MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS 2006 5. Karypis G. and Kumar V. Multilevel k-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs JOURNAL OF PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTING 48, 96–129 (1998). 6. Бувайло Д.П. Быстрый высокопроизводительный алгоритм для разделения нерегулярных графов // Вісник Запорізького державного університету. 2002. № 2. 7. Brian Read Advances in Databases: 18th British National Conference on Databases, BNCOD 18 Chilton, UK, July 9-11, 2001. Proceedings (Lecture Notes in Computer Science). 8. Karypis G. and Kumar V. Multilevel k-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs published electronically. 1999. Society of Industrial and Applied mathematics. 9. Ляховец А.В., Лесная Н.С., Шатовская Т.Б Исследование эффективности динамической кластеризации линейнонеразделимых зашумленных данных // Системы обработки информации. 5(86) 2010. С. 86-91. 10. Parul Agarwal, M. Afshar Alam, Ranjit Biswas Issues, Challenges and Tools of Clustering Algorithms IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 3, No. 2. 2011. 11. Коршунов Ю.М. Получение многомерной статистической выборки с заданными корреляционными свойствами ISSN 1995-4565 // Вестник РГПТУ. 2008. Вып. 23. 12. Vineet Chaoji, Mohammad Al Hasan, Saeed Salem, Mohammed J. Zaki. SPARCL: Efficient and Effective Shape-Based Clustering. In Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM2008), December 15-19, 2008, Pisa, Italy. P. 93-102, IEEE Computer Society, 2008. 13. Ляховец А.В. Исследование результатов применения модифицированного алгоритма хамелеон в области лечения поясничного стеноза // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. 3/11(57).

Поступила в редколлегию 21.03.2012

Ляховец Алена Витальевна, мл. научн. сотр. кафедры ПИ ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование и анализ данных. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Ленина, 12, кв. 58, тел. (066)3256098.

АПРОКСИМАЦІЯ ФРАКТАЛЬНИХ КРИВИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЛАЙНІВ

Розглядається застосування фракталів у задачах апроксимації кривих складної форми. Описується задача статистичного оцінювання параметрів фрактальних моделей для даних, що мають потенційно сплайнову природу. Вказуються особливості побудови фрактального сплайну з лінійною залежністю від параметрів, а також особливості розрахунків методу найменших квадратів для сплайнового фракталу. Наводиться алгоритм апроксимації кривих фрактальними сплайнами. Показуються приклади апроксимації фрактальним сплайном модельних фрактальних даних з адитивною випадковою похибкою та реального часового ряду.

Вступ

Апроксимація контурів складних природних об'єктів є важливим питанням, що потребує вирішення для задач відновлення і представлення даних у різних предметних областях, зокрема таких як медичні зображення, представлення мультимедійних даних та САПР (системи автоматизованого проектування та розрахунку). Останнім часом отримали розвиток фрактальні сигнали в радіотехнічних системах та системах зв'язку [1].

Хоча фрактальні ітераційні функції були формалізовані більше, ніж десятиліття тому, їх широке застосування спостерігається лише у комп'ютерній графіці. К.Віттенбрінк [2] вперше використав фрактальні функції для позначення невизначеності у візуалізації наукових даних. Використання систем ітераційних функцій (IFS) для апроксимації кривих раніше було досліджено у [3], але не застосовано для відновлення конкретної кривої. Серед інших підходів до використання фракталів для вирішення «зворотної задачі» до інтерполяції слід відзначити роботу К.Беркнера [4], який використав вейвлет-трансформації, щоб отримати точну реконструкцію кривих. Математичними питаннями фрактальної апроксимації цікавиться український науковець Д.Ю.Мітін [5, 6]. Зв'язок фрактальної розмірності та якості апроксимації досліджує В.В.Ванін [7] тощо.

Питання побудови фрактальних кривих досліджені досить добре. Проте не менше значення має й задача апроксимації гіпотетично фрактальних сигналів і процесів фрактальними моделями. В більшості випадків - це складна процедура, часто ітераційна, нелінійної оптимізації. Це ускладнює статистичне оцінювання параметрів моделі в умовах наявності завад в даних.

Ми пропонуємо новий підхід до апроксимації фрактальних кривих з використанням фрактальних сплайнів. Метою роботи є отримання способу оцінювання параметрів фрактальних сплайнів за методом найменших квадратів. Необхідно виконати тестування моделі як на синтетичних (генерованих програмою), так і на природних (валютний курс) часових рядах.

1. Фрактальна апроксимація

Нехай маємо набір вхідних точок $\{(t_i, x_i)\}_{i=0}^N$, де $t_0 < t_1 < \dots < t_N$, N – кількість точок.

Тоді апроксимуючою функцією назвемо таку неперервну функцію $F: [x_0, x_N]$, яка дозволяє представити вхідні дані з кількістю трансформацій, суттєво меншою за N . У загальному випадку вважаємо, що кількість точок даних перевищує кількість степенів свободи у представленні. Для оцінки якості фрактальної апроксимації будемо використовувати відстань Хаусдорфа. Нехай A і A' – дві скінченні множини у метричному просторі (\mathcal{X}, d) , тоді Хаусдорфова відстань між ними визначається як:

$$d_H(A, A') = \max \left\{ \max_{p \in A} (\min_{q \in A'} d(p, q)), \max_{p \in A'} (\min_{q \in A} d(p, q)) \right\}. \quad (1)$$

У випадку однакової кількості точок у множинах можна користуватися спрощеною формулою для розрахунку відстані:

$$D(A, A') = \sum_{i=0}^N d(A_i, A'_i) . \quad (2)$$

2. Фрактальні сплайни

Фрактальний сплайн – це функція, яка складається з сплайн-функцій різного масштабу, що зберігають самоподібність [8, с.162]. Як і звичайний сплайн, фрактальний сплайн характеризується ступенем, кількістю вузлів, крайовими умовами. Від фракталу він перейняв такі характеристики, як кількість масштабів і фрактальна розмірність.

Масштабом будемо називати кількість вкладених рівнів самоподібних сплайнів.

Для того аби сплайн став фракталом, необхідно, щоб кожен із R фрагментів також був сплайном, подібним до оригінального. Тоді сплайн на k -му масштабі буде складатися з R^k фрагментів. Поділ кожного фрагмента сплайну зберігає пропорцію нульового масштабу. Неперервність похідних і значень у точках стикування забезпечується, якщо сплайн періодичний, тобто значення у першому й останньому вузлах однакові.

Фрактальний сплайн нульового масштабу збігається зі звичайним сплайном тієї ж степені.

Розглянемо процес отримання фрактального сплайну k -го масштабу зі сплайну $(k-1)$ -го масштабу. Нехай на нульовому масштабі маємо таку матрицю вузлів сплайну:

$${}^0TU = [tu_{0,0}, tu_{1,0}, \dots, tu_{R+1,0}] , \quad (3)$$

де $tu_{i,j}$ – i -й вузол сплайну; j – масштаб, причому $tu_{0,0} = t_0$ і $tu_{R+1,0} = t_N$.

Наступне перетворення визначає матрицю вузлів на k -му масштабі:

$$\psi_k(TU) = TU * \begin{bmatrix} 1 \\ \omega_1 \\ \dots \\ \omega_{R+1} \end{bmatrix} , \quad (4)$$

тут
$$\omega_i = \frac{tu_i - tu_{i-1}}{tu_N - tu_0} . \quad (5)$$

Кожне перетворення ψ_k горизонтально звужує (у R^k разів) базовий фрактальний сплайн на інтервалі $D = [t_0, t_N]$ і перетворює його на фрагмент фрактального сплайну k -го масштабу на інтервалі $D_i = [t_i, t_{i-1}]$. Неперервне і гладке стикування у вузлах забезпечується граничними умовами:

$$\psi_i(tu_0) = tu_{i-1}, \quad \psi_i(tu_{R+1}) = tu_i . \quad (6)$$

Якщо відомий вектор значень сплайну нульового масштабу у вузлах, тоді легко отримати значення фрактального сплайну у довільній точці. Для ермітових сплайнів ці значення збігаються із значеннями сплайну у вузлових точках нульового масштабу. Таким чином, можна записати систему рівнянь для знаходження інтерпольованих (між вузлами) значень фрактального сплайну.

Оцінювання параметрів фрактального сплайну можна вважати задачею, зворотною до інтерполяції, де за відомими значеннями у точках інтерполяції (можливо з похибкою) слід знайти вузлові значення. У випадку сплайн-інтерполяції зворотна задача зводиться до пошуку матриці коефіцієнтів базисного сплайну. Звичайно для цього використовується метод найменших квадратів.

Вважаємо, що емпіричні дані є сумою деякого фракталу θ та некорельованої випадкової складової ε :

$$X = \theta + \varepsilon. \quad (7)$$

Також вважаємо, що фрактальна функція з достатньою точністю δ апроксимується фрактальним сплайном:

$$\|PA - \theta\| \leq \delta. \quad (8)$$

Розв'язок «зворотної задачі» за методом найменших квадратів полягає у знаходженні оцінок вектора параметрів:

$$A' = (P^T P)^{-1} P^T X, \quad (9)$$

де P – матриця планування фрактального сплайну.

