

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 0135-1710

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ

**Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

Выпуск 149

Харьков
2009

В сборнике представлены результаты исследований, касающихся компьютерной инженерии, управления, технической диагностики, автоматизации проектирования, оптимизированного использования компьютерных сетей и создания интеллектуальных экспертных систем. Предложены новые подходы, алгоритмы и их программная реализация в области автоматического управления сложными системами, оригинальные информационные технологии в науке, образовании, медицине.

Для преподавателей университетов, научных работников, специалистов, аспирантов.

У збірнику наведено результати досліджень, що стосуються комп'ютерної інженерії, управління, технічної діагностики, автоматизації проектування, оптимізованого використання комп'ютерних мереж і створення інтелектуальних експертних систем. Запропоновано нові підходи, алгоритми та їх програмна реалізація в області автоматичного управління складними системами, оригінальні інформаційні технології в науці, освіті, медицині.

Для викладачів університетів, науковців, фахівців, аспірантів.

Редакционная коллегия:

В.В. Семенец, д-р техн. наук, проф. (гл. ред.), *М.Ф. Бондаренко*, д-р техн. наук, проф., *И.Д. Горбенко*, д-р техн. наук, проф., *Е.П. Пуятин*, д-р техн. наук, проф., *В.П. Тарасенко*, д-р техн. наук, проф., *Г.И. Загарий*, д-р техн. наук, проф., *А.Штефан*, доктор-инженер, *Г.Ф. Кривуля*, д-р техн. наук, проф., *О.Г. Руденко*, д-р техн. наук, проф., *Н.В. Алипов*, д-р техн. наук, проф., *Е.В. Бодянский*, д-р техн. наук, проф., *Э.Г. Петров*, д-р техн. наук, проф., *В.Ф. Шостак*, д-р техн. наук, проф., *В.М. Левыкин*, д-р техн. наук, проф., *В.И. Хаханов*, д-р техн. наук, проф. (отв. ред.).

Свидетельство о государственной регистрации
печатного средства массовой информации

КВ № 12073-944ПР от 07.12.2006 г.

Адрес редакционной коллегии: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, комн. 321, тел. 70-21-326

© Харківський національний університет
радіоелектроніки, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ПОДЦЫКИН Н.С. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	4
ТЕВЯШЕВ А.Д., МАМЕДОВА А.А., ФРОЛОВ В.А. СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ.....	9
ХАХАНОВ В.И., ГУЗЬ О. А., ТИЕКУРА ИВ (TIECOURA YVES), НГЕНЕ КРИСТОФЕР УМЕРАХ (NGENE CHRISTOPHER UMERAH), КОПАНЕВ В.И. ИНФРАСТРУКТУРА ЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АССОЦИАТИВНЫХ ТАБЛИЦ.....	18
БАРАННИК В.В., СИДОРЕНКО Н.Ф., ШИНКАРЕВ В.В. МЕТОД КОМПОЗИЦИИ ПЕРФОРИРОВАННЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ЧИСЕЛ.....	30
СЛЕСАРЕНКО А.П., РОМАНЧЕНКО М.А., СОРОКА О.С. МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В 3-ВИМІРНІЙ БАГАТОШАРОВІЙ СТРУКТУРІ З ТРУБЧАСТИМИ НАГРІВАЧАМИ ДЛЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ПРИМІЩЕННЯ.....	36
ТЕВЯШЕВ А.Д., ВЫХОДЦЕВ Е.И., ПЕТРОВ К.Д., ДОМНЕНКО С.Н. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАММОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА.....	46
ЧЕРЕДНИЧЕНКО О.Ю., ЗОЛОТЬКО Н.В. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ВЫПУСКНИКОВ.....	53
СНИТЮК В.Е., КУЧЕР П.П. КОМПЛЕКТОВАНИЕ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ – ЗАДАЧА НЕЧЕТКОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.....	60
КУЛИК И.А., КОСТЕЛЬ С.В. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МЕТОД БИНОМИАЛЬНОГО НУМЕРАЦИОННОГО КОДИРОВАНИЯ.....	66
БАБИЧЕВ С.А., ПОГРЕБНЯК И.Ф., ШАРКО А.В. РАЗРАБОТКА БАЗОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, МОТИВИРОВАННЫХ ИНТЕРЕСАМИ.....	77
ДОВБИШ А.С., АЛТИННИКОВА К.В. ІЄРАРХІЧНИЙ АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРОНОГРАМ.....	85
ПРОЦАЙ Н.Т. МОДЕЛИ ЯЗЫКА – МОДЕЛЬ СКЛОНЕНИЯ СЛОВСОЧЕТАНИЙ.....	91
ЗАЙЧЕНКО С.А., ЛИТВИНОВА Е.И., ПОБЕЖЕНКО И.А. МОДЕЛЬ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЫСОКОУРОВНЕВЫХ ОПЕРАТОРОВ LTL-ЛОГИКИ.....	96
ПЕТРОВ А.Г., ПЕТРЕНКО В.Р. РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОПРОДУКТОВИХ БАГАТОСТАДІЙНИХ ДИСКРЕТНИХ ВИРОБНИЦТВ.....	111
РЕФЕРАТИ	118

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается дискретная математическая модель надежности стареющей технической системы, состояние которой ухудшается со временем, возрастает вероятность отказа. Предполагается, что в целях оптимизации работоспособности системы в случайные моменты времени проводятся профилактические ремонты разной глубины. Цель работы – обосновать правило выбора таких ремонтов, обеспечивающих оптимальный уровень работоспособности.

1. Общая постановка задачи, актуальность и цель исследования

Известно, что все технические системы в процессе наблюдения и эксплуатации ухудшают свои характеристики, а также увеличивается вероятность их отказа. Во многих случаях вероятность отказа является наиболее важной для моделирования, так как приводит к длительному простаиванию системы и значительным затратам на ее восстановление. Вероятность отказа может быть уменьшена и доведена до оптимального уровня с помощью проведения профилактических ремонтов. Обычно такие ремонты определяются регламентом в заранее определенные моменты времени. Реально, в силу различных причин, их реализация происходит в случайные моменты времени. В модели, которая будет построена, учитывается это обстоятельство.

Цель исследования – построить математическую модель надежности и работоспособности управляемой технической системы с конечным числом состояний. В статье рассматривается наиболее перспективный подход к моделированию надежности технических систем, предполагающий введение состояния, от которого зависит уровень работоспособности и вероятность отказа. Такой подход позволяет учесть индивидуальные особенности системы, например, скорость износа, что в свою очередь даст возможность более адекватно принимать решения по ее профилактическому обслуживанию. Существующие методы моделирования [1] для выбора оптимальных решений пользуются статистическими данными, полученными по большой группе однотипных систем. Основной величиной при этом является “наработка на отказ”. Понятно, что индивидуальные особенности конкретной системы в этом случае не учитываются. Целью моделирования является поддержание оптимальной работоспособности отдельной системы с учетом ее состояния на неограниченном интервале времени. В основу моделирования положен марковский случайный процесс.

В предлагаемой работе автор развивает подход к моделированию надежности технических систем, представленный в [2].

2. Математическая модель

Пусть стохастическая система S контролируется через случайный период времени $\zeta = \min(\xi, \tau)$, где ξ – случайное время до отказа, зависящее от наблюдаемого состояния в последний момент контроля; τ – плановый случайный период контроля, имеющий распределение Эрланга k -го порядка. В каждый момент контроля система может находиться в одном из состояний конечного множества $E' = \{x_1, \dots, x_N\}$. Будем считать, что наилучшим состоянием, в котором вероятность отказа минимальна, является x_1 , а наихудшим – состояние x_N . Состоянию x_1 соответствует новая система, а состоянию x_N – максимально изношенная. Все остальные состояния – промежуточные, вероятность отказа в которых упорядочена по его возрастанию от минимального к максимальному. Нам будет удобно расширить множество состояний, снабдив каждый элемент $x_i \in E$ вторым индексом s , $s = 1, \dots, k+1$. При этом $s = 1, \dots, k$ указывает на фазу эрланговского распределения [2] периода τ , $s = k+1$ указывает на состояние планового контроля. Обозначим $E'' = \{x_{is}\}$, $i = 1, \dots, N$, $s = 1, \dots, k+1$. Таким образом, полное множество состояний $E = E'' \cup \{x_0\}$.

Пусть в плановый момент контроля система находится в состоянии x_{jk+1} , $j=1, \dots, N$, в котором применяется одно из возможных профилактических ремонтов. Положим, что множество допустимых профилактических ремонтов, которое назовем множеством управлений и обозначим $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$, конечно. Элемент этого множества, управление y_i , определяет глубину обновления системы. Оно определяет интенсивности μ_{js} перехода системы из состояния x_{jk+1} в состояние x_{s1} , $s=1, \dots, j$. Будем считать, что чем глубже управление обеспечивает обновление системы, тем больше интенсивность перехода в состояние с меньшим номером s . Однако будем учитывать, что чем глубже обновление системы, тем больше стоит это управление.

Естественно считать, что отказ системы возможен в любом состоянии x_{js} , $j=1, \dots, N$, $s=1, \dots, k$, причем интенсивность отказа v_j не зависит от фазы s . Считаем формально, что отказ системы приводит к переходу ее в состояние x_0 . В состоянии x_0 система восстанавливается в одно из состояний x_{j1} , с интенсивностью ϕ_j , $j=1, \dots, N$.

Обозначим интенсивность перехода между фазами через λ .

Основная задача моделирования будет состоять в выборе оптимальной стратегии управления, т.е. в выборе вида профилактического ремонта для каждого состояния в каждый момент контроля.

Система уравнений Колмогорова для вероятностей состояний предложенной выше модели имеет следующий вид [4]:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} P_{11}(t) &= -(v_1 + \lambda_1 + 1)P_{11}(t) + \phi_1 P_0(t) + \sum_{i=1}^N \mu_{i1} P_{ik}(t), \\
\frac{d}{dt} P_{s1}(t) &= -(v_s + \lambda_s + 1)P_{s1}(t) + \phi_s P_0(t) + \sum_{i=s}^N \mu_{is} P_{ik+1}(t) + \lambda_{s-1} P_{s-11}(t), \quad s=2, \dots, N-1, \\
\frac{d}{dt} P_{N1}(t) &= -(v_N + 1)P_{N1}(t) + \phi_N P_0(t) + \mu_{NN} P_{Nk+1}(t) + \lambda_{N-1} P_{N-11}(t), \\
\frac{d}{dt} P_{1s}(t) &= -(v_1 + \lambda_1 + 1)P_{1s}(t) + \lambda_{1s-1} P_{1s-1}(t), \quad s=2, \dots, k, \\
\frac{d}{dt} P_{qs}(t) &= -(v_q + \lambda_q + 1)P_{qs}(t) + \lambda_{qs-1} P_{qs-1}(t) + \lambda_{q-1} P_{q-1s}(t), \quad q=2, \dots, N-1, \quad s=2, \dots, k, \\
\frac{d}{dt} P_{Ns}(t) &= -(v_q + 1)P_{Ns}(t) + \lambda_{Ns-1} P_{Ns-1}(t) + \lambda_{N-1} P_{N-1s}(t), \quad s=2, \dots, k, \\
\frac{d}{dt} P_{qk+1}(t) &= -\sum_{i=1}^q \mu_{qi} P_{qk+1}(t) + \lambda_{qk} P_{qk}(t), \quad q=1, \dots, N, \\
\frac{d}{dt} P_0(t) &= -\sum_{i=1}^N \phi_i P_0(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k v_i P_{ij}(t), \\
P_0(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k+1} P_{ij}(t) &= 1.
\end{aligned} \tag{1}$$

Заметим, что одно из уравнений системы, кроме условия нормировки, может быть опущено при ее решении.

Пусть в начальный момент времени система находится в состоянии x_{11} . Тогда начальное распределение вероятностей имеет следующий вид:

$$P_{11}(0) = 1, \quad P_0(0) = 0, \quad P_{ij}(0) = 0 \quad \text{для всех } i, j, \text{ кроме } i = j = 1.$$

Рассмотрим случай, когда существует стационарный режим функционирования системы [4]. При этом существуют пределы вероятностей состояний $P_{ij}(t)$, $P_0(t)$ при $t \rightarrow \infty$ и, следовательно, в этом режиме все производные этих вероятностей равны 0. Тогда приведенная система дифференциальных уравнений перейдет в неоднородную систему линейных алгебраических уравнений. Такая система может быть решена, например, с помощью компьютерной программы MAPLE.

3. Определение параметров системы

Состояние системы определяется набором контролируемых параметров, содержащих информацию о надежности системы, и на практике часто может быть сведено с помощью некоторой весовой функции к скалярной величине. Размерность модели при этом существенно снижается. Заметим, что выбор информативного набора параметров может быть проведен, например, с помощью методов теории распознавания образов [4].

Процесс износа технической системы достаточно адекватно описывается с помощью интенсивностей перехода λ_i , $i=1, \dots, N-1$, между соседними состояниями $x_{ij} \rightarrow x_{i+1j}$, $i=1, \dots, N-1$, $j=1, \dots, k$. Действительно, в состоянии x_{11} система находится случайное время, распределенное по показательному закону, что соответствует отсутствию износа, и переход в состояние отказа за счет "случайных" факторов, т.е. с постоянной условной вероятностью. Увеличение степени последствия за счет переходов в новые состояния отражает увеличение степени износа и, значит, увеличение со временем условной вероятности отказа [1]. Оценка интенсивности λ_i , $i=1, \dots, N-1$, перехода между состояниями легко может быть получена методами математической статистики на основе имеющейся информации [6].

Интенсивности ν_i , $i=1, \dots, N$, могут быть получены методами математической статистики на основе имеющейся информации.

Получим оценки интенсивности λ перехода между фазами и порядка k случайной величины η , имеющей распределение ФУР Эрланга k -го порядка. Пусть t_1, t_2, \dots, t_n – реализации периода времени между плановыми остановками системы на профилактический ремонт. Так как $M\eta = \frac{k}{\lambda}$, а дисперсия $D\eta = \frac{k}{\lambda^2}$, то метод моментов дает следующие

оценки параметров λ и k : $\tilde{\lambda} = \frac{\bar{t}}{\tilde{\sigma}^2}$, $\tilde{k} = \left[\frac{\bar{t}^2}{\tilde{\sigma}^2} \right]$, где: $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$, $\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2$, квадрат-

ные скобки означают целую часть.

Интенсивность ремонта в состоянии x_0 может быть оценена методами математической статистики. Здесь следует заметить, что удобно оценить отдельно интенсивность ϕ выхода из состояния x_0 и вероятности перехода π_i из этого состояния в состояния x_{i1} ,

$i=1, \dots, N$, $\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$. Тогда искомые интенсивности следует положить равными $\phi_i = \phi \pi_i$.

Определим далее параметры управления. Управления, т.е. профилактические ремонты разной глубины обновления системы, как правило, не могут ухудшить ее состояние. Поэтому будем считать, что из состояния x_{ik+1} , $i=1, \dots, N$, под действием управления возможен переход лишь в состояние x_{j1} , $j=1, \dots, i$. Аналогично предыдущему, методы

статистики легко позволяют оценить вероятности $p_j(y)$, $j=1, \dots, i$, такие, что $\sum_{j=1}^i p_j = 1$, для каждого $y \in Y$, каждого состояния профилактики x_{ik+1} , а также интенсивность μ выхода из состояния x_{ik+1} . Тогда искомые интенсивности для выхода из состояния x_{ik+1} равны $\mu_{ij}(y) = \mu p_j(y)$, $j=1, \dots, i$.

Работа системы связана с некоторыми затратами, обеспечивающими ее функционирование, в частности с проведением профилактических ремонтов. Кроме того, работа системы в штатном режиме приносит, как правило, определенный доход в единицу времени, возможно, зависящий от состояния. Обозначим доход системы в единицу времени в состоянии x_{ij} через $w(x_{ij})$. Пусть стоимость проведения ремонтных регламентных работ в единицу времени в состоянии x_{ik+1} составляет величину $r(x_{ik+1}, y)$, где $y \in Y$ – управление, определяющее глубину проведения профилактического ремонта (номер управления), а стоимость восстановления системы из состояния отказа в единицу времени в состоянии x_0 – величину Γ_0 .

4. Оптимизация системы

Отображение $E \rightarrow Y$ назовем решающей функцией и обозначим f , а последовательность решающих функций $\pi = \{f_1, f_2, \dots\}$ назовем стратегией. Стратегия вида $\pi^{(\infty)} = \{f, f, \dots\}$ называется стационарной. Для заданной стационарной стратегии $\pi^{(\infty)}$ средний доход в единицу времени L в стационарном режиме для рассматриваемой системы определяется так:

$$L(\pi^{(\infty)}) = \sum_{i=1}^N w(x_{ij}) \left(\sum_{j=1}^k p_{ij} \right) - \sum_{i=1}^N r(x_{ik+1}, f(x_{ik+1})) p_{ik+1} - r_0 p_0,$$

где $f(x_{ik+1}) \in Y$ – управление, определяемое решающей функцией f в стратегии $\pi^{(\infty)}$.

Задача состоит в том, чтобы найти стратегию $\pi^{(\infty)}$, максимизирующую функцию L . Стационарных стратегий конечное множество, поэтому такая стратегия существует. В нашем случае она легко может быть найдена с помощью вычислительной программы MAPLE. Далее рассмотрим модельный пример. Все громоздкие вычисления предполагается провести в системе MAPLE V R4 [7].

5. Пример

Пусть в результате обработки статистических данных получено, что длительность периода регламентных профилактических ремонтов является случайной величиной, распределенной по закону Эрланга k -го порядка с параметрами $l = 1.5$ и $k = 2$. Это определяет множество состояний системы $E = \{x_0, x_{ij}\}$, $i = 1, \dots, 3$, $j = 1, \dots, 3$. В состояниях x_{i3} , $i = 1, \dots, 3$, проводятся профилактические ремонты, а в состоянии x_0 – восстановление системы после отказа.

Систему уравнений для вероятностей состояний в стационарном режиме получим из (1). Она примет следующий вид:

$$\begin{aligned} &-(v_1 + \lambda_1 + l)P_{11} + \mu_{21}P_{23} + f_1P_0 + \mu_{11}P_{13} + \mu_{31}P_{33} = 0, \\ &-(v_2 + \lambda_2 + l)P_{21} + \mu_{32}P_{33} + f_2P_0 + \mu_{22}P_{23} + \mu_{31}P_{33} + \lambda_1P_{11} = 0, \\ &-(v_{31} + l)P_{31} + \mu_{21}P_{23} + f_3P_0 + \mu_{33}P_{33} + \lambda_2P_{21} = 0, \\ &-\mu_{11}P_{13} + lP_{12} = 0, \\ &-(\mu_{21} + \mu_{22})P_{23} + lP_{22} = 0, \\ &-(\mu_{31} + \mu_{32} + \mu_{33})P_{33} + lP_{32} = 0, \\ &-(f_1 + f_2 + f_3)P_0 + v_1(P_{11} + P_{12}) + v_2(P_{21} + P_{22}) + v_3(P_{31} + P_{32}) = 0, \\ &-(v_2 + \lambda_2 + l)P_{22} + lP_{21} + \lambda_1P_{12} = 0, \\ &-(v_3 + l)P_{32} + \lambda_2P_{22} = 0, \\ &P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{21} + P_{22} + P_{23} + P_{31} + P_{32} + P_{33} = 1. \end{aligned}$$

В состояниях x_{i3} , $i = 1, \dots, 3$, система простаивает, в них проводятся профилактические ремонты. Суммарная интенсивность выхода из каждого состояния x_{i3} , $i = 1, \dots, 3$, равна $\mu = 3$. Вероятности же переходов из указанных состояний в рабочие состояния зависят от глубины профилактического ремонта. Положим, что управление u_1 в наибольшей степени обновляет систему, управление u_2 – в меньшей степени, а управление u_3 – в наименьшей степени. Интенсивность μ_{ij} определяет переход из состояния x_{i3} в состояние x_{j1} , $j = 1, \dots, i$. Значения интенсивностей для управления u_1 : $\mu_{11} = \mu$, $\mu_{21} = 0.9\mu$, $\mu_{22} = 0.1\mu$, $\mu_{31} = 0.75\mu$, $\mu_{32} = 0.15\mu$, $\mu_{33} = 0.1\mu$; для управления u_2 : $\mu_{11} = \mu$, $\mu_{21} = 0.5\mu$, $\mu_{22} = 0.5\mu$, $\mu_{31} = 1/3\mu$, $\mu_{32} = 1/3\mu$, $\mu_{33} = 1/3\mu$; для управления u_3 : $\mu_{11} = \mu$, $\mu_{21} = 0.15\mu$, $\mu_{22} = 0.85\mu$, $\mu_{31} = 0.1\mu$, $\mu_{32} = 0.15\mu$, $\mu_{33} = 0.75\mu$.

Стоимость профилактического ремонта в единицу времени в состоянии x_{i3} составляет величину $r(x_{i3}, y_j)$, если применяется управление $y_j \in Y$, $j = 1, \dots, 3$. Эти величины выбраны следующими: $r(x_{13}, y_1) = 5$, $r(x_{23}, y_1) = 5.5$, $r(x_{33}, y_1) = 6$; $r(x_{13}, y_2) = 4$, $r(x_{23}, y_2) = 4.2$, $r(x_{33}, y_2) = 4.6$; $r(x_{13}, y_3) = 3$, $r(x_{23}, y_3) = 3.2$, $r(x_{33}, y_3) = 3.4$.

Пусть выбрана единица измерения дохода и затрат. Система приносит доход в единицу времени в состояниях x_{11}, x_{12} равный 30, в состояниях x_{21}, x_{22} равный 22, в состояниях x_{31}, x_{32} равный 14 единиц. Восстановление отказавшей системы стоит $t_0 = 18$ условных единиц в единицу времени.

Для остальных параметров выбраны следующие значения. Интенсивность перехода между состояниями $\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 2$. Интенсивность отказа в состояниях x_{ij} : для $i = 1$ и $j = 1, 2$ равна $v_1 = 0.1$, для $i = 2$ и $j = 1, 2$ $v_2 = 0.2$, для $i = 3$ и $j = 1, 2$ $v_3 = 1$. Интенсивность восстановления системы из отказа в состояние x_{11} равна $\phi_1 = 0.6$, в состояние x_{21} равна $\phi_2 = 0.4$, в состояние x_{31} равна $\phi_3 = 0.3$.

Получен следующий результат. Наилучшей стратегией является та, которая предписывает управление y_1 во всех состояниях, в которых предусмотрен профилактический ремонт. Использование программы MAPLE V R4 для решения поставленной задачи дало следующий результат. Применение управления y_1 приводит к доходу 15.25437722, управления y_2 – к доходу 14.53419191, управления y_3 – к доходу 14.00128186 в единицу времени при неограниченном времени эксплуатации системы.

6. Выводы

Предложен новый подход к моделированию стареющих технических систем, вероятность возможного отказа которых возрастает со временем. Он состоит в том, что для описания эволюции процесса старения технической системы вводится последовательность состояний, которые она проходит по очереди. При этом такой показатель системы как интенсивность отказа монотонно возрастает. Показано, что при определенных условиях эволюция системы может быть описана марковским процессом и, следовательно, модель может быть основана на системе уравнений Колмогорова.

Целью моделирования явилось нахождение такой стратегии профилактических обновлений системы, которая бы оптимизировала ее работоспособность и надежность. Практическое значение полученных результатов состоит в том, что решение этой актуальной задачи легко может быть получено с помощью математических вычислительных программ, например MAPLE. Следует учесть, что в модели принят случайный период контроля. Последнее расширяет круг систем, которые адекватно могут быть описаны предложенной моделью.

Список литературы: 1. *Вопросы математической теории надежности* / Под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376с. 2. *Подцькин Н.С.* Дискретная модель надежности восстанавливаемой системы // АСУ та прилади автоматики. 2004. Вип. 129. С. 14-18. 3. *Боровков А.А.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1976. 352с. 4. *Розанов Ю.А.* Случайные процессы. М.: Наука, 1971. 288 с. 5. *Горелик А.Л., Скрипкин В.А.* Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1984. 208с. 6. *Крамер Г.* Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 7. *Дьяконов В.П.* Математическая система MAPLE V R3/R4/R5, М.: СОЛОН, 1998. 400с.

Поступила в редколлегию 27.11.2009

Подцькин Николай Серафимович, канд. техн. наук, доцент кафедры математического моделирования и программного обеспечения ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование управляемых стохастических систем и методы их оптимизации, информатика. Адрес: Украина, 61115 Харьков, ул. 2-й Пятилетки, 2-Г, кв. 115, тел. 707-54-68.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Приводится и обосновывается стохастическая модель квазистационарного режима транспорта природного газа в газотранспортных системах с многониточными линейными участками и многоцеховыми компрессорными станциями.

1. Введение

В настоящее время накоплен значительный опыт по математическому моделированию и оптимизации стационарных режимов транспорта и распределения природного газа в газотранспортных системах (ГТС) [1-3,6]. Однако получаемые с их помощью оптимальные решения для стационарных режимов соответствуют абсолютно точным значениям всех параметров математических моделей технологического оборудования ГТС и абсолютно точным значениям граничных условий и находятся, как правило, на границе допустимой области. На практике это приводит к тому, что даже незначительные вариации параметров моделей или граничных условий не только существенно изменяют оптимальное решение, но выводят его из допустимой области. Естественно, что такие “оптимальные” решения являются неприемлемыми при оперативно–диспетчерском управлении фактическими режимами работы ГТС, которые существенно отличаются от стационарных.

Анализ режимов работы ГТС. Все фактические режимы работы ГТС можно условно разделить на три группы:

- стационарные;
- квазистационарные;
- существенно нестационарные.

Стационарные режимы транспорта и распределения природного газа в ГТС характеризуются тем, что параметры газовых потоков (давление, температура, газовый состав) изменяются только по пространственным координатам, но не изменяются во времени. Расход газа на всех входах и выходах ГТС, а также на всех технологических элементах ГТС принимается постоянным. Поэтому при моделировании стационарного режима все параметры газовых потоков рассматриваются на одном временном слое (для одного фиксированного момента времени). Стационарные режимы работы ГТС существуют на достаточно коротких интервалах времени, а суммарное время их существования, например, в течение года может составлять (0–15%). Математические модели стационарных режимов работы ГТС эффективно используются в задачах проектирования и реконструкции ГТС [5,6], но, как показывает опыт [2,3], мало эффективен для решения задач оперативно–диспетчерского управления режимами работы ГТС.

В связи с этим в настоящее время является актуальным моделирование квазистационарных режимов, которые характеризуется тем, что параметры газовых потоков изменяются как по пространственным переменным, так и по времени определённым образом относительно некоторых своих средних значений и имеют полигармонические тренды, периоды которых равны или кратны одним суткам. Таким образом, к квазистационарным режимам транспорта и распределения природного газа в ГТС относятся все нестационарные режимы, порождённые естественной нестационарностью процессов потребления природного газа различными категориями потребителей в ГТС. Квазистационарные режимы являются основными режимами работы ГТС и составляют до 70% в течение года. Известно, что процессы потребления природного газа являются стохастическими процессами со сложной корреляционной функцией, определяемой комплексным влиянием на них трёх основных групп факторов – хронологических, метеорологических и организационных.

Более того, известно [7], что при возмущении любой системы случайными процессами процессы, протекающие в самой системе, также являются случайными.

Существенно нестационарные режимы – это режимы, порождённые существенными (плановыми или аварийными) изменениями структуры или параметров технологического оборудования ГТС (подключением или отключением крупных источников или потребителей природного газа, открытием или закрытием системных переключателей, пуском или остановом газоперекачивающих агрегатов (ГПА), разрывами трубопроводов и т. п.). Существенно нестационарные режимы характеризуются тем, что параметры газовых потоков в ГТС существенно изменяются как по пространственным, так и по временной переменным. Поэтому для моделирования и оптимизации существенно нестационарных режимов необходимо использовать взаимосвязанные значения параметров газовых потоков по всем пространственным и временной переменным, т.е. рассчитывать траектории изменения параметров газовых потоков на любом технологическом объекте и в любом узле ГТС.

Таким образом, цель данной работы заключается в рассмотрении и решении проблемы математического моделирования квазистационарных режимов транспорта и распределения природного газа в ГТС с многониточными линейными участками (ЛЮ) и многоцеховыми компрессорными станциями (КС). Поставленная цель достигается решением следующих задач: необходимо построить стохастическую квазистационарную модель основных технологических элементов ГТС (участков трубопроводов(УТ) и газоперекачивающих агрегатов); на основе этих элементов и моделей структуры ГТС получить общую стохастическую модель квазистационарных неизотермических режимов транспорта и распределения природного газа в ГТС с многониточными ЛЮ и КС; на основе этой модели сформулировать общий класс задач математического моделирования квазистационарных неизотермических режимов транспорта и распределения природного газа в ГТС рассматриваемого типа.

2. Стохастическая модель квазистационарного режима транспорта природного газа по участку трубопровода

Известно [6], что математическую модель стационарного неизотермического режима транспорта природного газа по участку трубопровода можно представить в виде:

$$P_H^2 - P_K^2 = \frac{\Delta L T_{cp} Z_{cp}}{\tau' \alpha^2 \phi^2 E^2 D^{5,2}} q^2, \quad (1)$$

где τ' – числовой коэффициент, значение которого зависит от выбранных единиц измерения; P_H и P_K – давление в начале и в конце i – го участка трубопровода; q – коммерческий расход.

Обозначим $\beta = \frac{\Delta L T_{cp} Z_{cp}}{\tau' \alpha^2 \phi^2 E^2 D^{5,2}}$, тогда вместо уравнения (1) можем записать

$$P_H^2 - P_K^2 = \beta q^2. \quad (2)$$

Это уравнение наиболее четко показывает функциональную связь между давлением в начале и в конце трубопровода с расходом по нему.

Значение коэффициента Z_{cp} находим по формуле

$$Z_{cp} = 1 - \left[(P_{cp} - 6) (0,345 \cdot 10^{-2} \Delta - 0,446 \cdot 10^{-3}) + 0,015 \right] \left[1,3 - 0,144(T_{cp} - 283,2) \right]. \quad (3)$$

В качестве P_{cp} можно брать среднее интегральное значение давления по участку

$$P_{cp} = \frac{2}{3} (P_H + P_K^2 / (P_H + P_K)). \quad (4)$$

Температуру газа в любой точке x участка трубопровода находят по формуле В.Г. Шухова:

$$T_x = T_{cp} + (T_H - T_{cp}) e^{-\theta x}, \quad (5)$$

где x – расстояние от начала участка до точки этого участка с координатой x ; T_{cp} – средняя на некотором интервале времени $[0, T]$ температура грунта на глубине заложения

трубопровода; T_n – температура газа в начале участка; $\theta = 62,6 K_T D_n / 10^6 q \Delta B$, K_T – коэффициент теплопередачи от газа к грунту; D_n – наружный диаметр трубопровода; B – теплоемкость газа.