Особливістю МНК для фрактального сплайну очевидно є його матриця планування. Розглянемо побудову такої матриці. Для отриманої матриці ${}^k P$ масштабу k на множині вхідних точок $\{(t_i, x_i)\}_{i=0}^N$ розраховуємо матрицю планування ${}^k P$. Значення j -го стовпця матриці ${}^k P$ є значеннями j -ї функції форми на інтервалі $D = [t_0, t_N]$. Внаслідок локальних властивостей функції форми матриця ${}^k P$ є блочно-діагональною [9, с.100]:

$${}^k P = \begin{bmatrix} G_{0,0} & 0 & \dots & 0 \\ G_{1,0} & G_{0,1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{N,0} & G_{N-1,1} & \dots & 0 \\ 0 & G_{N,1} & \dots & G_{0,R+1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де $G_{i,j}$ — матриці-стовпці, котрі складаються з відліків базису на відповідних суміжних фрагментах. Якщо зобразити ненульові елементи матриці планування точками, то вони матимуть характерний вигляд, показаний на рис. 1. Фрактальна матриця планування є самоподібною. Матриця k -го масштабу є копією матриці $(k - 1)$ -го масштабу, зменшена в $1/R$ рази.

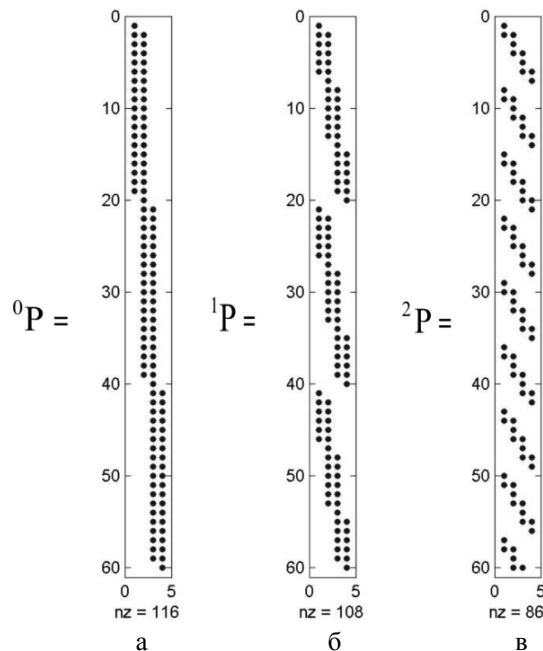


Рис. 1. Внутрішня структура матриць планування: а – нульового масштабу; б – першого масштабу; в – другого масштабу

Оскільки фрактальний сплайн є сумою звичайних сплайнів різних масштабів, що зберігають самоподібність, результуюча матриця планування рівна:

$$P = {}^0 P + {}^1 P + \dots + {}^k P. \quad (11)$$

3. Алгоритм апроксимації фрактальними сплайнами

Апроксимація фрактальними сплайнами передбачає послідовне виконання таких пунктів:

1. Перевірити вхідний часовий ряд на фрактальність, обчисливши фрактальну розмірність.
 2. Розділити вхідні дані на K інтервалів, що не перетинаються. Кінцеві точки інтервалів формують $(K + 1)$ вузлів базисного фрактального сплайну.

3. Розрахувати матрицю планування для матриці вузлів базисного сплайну за формулою (10).

4. Розрахувати матрицю коефіцієнтів за формулою (9).

5. Побудувати фрактальний сплайн першого масштабу за формулою

$${}^0S = {}^0P * A \quad (12)$$

6. Визначити коефіцієнт деталізації (масштаб фрактального сплайну).

7. Визначити систему перетворень кожної точки фрактального сплайну s -го масштабу у точку фрактального сплайну $(s + 1)$ -го масштабу.

8. Ітераційно застосувати отриману систему перетворень на всі сегменти фрактального сплайну.

9. Оцінити якість апроксимації за формулою (2).

10. Якщо якість апроксимації достатня – завершити, інакше виконати пункт 2 для іншої схеми вузлів.

4. Тестування

З метою тестування метод було випробувано на часових рядах двох типів. Перший тип – фрактальний сплайн інтерполяції з додаванням білого шуму. Модельний фрактальний сплайн для нульового масштабу має вузли $\{0,16,32,48,64\}$ та значення у вузлах $\{1,10,-10,10,1\}$. Для побудови фракталу використано три масштаби. До отриманих значень додавалися некорельовані випадкові числа, розподілені за нормальним законом з одиничною дисперсією.

Результати тестування представлені на рис. 2, а математичні розрахунки – у табл. 1. Хаусдорфова відстань між вхідним і вихідним рядом становить 62,73 од.

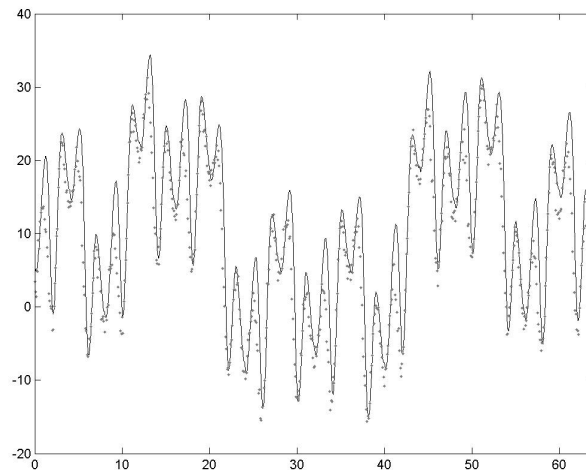


Рис. 2. Апроксимація зашумленого фрактального сплайну.

Точками позначено початкові дані, суцільною лінією – фрактальний сплайн.

Таблиця 1

Задані значення	1	10	-10	10	1
Отримані значення	1,69	11,05	-9,35	10,11	1,68
Абсолютна похибка	-0,69	-1,05	-0,65	-0,11	-0,68
Середня абсолютна похибка за 20 експериментів	0,6	0,6	0,5	0,55	0,63
Середньоквадратичне відхилення за 20 експериментів	0,3	0,33	0,26	0,34	0,25

Другий тип – часовий ряд природного або соціально-економічного походження, який необхідно апроксимувати. Як тестовий обрано економічний ряд індексу Доу-Джонса. Вибір обумовлено низкою досліджень, наприклад [10], які доводять наявність у таких рядах фрактальної природи. Результати апроксимації представлені на рис. 3 і у табл. 2.



Рис. 3. Апроксимація часового ряду індексу Доу-Джонса. Сірим кольором позначено початковий ряд, чорним – фрактальний сплайн

Таблиця 2

Задані значення	0,8	0,7	0,55	0,75	0,94	0,5	0,75
Отримані значення	0,77	0,71	0,59	0,72	0,93	0,5	0,77
Абсолютна похибка	0,03	-0,01	-0,04	0,03	0,01	0	-0,02

Звичайно, у випадку реальних даних результат апроксимації не настільки хороший, як у попередньому випадку. Це зумовлено тим, що фрактальний сплайн має ще низку параметрів, які слід адаптувати до даних: число фрагментів та схема їх розміщення, кількість масштабів. Однак слід зауважити, що навіть за досить довільного вибору вказаних параметрів фрактальна сплайн-модель дуже вдало передає характер реального процесу.

Висновки і пропозиції

Застосування фрактального сплайну у поєднанні із методом найменших квадратів дозволяє отримати ефективні лінійні оцінки параметрів моделі. При цьому слід відмітити, що число параметрів для фрактального сплайну значно менше, ніж для звичайного сплайну, що описав би подібний процес. За рахунок зменшення числа параметрів, що оцінюються, підвищується достовірність оцінок. При цьому зберігається властива сплайнам простота розрахунків.

Для реальних даних *успішність застосування* фрактального сплайну може суттєво змінюватися залежно від таких додаткових факторів, як число фрагментів сплайну, схеми їх розміщення та кількості масштабів.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці методу фрактальної апроксимації без використання систем ітераційних функцій, що дозволило значно зменшити обсяг розрахунків без втрати точності. *Практична значущість* алгоритму полягає у можливості використання для систем стиснення інформації, валютного трейдингу, радіолокації, у комп'ютерній графіці та інших системах, що працюють з фрактальними сигналами.

Подальші дослідження алгоритмів роботи з фрактальними сплайнами полягають у розробці ефективних способів адаптації фрактального сплайну до даних шляхом зміни розміщення фрагментів сплайну та масштабів.

Список літератури: 1. *Potamov A.A.* Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Университетская книга, 2005. С.15-18. 2. *Craig M. Wittenbrink.* IFS fractal interpolation for 2D and 3D visualization. In Proc. IEEE Visualization '94. P. 77-83, Oct. 1995. 3. *Zair C.E. and Tosan E.* Computer-aided geometric design with IFS techniques. In Fractal Frontiers (Proc. Fractals '97). P. 443-452, Singapore, 1997. World Scientific. 4.

K.Berkner, "A Wavelet-Based Solution to the Inverse Problem for Fractal Interpolation Functions", in *Fractals in Engineering '97*, eds. J.Levy Vehel, E.Lutton and C.Tricot (Springer, London, 1997). P. 81-92. **5.** *Мітін Д.Ю.* Хаусдорфова фрактальна апроксимація функцій // Доповіді НАН України. 2009. №6. С.26-28. **6.** *Мітін Д.Ю., Назаренко М.О.* Поточкова фрактальна апроксимація функцій // Проблеми теорії наближення функцій та суміжні питання: Зб. праць Ін-ту математики НАН України. 2007. 4, №1. С.200-211. **7.** *Ванін В.В., Залевська О.В.* Точність фрактальної апроксимації структури поверхневого шару близької до фрактальної // Праці ТДАТУ. 2011. Вип. 4. Т.50. С.52-55. **8.** *Navascues M.A., Sebastian M.V.* Fractal Splines. Monografias del Seminario Matematico Garcia de Galdeano 33 (2006). P. 161-168. **9.** *Шелевицький І.В.* Методи та засоби сплайн-технології обробки сигналів складної форми. Кривий Ріг: Європейський університет, 2002. С.100-104. **10.** *Петерс Э.* Фрактальный анализ финансовых рынков: Применение теории хаоса в инвестициях и экономике. М.: Интернет-трейдинг, 2004. 304с.