Среднее значение температуры T_{cp} на участке газопровода длиной L вычисляется по формуле ($T_{гр}$ – температура грунта, L – длина участка)

$$T_{cp} = T_{гр} + [(T_n - T_{гр}) / \theta L] \cdot (1 - e^{-\theta L}). \quad (6)$$

Математическая модель стационарного неизоэтермического течения природного газа по участку трубопровода (1), (6) была получена в предположении, что расход газа по участку трубопровода является постоянным, т. е. фиксированной величиной. Эти модели широко применяются при проектировании новых и реконструкции действующих магистральных газопроводов ГТС. Однако на практике это условие практически никогда не выполняется. Расход газа по участкам трубопроводов ГТС непрерывно изменяется, причём эти изменения носят, как правило, случайный (стохастический) характер, вызванный стохастическим характером процессов потребления природного газа практически всеми категориями его потребителей в ГТС. Более того, математическая модель (1), (6) относится к классу детерминированных моделей, в которых априорно предполагается, что значения всех параметров, входящих в модель, известны точно. В реальных условиях функционирования ГТС это требование также практически никогда не выполняется. При разработке методов моделирования и оптимизации режимов работы ГТС параметры модели (1),(6) должны быть оценены по выборкам экспериментальных данных конечной длины, соответствующим фактическим (квазистационарным) режимам транспорта газа по участкам трубопроводов. Из математической статистики известно [7], что результаты измерений любых физических величин содержат в себе неустранимые случайные ошибки. Кроме того, любые оценки, полученные по выборкам конечной длины, являются также случайными величинами, вид функций распределения и параметры которых должны быть дополнительно оценены. Всё это приводит к необходимости перехода от модели стационарного неизоэтермического течения природного газа по участку трубопровода (1),(6) к стохастическим моделям квазистационарного неизоэтермического течения газа по участку трубопровода.

Для построения стохастической модели квазистационарного неизоэтермического течения газа по участку трубопровода введём ряд обозначений.

Пусть (Ω, B, P) – вероятностное пространство, где: Ω – пространство элементарных событий; B – σ -алгебра событий из Ω ; P – вероятностная мера на B .

Тогда $\forall \omega \in \Omega: P_i(\omega), q_i(\omega), T_i^0(\omega)$ – случайные величины, характеризующие, соответственно, давление, расход и температуру природного газа в произвольной, но фиксированной точке на i -м участке трубопровода ГТС.

Пусть $M_{\omega}\{\cdot\}$ – символ математического ожидания случайной величины $\{\cdot\}$.

В этом случае стохастическую модель квазистационарного течения газа по участку трубопровода можно представить в виде

$$M_{\omega}\{P_{H_i}^2(\omega) - P_{K_i}^2(\omega) - \beta_i(\omega) q_i^2(\omega)\} = 0, i \in M, \quad (7)$$

где M – множество участков трубопровода ГТС, $P_{H_i}(\omega), P_{K_i}(\omega), \beta_i(\omega), q_i(\omega)$ – случайные величины, характеризующие, соответственно, давление в начале $P_{H_i}(\omega)$ и в конце $P_{K_i}(\omega)$ i -го участка трубопровода; $q_i(\omega)$ – коммерческий расход газа на i -м участке трубопровода, а $\beta_i(\omega)$ – гидравлическое сопротивление i -го участка трубопровода:

$$\beta_i(\omega) = \frac{\Delta(\omega) L T_{cp_i}(\omega) \cdot Z_{cp_i}(\omega)}{\tau_i \alpha_i^2 \phi_i^2 E_i^2(\omega) D_i^{5.2}}, \quad (8)$$

здесь $\Delta(\omega)$ – относительная плотность природного газа по воздуху; $T_{cp_i}(\omega), Z_{cp_i}(\omega)$ – средняя температура и средняя плотность природного газа на i -м участке трубопровода; $E_i(\omega)$ – коэффициент эффективности i -го участка трубопровода.

Значение температуры газа в точке x i -го участка трубопровода удовлетворяет равенству

$$M_{\omega}\{T_{x_i}(\omega) - T_{cp_i}(\omega) - [T_{H_i}(\omega) - T_{cp_i}(\omega)]e^{-\theta_i(\omega)x}\} = 0, \quad (9)$$

где $T_{x_i}(\omega)$ – случайная величина, характеризующая температуру природного газа в точке, находящейся на расстоянии x от начала i -го участка трубопровода; $T_{H_i}(\omega)$ – температура природного газа в начале i -го участка; $T_{cp_i}(\omega)$ – среднее значение температуры газа на i -м участке трубопровода;

$$\theta_i(\omega) = 62.6 K_{T_i}(\omega) D_{H_i} / 10^6 q_i(\omega) \Delta(\omega) V(\omega), \quad (10)$$

здесь $K_{T_i}(\omega)$ – случайная величина, характеризующая среднее значение коэффициента теплопередачи от газа грунту на i -м участке трубопровода; $\Delta(\omega)$ – относительная плотность газа по воздуху; $V(\omega)$ – теплоемкость природного газа.

Систему уравнений (7)–(10) будем рассматривать в качестве стохастической модели квазистационарного неизотермического течения газа по i -му участку трубопровода.

Если в модели (7)–(10) заменить все случайные величины их математическими ожиданиями, то полученная модель будет по форме совпадать с моделью стационарного неизотермического течения газа (1), (6) по i -му участку трубопровода.

При использовании стохастической модели (7)–(10) для моделирования и оптимизации квазистационарных неизотермических режимов транспорта природного газа по участку трубопровода система уравнений (7)–(10) должна быть дополнена заданием статистических свойств пяти независимых случайных переменных.

Не нарушая общности, будем предполагать, что все независимые переменные $X_i(\omega)$, $i = 1, 2, \dots, 5$, входящие в модель (7)–(10), имеют нормальное распределение с известным математическим ожиданием и дисперсиями $N(\bar{X}_i, \sigma_{X_i}^2)$, $i = 1, 2, \dots, 5$:

$$N(\bar{P}_{H_i}, \sigma_{P_{H_i}}^2), N(\bar{q}_i, \sigma_{q_i}^2), N(\bar{T}_{H_i}, \sigma_{T_{H_i}}^2), N(\bar{\beta}_i, \sigma_{\beta_i}^2), N(\bar{K}_{T_i}, \sigma_{K_{T_i}}^2),$$

При решении практических задач моделирования и оптимизации квазистационарных режимов точные значения математических ожиданий и дисперсий независимых переменных модели (7)–(10) практически неизвестны, а известны только их оценки $(\hat{X}_i, \hat{\sigma}_{X_i}^2)$, $i = 1, 2, \dots, 5$, где \hat{X}_i – оценка математического ожидания случайной величины $X_i(\omega)$, а $\hat{\sigma}_{X_i}^2$ – оценка ее дисперсии.

Поэтому в дальнейшем вместо точных значений переменных $\bar{X}_i, \sigma_{X_i}^2, i = 1, 2, \dots, 5$ везде будем использовать их оценки $\hat{X}_i, \hat{\sigma}_{X_i}^2$. Подставляя в систему уравнений (7), (9) оценки математических ожиданий независимых переменных и решая полученную систему в алгебраическом смысле, мы получаем оценки математических ожиданий зависимых переменных \hat{P}_k, \hat{T}_H . Полученные оценки в силу неравенства Йенсена будут смещенными в силу выпуклости функций $P_k(P_H, T_H, q, \beta, K_T), T_k(P_H, T_H, q, \beta, K_T)$, однако в практических расчетах этим можно пренебречь.

3. Стохастическая модель квазистационарного режима работы газоперекачивающего агрегата

Математическая модель центробежного нагнетателя (ЦБН) ГПА основана на предположении о стационарности процесса компримирования газа в любой момент времени вне зависимости от режима движения газа в прилегающих участках магистрального газопровода (МГ). Подобное предположение возможно ввиду незначительной инерционности процесса компримирования газа по сравнению с процессом его движения по трубопроводным участкам МГ [2]. Это позволяет представить математическую модель процесса компримирования газа в ЦБН в виде системы алгебраических уравнений, определяющих основные газодинамические характеристики ЦБН, к которым относятся:

– степень сжатия и квадрат степени сжатия газа:

$$\varepsilon = P_k / P_H = \varepsilon(Q_{пр}, (n/n_0)_{пр}), \quad (11)$$

$$\varepsilon^2 = P_k^2 / P_n^2 = \varepsilon^2 \left(Q_{пр}, (n/n_0)_{пр} \right), \quad (12)$$

как функции от приведенной объемной производительности $Q_{пр}$ и приведенного числа оборотов $(n/n_0)_{пр}$, где n, n_0 – фактическое и номинальное число оборотов. В настоящее время зависимости (11), (12) при $(n/n_0)=1$ представляют в виде многочленов второй степени:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon(Q_{пр}, 1) = a_0 + b_0 Q_{пр} + c_0 Q_{пр}^2, \quad (13)$$

$$\varepsilon_1^2 = \varepsilon^2(Q_{пр}, 1) = a_1 + b_1 Q_{пр} + c_1 Q_{пр}^2, \quad (14)$$

где $Q_{пр} = (n_0/n)Q_v$, Q_v – объемная производительность ЦБН, м³/мин;

– политропический коэффициент полезного действия в виде полинома третьей степени:

$$\eta_{пол}(Q_{пр}) = d_0 + d_1 Q_{пр} + d_2 Q_{пр}^2 + d_3 Q_{пр}^3,$$

– внутренняя приведенная мощность N :

$$\left[\frac{N}{\gamma} \right]_{пр} = v(Q_{пр}) = c_0 + c_1 Q_{пр} + c_2 Q_{пр}^2 + c_3 Q_{пр}^3,$$

– приведенное относительное число оборотов привода:

$$\left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр} R_{пр} T_{пр}}{Z_n R_n T_n}},$$

где $Z_{пр}, R_{пр}, T_{пр}$ – приведенные значения параметров природного газа – коэффициента сжимаемости, температуры и газовой постоянной; Z_n, R_n, T_n – параметры газа на входе ЦБН.

Приближенная зависимость степени сжатия ε от фактического числа оборотов и физических параметров газа имеет вид [2]:

$$\varepsilon = \left[1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр}^2 \left(\varepsilon_0^{\frac{\mu-1}{\mu}} - 1 \right) \right]^{\frac{\mu}{\mu-1}}.$$

Известно [1,2], что зависимость

$$\frac{\mu}{\mu-1} = \frac{\mu}{\mu-1} (\eta_{пол}(Q_{пр}), T_n, T_k, P_n, P_k)$$

является достаточно сложной функцией, нелинейной по всем своим аргументам:

$$\frac{\mu}{\mu-1} = \eta_{пол} \frac{k}{k-1},$$

где μ – показатель политропы; $\eta_{пол}(Q_{пр})$ – политропический коэффициент полезного действия; k – показатель адиабаты.

Для построения общей модели стационарных неизотермических режимов транспорта и распределения природного газа в ГТС с многониточными линейными участками и многоцелевыми компрессорными станциями преобразуем модель ЦБН к виду:

$$\tilde{a}P_n^2 - P_k^2 + \tilde{b}P_n q + \tilde{c}q^2 = 0, \quad (15)$$

здесь $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}$ – коэффициенты, полученные для случая, когда степень сжатия $\varepsilon \leq 1,3$, а показатель политропы близок к реальным значениям, т.е. степень сжатия можно принять равной

$$\varepsilon = \left(1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр}^2 (\varepsilon_0 - 1) \right). \quad (16)$$

Преобразуем выражение (16) следующим образом:

$$\varepsilon^2 = \left(1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \right)^2 + 2 \left(1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \right) \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \varepsilon_0 + \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^4 \varepsilon_0^2.$$

Подставив вместо $\varepsilon_0, \varepsilon_0^2$ аппроксимирующие их полиномы и проведя преобразования, получим искомое представление ε^2 , где:

$$a_2 = \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^4 a_1 + 2 \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \left(1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \right) a_0 + \left(1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \right)^2,$$

$$b_2 = \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^4 b_1 + 2 \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \left(1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \right) b_0,$$

$$c_2 = \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^4 c_1 + 2 \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \left(1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 \right) c_0.$$

Таким образом, коэффициенты в выражении (15) представляются в виде:

$$\tilde{a} = a_2, \quad \tilde{b} = b_2 \frac{n}{n_0} \frac{\gamma_0 ZRT}{1440}, \quad \tilde{c} = c_2 \left(\frac{n}{n_0} \frac{\gamma_0 ZRT}{1440} \right)^2.$$

Учитывая причины, описанные в разделе 1, необходимо перейти от стационарной модели центробежного нагнетателя к стохастической модели, которая бы учитывала случайную природу данных как параметров модели, так и внешних возмущений.

В этом случае стохастическую модель квазистационарного режима работы центробежного нагнетателя можно представить в виде:

$$M_{\omega} \left\{ \tilde{a}(\omega) P_n^2(\omega) - P_k^2(\omega) + \tilde{b}(\omega) P_n(\omega) q(\omega) + \tilde{c}(\omega) q^2(\omega) \right\} = 0,$$

где $\tilde{a}(\omega)$, $\tilde{b}(\omega)$, $\tilde{c}(\omega)$ – случайные величины, полученные для случая, когда степень сжатия $\varepsilon(\omega) \leq 1,3$, исходя из предположения, что степень сжатия является случайной величиной:

$$\varepsilon_0(\omega) = \varepsilon(\omega, 1) = a_0(\omega) + b_0(\omega) Q_{\text{пр}}(\omega) + c_0(\omega) Q_{\text{пр}}^2(\omega),$$

$$\varepsilon_1^2(\omega) = \varepsilon^2(\omega, 1) = a_1(\omega) + b_1(\omega) Q_{\text{пр}}(\omega) + c_1(\omega) Q_{\text{пр}}^2(\omega),$$

здесь $Q_{\text{пр}}(\omega) = \frac{n_0}{n} \gamma_0 \frac{Z(\omega)RT(\omega)}{1440} \frac{q(\omega)}{P_n(\omega)}$ также является случайной величиной. Тогда $\tilde{a}(\omega)$, $\tilde{b}(\omega)$, $\tilde{c}(\omega)$ определяются выражением:

$$\tilde{a}(\omega) = a_2(\omega), \quad \tilde{b}(\omega) = b_2(\omega) \frac{n}{n_0} \frac{\gamma_0 Z(\omega)RT(\omega)}{1440}, \quad \tilde{c}(\omega) = c_2(\omega) \left(\frac{n}{n_0} \frac{\gamma_0 Z(\omega)RT(\omega)}{1440} \right)^2.$$

Стохастические модели введем также для следующих зависимостей:

– политропического коэффициента полезного действия:

$$\eta_{\text{пол}}(\omega) = d_0(\omega) + d_1(\omega) Q_{\text{пр}}(\omega) + d_2(\omega) Q_{\text{пр}}^2(\omega) + d_3(\omega) Q_{\text{пр}}^3(\omega),$$

– внутренней приведенной мощности N :

$$\left[\frac{N}{\gamma} \right]_{\text{пр}} = v(\omega) = c_0(\omega) + c_1(\omega) Q_{\text{пр}}(\omega) + c_2(\omega) Q_{\text{пр}}^2(\omega) + c_3(\omega) Q_{\text{пр}}^3(\omega),$$

– приведенного относительного числа оборотов привода:

$$\left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}(\omega) = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{\text{пр}} R_{\text{пр}} T_{\text{пр}}}{Z_n(\omega) R_n T_n(\omega)}}.$$

Приближенная зависимость степени сжатия $\varepsilon(\omega)$ от фактического числа оборотов и физических параметров газа имеет вид [2]:

$$\varepsilon(\omega) = \left[1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)_{\text{пр}}^2 (\omega) \left(\varepsilon_0^{\frac{\mu(\omega)-1}{\mu(\omega)}} - 1 \right) \right]^{\frac{\mu(\omega)}{\mu(\omega)-1}}, \quad \frac{\mu(\omega)}{\mu(\omega)-1} = \eta_{\text{пол}}(\omega) \frac{k}{k-1},$$

где μ – показатель политропы; $\eta_{\text{пол}}(\omega)$ – политропический коэффициент полезного действия; k – показатель адиабаты.

4. Стохастическая модель квазистационарного режима транспорта природного газа в ГТС с МЛУ и МГ, КС

Используя полученные выше модели: стохастическую модель квазистационарного режима транспорта природного газа по участку трубопровода и стохастическую модель режима работы газоперекачивающего агрегата, можно получить стохастическую модель температурного и гидравлического расчета транспорта природного газа в ГТС. Применим способ описания структуры ГТС в виде графа $G(V, E)$ [2], где V – множество вершин, E – множество дуг графа. Множество дуг графа делится на следующие подмножества: реальных участков M ; фиктивных участков по входам сети L ; фиктивных участков по выходам сети K ; фиктивных участков, соединяющих входы активных элементов с нулевой точкой (фиктивный дополнительный вход сети) T ; реальных ветвей дерева M_1 ; реальных ветвей дерева, соответствующих пассивным M_{11} и активным M_{12} элементам; реальных хорд графа M_2 ; реальных хорд графа, соответствующих пассивным M_{21} и активным M_{22} элементам; фиктивных ветвей дерева, соответствующих входам L_1 ; ветвей дерева по входам сети с заданным расходом L_{11} , заданным давлением L_{12} и заданной температурой L_{13} ; хорд графа, соответствующих входам L_2 ; хорд графа по входам сети с заданным расходом L_{21} , заданным давлением L_{22} , заданной температурой L_{23} ; фиктивных хорд, соответствующих выходам K_2 ($K_2 = K$); фиктивных хорд по выходам сети с заданным расходом K_{21} и заданным давлением K_{22} , заданной температурой K_{23} ; фиктивных хорд графа, соответствующих фиктивному дополнительному входу сети (дуги, соединяющие входы активных элементов с нулевой точкой) с заданным расходом T_{21} . Заданными величинами считаются, как и ранее, случайные величины, имеющие нормальный закон распределения и заданные своим математическим ожиданием и дисперсией.

Тогда стохастическую модель температурного и гидравлического расчета транспорта природного газа в ГТС можно представить в следующем виде:

$$M_{\omega} \left\{ \beta_r(\omega) q_r(\omega) | q_r(\omega) + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) | q_i(\omega) + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{\text{ин}}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{\text{ин}}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{\text{ин}}(\omega) | P_{\text{ин}}(\omega) \right\} \right\} = 0, \quad r \in M_{21}, \quad (17)$$

$$M_{\omega} \left\{ \tilde{c}_r(\omega) \left(q_r(\omega) - \frac{\tilde{b}_r(\omega) P_{\text{гн}}(\omega)}{2\tilde{c}_r(\omega)} \right) \left| q_r(\omega) - \frac{\tilde{b}_r(\omega) P_{\text{гн}}(\omega)}{2\tilde{c}_r(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_r(\omega) + \frac{\tilde{b}_r^2(\omega)}{4\tilde{c}_r(\omega)} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times P_{\text{гн}}(\omega) | P_{\text{гн}}(\omega) + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) | q_i(\omega) + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{\text{ин}}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{\text{ин}}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{\text{ин}}(\omega) | P_{\text{ин}}(\omega) \right\} \right\} = 0, \quad r \in M_{22}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& M_{\omega} \left\{ -P_{rk}(\omega) |P_{rk}(\omega)| - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ik}(\omega) |P_{ik}(\omega)| - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ik}^+ |P_{ik}^+| + \right. \\
& + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) |q_i(\omega)| + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \\
& \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{ih}(\omega) |P_{ih}(\omega)| \right\} \right\} = 0, \quad r \in L_{21},
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
& M_{\omega} \left\{ -P_{rk}^+ |P_{rk}^+| - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ik}(\omega) |P_{ik}(\omega)| - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ik}^+ |P_{ik}^+| + \right. \\
& + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) |q_i(\omega)| + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \\
& \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{ih}(\omega) |P_{ih}(\omega)| \right\} \right\} = 0, \quad r \in L_{22},
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
& M_{\omega} \left\{ P_{rh}(\omega) |P_{rh}(\omega)| - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ik}(\omega) |P_{ik}(\omega)| - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ik}^+ |P_{ik}^+| + \right. \\
& + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) |q_i(\omega)| + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \\
& \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{ih}(\omega) |P_{ih}(\omega)| \right\} \right\} = 0, \quad r \in K_{21},
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
& M_{\omega} \left\{ P_{rh}^+ |P_{rh}^+| - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ik}(\omega) |P_{ik}(\omega)| - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ik}^+ |P_{ik}^+| + \right. \\
& + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) |q_i(\omega)| + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \\
& \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{ih}(\omega) |P_{ih}(\omega)| \right\} \right\} = 0, \quad r \in K_{22},
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
& M_{\omega} \left\{ -P_{rk}(\omega) |P_{rk}(\omega)| - \sum_{i \in L_{11}} b_{1ri} P_{ik}(\omega) |P_{ik}(\omega)| - \sum_{i \in L_{12}} b_{1ri} P_{ik}^+ |P_{ik}^+| + \right. \\
& + \sum_{i \in M_{11}} b_{1ri} \beta_i(\omega) q_i(\omega) |q_i(\omega)| + \sum_{i \in M_{12}} b_{1ri} \times \left\{ \tilde{c}_i(\omega) \left(q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right) \times \right. \\
& \left. \left. \times \left| q_i(\omega) - \frac{\tilde{b}_i(\omega) P_{ih}(\omega)}{2\tilde{c}_i(\omega)} \right| - \left(\tilde{a}_i(\omega) + \frac{\tilde{b}_i^2(\omega)}{4\tilde{c}_i(\omega)} - 1 \right) P_{ih}(\omega) |P_{ih}(\omega)| \right\} \right\} = 0, \quad r \in T_{21},
\end{aligned} \tag{23}$$

$$M_{\omega} \left\{ \sum_{r \in M_2 \cup L_{22} \cup K_{22}} b_{1ri} q_r(\omega) + \sum_{r \in L_{21} \cup K_{21}} b_{1ri} q_r^+ - q_i^+ \right\} = 0, \tag{24}$$

$$M_{\omega} \left\{ T_{ik}(\omega) - T_{rp} - (T_{ih}(\omega) - T_{rp}) e^{-\theta_i(\omega)x} \right\} = 0, \quad i \in M_{11} \cup M_{21}, \tag{25}$$

$$M_{\omega} \left\{ T_{ik}(\omega) - T_{ih}(\omega) (P_{ik}(\omega) / P_{ih}(\omega))^{\frac{\mu(\omega)-1}{\mu(\omega)}} \right\} = 0, \quad i \in M_{12} \cup M_{22}, \tag{26}$$

$$M_{\omega} \left\{ T_j(\omega) \sum_{i \in G_j^+} q_i(\omega) - \sum_{i \in G_j^-} q_i(\omega) T_{ik}(\omega) \right\} = 0, \quad j \in V, \quad (27)$$

где ($P_{ин}^+$, $P_{ик}^+$, $T_{ин}^+$, $T_{ик}^+$, Q_r^+ – знаком «+» отмечены заданные величины); $b_{Гi}$ – элемент цикломатической матрицы, находящейся на пересечении $г$ -й строки и i -го столбца; $P_{ин}(\omega)$, $P_{ик}(\omega)$ – случайные величины, характеризующие давление в начале и конце i -й дуги; $T_{ин}(\omega)$, $T_{ик}(\omega)$ – случайные величины, характеризующие температуру в начале и конце i -й дуги; $q_i(\omega)$ – случайная величина, характеризующая коммерческий расход i -й дуги; $\tilde{a}_i(\omega)$, $\tilde{b}_i(\omega)$, $\tilde{c}_i(\omega)$ – коэффициенты аппроксимации ГПА, принадлежащего i -й дуге; G_j^+ , G_j^- – множество элементов, по которым газ поступает в j -й узел и отбирается из него соответственно; $\beta_j(\omega)$ – коэффициент гидравлического сопротивления (24); $\theta_j(\omega)$ – случайная величина, определенная выражением (26).

Выводы

Исследована проблема математического моделирования квазистационарных неизоотермических режимов транспорта природного газа в газотранспортных системах. Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые предложены следующие модели: стохастическая модель квазистационарного режима транспорта природного газа по участку трубопровода, стохастическая модель режима работы газоперекачивающего агрегата, а также стохастическая модель температурного и гидравлического расчета транспорта природного газа в ГТС, которые учитывают как стохастическую природу основных возмущающих факторов газотранспортных систем – процессов потребления природного газа, так и стохастическую природу параметров математических моделей. Практическая значимость заключается в том, что эти модели позволяют получить верхнюю и нижнюю оценки диапазонов изменения параметров газовых потоков в любом узле ГТС для заданного уровня внешних стохастических возмущений. Такие модели являются чрезвычайно важными для диспетчерского персонала, осуществляющего оперативно-диспетчерское управление режимами работы ГТС, так как дадут возможность оперативно идентифицировать причины появлений изменения параметров газовых потоков в узлах ГТС.

Список литературы: 1. Евдокимов А.Г., Дубровский В.В., Тевяшев А.Д. Потокораспределение в инженерных сетях. М.: Стройиздат, 1979. 2. Евдокимов А.Г., Тевяшева А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. 3. Сардашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. 577 с. 4. Трубопроводные системы энергетики. Управление развитием и функционированием/Под общей ред. А.Д.Тевяшева. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2004. С. 322–330. 5. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов//Открытое акционерное общество ГазПром, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий» ВНИИГАЗ. Москва. 2004. 6. Меренков А.П., Сепнова Е.В., Сумароков С.В. и др. Математическое моделирование и оптимизация систем, тепло-, водо-, нефте- и газопотребления. Новосибирск: В.О. «Наука» 1992. 406с. 7. Волков И.К., Зуев С.М., Увяткова Г.М. Случайные процессы. М: Издательство МГТУ им Н.Э.Баумана. 1999. 448с.

Поступила в редколлегию 25.11.2009

Тевяшев Андрей Дмитриевич, д-р техн. наук, зав.каф.прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование энергетических систем, теория стохастических моделей. Увлечения и хобби: теннис, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-14-36, e-mail: tevjashev@kture.kharkov.ua

Мамедова Асима Абушовна, аспирантка каф.прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование, системный анализ, теория оптимальных решений. Увлечения и хобби: настольный теннис, педагогика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 068 613 28 62, e-mail: asima_mamedova@ukr.net.

Фролов Вадим Анатольевич, аспирант каф.прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: системы управления, математическое моделирование, теория оптимальных решений. Увлечения и хобби: футбол, путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-14-36.

ИНФРАСТРУКТУРА ЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АССОЦИАТИВНЫХ ТАБЛИЦ

Предлагается инфраструктура логического анализа ассоциативных таблиц (матриц), позволяющая выполнять обработку взаимодействия входного вектора с n -мерным алгебрологическим пространством, задаваемым с помощью упорядоченных и структурированных таблиц проблемно-ориентированных данных, которые представляют собой ассоциативные модели поведения логических объектов. Для оценки взаимодействия векторов в алгебрологическом пространстве разрабатывается универсальный критерий качества, позволяющий находить и оценивать квазиоптимальное решение в задачах ассоциативно-логического анализа информации. Приводятся примеры использования инфраструктуры и алгебрологических процедур для решения традиционных задач логического анализа, подтверждающие эффективность и практическую направленность алгебраических моделей.

Цель – разработка предикатной алгебры ассоциативных матриц для аппаратной реализации инфраструктуры логического анализа больших объемов информации в виде мультипроцессорной матрицы, использующей ограниченную систему логических команд для параллельно-конвейерного решения задач поиска, принятия решений, распознавания образов и диагностирования технических состояний.

Задачи исследования: 1. Мотивация и актуальность аппаратной реализации процедур анализа информационных массивов, сформатированных в графы ассоциативных таблиц. 2. Разработка предикатной алгебры ассоциативных матриц как эффективного математического аппарата, ориентированного на параллельно-конвейерную обработку векторных и табличных массивов. 3. Создание метрики для оценивания взаимодействия векторов и таблиц в процессе поиска оптимального решения в дискретном булевом пространстве. 4. Решение практических задач нахождения квазиоптимального покрытия и диагностирования неисправностей или ошибок в программных продуктах.

Источники исследования: 1. Аппаратные средства решения информационно-логических задач [1-4]. 2. Алгебраические системы конечных предикатов для описания и анализа ассоциативно-логических структур данных [5-8]. Критерии оценивания вариантов поиска решений в дискретном булевом пространстве [9-12]. Методы решения задач покрытия и диагностирования на основе анализа таблиц [13-16].

1. Актуальные технологии

Современный рынок электронных и информационных технологий очень нуждается в новых носителях больших объемов информации, эффективных структурах данных для хранения и поиска требуемой информации, новых интеллектуальных и компьютерных средствах, точно и быстро обеспечивающих любые запросы пользователя. Современные компьютеры ориентированы в своей основе на арифметические вычисления, поэтому не всегда являются эффективным инструментом для решения логических, ассоциативных и поисковых задач в существующем океане информации. В связи с этим актуальным представляется разработка новых специализированных технологий, ориентированных на создание цифровой системы на кристалле с ограниченной системой логических команд для анализа в реальном масштабе времени больших информационных массивов, организованных в эффективные структуры данных. Такие информационно-ориентированные процессоры могут поддерживать как серверную, так и клиентскую стороны компьютерной сети путем встраивания в системную плату или их соединения через один из портов, например, используя USB. Если исключить из рассмотрения арифметические операции, которые не свойственны человеческому мозгу, то все ресурсы мозгоподобного компьютера можно переориентировать на повышение мощности и производительности вычислителя для чрезвычайно большого класса проблем логического, ассоциативного анализа, распознавания образов, диагностирования и поиска информации.