Надійшла до редколегії 16.03.2012

Новікова Ольга Борисівна, аспірантка Національного авіаційного університету. Наукові інтереси: сплайни, фрактали, розробка програмного забезпечення. Адреса: Україна, 50055, Дніпропетровська обл., Кривий Ріг, вул. Кириленка, буд. 27, кв. 92, тел.: 050-907-85-99.

УДК 662.997; 621.38: 535.215

В.Н. ГУРИН, И.О. ЯШКОВ, Д.В. ГУРИН

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СЕЛЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ И КОНСТРУКЦИИ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЛЕКТОРА С РЕКОМЕНДАЦИЯМИ ПО ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Рассматриваются основы создания эффективного селективного покрытия для активного элемента преобразователя солнечной энергии в тепловую. Показывается, что предложенная технология и конструкция активного элемента позволяет повысить эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую на 18-20% по сравнению с существующими. Описывается также разработанная конструкция солнечного теплового коллектора на основе активного элемента с эффективным селективным покрытием из черненого алюминия, полученного реактивным распылением в вакууме на алюминиевую фольгу. Приводятся теплоэнергетические показатели работы теплового коллектора в различных климатических зонах. Даются рекомендации по его применению.

1. Анализ состояния экологически чистых источников энергии

В настоящее время человечество активно внедряет новые экологически чистые источники энергии и в течение ближайших десятилетий нужно внедрить в повседневную жизнь возобновляемые экологически чистые источники энергии, прежде всего, такие как ветроэнергетика и гелиоэнергетики. В противном случае грядущие экологические катастрофы поставят под угрозу возможность дальнейшего существования жизни на нашей планете.

Являясь базовой отраслью, энергетика Украина включает в себя атомную энергетику, гидроэнергетику и тепловую энергетику. К 2100 году интегральное потребление энергии более чем вдвое превысит известные оценки экономически доступных природных ресурсов [1,2]. Интенсивное использование традиционных источников энергии привело к появлению ряда экологических проблем. Самые острые по своим неблагоприятным последствиям - увеличение выбросов в атмосферу углекислого газа и уменьшение толщины озонового слоя. Так, каждый киловатт мощности тепловой электростанции за один год вырабатывает в качестве побочных продуктов в среднем 2,4 т золы, 30 кг окиси серы и 3 кг окиси углерода. За последние 100 лет концентрация углекислого газа в атмосфере Земли повысилась на 13% [1,2].

Атомные электростанции вырабатывают электроэнергию, которая сегодня является более дешевой, чем электроэнергия, вырабатываемая тепловыми электростанциями. Однако при работе атомной электростанции около 99% топлива идет в отходы, которые представляют собой радиоактивные продукты расщепления. Общеизвестно, что утилизация радиоактивных отходов является дорогостоящей операцией, требующей постоян-

ного экологического надзора. Выходом из сложившегося положения является использование энергии солнца.

Для оценки возможностей солнечной энергетики округленно считают, что плотность потока солнечной радиации вне атмосферы Земли равна 1.4 кВт/м^2 , а на уровне океана на экваторе в полдень 1 кВт/м^2 [3]. Общая мощность солнечной радиации, перехватываемая нашей планетой, составляет $1,7 \cdot 10^{14} \text{ кВт}$. Это колоссальная мощность, примерно в 500 раз превышает предельные потребности человеческой цивилизации, составляющие $3 \cdot 10^{11} \text{ кВт}$. Если оценить всю солнечную энергию, которую наша планета получает за один год, то она составит $1018 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, что примерно в 10 раз больше энергии всех разведанных и неразведанных ископаемых топлив, включая и расщепляющиеся вещества.

Солнечная энергетика доступна повсеместно и это экологически чистый источник энергии, позволяющий использовать его во все возрастающих масштабах без негативного влияния на окружающую среду.

Основными направлениями использования солнечной энергии считаются:

- прямое превращение солнечной энергии в электрическую;
- получение тепла путем абсорбции солнечного излучения.

Получение такого низкотемпературного тепла можно осуществить с помощью плоских тепловых коллекторов, работающих на принципе тепличного эффекта [4]. Физическая суть этого эффекта заключается в преобразовании солнечного излучения тепловым коллектором, покрытым прозрачным для солнечных лучей материалом, внутри которого находится нагреваемый теплоприемник, с минимизированным рассеиванием тепловой энергии. Так как основная интенсивность солнечного излучения в наземных условиях находится в спектральном интервале $0,4 \text{ мкм} - 1,8 \text{ мкм}$, то в качестве прозрачного верхнего слоя используется обычное стекло. Коэффициент пропускания стекла в этом спектральном диапазоне достигает 95%. Расположенный в нижней части коллектора, теплоприемник представляет собой абсорбирующее покрытие с коэффициентом поглощения солнечного излучения до 90%. Поглощая прямое солнечное излучение, это абсорбирующее покрытие даже без верхнего стекла может нагреваться в зависимости от мощности падающего излучения до $50-80^\circ\text{C}$. Нагретое до таких температур тело излучает тепловую энергию, основная мощность которого находится в инфракрасном диапазоне

Для спектрального диапазона, соответствующего инфракрасному излучению, стекло обладает низким коэффициентом пропускания. Это и приводит к тепличному эффекту, заключающемуся в накоплении энергии под стеклом и увеличении температуры теплоприемника до 160°C , если преобразованная энергия не выводится из коллектора теплоносителем. В рабочем режиме накопленное тепло расходуется на нагрев воздуха или воды, которые циркулируют через коллектор. В средней полосе Европы в летний период их производительность может достигать 50-60 литров воды. Вода может нагреваться до $60-70^\circ\text{C}$ с каждого квадратного метра в день [1]. КПД солнечного коллектора составляет порядка 70% и зависит от температуры окружающей среды, плотности потока солнечной энергии и температуры, до которой необходимо нагревать воду в коллекторе. С уменьшением температуры, до которой необходимо нагреть воду, циркулирующую через коллектор, КПД коллектора увеличивается. Однако стандартная температура нагреваемой воды составляет 50°C . Для солнечного коллектора основной технической характеристикой является объем воды или воздуха, нагреваемых до заданной температуры в течение светового дня квадратным метром коллектора. Этот параметр зависит от времени года и географического положения места, в котором устанавливаются коллекторы.

Эффективность солнечного коллектора может быть увеличена при использовании на теплоприемной поверхности селективно поглощающих покрытий, которые обладают свойством хорошо поглощать видимую часть солнечного спектра и практически не излучать в инфракрасной области спектра [5- 7]. Селективные покрытия представляют собой единственный наукоемкий элемент в конструкции солнечного коллектора.

Цель работы – создание селективного покрытия, которое обеспечивало бы наиболее эффективное поглощение солнечной энергии, и разработка на его базе солнечного теплового коллектора.

2. Исследование характеристик селективного покрытия и разработка на его основе теплового коллектора

Авторами, совместно с НТУ «Харьковский Политехнический Институт», предложено селективное покрытие на основе черного алюминия, полученного путем реактивного (в смеси кислорода и аргона) распыления алюминия в вакууме, и проведены его испытания. Получены следующие основные характеристики покрытия [8]:

- коэффициент поглощения солнечного излучения $\alpha_s > 0,95$;
- коэффициент излучения $\epsilon = 50,12$;
- покрытие повышает КПД на 18-22%.

Композиция на основе полиуретанового клея надежно крепит алюминиевую фольгу на поверхности. Ее рабочие температуры не ниже $140\text{ }^\circ\text{C}$, а тепловые перегрузки могут достигать $180\text{-}200\text{ }^\circ\text{C}$ без изменения качества соединения.

Таким образом, в результате испытаний установлено, что эффективность использования солнечного теплового коллектора, в котором применена пленка с предложенным селективным покрытием, повышается в среднем на 20%.

Известно, что возможна экономия топлива за счет использования солнечных пассивных систем отопления на основе архитектурно-планировочных и технических решений, или таких, как гелиоустановки в системах отопления, которые называются активными системами [9,10]. В активных системах солнечные лучи поступают в гелиоприемник - солнечный коллектор, где их энергия преобразуется в тепловую с расчетными параметрами. Количество аккумулируемого тепла определяется по формуле [11]:

$$Q=mc(t_2-t_1),$$

где t_2 и t_1 – начальная и конечная температура, $^\circ\text{C}$; m – масса материала; c – теплоемкость материала, $\text{кДж/кг } ^\circ\text{C}$.

Для получения максимального теплового эффекта солнечную панель размещают так, чтобы солнце освещало ее максимальное время. Наклон панели должен быть $10\text{-}15^\circ$ плюс географическая широта, что для широты 45° составляет примерно $55\text{-}60^\circ$. При этом появляется возможность стабильно нагревать воду и воздух до $50\text{-}60\text{ }^\circ\text{C}$ и экономить на 1 м^2 поверхности солнечных коллекторов 120-180 кг условного топлива в год. Стоимость 1 м^2 солнечных коллекторов для нагрева воды зависит от конструкции и материала и составляет примерно \$ 200-500.