В плане предлагаемых исследований вызывает интерес десятка перспективных технологий от Gartner Research Group (Gary Smith, EE Times, 12.2009) для ближайших лет. В ней нашли отражение только технологии, связанные с разработкой специализированных цифровых изделий на кристаллах, хотя развитие программных технологий также будет оказывать сильное влияние на состояние рынка электроники. Глобально важными остаются технологии снижения потребляемой мощности и решения, направленные на уменьшение содержания ценных материалов в продукте. Данные технологии выступают двигателями многих направлений развития электроники, перечисленных ниже: 1. Биологическая обратная связь или электроника, управляемая мыслью. 2. Печатная электроника на основе использования органических материалов. 3. Пластиковая память на основе полимеров, проявляющих ферроэлектрические свойства. 4. Безмасочная литография на основе использовании электронного луча для создания топологии схемы. 5. Параллельная обработка данных для многоядерных гетерогенных графических процессоров. 6. Сбор энергии от механических и электрических процессов в окружающей среде. 7. Биоэлектроника и wetware, сочетающие биологические объекты и электронику для медицины. 8. Резистивное ОЗУ или мемристор с эффектом памяти как четвертый пассивный элемент электронной схемы, дополняющий резистор, конденсатор и индуктивность. 9. Переходные отверстия в кремнии (Through-Silicon-Via – TSV) для создания реальных 3D-SiP и кристаллов. 10. Различные технологии батарей на основе сочетания никеля и лития.

В плане актуализации пункта 5 топ-технологий мозгоподобный компьютер ориентируется только на параллельные вычисления, связанные с обработкой двоичных и многозначных векторов, таблиц, матриц на основе использования мультипроцессора, ассоциативной памяти, регистров. Для оценивания полученных решений необходимо использовать арифметически независимый критерий оценки качества в векторном логическом пространстве, определяемый соотношением нулевых и единичных разрядов. Таким образом, лучшим решением при разработке мозгоподобного компьютера будет полное исключение всех арифметических операций и команд на их основе, что на несколько порядков повысит быстродействие выполнения векторных логических операций над информационными массивами больших объемов. Еще одна инновация связана с параллельной обработкой не векторов, а информационного окна, сканирующего данные, с масштабируемыми параметрами количества строк и столбцов.

Если рассматривать успех мозгоподобного проекта как создание двух эффективных движков, математического и технологического (аппаратного), то первый должен быть основан на использовании алгебры, ориентированной на выполнение транзакций, максимально приближенных к системным компонентам информационно-логической модели как носителя алгебры. В этом случае сигнатура будет представлена векторными или транзакционными логическими операциями над таблицами, матрицами, векторами, а также более сложными предикатными конструкциями, ориентированными на создание полезной для человека системной функциональности, определенной во времени и пространстве и имеющей целевую функцию и метрику для оценивания полученного решения. Если для технологического информационно-логического движка в современных условиях не найти лучшего варианта эффективной аппаратной платформы, чем мультипроцессорная матрица с системой только логических команд, то математический двигатель должен быть инвариантным к любым регулярным структурам данных и масштабируемым относительно параллельной обработки векторов и таблиц произвольной размерности. Важным технологическим свойством движка является скроллинговое окно для сканирования таблиц большой размерности, которое обеспечивает параллельное выполнение логических операций между входным вектором-запросом и всеми ячейками окна. Средства предлагаемой алгебры должны иметь эффективные и простые критерии оценивания решений логического анализа в дискретном булевом пространстве. Иначе, теория должна быть ориентирована только на логические операции, оперировать не переменными, а векторами и матрицами (таблицами), максимально распараллеливать все вычислительные процессы, обеспечивать масштабируемость как размерности операндов, так и исполняемых программных приложений для эффективного достижения цели с требуемым качеством удовлетворения запроса.

Сущность данного исследования – создание проблемно ориентированной предикатной алгебры ассоциативных матриц и масштабируемого технологического двигателя в виде мультипроцессорной инфраструктуры с минимальным числом логических операций, ориентированных на параллельно-конвейерную обработку табличных и векторных форм данных для существенного повышения быстродействия анализа больших объемов информации при решении задач поиска, принятия решений, распознавания образов и диагностирования технических состояний объектов или процессов.

2. Инфраструктура логического анализа табличных предикатов

Аналитическая предикатная модель описания и решения логических уравнений информационного анализа представлена системой предикатов:

$$P(m, A) = Q(m, A) = [0, 0 - 1, 0];$$

$$Q(m, A) = \frac{1}{3}[d(m, A) + \mu(m \in A) + \mu(A \in m)];$$

$$P(m, A) = 1 \leftarrow m = A;$$

$$P(m, A) = \max_i Q_i(m, A_i);$$

$$Q(m, A_i) = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n\};$$

$$P(m, A) = m \Delta (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m);$$

$$\Delta = \{\wedge, \vee, \neg\};$$

$$A = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m);$$

$$A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{is});$$

$$A_{ij} = (A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{msq});$$

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_r, \dots, m_q);$$

$$P(m, A) = m \wedge \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\} = p;$$

$$p = \{p_1, p_2, \dots, p_r, \dots, p_n\};$$

$$m \wedge (A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_i \vee \dots \vee A_m) = \max_i Q_i(m, A_i);$$

$$p_r(\in p) = m \underset{i=1, m}{\overset{j=1, s}{\Delta}} A_{ij} \leftarrow \begin{cases} \forall i \exists j (m \wedge A_{ij} \neq \emptyset); \\ \exists i \forall j (m \wedge A_{ij} = \emptyset) \wedge d(m, A_{ij}) = \max; \end{cases}$$

$$m \wedge A_{ij} = m_r \underset{r=1}{\overset{q}{\wedge}} A_{ijr} = \begin{cases} m \leftarrow m_r \underset{r=1}{\overset{q}{\wedge}} A_{ijr} = m_r; \\ A_{ij} \leftarrow m_r \underset{r=1}{\overset{q}{\wedge}} A_{ijr} = A_{ijr}; \\ m \wedge A_{ij} \leftarrow m_r \underset{r=1}{\overset{q}{\wedge}} A_{ijr} = m_r \vee A_{ijr}; \\ \emptyset \leftarrow \exists (m_r \underset{r=1}{\overset{q}{\wedge}} A_{ijr} = \emptyset); \end{cases} \quad (1)$$

$$P(m, A) = p_r(\in p) \leftarrow Q_i(m, p_r) = \max, r = \overline{1, n}.$$

Здесь определены следующие предикаты. Выражение $P(m, A) = Q(m, A)$ с помощью операций объединения, пересечения и дополнения задает аналитическую модель вычислительного процесса в виде предиката, определенного на единичном интервале

$Q(m, A) = [0, 0 - 1, 0]$ интегральным критерием принадлежности входного вектора множеству дискретных булевых состояний. Упорядоченная совокупность $A = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m)$ взаимодействующих ассоциативных таблиц объединяется на системном уровне обобщенным графом целевой функциональности. Предикат $A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{is}) = 1$ представлен совокупностью векторов, формирующих ассоциативную таблицу. Вектор $A_{ij} = (A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{ijq})$ задает ассоциативное решение как совокупность состояний переменных, где каждая координата или переменная определена в троичном алфавите $A_{ijr} \in \{0, 1, x\} = \beta$. Взаимодействие $P(m, A)$ входного вектора запроса $m = (m_1, m_2, \dots, m_r, \dots, m_q)$ с графом ассоциативных таблиц $A = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m)$ формирует множество решений $p = \{p_1, p_2, \dots, p_r, \dots, p_n\}$, каждое из которых имеет интегральную оценку качества $Q(m, A) = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n\}$. Выбор лучшего решения осуществляется путем вычисления функционала: $P(m, A) = p_r (\in p) \leftarrow Q_i(m, p_r) = \max, r = \overline{1, n}$.

3. Предикатная алгебра ассоциативных матриц

Матрица (таблица), размерностью $n \times m$, может быть представлена векторами строк или столбцов $[A_i] \vee [A_j]$, где каждая координата матрицы или вектора определена в алфавите $\{0, 1\}$:

$$A = [A_{ij}] = \{[A_i], [A_j]\}, [A_i] = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i1}, \dots, A_{in}), [A_j] = (A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{j1}, \dots, A_{jm}), A_{ij} = \{0, 1\},$$

$$A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{in}), A_j = (A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{ji}, \dots, A_{jm}). \quad (2)$$

Матрица взаимодействует с одним из входных векторов, ориентированных на обработку строк или столбцов $m^a \vee m^b$:

$$m = m^a \vee m^b, m^a = (m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n), m^b = (m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_m). \quad (3)$$

По существу матрица представляет собой любое ассоциативное отношение (таблицу истинности, таблицу предикатов), заданное в n - (m -) мерном векторном двоичном пространстве, где каждый вектор есть точка, принадлежащая данному пространству. Взаимодействие m -вектора с матрицей A преследует цель определить отношение принадлежности каждого вектора матрицы или точки пространства к m -вектору или выполнить разделение пространства точек на два подмножества. Для решения данного класса задач вводятся предикаты, инвариантные по отношению к обработке строк и столбцов матрицы, основанные на использовании логических операций (И, ИЛИ, НЕ).

1) Дизъюнкция конъюнктивного взаимодействия между m -вектором и A -матрицей:

$$P_1(m, A) = m \wedge A = m \wedge [A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_{i(j)} \vee \dots \vee A_{n(m)}] = \begin{cases} p^a = p^a \vee m^a \bigwedge_{i=1}^n A_i \leftarrow m^a \bigwedge_{i=1}^n A_i \neq \emptyset; \\ p^b = p^b \vee m^b \bigwedge_{j=1}^m A_j \leftarrow m^b \bigwedge_{j=1}^m A_j \neq \emptyset. \end{cases} \quad (4)$$

2) Логическое умножение конъюнкции единичных по m векторов матрицы A на отрицание дизъюнкции нулевых по m векторов A :

$$P_2(m, A) = \left(\bigwedge_{\forall m_{i(j)}=1} A_{i(j)} \right) \wedge \overline{\left(\bigvee_{\forall m_{i(j)}=0} A_{i(j)} \right)}.$$

3) Логическое умножение дизъюнкции единичных по m векторов матрицы A на отрицание дизъюнкции нулевых по m векторов A :

$$P_3(m, A) = \left(\bigvee_{\forall m_{i(j)}=1} A_{i(j)} \right) \wedge \overline{\left(\bigvee_{\forall m_{i(j)}=0} A_{i(j)} \right)}. \quad (5)$$

Для всех трех операций качество взаимодействия между m -вектором и A -матрицей оценивается с помощью теоретико-множественной метрики:

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{1}{3}[d(m, A_{i(j)}) + \mu(m \in A_{i(j)}) + \mu(A_{i(j)} \in m)], \\
d(m, A_{i(j)}) &= \frac{1}{n} \{n - \text{card}[m \bigcap_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = \emptyset]\}; \\
\mu(m \in A_{i(j)}) &= 2^{\text{card}[m \cap A_{i(j)}] - \text{card}[A_{i(j)}]} \leftarrow \text{card}[m \cap A_{i(j)}] = \\
&= \text{card}[m \bigcap_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = x] \& \text{card}[A_{i(j)}] = \text{card}[\bigcup_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = x] \& [m \bigcap_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} \neq \emptyset]; \\
\mu(A_{i(j)} \in m) &= 2^{\text{card}[m \cap A_{i(j)}] - \text{card}[m]} \leftarrow \text{card}[m \cap A_{i(j)}] = \\
&= \text{card}[m \bigcap_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = x] \& \text{card}[m] = \text{card}[\bigcup_{i(j)=1}^{n(m)} m = x] \& [m \bigcap_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} \neq \emptyset].
\end{aligned} \tag{6}$$

Данные формулы определения качества взаимодействия m -вектора и A -матрицы изоморфны следующим алгебрологическим выражениям:

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{1}{3}[d(m, A_{i(j)}) + \mu(m \in A_{i(j)}) + \mu(A_{i(j)} \in m)], \\
d(m, A_{i(j)}) &= \frac{1}{n} \{n - \text{card}[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 0]\}; \\
\mu(m \in A_{i(j)}) &= 2^{\text{card}[m \wedge A_{i(j)}] - \text{card}[A_{i(j)}]} \leftarrow \text{card}[m \wedge A_{i(j)}] = \\
&= \text{card}[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = x] \& \text{card}[A_{i(j)}] = \text{card}[\bigvee_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = x] \& [m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} \neq 0]; \\
\mu(A_{i(j)} \in m) &= 2^{\text{card}[m \wedge A_{i(j)}] - \text{card}[m]} \leftarrow \text{card}[m \wedge A_{i(j)}] = \\
&= \text{card}[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = x] \& \text{card}[m] = \text{card}[\bigvee_{i(j)=1}^{n(m)} m = x] \& [m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} \neq 0].
\end{aligned} \tag{7}$$

Здесь кодирование теоретико-множественных символов четырехзначного алфавита для выполнения операций в алгебре логики определяется в следующем виде:

$$T(\alpha \rightarrow \beta) = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \alpha & 0 & 1 & x & \emptyset \\ \hline \beta & 01 & 10 & 11 & 00 \\ \hline \end{array} \tag{8}$$

В таком алфавите все теоретико-множественные операции, согласно изоморфизму, имеют аналоги в булевой алгебре, что позволяет более эффективно, параллельно выполнять алгебрологические регистровые операции над векторами.

Если векторы $A_{i(j)}$, m определены в двоичном алфавите, то формулы определения качества взаимодействия m -вектора и A -матрицы упрощаются:

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{1}{3}[d(m, A_{i(j)}) + \mu(m \in A_{i(j)}) + \mu(A_{i(j)} \in m)], \\
d(m, A_{i(j)}) &= \frac{1}{n} \{n - \text{card}[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 0]\}; \\
\mu(m \in A_{i(j)}) &= 2^{\text{card}[m \wedge A_{i(j)}] - \text{card}[A_{i(j)}]} \leftarrow \text{card}[m \wedge A_{i(j)}] = \\
&= \text{card}[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1] \& \text{card}[A_{i(j)}] = \text{card}[\bigvee_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1]; \\
\mu(A_{i(j)} \in m) &= 2^{\text{card}[m \wedge A_{i(j)}] - \text{card}[m]} \leftarrow \text{card}[m \wedge A_{i(j)}] = \\
&= \text{card}[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1] \& \text{card}[m] = \text{card}[\bigvee_{i(j)=1}^{n(m)} m = 1].
\end{aligned} \tag{9}$$

Фактически функция принадлежности определяется числом единиц, полученных после логического умножения векторов $A_{i(j)} \wedge m$, отнесенных к количеству единиц в векторах $A_{i(j)}, m$. Здесь следует понимать существенное отличие взаимодействия уже не пространств, а точек в виде вектор-маски m и двоичных векторов матрицы $A = [A_{ij}]$. Тем не менее, два упомянутых компонента успешно могут взаимодействовать в векторном алгебрологическом пространстве с помощью операций И, ИЛИ, НЕ. При этом следует учитывать, что нулевые векторы не могут взаимодействовать между собой, поскольку они соответствуют пустому множеству по определению. Следовательно, векторы матрицы $A = [A_{ij}]$ и маска m не могут быть определены только нулевыми значениями по всем координатам. Нуль-вектор есть n -мерный вектор, равный единицам по всем координатам. Он формирует пустое пространство. Кодовое расстояние между двумя алгебрологическими векторами определяется числом нулевых значений при их конъюнкции минус количество единичных координат в результирующем векторе.

Здесь и далее матрица $A = [A_{ij}]$ будет записываться двумя способами – по строкам или столбцам:

$$\begin{aligned} A &= [A] \vee [B] = [A_i] \vee [B_j], \\ A &= (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n); \\ B &= (B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_m). \end{aligned} \tag{10}$$

Две формы записи служат для сокращения сложности представления формул, задающих процесс обработки матрицы, а также для улучшения понимания аналитически записанных вычислительных процессов. Соответственно входной вектор-маска имеет идентификаторы $m = m^a \vee m^b$ в зависимости от способа анализа матрицы, по строкам или столбцам. Три предикатные векторные операции (and, or, not) позволяют инновационно решать многие, интересные для практики, задачи. Некоторые из них представлены ниже.

4. Задача покрытия

Нахождение квазиоптимального покрытия единичными значениями вектор-строк всех вектор-столбцов таблицы. Технологическая инновация – параллельное выполнение операций над векторами матрицы или таблицы. Научная новизна – определение подмножества максимально непересекающихся или минимально пересекающихся строк.

Стратегия процедуры. Выбор ядра – каждая строка, покрывающая некоторый столбец безальтернативно – одна единица в столбце. Для этого вектор-столбец m^b последовательно маскирует по одной координате для нахождения ядра в виде вектор-строк, которые покрывают безальтернативно некоторый столбец. Определение дополнения к ядру – строки с максимальным числом единиц, имеющие максимально пустое пересечение с уже найденными векторами покрытия. Вербальному описанию модели процесса поиска покрытия соответствует следующая аналитическая форма поиска ядра и дополнения к нему:

$$\begin{aligned} P &= P \bigvee_{i=1}^n [A_i \leftarrow (Q_j (m^b \wedge B_j) = 1) \leftarrow (m^b = 0) \vee (m_j^b = 1)]; \\ P &= P \bigvee_{i=1}^n [A_i \leftarrow \max[Q_i ((m^a = 1) \wedge A_i) \times (1 - Q_i (P \wedge A_i))]]; \end{aligned} \tag{11}$$

Здесь вектор m играет неочевидную роль маскирования строк, столбцов или отдельных переменных матрицы для создания идеальных условий вычислительного процесса в целях достижения результата. Без него матрица – мертвая информация. Для решения задачи покрытия необходимо последовательно задать для каждого столбца вектор-маску $(m^b = 0) \vee (m_j^b = 1)$, определенную всеми нулями, кроме одной координаты j , имеющей единичный сигнал; запись $m^a = 1$ означает, что строчный вектор-маска равен 1 по всем координатам. Произведение критериев качества $Q_i ((m^a = 1) \wedge A_i) \times (1 - Q_i (P \wedge A_i))$ предпочтительнее суммы, поскольку оно дает более взвешенную оценку относительно покрывающей способности вектора и кодового расстояния с уже имеющимся решением при выборе очередной строки – кандидата в покрытие. Вычислительная сложность процедуры поиска квазиоптимального покрытия равна $Z = n + \frac{1}{2} n^2$, где n – число строк в матрице,

первое слагаемое – определение ядра покрытия, второе – поиск квазиоптимального дополнения к нему.

Для примера таблицы, размерностью 5x7, имеющей вид:

$$A = [A_i] \vee [B_j] = \begin{array}{c|cccccc} A_i \setminus B_j & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 & B_7 \\ \hline A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ A_2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ A_3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ A_4 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ A_5 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad (12)$$

модель поиска квазиоптимального покрытия на основе использования описанной выше процедуры дает минимальное покрытие: $P = \{A_1, A_4, A_5\}$.

5. Метод диагностирования дефектов по таблице неисправностей

Рассматривается на примере транзакционного графа одного из программных модулей Row_buffer, используемых при создании IP-core вейвлет-преобразования для стандарта JPEG 2000 (рис. 1). Вершины графа представлены входными шинами и переменными, регистрами и выходными шинами. Дуги между ними означают существование транзакций между вершинами при выполнении операторов HDL-кода.

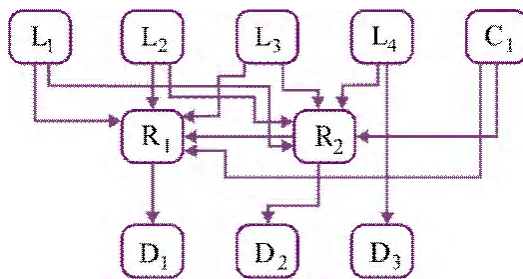


Рис. 1. Row_buffer транзакционный граф

Для данного Row_buffer графа построена таблица, задающая поведение неисправных блоков на тесте путем использования системы моделирования и генерации тестов SIGETEST:

$$A = \{A_i, B_j\} = \begin{array}{c|cccccccccccc|cc} \text{Test} & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 & B_7 & B_8 & B_9 & B_{10} & m_1^b & m_2^b \\ \hline & (L_1) & (L_2) & (L_3) & (L_4) & (C_1) & (R_1) & (R_2) & (D_1) & (D_2) & (D_3) & & \\ \hline A_1(t_1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ A_2(t_2) & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ A_3(t_3) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ A_4(t_4) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ A_5(t_5) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_6(t_6) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ A_7(t_7) & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_8(t_8) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_9(t_9) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ A_{10}(t_{10}) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{11}(t_{11}) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{12}(t_{12}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ A_{13}(t_{13}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

5.1. Метод ассоциативно-логического анализа столбцов таблицы неисправностей (ТН)

Он основан на применении операции логического умножения или конъюнкции вектора экспериментальной проверки, формально рассматриваемого в качестве входного вектор-столбца или маски m , на столбцы таблицы неисправностей $m^b \wedge (B_1 \vee B_2 \vee \dots \vee B_j \vee \dots \vee B_m)$ и подсчете качества взаимодействия векторов $Q_j(m^b \wedge B_j)$ в целях выбора лучшего из них по критерию максимального качества. При этом столбец $B_j \in A$ фактически идентифици-

рует метрику поведения неисправности или дефектного блока на тестовых наборах. Предикатная запись процесса получения решения в виде совокупности ошибок, присутствующих в HDL-коде, представлена в следующем виде:

$$P^S = P^S \bigvee_{i=1}^n [B_j \leftarrow \max(Q_j(m^b \wedge B_j))];$$

$$P^m = P^m \bigvee_{i=1}^n [B_j \leftarrow (m^b \wedge B_j = B_j)] \leftarrow Q[m^b \wedge (\bigvee_{j=1}^m B_j \in P^m)] = 1 \vee \max; \quad (13)$$

здесь вектор

$$m^b = f(T, F) \oplus f^*(T, F, L) \quad (14)$$

экспериментальной проверки есть результат проведения тестового эксперимента – сравнение функционалов (состояний выходов) эталонного $f(T, F)$ и реального $f^*(T, F, L)$ устройства с дефектами L на тестовых наборах T .

Достоинство метода – выбор всегда лучшего решения из всех возможных как для одиночных, так и для кратных дефектов. В последнем случае, если одиночный дефект не идентифицируется оценкой, равной 1, выполняется дизъюнкция таких вектор-строк (главное отличие метода от существующих технологий), которые формируют оценку качества,

равную 1 или максимально близкую к единице $Q[m^b \wedge (\bigvee_{j=1}^m B_j \in P^m)] = 1 \vee \max$. По существу,

в список кратных дефектов включаются такие одиночные неисправности, которые при логическом умножении на вектор экспериментальной проверки дают результат в виде соответствующего вектор-столбца. При этом дизъюнкция всех столбцов, составляющих

решение, равна $\bigvee_{j=1}^m (B_j \in P^m) = m^b$.

С использованием таблицы и процедур диагностирования (13) определяются дефектные компоненты программного кода модуля `Row_buffer` методом логического умножения вектор-столбцов таблицы истинности на вектор экспериментальной проверки. Здесь векторы m_1^b , m_2^b формируют результат диагностического эксперимента, выполняемый по ранее определенной технологии (14). Результат диагностирования одиночных и кратных дефектов имеет следующий вид:

$$P^S(m_1^b) = m_1^b \wedge (L_1 \vee L_2 \vee L_3 \vee L_4 \vee C_1 \vee R_1 \vee R_2 \vee D_1 \vee D_2 \vee D_3) = D_2;$$

$$P^m(m_2^b) = m_2^b \wedge (L_1 \vee L_2 \vee L_3 \vee L_4 \vee C_1 \vee R_1 \vee R_2 \vee D_1 \vee D_2) = L_1 \vee L_2;$$

$$Q(m_1^b, D_2) = 1; \quad (15)$$

$$Q[m_2^b, (L_1 \vee L_2)] = \frac{1}{3} \left(\frac{4}{13} + \frac{1}{4} + 1 \right) = 0,52.$$

В первом случае диагноз определен в виде одного дефектного блока D_2 , присутствующего в транзакционном графе, качество решения равно 1. Во втором случае процедура диагностирования выявила наличие двух дефектных модулей $L_1 \vee L_2$, которые не смогли сформировать идеальную оценку качества. Тем не менее, решение является лучшим среди всех возможных, которое максимально приближено к вектору экспериментальной проверки по критерию принадлежности $Q[m_2^b, (L_1 \vee L_2)]$.

Вычислительная сложность метода анализа столбцов определяется следующей зависимостью:

$$Z^c = 3n^2 + n^2 = 4n^2; \quad Z^r = 3n + n = 4n.$$

Здесь первая оценка учитывает выполнение координатных операций над матрицей размерностью $n \times n$. Вторая оценка определяет вычислительную сложность регистровых параллельных операций для подсчета критериев качества и обработки матрицы соответственно.

5.2. Метод ассоциативно-логического анализа строк таблицы неисправностей

Стратегия определения ошибок программного кода по таблице неисправностей связана с анализом ее строк, состоящим из двух процедур: 1) вычисление произведения конъюнкции строк, отмеченных единичными значениями вектора $A_i (m_i^b = 1)$ на отрицание дизъюнкции нулевых строк $A_i (m_i^b = 0)$ для одиночных дефектных блоков; 2) вычисление произведения дизъюнкции единичных строк на отрицание дизъюнкции нулевых строк для кратных дефектных блоков:

$$\begin{aligned} P^s &= \left(\bigwedge_{\forall m_i^b=1} A_i \right) \wedge \left(\overline{\bigvee_{\forall m_i^b=0} A_i} \right); \\ P^m &= \left(\bigvee_{\forall m_i^b=1} A_i \right) \wedge \left(\overline{\bigvee_{\forall m_i^b=0} A_i} \right); \end{aligned} \quad (16)$$

Формулы интересны тем, что они не привязаны к критериям качества диагностирования, а оперируют лишь двумя компонентами, таблицей неисправностей и вектором экспериментальной проверки.

Выполнение процедуры диагностирования по формулам (16) для вектора экспериментальной проверки $m^b = (0101010010010)$, заданного в последней таблице неисправностей, дает результат: $P^s(m_1^b, A) = D_2$, который не хуже, чем ранее полученный, методом анализа столбцов. Для вектора экспериментальной проверки $m^b = (1110011100000)$ результат диагностирования имеет вид: $P^m(m_2^b, A) = L_1 \vee L_2$.

Вычислительная сложность метода анализа строк определяется следующей зависимостью: $Z^c = n^2$; $Z^r = n$.

Первая оценка предназначена для подсчета числа координатных операций, вторая определяет вычислительную сложность процесса обработки на основе регистровых параллельных операций.

6. Векторно-логический критерий качества решения

Цель – использовать только логические операции и исключить арифметические вычисления из процедуры формирования критерия для существенного повышения быстродействия логического анализа информационных массивов.

Идея – качество решения логического анализа оценивается мощностью единиц в векторе качества, а определяется путем взаимодействия входного вектора с таблицами данных на основе использования векторных логических операций.

Вектор качества формирует критерий принадлежности, определяемый следующими выражениями:

$$\begin{aligned} Q &= d[m, A_{i(j)}] + \mu[m \in A_{i(j)}] + \mu[A_{i(j)} \in m], \\ d(m, A_{i(j)}) &= \text{card} \left[m \bigoplus_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1 \right]; \\ \mu(m \in A_{i(j)}) &= \text{card}[A_{i(j)} = 1] - \text{card} \left[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1 \right]; \\ \mu(A_{i(j)} \in m) &= \text{card}[m = 1] - \text{card} \left[m \bigwedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1 \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Первая составляющая критерия формирует степень несовпадения n -мерных векторов – кодовое расстояние путем выполнения операции Хор, вторая и третья определяют степень непринадлежности результата конъюнкции к числу единиц каждого из двух взаимодействующих

ющих векторов. Понятия принадлежности и непринадлежности являются взаимодополняющими, но в данном случае технологичнее высчитывать именно непринадлежность. Таким образом, идеальный критерий качества равен нулю, когда два вектора равны между собой. Оценка качества взаимодействия двух двоичных векторов убывает по мере роста критерия от 0 к 1.

Чтобы окончательно уйти от арифметических операций при подсчете критерия качества, необходимо выражения (17) преобразовать к следующему виду:

$$\begin{aligned}
 Q &= d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m), \\
 d(m, A) &= m \oplus A; \\
 \mu(m \in A) &= A \wedge \overline{m \wedge A}; \\
 \mu(A \in m) &= m \wedge \overline{m \wedge A}.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Здесь оценки представлены уже не числами, а векторами, которые оценивают взаимодействие между компонентами m, A . При этом число нулей в трех оценках есть хорошо, а единицы ухудшают качество взаимодействия. Оптимизация решения логической задачи направлена на минимизацию числа единиц и максимизацию количества нулевых координат в векторах критерия качества. Для сравнения двух оценок необходимо определять мощность единиц в каждом векторе без выполнения операций суммирования, это можно сделать с помощью регистра [4] уплотнения единиц и их сдвига влево, представленного на рис. 2. Регистр позволяет за один такт выполнить сдвиг влево и уплотнить все единичные координаты n -разрядного двоичного вектора. После процедуры сжатия номер последнего или правого единичного бита уплотненной серии единиц формирует индекс качества взаимодействия векторов.

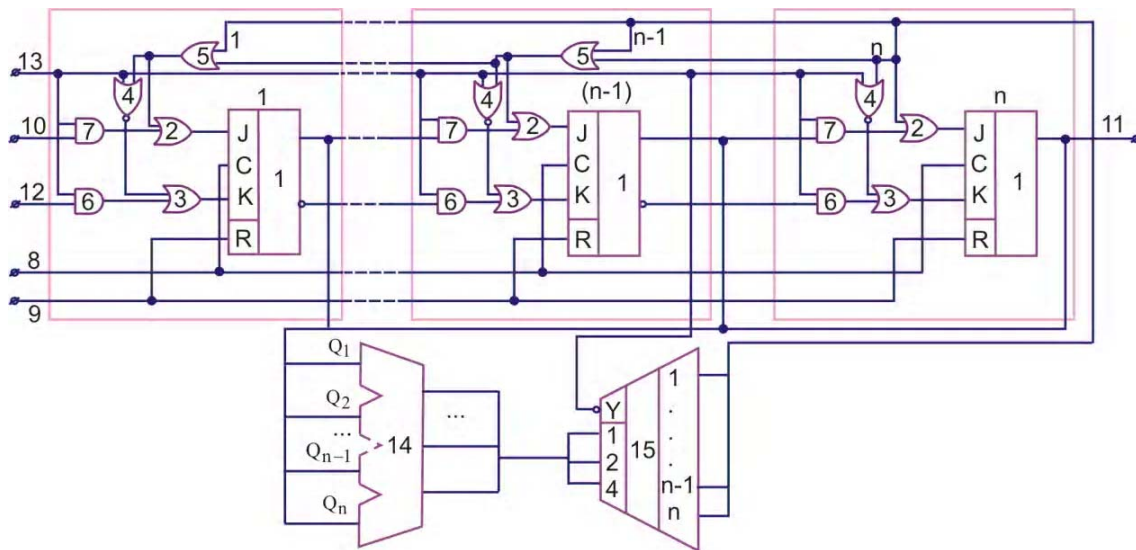


Рис. 2. Регистр уплотнения единиц

Для двух векторов $m = (110011001100)$; $A = (000011110101)$ определение качества их взаимодействия в соответствии с моделью (18) представлено в следующем виде (нулевые координаты отмечены точками):

m	1 1 . . 1 1 . . 1 1 . .
A	. . . . 1 1 1 1 . 1 . 1
$m \wedge A$	. . . . 1 1 . . . 1 . . .
$\overline{m \wedge A}$	1 1 1 1 . . 1 1 1 . 1 1
$d(m, A) = m \oplus A$	1 1 1 1 1 . . 1
$\mu(A \in m) = m \wedge \overline{m \wedge A}$	1 1 1 . . .
$\mu(m \in A) = A \wedge \overline{m \wedge A}$	. . . . . . 1 1 . . . 1
$Q = d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m)$	1 1 1 1 1 . . 1
$Q(m, A) = (6, 12)$	1 1 1 1 1 1

Здесь сформирована не только оценка качества взаимодействия векторов, равная $Q(m, A) = (6, 12)$, но, что самое главное, единичные координаты строки $Q = d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m)$ идентифицируют все те места или позиции, по которым существует некачественное взаимодействие векторов.