Многие фирмы Европы разрабатывают, производят и поставляют коллекторы различной конструкции и стоимости. Среди них можно назвать украинские фирмы “Гелиотерм”, специализированное научно-производственное объединение “Укргелиопром”. Кроме того, “Укргелиопром” внедряет солнечные коллекторы английского производства. Внешнее покрытие из тедмара фирмы “Dupont” с оптическим КПД 92 %. Стоимость 1 м^2 такой гелиоустановки с оборудованием от 20 до 350 американских долларов, гарантийный срок работы 5 лет.

Один из современных разработчиков и поставщиков солнечной техники и технологий в Германии – известная фирма “VISSMANN”. Она изготавливает два типа плоских солнечных коллекторов, горизонтальные и вертикальные, которые используются на плоских крышах [12].

При проектировании домов с гелиоустановками для оценки экономической эффективности сооружения солнечной установки необходимо учитывать, что затраты на 1 м^2 окупятся уже за 5 лет эксплуатации за счет экономии топлива и электроэнергии [13,14].

Нами разработана конструкция плоского солнечного теплового коллектора на основе активного элемента, полученного вакуумным реактивным распылением алюминия на алюминиевую фольгу, движущуюся в процессе напыления с определенной скоростью. Конструкция теплового коллектора ТСК-ИАСС и его особенности подробно описаны в [15].

Основные показатели коллектора ТСК- ИАСС:

габаритные размеры – 165х65х5 см;
 габаритная площадь – 1 м²;
 вес – до 17 кг;
 давление теплоносителя в каналах абсорбера – 0,6 МПа;
 инерционность (нагрев воды 20–50°С при W=11,5 л/ч и И=20°С) – 8 мин;
 срок службы – не меньше 15 лет.

Теплотворные характеристики коллектора приведены в таблице.

Полученная тепловая энергия нагрева теплоносителя (воды) в кВт·ч		Кол-во нагретой в течение летнего дня воды	Температура нагретой воды
на день	на год	л/день	°С
3,9...5,1	795...1065	335...440	30
3,7...4,9	760...1030	160...220	40
3,6...4,8	732...998	105...140	50
3,5...4,7	690...977	90...120	55

Даже самый высококачественный солнечный коллектор сам по себе еще не гарантирует оптимальной эксплуатации солнечной установки. Здесь важно реализовать комплексное системное решение. На наш взгляд разработка солнечной установки фирмы Viessmann с применением разработанного нами теплового солнечного коллектора ТСК-ІАСС будет наиболее эффективна. Фирма Viessmann поставляет также все компоненты, необходимые для автоматической регулировки работы солнечной установки:

- контроллер, согласованный с солнечной установкой,
- емкостный водонагреватель с низко расположенным теплообменником солнечных коллекторов,
- конструктивные детали, позволяющие улучшать регулировочные характеристики солнечной установки и таким образом добиваться ее максимальной отдачи.

Правильно рассчитанные солнечные установки с взаимно согласованными системными компонентами могут покрывать 50-60% годовой потребности в энергии для приготовления горячей воды в одно- и двух- квартирных жилых домах [16].

3. Выводы

Сделан анализ состояния проблемы, связанной с применением альтернативных источников энергии. Показано, что преобразование солнечной энергии в тепловую является наиболее предпочтительным.

Научно новым является предложенное селективное покрытие на основе реактивно распыленного алюминия с коэффициентом поглощения 98% , что на 20% больше, чем у применяемых лакокрасочных покрытий на основе окислов хрома.

Практическое значение предложенного солнечного теплового коллектора ТСК-ІАСС заключается в том, что он может быть использован в компонентах солнечной установки фирмы Viessmann, а также других фирм–разработчиков. Это позволит спроектировать эффективную систему горячего водоснабжения для бытовых нужд, обеспечить экономию ресурсов и в значительной мере улучшить экологическую ситуацию.

Дальнейшей задачей авторов является разработка эффективной и недорогой солнечной отечественной установки на основе теплового солнечного коллектора ТСК-ІАСС, работающей в режиме автоматического регулирования параметров.

Список литературы: 1. *Бойко, Б.Т.* Физика фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии / Б.Т. Бойко, Ю.Г. Гуревич. Харьков. Основа. 1992. 225 с. 2. *Шурчков, А.В.* Энергетичний потенціал сонячного випромінювання України / А.В.Шурчков, Г.М.Забарний, О.М.Щербина, О.Л.Пасечниченко // Ринок інсталяційний. 2001. № 7. С.14-15. 3. *Преобразование* солнечной энергии. Вопросы физики твердого тела Текст / Под ред. Серафино Б. М.: Энергоиздат. 1987. 125 с. 4. *Современное состояние и направления развития систем солнечного теплоснабжения в Украине и мире.* / Нетрадиц. энергетика в XXI веке: Докл. II Междунар. конф., Крым, Ялта, 17-22 сент. 2001 г./ М.Д.Рабинович. К.: 2001. С.115-117. 5. *Справочник по физике* / Под ред. Б.М. Яворского и А.А. Детлафа. Москва : 1986. 356 с. 6. RENEWABLE ENERGY WORD. 2000. Vol. 3. N2. С.25- 35. 7. *Гелиоэнергетика - будущее Украины* [Электронный

ресурс]/ НТУ «ХПИ», Харьков. Режим доступа: <http://users/Kpi.Kharkov.ua/fmeg/gelioinukrfine.html>. 2008г. Загл. с экрана. **8.** *Гурин В.Н., Гурин Д.В.* Разработка эффективного селективного покрытия для солнечных тепловых коллекторов / В.Н. Гурин, Д.В.Гурин // Вестник Международного Славянского Университета. Серия: “Технические науки”, 2008. Том XI. №1. С.22-25. **9.** *Бутузов, В.А.* Солнечное теплоснабжение: состояние дел и перспективы развития /В.А.Бутузов // Энергосбережение. 2000. №4. С.28-30. **10.** *Стронський Л.М.* Сонячне випромінювання – альтернатива енергозабезпечення України в контексті глобальної ситуації / Л.М.Стронський // Ринок інсталяційний. 2000. 6. С.28-29. **11.** *Тепловые насосы и солнечные коллекторы* [Электронный ресурс] /Режим доступа <http://board-of.crimea.ua/tovar/Bu-tent-ukrytie-re>. 02.03.2008. Загл. с экрана. **12.** *Солнечные коллекторы* [Электронный ресурс] / Режим доступа <http://www.artclimat.com.ua/equipment/solar/>. 21.03.2008. Загл с экрана. **13.** *Viessmann техника майбутнього* // Ринок інсталяційний. 2000. 6.С.19. **14.** *Исследование характеристик солнечных абсорбционных термо-трансформаторов на математической модели.* Нетрадиц. энергетика в XXI веке: Докл. II Междунар. конф. Крым, Ялта, 17-22 сент. 2001 / А.Р.Ферт, И.П.Толстых. К., 2001. С.126-128. **15.** *Гурин В.Н., Гурин Д.В.* Разработка конструкции солнечного теплового коллектора и рекомендации по его использованию /В.Н.Гурин, Д.В. Гурин// Вестник Международного Славянского Университета. Серия: “Технические науки”, 2008. Том XI. №1.С.14-19. **16.** *Гелиоустановки горячего водоснабжения в России: экономические и энергетические показатели: Нетрадиц. энергетика в XXI веке: Докл. II Междунар. конф. Крым, Ялта. 17-22 сент. 2001/ В.А.Бутузов. К.: 2001.С.113-115.*

Поступила в редколлегию 11.03.2012

Гурин Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Экономической кибернетики и управления экономической безопасностью» НТУ ХПИ. Научные интересы: разработка инвестиционных проектов. Увлечения: горный и водный туризм. Адрес: Украина, 61100, Харьков, ул. Тимирязева, 28, кв. 228, тел: 0634935462 (моб.), 3764242 (дом.), 7021490 (раб.).

Яшков Игорь Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры ТАПР ХНУРЭ. Научные интересы: автоматизация технологических процессов. Адрес: Украина, 61001, Харьков, пр. Гагарина, 21, кв.27, тел: 0679101493 (моб.)

Гурин Дмитрий Валерьевич, студент группы АКИТ-10-1 ХНУРЭ. Научные интересы: автоматизация технологических процессов. Увлечения: горный туризм, путешествия. Адрес: Украина, Харьков, ул. Тимирязева, 28, кв.228, тел. 0936455278 (моб.), 3764242 (дом.).

УДК.544.032

П.П. ЛОШИЦКИЙ, Д.Ю. МИНЗЯК

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ**

Показывается возможность дистанционного определения концентраций растворов и регулирования жизнедеятельности микроорганизмов, помещенных в водный раствор питательной среды при воздействии электромагнитного излучения, с учетом эффекта “памяти воды”.

1. Введение

Развитие исследований взаимодействия коротковолнового сверхвысокочастотного электромагнитного излучения с различными водными растворами существенно расширило представление о физических явлениях, имеющих место при подобном взаимодействии. Фактически можно говорить о создании высокоточных методов диагностики состояния биологических объектов. Использование этих методов в различных областях химии, медицины и физики становится актуальной задачей на современном этапе развития исследований.

Взаимодействия электромагнитных излучений различных частотных диапазонов с веществом используются для определения параметров этого вещества. Наиболее разрабо-

танными являются оптические методы определения концентраций и фракционного состава малых частиц в газах и жидкостях, которые основываются на измерении таких характеристик:

- проозрачность;
- степень поляризации рассеяния света;
- индикатриса рассеяния;
- дифракционная картина;
- голографическая картина [1].

Таким образом, вещество, взаимодействующее с излучением, модулирует несущий сигнал, т.е. меняет его амплитуду, форму, фазу, частотные свойства. Модулированный веществом сигнал является материальным носителем информации об этом веществе.