Другой пример иллюстрирует формирование максимального критерия качества для двоичных векторов $m = (110000110011)$; $A = (110000110011)$, совпадающих по всем координатам:

m	1 1 1 1 . . 1 1
A	1 1 1 1 . . 1 1
$m \wedge A$	1 1 1 1 . . 1 1
$m \wedge A$	. . 1 1 1 1 . . 1 1 . .
$d(m, A) = m \oplus A$	. . . . . . . . . . . .
$\mu(A \in m) = m \wedge (m \wedge A)$	. . . . . . . . . . . .
$\mu(m \in A) = A \wedge (m \wedge A)$	. . . . . . . . . . . .
$Q = d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m)$	. . . . . . . . . . . .
$Q = (0, 12)$	. . . . . . . . . . . .

Здесь критерий качества, равный нулю во всех 12 разрядах $Q = (0, 12)$, является максимальным или самым лучшим для взаимодействующих векторов $m = (110000110011)$; $A = (110000110011)$, поскольку он определен минимальным числом единиц на двенадцати координатах вектора.

Для сравнения двух решений, полученных в результате логического анализа, следует использовать сжатые векторы качества Q , над которыми необходимо выполнить процедуру, состоящую из следующих векторных операций:

$$Q(m, A) = \begin{cases} Q_1(m, A) \leftarrow Q_1(m, A) \oplus Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A) = 0; \\ Q_2(m, A) \leftarrow Q_1(m, A) \oplus Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A) \neq 0. \end{cases} \quad (19)$$

Для двоичных векторов, представляющих собой критерии качества, выполнена процедура определения лучшего из них на основе выражения, представленного в (19):

$Q_1(m, A) = (6, 12)$	1 1 1 1 1 1
$Q_2(m, A) = (8, 12)$	1 1 1 1 1 1 1 1
$Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A)$	1 1 1 1 1 1
$Q_1(m, A) \oplus Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A)$	. . . . . . . . . . . .
$Q(m, A) = Q_1(m, A)$	1 1 1 1 1 1

Предложенная алгебра и разработанные с ее помощью аналитические модели и методы анализа таблиц на основе введенных критериев качества позволяют решать задачи поиска квазиоптимального покрытия (неисправностей), диагностирования одиночных и кратных дефектов программных блоков. Алгебра анализа матриц также может быть использована для решения следующих задач: 1. Моделирование исправного поведения цифрового устройства, заданного таблицей истинности. 2. Определение качества теста по таблице неисправностей. 3. Минимизация теста. 4. Поиск тестов, распознающих заданный дефект, на основе анализа таблицы неисправностей. 5. Идентификация кратного дефекта. 6. Поиск и исправление ошибок при наборе текста.

7. Выводы

1. Научная новизна представлена предикатной алгеброй логического анализа векторных и табличных форм задания информации для решения задач поиска, диагностирования, распознавания образов и принятия решений в векторном дискретном булевом пространстве. Представлены быстродействующие модели и методы параллельного векторного логического анализа информации, полностью исключая использование арифметических операций, в том числе и для подсчета критерия качества решения, где используются только логические операции. Также описаны новые методы для решения задач диагностирования и нахождения квазиоптимального покрытия, использующие векторные операции, ориентированные на распараллеливание вычислительных процессов.

2. Практическая значимость заключается в ориентации алгебры ассоциативных таблиц и методов их анализа на создание логического мультипроцессора с ограниченной системой команд, ориентированной на высокое быстродействие параллельной обработки больших массивов информации, представленных графовыми структурами ассоциативных матриц. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку прототипа мультипроцессора и исследование новых практических задач с помощью предложенной алгебры.

Список литературы: 1. *Zorian Yervant*. Test Strategies for System-in-Package // The Plenary Paper of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'08). Lvov, Ukraine. October 9-12, 2008. 2. *Smith L*. 3D Packaging Applications, Requirements, Infrastructure and Technologies // Fourth Annual International Wafer-Level Packaging Conference. San Jose, California. September, 2007. 3. *The next Step in Assembly and Packaging: System Level Integration in the package (SiP)* / Editors: William Chen, W. R. Bottoms, Klaus Pressel, Juergen Wolf // SiP White Paper. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2007. P. 17-23. 4. *Какурин Н.Я., Хаханов В.И., Лобода В.Г., Какурина А.Н.* / Регистр сдвига. А.С. №1439682. 22.07.88. 4с. 5. *Бондаренко М.Ф., Дударь З.В., Ефимова И.А., Лецинский В.А., Шабанов-Кушнарченко С.Ю.* О мозгоподобных ЭВМ // Радиоэлектроника и информатика. Харьков: ХНУРЭ, 2004. № 2. С. 89–105. 6. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Об алгебре предикатов // Бионика интеллекта. Харьков: ХНУРЭ, 2004. № 1. С. 15–26. 7. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Теория интеллекта. Учебник. Харьков: СМИТ, 2006. 592 с. 8. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модели языка // Бионика интеллекта. Харьков: ХНУРЭ, 2004. № 1. С. 27–37. 9. *Акритас А.* Основы компьютерной алгебры с приложениями: Пер. с англ. М.: Мир, 1994. 544 с. 10. *Гилл Ф. Мюррей У., Райм М.* Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509с. 11. *Амтетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С.* Методы оптимизации. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. 440 с. 12. *Дегтярев Ю. И.* Методы оптимизации: Учебное пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1980. 270с. 13. *Bergeron J.* Writing Testbenches Using System Verilog / J. Bergeron // Springer Science and Business Media, Inc., 2006. 414 p. 14. *Abramovici M., Breuer M.A. and Friedman A.D.* Digital System Testing and Testable Design. Comp. Sc. Press. 1998. 652 p. 15. *Densmore Douglas A* Platform-Based taxonomy for ESL Design / Douglas Densmore, Roberto Passerone, Alberto Sangiovanni-Vincentelli // Design&Test of computers. 2006. P. 359–373. 16. *Хаханов В.И.* Проектирование и тестирование цифровых систем на кристаллах / В.И. Хаханов, Е.И. Литвинова, О.А. Гузь. Харьков: ХНУРЭ, 2009. 484с.

Поступила в редколлегию 12.11.2009

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

Гузь Олеся Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой специализированных компьютерных систем Донецкой академии автомобильного транспорта. Научные интересы: проектирование и диагностика цифровых систем и сетей на кристаллах. Адрес: Украина, 83086, Донецк, пр. Дзержинского, 7, тел. (063) 470-52-09. E-mail: olesya_guz@ukr.net.

Тиекура Ив (Tiecoura Yves), аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем и сетей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-421. E-mail: kiu@kture.kharkov.ua.

Нгене Кристофер Умерах (Ngene Christopher Umerah), аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: вычислительная математика, техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: музыка, поэзия, путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: ri@kture.kharkov.ua.

Копанев Вадим Игоревич, студент гр. КСМ-06-2 факультета КИУ ХНУРЭ. Научные интересы: вычислительная математика, техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: музыка, поэзия, путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: burninglegion@haker.ru.

МЕТОД КОМПОЗИЦИИ ПЕРФОРИРОВАННЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ЧИСЕЛ

Излагается обоснование и основные этапы разработки метода композиционной сборки неравновесных перфорированных позиционных чисел на основе массивов нижнего диапазонного и верхнего дифференцированного диапазонного уровней. Строится дифференциальное описание массивов верхнего перфорационного уровня, учитывающее наличие однородной структуры динамических диапазонов перепадов на границы контура и основного фона изображения. Показывается, что композиционные перфорированные числа в отличие от неравновесных позиционных чисел обладают свойствами для потенциального повышения степени сжатия.

1. Введение

В соответствии с современными потребностями общества актуальная *цель научной прикладной тематики исследований* в процессе разработки и совершенствования информационных систем заключается в обеспечении сокращения объемов видеoinформационного потока в условиях ограниченного временного ресурса [1, 2].

В работах [3-5] обоснована необходимость формирования перфорированных неравновесных позиционных чисел для дифференциального представления изображений. Это позволит: выявить закономерности перфорированности динамических диапазонов дифференциального представления насыщенных мелкими деталями изображения; обеспечить возможности для дополнительного сокращения избыточности дифференциально-представленных изображений в случаях нестационарности структурных свойств. Суть формирования перфорированных неравновесных чисел заключается в том, что для массивов дифференциального представления, рассматриваемых как неравновесные позиционные числа, существуют такие элементы, удаление которых приводит к значительному сокращению динамического диапазона оставшихся элементов. Тогда формируются два массива $H \rightarrow \{H^{(0)}; H^{(1)}\}$. Первый массив $H^{(1)}$ содержит элементы верхнего перфорационного уровня. Соответственно элементам второго массива $H^{(0)}$ отвечает нижний перфорационный уровень.

Для реализации потенциальных возможностей относительно повышения степени сжатия без потери качества изображений следует разработать метод компрессии. Необходимо учитывать структурные особенности изображений, а именно наличие: корреляции между соседними элементами изображения; когерентности элементов в столбцах фрагментов изображения; ограниченного количества резких перепадов для фрагментов изображений; ограниченного значения и неравномерности динамических диапазонов перепада между соседними элементами изображения; ограниченного количества перепадов, имеющих высокие динамические диапазоны.

Значит, метод сжатия должен быть комплексным, т.е. процесс обработки будет содержать в себе несколько этапов. Важный этап обработки дифференцированных изображений заключается в построении композиционного представления массивов перфорирующих уровней. Отсюда *научной задачей* является обоснование и разработка метода композиционного описания перфорированных неравновесных позиционных чисел для повышения эффективности процесса кодирования.

2. Разработка технологического процесса построения структурно-дифференциального описания изображений

Построение неравновесных позиционных чисел. Данный этап включает в себя формирование динамических диапазонов для элементов массивов дифференциального представления (МДП) $d_{k\ell} = \min(d_k, d_\ell)$, $k = \overline{1, m}$; $\ell = \overline{1, n}$; $h'_{k\ell} \leq d_{k\ell} - 1$. В результате образуется неравновесное позиционное число (НПЧ), для элементов которого существуют ограниче-

ния на динамический диапазон $\{d_{1\ell}, \dots, d_{k\ell}, \dots, d_{m\ell}\}$. Этап является предварительным для организации построения перфорированных чисел.

Создание перфорированного неравновесного позиционного представления осуществляется на базе массивов дифференциального представления. Распределение элементов НПЧ по массивам перфорировующих уровней осуществляется для известного порогового значения $K(h')_{\text{пор}}$ на основе следующего правила:

– если для динамического диапазона элемента НПЧ выполняется неравенство:

$$d_{k\ell} \leq K(h')_{\text{пор}}, \quad (1)$$

то элемент $h'_{k\ell}$ относится к области нижнего перфорировующего уровня $h'_{k\ell} \in H^{(0)}$;

– если выполняется неравенство $d_{k\ell} > K(h')_{\text{пор}}$, тогда элемент $h'_{k\ell}$ принадлежит массиву верхнего перфорировующего уровня $h'_{k\ell} \in H^{(1)}$.

Элементы массивов нижнего $h^{(1)}$ и верхнего $h^{(2)}$ перфорировующего уровня могут находиться на разных позициях в массиве дифференциального представления. Поэтому на очередном этапе обработки необходимо из отобранных элементов сформировать наиболее полные массивы для упрощения процесса кодирования. Формирование массивов элементов нижнего и верхнего перфорировующего уровней предлагается проводить с учетом того, что массивы заполняются в направлении строк, а в случае заполнения неполной строки элементом из другой строки, имеющим больший диапазон, необходимо пересчитать диапазоны для элементов всей строки.

Образование массивов перфорировующих уровней проводится на основе процедур:

1) отбираются элементы нижнего уровня, которые соответствуют условию (1). Недостающие элементы заполняются нулевыми значениями. На позиции, соответствующей отобранному элементу, ставится нулевое значение;

2) построение массива второго уровня заключается в замене нулевых значений соседними элементами или элементами соседних строк.

Если выполняется неравенство (1), то элемент $h'_{k\ell}$, стоящий на позиции с координатами $(k; \ell)$ в массиве H , относится к массиву $H^{(0)}$. Заполнение массива $H^{(0)}$ осуществляется по строкам. Длина строки совпадает с длиной строки массива H и равняется n .

Значения координат $(\xi; \gamma)$ с учетом известного количества элементов $v(H^{(0)}_{k\ell})$, принадлежащих массиву $H^{(0)}$ на момент начала распределения $(k; \ell)$ -го элемента массива H , находятся на основе следующих выражений:

– когда количество элементов $v(H^{(0)}_{k\ell})$ меньше, чем количество n элементов в строке массива $H^{(0)}$, т.е. $v(H^{(0)}_{k\ell}) < n$, то $\xi=1$, а $\gamma = v(H^{(0)}_{k\ell}) + 1$;

– в случае, когда выполняется равенство $v(H^{(0)}_{k\ell}) = n$, то $\xi=2$, а $\gamma = 1$;

– если длина строки массива $H^{(0)}$ превышает количество элементов массива $H^{(0)}$, т.е. $v(H^{(0)}_{k\ell}) > n$, то $\xi = \left[\frac{v(H^{(0)}_{k\ell})}{n} \right] + 1$; $\gamma = v(H^{(0)}_{k\ell}) - \left(\left[\frac{v(H^{(0)}_{k\ell})}{n} \right] n \right) + 1$.

Построение массива $H^{(1)}$ из элементов $h'_{k\ell}$, для динамических диапазонов которых не выполняется условие (1), организуется на основе оставшихся элементов массива H . Массив $H^{(1)}$ верхнего перфорировующего уровня образуется путем заполнения позиции массива H , на которой размещается элемент, принадлежащий массиву $H^{(0)}$. В этом случае для пересчета координат элементов массива H в координаты элементов массива $H^{(1)}$ используется правило.