Известно, что физические факторы, в том числе электромагнитные излучения крайне низкой интенсивности, влияют на свойства и функционирование биологических объектов [2]. При взаимодействии биологических объектов с физическими факторами первичной «мишенью» является вода [3]. Изменение свойств воды и образование ее радикалов, влияющих на биологические объекты, которые находятся в воде или содержат воду, регулируют жизнедеятельность живых организмов или меняют свойства биологических объектов при воздействии физических факторов даже очень слабых интенсивностей. Учитывая, что вода обладает свойством сохранять изменения состояния, вызванные внешними воздействиями («памятью») [4], можно полагать, что существует возможность изменения свойств водных растворов при дистанционном контакте с заданным химическим веществом под воздействием электромагнитного излучения.

В работе [5] описываются результаты воздействия химических веществ, находящихся в запаянной ампуле, на взвесь микроорганизмов, передачу свойств химического вещества с помощью антенн, в качестве которых использовались акупунктурные иглы, а также обычные проводники, соединяющие вещество и биологический объект.

Данная методика не получила развития. Это может быть связано как с определенной необъективностью приводимых результатов, так и со сложностями овладения методов, для которых нужно затратить много времени и сил даже квалифицированному специалисту в области рефлексотерапии [5].

На более высоком научном уровне похожие идеи развиваются в работе [6], посвященной волновой генетике.

Волновая генетика – это сравнительно новое направление в биологии. Предлагаемое положение о кодовых полях распределенной системы хромосомных излучателей (в дополнение к известному матричному синтезу белков) представляет не только теоретический интерес, но имеет также большое практическое значение. Уже сейчас видны перспективы его использования в электронике, молекулярной биотехнологии, онкологии, геронтологии и других разделах медицины. Комплексный подход к анализу работы генетического аппарата позволяет понять механизмы фрактальной свертки пространственно-временных характеристик биосистемы в ее хромосомах с учетом их микроокружения.

В экспериментах с использованием спектроскопии корреляции фотонов проведено доказательство генерации гелями ДНК *in vitro* акустических солитонов, в рамках явления возврата Ферми – Паста - Улама. Практические исследования включили в себя также опыты по дистанционной трансляции излученных сигналов от зародышей к эмбриональной ткани с помощью электромагнитных излучений, что согласуется с известными экспериментами Дзянь-Каньджня (г. Хабаровск).

Данное направление исследований не получило ни широкого распространения, ни достаточного внедрения в практическую медицину. Таким образом, на сегодняшний день, имеется ряд теоретически перспективных направлений, в которых надежд и ожиданий значительно больше полученных практических результатов. Поэтому цель настоящей работы – исследовать возможности применения электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн для дистанционного определения, регулирования и управления свойствами водных растворов, используя эффект «памяти воды».

2. Основная часть

2.1. Дистанционное определение концентрации

Вода и водные растворы обладают целым рядом особых свойств, которых не имеют другие жидкости. Одним из таких свойств является “память воды”, суть которого сводится к тому, что спонтанные колебания воды связаны с образованием гигантских гетерофазных кластеров [7]. Свойства этих кластеров сильно зависят от наличия примесей в самом незначительном количестве, а также от внешних воздействий крайне низких интенсивностей. При этом спонтанные колебания одного раствора способны воспринимать и реагировать на колебания других водных растворов, изолированных диэлектрической емкостью и помещенных в данный раствор [4]. Спонтанные колебания массы жидкости влекут за собой локальные колебания температуры в объеме жидкости. В работе [8] показано, что по стохастическим колебаниям (флуктуациям) локальной температуры можно определить концентрацию растворенных веществ в воде с помощью соответствующей статистической обработки. Используя “память воды”, данную методику можно модернизировать. Закрытую емкость с раствором неизвестной концентрации помещают в сосуд с водой, в котором измерения флуктуации дифференциальной локальной температуры. Для «стабилизации» процесса измеряют и увеличения амплитуды изменения флуктуаций температуры используют эффект стохастического резонанса [9]. Для этого емкость с неизвестной концентрацией раствора облучают широкополосным шумом крайне высоких частот и очень низкой интенсивности (частотой 57...68 ГГц с уровнем спектральной плотности шума 10^{-19} Вт/Гц·см³). Обработку результатов измерений и определение неизвестной концентрации раствора осуществляют методом, описанным в работе [8].

2.2. Изменение электромагнитной волны при взаимодействии с веществом

Не искажая свойств среды, электромагнитное излучение обеспечивает получение данных об ансамбле исследуемых частиц взвеси и позволяет зафиксировать динамику изменения состояния вещества с высоким временным разрешением.

Сущность взаимодействия электромагнитных волн с веществом сводится к интерференции падающей первичной волны с вторичными волнами, возникающими вследствие колебания электронов и ионов вещества, обусловленных действием поля первичной волны. Несмотря на то, что количественная теория о поглощении и рассеянии электромагнитных излучений произвольными биологическими дисперсными средами отсутствует, важную информацию о взаимодействии вещества и излучения можно получить на основе изучения взаимодействия излучения с модельными средами [10,11].

При этом известно, что в оптическом диапазоне рефракцию смеси веществ R можно вычислить, если известны рефракции r_1, r_2, \dots – ее отдельных компонент и их процентное содержание c_1, c_2, \dots – в смеси: $100R = c_1 \cdot r_1 + c_2 \cdot r_2 + \dots$

Этот результат означает, что под воздействием электромагнитного излучения поведение молекул каждой компоненты остается таким же, независимо от того, взята ли данная компонента отдельно или в смеси с другими.

3. Экспериментальные измерения

3.1. Определение концентрации

На рис. 1 приведена схема дистанционного измерения концентраций. В качестве модельных объектов измерений использовали бутылки с алкогольными напитками, в которых измеряли содержание этилового спирта и глюкозы. Эти вещества были выбраны по причине легкости измерения стандартными методами относительно точных концентраций спирта и сахара, а также в связи с возможностью сравнить с результатами, полученными разработанной методикой. Результаты части измерений приведены в табл. 1.

Данные, полученные по стандартной методике, подразумевают ГОСТ 3639–79 (Межгосударственный стандарт. Растворы водно – спиртовые).

В табл. 1 размерность единиц измерений приведена к обычно применяемым – спирт в процентах объема, а сахар - в граммах на кубический дециметр.

Основной вклад в погрешность измерений вносит ошибка калибровки эталонных измерений. Результаты дистанционных измерений достаточно хорошо совпадают с результатами непосредственного измерения параметров растворов.

Таблица 1
Результаты измерений

Напиток	Спирт (разработанная методика)	Сахар (разработанная методика)	Спирт (стандартная методика)	Сахар (стандартная методика)
«Маргини» 15%	13.8 %	-	14.1%	-
«Маргини» 15%	14.7%	-	14.9%	-
Вино «Кадарка»	11.1%	32 г/дм ³	11.5%	39 г/дм ³
Вино «Мускат»	15.6%	12 г/дм ³	16%	14 г/дм ³

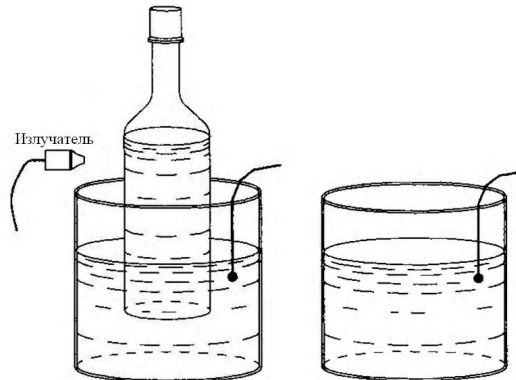


Рис. 1. Схема дистанционного измерения концентрации раствора

3.2. Регулирование жизнедеятельности микроорганизмов

В качестве объекта исследований дистанционного воздействия химических веществ использовались сточные воды дрожжевого производства и перекись водорода. Сточные воды дрожжевого производства после сепарации первой ступени содержат дрожжевые клетки в концентрации $10^6 \dots 10^7$ условных единиц в 1 см^3 . Выживаемость дрожжевых клеток резко уменьшается при наличии в окружающей среде перекиси водорода (H_2O_2). Повышение концентрации H_2O_2 обратно пропорционально выживаемости. Экспериментальные исследования проводились по схеме, приведенной на рис.2.

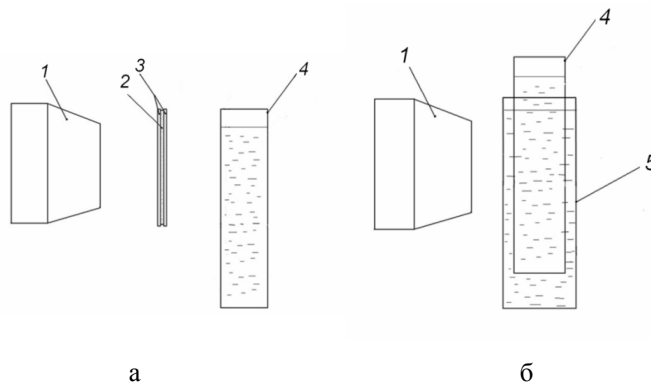


Рис.2. Схема обработки сточных вод дрожжевого производства

На рис.2: 1– генератор электромагнитного излучения крайне высокой частоты; 2 – тонкий слой раствора H_2O_2 концентрации 35%; помещенный в «модулятор» 3; 4 – емкость со сточной водой дрожжевого производства с концентрацией $n \cdot 10^6$ КОЕ/см³; 5– сосуд с раствором H_2O_2 концентрации 35%.

Пробирки со сточной водой дрожжевого производства с концентрацией $n \cdot 10^6$ КОЕ/см³ (количество образованных единиц) облучались широкополосным шумовым излучением крайне высокой частоты 57...68 ГГц с уровнем спектральной плотности шума 10^{-19} Вт/Гц·см³. При этом в одном случае (рис.2, а) КВЧ - излучение проходило через две плоско – параллельные стеклянные пластинки, которые удерживались вместе силами поверхностно-

го натяжения раствора H_2O_2 концентрацией 35 %, помещенного между пластинками, а во втором случае (рис.2, б) пробирка со сточной водой находилась в сосуде с раствором H_2O_2 такой же концентрации. Влияние облучения на сточную воду оценивалось путем подсчета количества дрожжевых клеток в камере Горяева по стандартной методике.

В качестве контроля использовалась пробирка со сточной водой, которая подвергалась КВЧ – облучению в течение двадцати минут, а между стеклянными пластинами находился раствор дистиллированной воды.

Аналогичные опыты проводились при воздействии низкочастотным импульсным излучением (меандр) с частотой повторения 100 кГц и амплитудой 4 В. Каждая серия экспериментов проводилась в трех повторностях. В табл. 2 приведены результаты экспериментов (средние по каждой серии).

Таблица 2

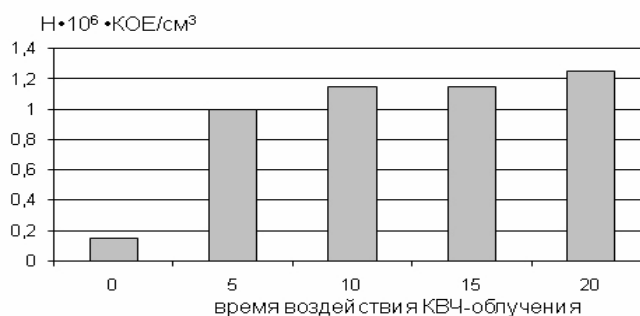
Результаты исследования обработки сточных вод дрожжевого производства

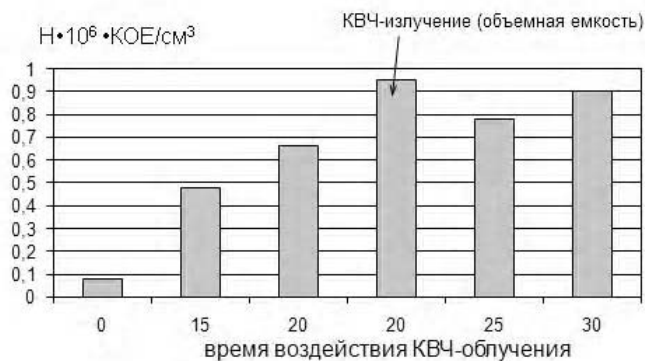
Воздействующий фактор	Время воздействия, мин	Концентрация живых клеток $10^6 \cdot \text{КОЕ}/\text{см}^3$	Концентрация мертвых клеток $10^6 \cdot \text{КОЕ}/\text{см}^3$
КВЧ-излучение	Контроль (0)	$1,4 \pm 0,05$	$0,15 \pm 0,05$
	5	$1,4 \pm 0,05$	$1 \pm 0,05$
	10	$1,4 \pm 0,05$	$1,15 \pm 0,05$
	15	$1,4 \pm 0,05$	$1,15 \pm 0,05$
	20	$1,4 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,05$
КВЧ-излучение	Контроль (0)	$1,6 \pm 0,05$	$0,08 \pm 0,05$
	15	$1,6 \pm 0,05$	$0,48 \pm 0,05$
	20	$1,6 \pm 0,05$	$0,66 \pm 0,05$
	25	$1,6 \pm 0,05$	$0,78 \pm 0,05$
	30	$1,6 \pm 0,05$	$0,9 \pm 0,05$
КВЧ-излучение (объемная емкость)	20	$1,6 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$
НЧ-излучение	Контроль (0)	$1,4 \pm 0,05$	$0,15 \pm 0,05$
	10	$1,4 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,05$
	20	$1,4 \pm 0,05$	$0,85 \pm 0,05$

На рис.3 приведены гистограммы результатов исследования обработки сточных вод дрожжевого производства.

Выводы

1. Электромагнитное излучение при прохождении через вещество приобретает пространственно – временную модуляцию.
2. Экспериментально показана возможность дистанционного определения концентрации растворов.
3. Экспериментально показана возможность дистанционного регулирования свойств водных растворов, когда в качестве несущего используется излучение крайне низкой интенсивности.
4. При увеличении интенсивности несущего излучения результат переноса ухудшается.
5. Увеличение объема вещества, модулирующего электромагнитное излучение, увеличивает эффект воздействия.





б

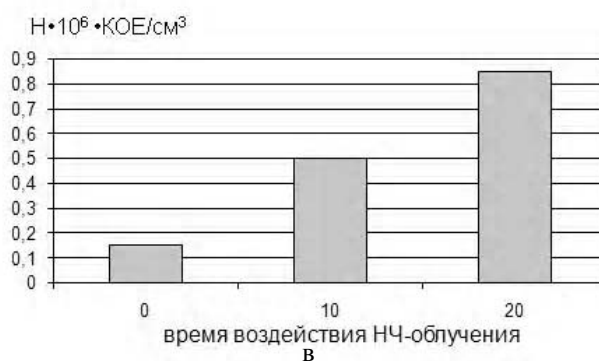


Рис. 3. Гистограммы результатов исследования обработки сточных вод дрожжевого производства: *а* – зависимость мертвых клеток дрожжей от времени КВЧ – облучения (для результатов первой серии исследований); *б* – зависимость мертвых клеток дрожжей от времени КВЧ – облучения (для результатов второй серии исследований); *в* – зависимость мертвых клеток дрожжей от времени НЧ – облучения. *Н* – концентрация мертвых клеток дрожжей

Список литературы: 1. *Бразилковский В.В.* Голографический метод исследования дисперсионного состава аэрозоля / Бразилковский В.В., Вагнер В.А., Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. // Горизонты образования. 2006. №8. С.1-9. 2. *Миллиметровые волны в медицине и биологии* / Под ред. Н.Д.Девяткова. М.: ИРЭ АН СССР, 1989. 128 с. 3. *Лошицкий П.П.* Взаимодействие биологических объектов с физическими факторами. Киев.: НТУУ “КПИ”, 2009. 272 с. 4. Пат. 7А 01С1/00 UA. Спосіб передпосівної обробки насіння / П.П. Лошицький, Т.В. Кондратюк. № 70781А; заявл. 28.12.2003; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10, Изобретения. 5 с. 5. *Лутичев Н.Л.* Электропунктурная диагностика, гомеотерапия и феномен дальнего действия. М.: Альфа-Эко СП, 1990. 136 с. 6. *Горяев П.П.* Волновой геном. М.: Общественная польза, 1994. 280 с. 7. *Goncharuk V.V.* Giant heterophase water clusters on glass surface / V.V.Goncharuk, E.A.Orlova, V.V.Malyarenko // XI Polish – Ukrainian Symposium on Theoretical and Experimental Studies of Interfacial Phenomena and Their Technological Applications, 22 – 26 Aug. 2007. Book of proceedings. – Krasnobrod – Zamosc: MCSU, 2007. P.32. 8. *Лошицкий П.П.* Дослідження концентраційних залежностей водних розчинів / П.П.Лошицький, Д.Ю.Минзяк // Медична інформатика та інженерія. 2011. №2. С.29 – 34. 9. *Анищенко В.С.* Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / В.С.Анищенко, А.Б.Нейман, Ф.Мосс, Л.Шиманский – Гайер // Успехи физических наук. 1999. Т.169, №1. С. 7 – 38. 10. *Фабелинский И.Л.* Молекулярное рассеяние света. М.: Наука, 1965. 542 с. 11. *Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред* / В.Н.Лопатин, А.В. Приезжев, А.Д. Апонасенко, Н.В. Шепелевич, В.В. Лопатин, П.В.Пожаленкова, И.В.Простакова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 384с.

Поступила в редколлегию 04.03.2012

Лошицкий Павел Павлович, д-р техн. наук, профессор НТУУ “КПИ”. Адрес: Украина, Киев, ул. Политехническая, 16, тел. 454-90-64, e-mail: minzyak@mail.ru.

Минзяк Дмитрий Юрьевич, аспирант НТУУ “КПИ”. Адрес: Украина, Киев, ул. Политехническая, 16, тел. 454-90-64, e-mail: minzyak@mail.ru.

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ВАРИАНТОВ ПЛАНОВ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ В ПРЕЦЕДЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Предлагаются модели формирования и многокритериального оценивания вариантов планов развития предприятия с использованием опыта прошлых разработок. Обосновывается использование прецедентного подхода при формировании вариантов планов развития предприятия. Разрабатываются модели многокритериальной оптимизации для выбора предпочтительного решения на основе скалярной оценки функции полезности. Предлагается модифицированная структура прецедентной системы принятия решений и соответствующая иерархическая модель функционирования.

Введение

Жесткие условия конкуренции, в которых функционирует промышленное предприятие, и высокая динамичность внешней среды требуют разработки и использования различного рода стратегий и средств адаптации к возмущающим воздействиям внешней среды, совершенствования структуры и целевой стратегии функционирования предприятия. Основные трудности, с которыми приходится сталкиваться на этапе формулировки и отбора возможных вариантов решения, заключаются в определении количества альтернатив и критериев их оценки. Особенностью процесса принятия решения при выборе варианта развития предприятия является необходимость анализа больших объемов информации при наличии ограничений во времени на оценку вариантов и значительном уровне неопределенности, присущей предпроектному этапу планирования.

В настоящее время отсутствует приемлемая методическая база для решения вопросов анализа и прогноза развития производственного предприятия на предпроектной стадии принятия стратегических решений. Поэтому задача разработки методических и инструментальных средств принятия решения по выбору планов развития предприятия на предпроектном этапе планирования является актуальной.

Постановка задачи

Целью проводимых исследований является повышение обоснованности и достоверности решений, принимаемых на предпроектном этапе планирования, путем разработки моделей формирования оценивания вариантов развития предприятия и применения их в прецедентной системе принятия решений.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Обосновать применение прецедентного подхода в задаче формирования вариантов планов развития предприятия.
2. Разработать модель формирования вариантов стратегий развития предприятия.
3. Разработать модель многокритериального оценивания вариантов стратегий развития.
4. Модифицировать структуру прецедентной системы принятия решений на основе модели ее функционирования.

Целевой подход с системных позиций позволяет наиболее полно решать задачу принятия решений для выработки стратегии развития предприятия [1]. Переход от концептуального этапа управления развитием к разработке вариантов его практической реализации происходит на основе предпроектной проработки различных вариантов и оценки реализуемости достижения целей отдельными подсистемами и глобальной цели системы в соответствии со стратегической концепцией развития [2].

При формировании перечня возможных вариантов используются различные методы поиска информации, в том числе и метод аналогий (прецедентов), основанный на использовании опыта прошлых разработок.

Реализация этапа оценки вариантов связана с необходимостью перехода от качественных лингвистических переменных к некоторой метрике заданного набора частных критериев вариантов [3]. Сложность решения задачи многофакторного оценивания обусловлена многомерностью факторного пространства и разнородностью ее размерности, интервалом возможных значений и др. [4]. Таким образом, возникает задача построения модели многофакторного оценивания, отвечающей определенной ситуации принятия решения.

Существующие системы поддержки принятия решений (СППР) в основном рассчитаны на использование в ситуациях, когда прецедент является четко заданным и определенным через множество достоверных свойств ситуации. Концепция четырехфазного цикла основана на предположениях о некоинцидентности источников информации о проблемной ситуации, статичности описания прецедента и независимости прецедентов и, соответственно, проблемных ситуаций друг от друга. Перед лицом, принимающим решение (ЛПР) относительно стратегии развития предприятия, встает проблема анализа ситуации и оценки способа реализации выбранной стратегии. Вначале решается задача поиска поля удовлетворяющих действий, а затем выбора лучшей стратегии в этом поле.

Решение задачи

Предлагается использовать для формирования вариантов планов развития предприятия прецедентный подход [5], позволяющий решать задачи поддержки принятия решений в сложных слабоструктурированных системах. Выбор данного подхода обусловлен тем, что зачастую на производственном предприятии к моменту возникновения проблемы выпуска новой продукции или ее модернизации уже накоплен значительный опыт решения похожих проблем, возникавших ранее. Представление этого опыта в виде прецедентов и его автоматизированная обработка при помощи специализированных систем принятия решений позволяют значительно повысить эффективность его повторного применения.

Формирование вариантов планов развития предприятия предполагает использование информации, которая является результатом анализа документации прошлых разработок. Поиск и отбор вариантов решений производится в системе прецедентного типа с учетом степени сходства для получения необходимой информации о параметрах производства.

Процесс формирования вариантов как основы выбора является нетривиальной задачей принятия решения, особенно на предпроектной стадии. Возможность упустить из рассмотрения приемлемый (продуктивный) вариант усиливает важность и ответственность данного этапа.

Прецедент представляет собой информационный блок, включающий в себя базовую ситуацию и соответствующее ей решение. В процессе производственной деятельности в предметной области формируются проблемно-ориентированные прецеденты, накапливающиеся в хранилище, в качестве которого могут выступать традиционные базы данных, специализированные серверы знаний, многомерные БД, архивы и т.д.

Решение проблемы по аналогии основано на распознавании текущей проблемной ситуации, информация о которой представлена в виде некоего образа (аналога), и поиске похожих образов, содержащихся в хранилище образов (базе прецедентов), с последующей их адаптацией и повторным использованием для решения задач исследования.

Принятие решения на основе прецедентного подхода предполагает решение следующих задач:

- выбор способа представления знаний о ситуации и возможных решениях;
- определение способа поиска и выбора технологических решений в хранилище прецедентов;
- разработка метода идентификации и адаптации решений.

Одной из главных задач прецедентной системы принятия решений является накопление и упорядочение достаточно большого и уместного для принятия решений множества прецедентов, для хранения которых используются их архивы, в каждом из них имеется вся необходимая информация для формирования технологического и соответствующего планового решения.

Алгоритм формирования базы прецедентов включает следующие фазы:

- 1) определение весовых коэффициентов признаков для оценки уровня значимости прецедента в рассматриваемой базе;

- 2) кластеризация прецедентов по выявленным признакам;
- 3) поиск требуемого множества прецедентов на основе критерия подобия ситуаций.

Для реализации данного алгоритма разработаны модели формирования и отбора вариантов из базы прецедентов, основанные на прецедентном подходе и вычислении меры сходства предполагаемых аналогичных технологических решений к заданным требованиям.

Определяется оценочная функция признаков – чем меньшее (или большее) значение имеет эта функция, тем более важен соответствующий признак. Оценочная функция позволяет в дальнейшем производить отбор уместных прецедентов, используя отношение подобия, построенное на множестве наиболее важных признаков [6].

Для заданного набора весов признаков w_j ($w_j \in [0, 1], j = 1, \dots, n$) и пары прецедентов e_p и e_q , определим взвешенную меру близости как

$$d_{pq}^{(w)} = \left(\sum_{j=1}^n w_j^2 (x_{pj} - x_{qj})^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

а меру подобия прецедентов

$$SM_{pq}^{(w)} = \frac{1}{1 + d_{pq}^{(w)}},$$

где x – значения признаков.

Оценочная функция признаков определяется следующим образом:

$$E(w) = \frac{2 \left[\sum_p \sum_{q(q < p)} \left(SM_{pq}^{(w)} (1 - SM_{pq}) + SM_{pq} (1 - SM_{pq}^{(w)}) \right) \right]}{N(N-1)},$$

здесь N – число прецедентов в базе.

Кластеризация базы прецедентов используется для ускорения операций выборки сходных прецедентов и предварительного разбиения их базы на компактные множества покрытия. Алгоритм кластеризации основывается на категории сходства и предполагает следующие этапы:

- 1) задается уровень значимости (пороговый уровень) $\beta \in [0, 1]$;
- 2) определяется модифицированная матрица подобия

$$SM1 = \max_k \left[\min \left(SM_{pq}^{(w)}, SM_{kq}^{(w)} \right) \right];$$

3) если $SM1 \subset SM$, то определяются отдельные кластеры на основе правила: прецедент p и прецедент q принадлежат одному и тому кластеру тогда и только тогда, когда $s_{pq} \geq \beta$, в противном случае матрица SM заменяется на $SM1$ и выполняется возврат к шагу 2.

После того как исходная база данных разделена на отдельные кластеры, можно реализовать процедуру поиска подобных прецедентов (на основе отношения подобия).

В системе поддержки прецедентных решений, построенной на основе представленных моделей формирования базы прецедентов, временные затраты на поиск решения существенно снижаются, в результате чего быстродействие системы увеличивается.

Для задачи попарного сравнения иницирующего прецедента с отобранными из хранилища вычисляются отклонения характеристик планируемого варианта от найденных эталонных, которое обозначим Δx_i . Характеристики x_i необходимо нормализовать и привести к изоморфному виду, для этого можно использовать функцию полезности.

Задача ранжирования и отбора прецедентов на основе оценки подобия осуществляется на основе модели многофакторной обобщенной оценки в виде «расстояния» характеристик планируемого варианта от найденных эталонных, которая имеет вид:

$$L = \sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i,$$

где a_i – весовые коэффициенты, определяющие значимость отдельных характеристик по отношению к другим, $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, $0 < a_i \leq 1$. Принцип оптимальности: $x^\circ_{II} = \arg \min_{x \in X} \sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i$.

По такому принципу происходит ранжирование найденных эталонных ТП по степени подобия планируемому.

Для оценки найденных вариантов и выбора предпочтительного разработаны модели многокритериального оценивания. Они необходимы при реализации следующих задач процедуры принятия решения [7]:

- задание метрики, т.е. критериев оценки качества $K(x)$ допустимых решений $x \in X$;
- определение наилучшего (экстремального по $K(x)$) решения $x^\circ \in X$.

Каждое решение характеризуется набором критериев, которые определяют некоторые частные аспекты эффективности решения, а их совокупность достаточно полно характеризует «качество» решения в целом. Таким образом, решение x в общем случае определяется множеством частных критериев $K(x) = \{k_i(x)\}$, $i = \overline{1, n}$.

Нахождение оптимального решения x° связано с решением задачи

$$x^\circ = \arg \operatorname{extr}_{x \in X} K(x) \equiv \arg \operatorname{extr} \{k_i(x)\}, i = \overline{1, n}.$$

Разрешимость задачи обусловлена структурой множества допустимых решений X . Это множество состоит из двух подмножеств: согласованных X^S и противоречивых (компромиссных) X^C решений $X = X^S \cup X^C$; $X^S \cap X^C = \emptyset$.

Оценивание вариантов производится на основе обобщенного скалярного критерия и использует сформированную на множестве частных критериев количественную многофакторную оценку вида:

$$P(x) = F[k_i(x), A],$$

где A – кортеж параметров модели, для которой выполняется следующее условие:

$$x_1, x_2 \in X \text{ и } x_1 \succ x_2, \text{ то } P(x_1) > P(x_2).$$

Знак « \succ » означает отношение порядка.

Таким образом, функция полезности является количественной мерой относительной предпочтительности решений.

Реализация приведенной выше модели задачи многокритериальной оптимизации предполагает, что для решения $x_j \in X$ известен кортеж значений частных критериев:

$$K(x_j) = \langle k_i(x_j) \rangle, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}.$$

Это означает, что известны зависимости, определяющие связь между управляемыми переменными (решениями x) и значениями частных критериев, т.е.

$$k_{ij}(x) = f_i(x_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}.$$

Рассматриваемая задача может быть представлена математической моделью в терминах теории полезности в виде:

$$\Phi(x) = P[Z(a_j)K_i(x)], i = \overline{1, n},$$

где $K_i(x)$, $i = \overline{1, n}$ – частные критерии; $Z(a_i)$ – субъективная информация о предпочтительности частных критериев у ЛППР.

Главным в построении модели такого типа является определение вида оператора P (структуры модели), для чего необходимо иметь информацию о значимости и форме представления частных критериев. Эти вопросы решаются при построении модели для каждого конкретного случая.

Используя понятие функции полезности частных критериев, модель формирования многофакторной оценки альтернативы $x \in X$ можно представить в виде:

$$\Phi(x) = P[Z(a_i)', m_i[K_i(x)]], i = \overline{1, n},$$

где $m[K_i(x)]$ – функция полезности частных критериев; $Z(a_i)'$ – информация об относительной важности этой функции.

Каждая альтернатива $x \in X$ характеризуется набором частных критериев, которые имеют свой интервал и разную размерность. Исходя из этого, конкретная альтернатива может описываться нелинейностями различного типа. Этот факт необходимо учитывать при выборе функции полезности частных критериев.

Перечисленным выше требованиям отвечает функция полезности вида:

$$m_i[K_i(x)] = \left(\frac{K_i(x) - K_{iHX}}{K_{iHL} - K_{iHX}} \right)^{\alpha_i},$$

где $K_i(x)$ – значение частного критерия; K_{iHL}, K_{iHX} – соответственно наилучшее и наихудшее значение частного критерия, которое он принимает на области допустимых решений $x \in X$; α_i – параметр, определяющий вид зависимости: при $0 < \alpha_i < 1$ – выпуклая вверх; при $\alpha_i = 1$ – линейная; при $\alpha_i > 1$ – выпуклая вниз.

Для реализации разработанных моделей в системе принятия решений возникла необходимость модификации структуры прецедентной системы. Вследствие этого была предложена модель прецедентной системы принятия решений в виде иерархии функций и задач поиска, выбора прецедентов с последующей многокритериальной оценкой отобранных вариантов.

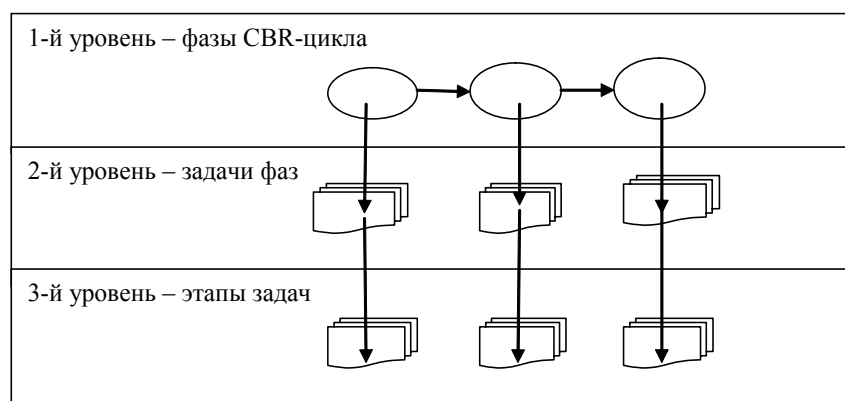
Цикл принятия решения (СВР-цикл) формально представим как совокупность последовательно выполняемых фаз [8]:

$$СВР = \langle F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6 \rangle,$$

где F_1 – фаза выбора прецедентов, подобных иницирующему объекту, на основе оценки подобия; F_2 – фаза принятия решения в проблемной ситуации путем использования извлеченного прецедента; F_3 – фаза верификации и адаптации извлеченного прецедента; F_4 – фаза сохранения вновь принятого решения в хранилище прецедентов; F_5 – фаза пересмотра хранилища прецедентов на основе оценки качества прецедента с помощью синтаксических либо семантических мер; F_6 – фаза восстановления (реконструкции) хранилища прецедентов.

После определения фаз СВР-цикла была произведена их декомпозиция на составляющие задачи, при этом определены входные параметры для каждой фазы. В результате была сформирована иерархическая структурно-параметрическая модель функционирования прецедентной системы принятия решений (ПСПР), которая представляет собой последовательность и взаимосвязь фаз СВР-цикла, направленных на реализацию основной цели системы – выбора наилучшего решения из структурированной базы прецедентов.

При этом предполагается последовательное решение определенного набора задач с выделением этапов их решения. Таким образом, обобщенная иерархическая структура модели функционирования ПСПР содержит три уровня (рисунок).



Обобщенная иерархическая структура модели функционирования ПСПР

Заклучение

Впервые разработаны модели формирования и оценивания вариантов стратегий развития предприятия, которые основаны на использовании опыта прошлых разработок и вычисления меры сходства для сравнения многокритериальных вариантов, что повышает обоснованность и достоверность управленческих решений, принимаемых на предпроектном этапе планирования развития. В модели формирования вариантов стратегий развития накопленный опыт представляется в виде прецедентов решений в архиве предприятия и позволяет производить его автоматизированную обработку при помощи специализированной системы принятия решений. Степень сходства определяется путем покоординатного сопоставления проблемной ситуации с ситуацией прецедента, в результате определяются расстояние между проблемной ситуацией и ситуацией прецедента. Принятие решения о выборе предпочтительного производится с помощью модели оценивания, которая предполагает построение скалярных оценок на основе многокритериального оценивания вариантов и оптимизации многокритериальной функции.

Модифицирована структура прецедентной системы принятия решений по выбору варианта развития предприятия. В результате получила дальнейшее развитие модель прецедентной системы принятия решений по выбору вариантов планов развития предприятия, которая в отличие от существующих позволяет сократить количество анализируемых вариантов. Модель предполагает построение структуры СВР-цикла в виде набора шести последовательных фаз с последующей структурной декомпозицией задач системы принятия решений на соответствующих фазах функционирования.

Предложенные модели имеют практическое значение, так как реализованы в инженерных методиках, которые использованы в прецедентной системе информационной поддержки и принятия управленческих решений для оценивания и оптимизации многофакторных альтернатив. Возникает возможность формирования множества вариантов для оптимизации процесса производства на основе использования опыта прошлых разработок из архива аналогов в структуре прецедентной системы.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении использования предложенного подхода и разработанных моделей для формирования системы критериев принятия решений в задачах логистического управления предприятием.

Список литературы: 1. *Петров Э.Г.* Управление устойчивым развитием предприятий / Петров Э.Г., Подмогильный Н.В., Соколова Н.А., Ходаков В.Е. Херсон: 2009. 558с. 2. *Гриша С.М.* Прийняття рішень на базі досвіду як підхід до подолання фактора суб'єктивності / Гриша С.М., Гнатенко Н.С. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2008. № 4. С. 62-75. 3. *Блинов С.А.* Методика обстеження і многокритеріальна оцінка типових варіантів ГПС [текст] / Блинов С.А., Васильев В.Н. // Проблеми створення ГАП. М.: Наука, 1987. С. 22-26. 4. *Дехтяренко, В.А.* Алгоритмічна модель многокритеріальної оцінки рішень на множині векторів обмежень / Дехтяренко В.А. // Методи і системи прийняття рішень. Проблеми створення експертних систем. Рига: Риж. політех. ін-т, 1988. С. 52-58. 5. *Шерстюк В.Г.* Формальна модель гібридної сценарно-прецедентної СППР / В.Г. Шерстюк / Шерстюк В.Г. // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси і системи. 2004. Вип. 1. С. 114-122. 6. *Артюх, Р.В.* Модели формирования вариантов стратегии развития / Р.В. Артюх, А.А. Белоцкий // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХУПС. Вип. 8 (98). Харків, 2011. С. 263-265. 7. *Артюх, Р.В.* Критеріальний аналіз при неповній інформації / Р.В. Артюх, А.А. Белоцкий, О.Н. Замирець // Проблеми інформаційних технологій. 2011. Вип. 9. С. 95-99. 8. *Замирець О.Н.* Модель оцінки варіантів стратегії розвитку [текст] / О.Н. Замирець, Р.В. Артюх, А.А. Белоцкий // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Вип. 3(29). Х., 2011. С. 107-109.

Поступила в редколлегию 11.03.2012

Артюх Роман Владимирович, мл. науч. сотр. НДІ СТ ХНУРЕ. Научные интересы: стратегии развития предприятий, технологические процессы производства, теория принятия решений, многокритериальные модели. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, roman_artuuh@mail.ru, тел.: моб. 0675720625, раб. 702-14-32.

Божинский Иван Андреевич, канд. техн. наук, зам. начальника НИЧ ХНУРЕ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-378.