Если динамический диапазон $d_{k\ell}$ элемента с координатами $(k; \ell)$ удовлетворяет неравенству (1), то координаты очередного элемента $h_{k, \ell+1}$ (если $\ell+1 \leq n$) или $h_{k+1, 1}$ (если $\ell+1 > n$) массива H будут равны $\xi=k$; $\gamma=\ell$. Формат массива H после выборки из него элементов в массив $H^{(0)}$ является содержанием массива $H^{(1)}$.

В результате выполнения данного этапа обеспечивается:

- распределение позиций в неравновесном позиционном числе N на массивы $N^{(0)}$ и $N^{(1)}$ соответственно значений элементов нижнего и верхнего перфорирующих уровней;
- разбиение массива $D(h')$, состоящего из значений ограничений на динамический диапазон $d_{\xi\gamma}$, соответственно на массивы $D(h')^{(0)}$ и $D(h')^{(1)}$.

Особенность массива $N^{(1)}$ верхнего диапазонного уровня заключается в том, что он содержит элементы, имеющие наибольшие динамические диапазоны. Это является причиной увеличения значения кода-номера, причем характер такой зависимости близок к экспоненциальному (рисунок).

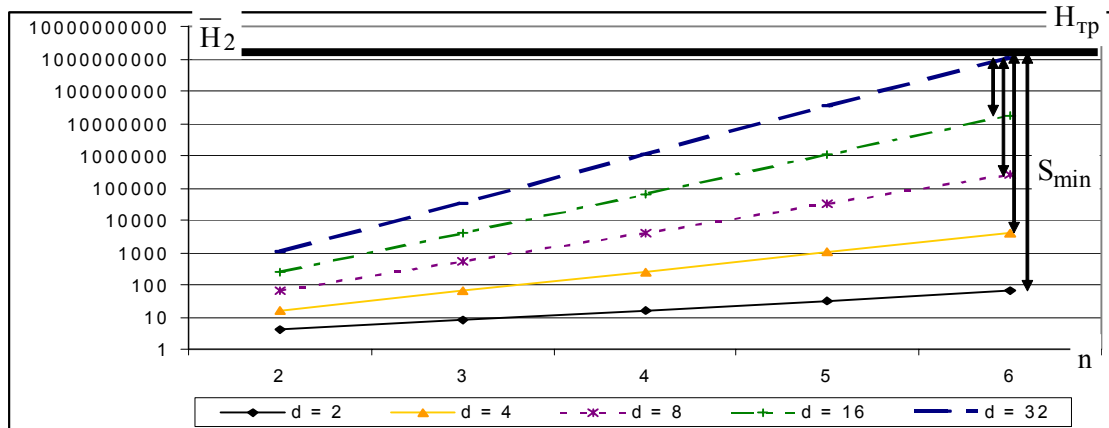


График зависимости количества информации \bar{N}_2 (в логарифмическом масштабе) от динамического диапазона d и количества n элементов НПЧ

В результате анализа графиков на рисунке можно заключить, что:

- зависимость количества информации от длины НПЧ близка к экспоненциальной зависимости;
- с ростом динамического диапазона количество минимальной потенциальной S_{min} избыточности также уменьшается по экспоненте вплоть до нулевого значения.

Для исключения данного недостатка предлагается использовать особенность элементов массивов $N^{(1)}$, а именно:

- массив верхнего диапазонного уровня перфорированного представления содержит элементы, равные значениям перепадов на границы контура и основного фона фрагмента изображения;
- динамический диапазон перепада на границы контура и основного фона фрагмента изображения имеет однородную структуру.

Данные особенности позволяют перейти к дифференциальному описанию массивов верхнего перфорационного уровня. Суть дифференциального представления массивов верхнего диапазонного уровня заключается в том, что они рассматриваются как двумерные позиционные числа в разностном неравновесном пространстве.

Тогда элементами дифференциального неравновесного позиционного числа являются длины расстояний от него до двумерного НП числа, имеющего минимальные значения элементов, т.е. соответствующие нижнему уровню разностного неравновесного пространства. Код-номер массива $N^{(1)}$ будет определяться относительно кода-номера НПЧ, соответствующего минимальному уровню дифференциального неравновесного пространства. Значение кода-номера двумерного дифференциального НПЧ будет зависеть от количества неравновесных чисел, удовлетворяющих ограничениям дифференциального неравновесного пространства. Количество таких чисел определяется как длина R расстояния от числа, соответствующего минимальному уровню, до текущего числа в двумерном дифференциальном неравновесном пространстве.

Минимальный уровень дифференциального неравновесного пространства (ДНП) предлагается формировать с учетом выявления минимальных значений в каждой строке массива

ва верхнего перфорационного уровня. Формируется вектор минимальных значений в строках $M = \{\mu_1, \dots, \mu_m\}$: $\mu_i = \min_{1 \leq j \leq n} \{h_{ij}^{(1)}\}$, $i = \overline{1, m}$, где μ_i – минимальное значение в i -й строке массива $H^{(1)}$. Выявление минимальных значений в каждой строке позволяет учесть особенности динамических диапазонов на границах объектов изображения. Тогда двумерное дифференциальное неравновесное пространство задается вектором S ограничений на динамический диапазон значений длин расстояний:

$$S = \{s_{1j}, \dots, s_{nj}\}; s_{ij} = d_{ij}^{(1)} - \mu_i; \quad (2)$$

$$\mu_i \leq h_{ij}^{(1)} \leq d_{ij}^{(1)} - 1, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n^{(1)}}, \quad (3)$$

где s_{ij} – разность между максимальным $d_{ij}^{(1)}$ и минимальным μ_i значениями в i -й строке массива $H^{(1)}$ верхнего перфорационного уровня; $n^{(1)}$ – количество столбцов в массиве $H^{(1)}$.

Нижний уровень $M^{(2)}$ двумерного дифференциального пространства определяется на основе значений вектора $M = \{\mu_1, \dots, \mu_m\}$ и является неравновесным позиционным числом, элементы которого удовлетворяют ограничениям на динамический диапазон верхнего перфорирующего уровня. С учетом ограничений (2) и (3) значение кода-номера как длины расстояния R между текущим массивом $H^{(1)}$ и нижним уровнем $M^{(2)}$ двумерного ДНП определяется по формуле

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^{(1)}} (h_{ij}^{(1)} - \mu_i) \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} s_{i\xi} \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} s_{\gamma\xi},$$

где $(h_{ij}^{(1)} - \mu_i) = \bar{h}_{ij}^{(1)}$ – величина разности между значениями элементов текущего массива и нижнего уровня двумерного ДНП, расположенных на позиции $(i; j)$.

Покажем, что рассмотрение массива $H^{(1)}$ в двумерном дифференциальном пространстве позволяет сократить значение его кода-номера относительно исходного случая. Для этого покажем, что между кодом-номером R как длины расстояния в ДНП и исходным кодом-номером $N^{(1)}$ выполняется неравенство

$$R \leq N^{(1)}. \quad (4)$$

Распишем соотношение (3) с учетом формулы (2) и получим

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^{(1)}} (h_{ij}^{(1)} - \mu_i) \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} (d_{i\xi}^{(1)} - \mu_i) \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} (d_{\gamma\xi}^{(1)} - \mu_\gamma). \quad (5)$$

Тогда, поскольку выполняются неравенства:

$$(h_{ij}^{(1)} - \mu_i) \leq h_{ij}^{(1)}; \quad \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} (d_{i\xi}^{(1)} - \mu_i) \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^m (d_{\gamma\xi}^{(1)} - \mu_\gamma) \leq \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} d_{i\xi}^{(1)} \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} d_{\gamma\xi}^{(1)},$$

то получаем неравенство (4).

Покажем теперь, что код-номер неравновесного позиционного числа в дифференциальном пространстве, определяемый как длина относительного расстояния, будет меньше, чем разность между кодом-номером неравновесного числа и кодом-номером нижнего уровня в исходном перфорированном пространстве, т.е.

$$R \leq N^{(1)} - N_{\min}^{(1)}, \quad (6)$$

где $N_{\min}^{(1)}$ – значение кода-номера НПЧ $M^{(2)}$, являющегося нижним уровнем двумерного дифференциального неравновесного пространства:

$$N_{\min}^{(1)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^{(1)}} \mu_i \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} d_{i\xi}^{(1)} \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} d_{\gamma\xi}^{(1)}.$$

Действительно, распишем левую часть неравенства (6) и получим

$$N^{(1)} - N_{\min}^{(1)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^{(1)}} h_{ij}^{(1)} \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} d_{i\xi}^{(1)} \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} d_{\gamma\xi}^{(1)} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^{(1)}} \mu_i \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} d_{i\xi}^{(1)} \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} d_{\gamma\xi}^{(1)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^{(1)}} (h_{ij}^{(1)} - \mu_i) \prod_{\xi=j+1}^{n^{(1)}} d_{i\xi}^{(1)} \prod_{\gamma=i+1}^m \prod_{\xi=1}^{n^{(1)}} d_{\gamma\xi}^{(1)}. \quad (7)$$

Отсюда, сравнив правые части соотношений (5) и (7), получим неравенство (6).

Выполнение неравенства (6) позволяет сделать заключение относительно того, что представление массива элементов верхнего перфорационного уровня в дифференциальном неравновесном позиционном пространстве обеспечивает дополнительное сокращение комбинаторной избыточности, обусловленной: снижением динамического диапазона элементов верхнего перфорационного уровня за счет выявления минимальных значений; сокращением количества неравновесных позиционных чисел, предшествующих текущему НПЧ, но не удовлетворяющих условиям дифференциального пространства.

Таким образом, построено представление массивов верхнего перфорационного уровня в дифференциальном неравновесном пространстве. Обеспечивается повышение возможностей относительно сокращения комбинаторной избыточности.

3. Сборка перфорационного числа на основе композиции двух массивов

Дальнейшая обработка массивов перфорационных уровней может осуществляться на основе двух подходов, а именно:

- 1) формирование кода-номера для каждого массива в отдельности;
- 2) вычисление кода-номера для композиционного массива, полученного в результате сборки массивов перфорационных уровней в один массив.

Первое направление позволяет сократить количество вычислительных затрат, отводимых в случае формирования композиционного перфорационного числа. Однако в этом случае не учитывается, что динамический диапазон элементов массивов перфорирующих уровней может быть сокращен так, что формируемые кодовые комбинации будут содержать большое количество незначимых двоичных разрядов. Это приведет к снижению степени сжатия.

Исключить подобные недостатки позволяет второй подход обработки перфорационных чисел. Данный подход позволяет учесть, что наибольшие коэффициенты сжатия при формировании кода-номера неравновесным позиционным числам достигаются тогда, когда длина кодового слова не меньше 32 бит. Особенно это проявляется при обработке НП чисел, элементы которых имеют большие динамические диапазоны. В то же время для того, чтобы заполнить кодовые слова такой длины значимыми разрядами, необходимо формировать коды-номера, имеющие соответствующие большие значения. Для этого требуется увеличивать количество элементов в НПЧ. Кроме того, обеспечивается возможность:

- обрабатывать большее количество элементов, т.е. увеличиваются потенциальные возможности относительно количества сокращаемой избыточности;
- выбирать элементы, имеющие минимальные значения оснований. Это позволит снизить длину кода, поскольку минимальные значения будут на позициях старших элементов.

Рассмотрим процедуру сборки перфорационного числа на основе композиции двух массивов. Его содержание заключается в расстановке элементов массивов $N^{(0)}$, $\bar{N}^{(1)}$ на исходные позиции в массиве N . Для этого используется информация о динамических диапазонах $d_{\xi\gamma}^{(0)}$ и $d_{\xi\gamma}^{(1)}$ массивов $D(h')^{(0)}$ и $D(h')^{(1)}$. Тогда процесс формирования массива N состоит из следующих этапов:

1) Для известных значений $d_{\xi\gamma}^{(0)}$ и $d_{\xi\gamma}^{(1)}$ вычисляется значение перфорирующего порога $K(h')_{\text{пор}}$, $K(h')_{\text{пор}} = v_u \sum_{u=1}^U d^{(u)} / m n = \sum_{k=1}^m \sum_{\ell=1}^n d_{k\ell} / m n$, где $d^{(u)}$ – значение основания НПЧ для u -го уровня динамического диапазона; v_u – количество оснований НПЧ, принадлежащих u -му уровню динамического диапазона; U – количество уровней динамического диапазона.

Достоинства такого подхода заключаются в: отсутствии необходимости вычисления минимального значения массива дифференциального представления, что позволяет избежать формирования дополнительной служебной информации; вычислении порога перфорации на основе взвешенного учета динамических диапазонов элементов МДП, что позволяет повысить чувствительность перфорирования к структурному содержанию.

Для вычисления величины $K(h')_{\text{пор}}$ не требуется введения дополнительной служебной информации и больших вычислительных затрат.

2) Для вычисленного значения порога $K(h')_{\text{пор}}$ процесс формирования массива H на основе массивов $H^{(0)}$ и $\overline{H}^{(1)}$ примет вид:

– если выполняется неравенство $d_{k\ell} \leq K(h')_{\text{пор}}$, то элемент $h'_{k\ell}$, стоящий на $(k; \ell)$ -й позиции в массиве H , относится к массиву $H^{(0)}$. В этом случае текущий элемент массива $H^{(0)}$ располагается на $(k; \ell)$ -ю позицию в массиве H ;

– если выполняется неравенство $d_{k\ell} > K(h')_{\text{пор}}$, то элемент $h'_{k\ell}$, стоящий на $(k; \ell)$ -й позиции в массиве H , относится к массиву $\overline{H}^{(1)}$, т.е. на $(k; \ell)$ -ю позицию в массиве H ставится текущий элемент $\overline{h}_{k\ell}^{(1)}$ массива $\overline{H}^{(1)}$.

После просмотра всех позиций массива H заканчивается процесс его формирования. В результате выполнения данного этапа компрессии образуется композиционное перфорированное неравновесное позиционное число (ПНПЧ) H'' , $H'' = \{h''_{k,\ell}\}$, $k = \overline{1, m}$, $\ell = \overline{1, n}$.

4. Выводы

1. Разработан метод композиционной сборки неравновесных перфорированных позиционных чисел на основе массивов нижнего диапазонного и верхнего дифференцированного диапазонного уровней.

2. Построено дифференциальное описание массивов верхнего перфорационного уровня, учитывающее такую особенность как наличие однородной структуры динамических диапазонов перепадов на границы контура и основного фона изображения. В этом случае массивы верхнего диапазонного уровня рассматриваются как двумерные позиционные числа в разностном неравновесном пространстве. Элементами дифференциального неравновесного позиционного числа являются длины расстояний от него до двумерного НП числа, имеющего минимальные значения элементов, т.е. соответствующие нижнему уровню разностного неравновесного пространства.

3. Обосновано, что композиционные перфорированные числа в отличие от неравновесных позиционных чисел обладают следующими свойствами для потенциального повышения степени сжатия:

1) сокращенный динамический диапазон для элементов верхнего перфорирующего уровня, описывающих значимые перепады в изображениях;

2) количество дополнительной служебной информации о минимальных значениях определяется только для строк массива верхнего перфорирующего уровня, и может в пределе равняться одной величине;

3) для определения перфорирующего порога не используется дополнительная служебная информация.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что получил дальнейшее развитие метод неравновесного позиционного кодирования (полиадического кодирования), состоящий в том, что осуществляется выявление перфорированных динамических диапа-

зон на основе взвешенного усреднения исходных динамических диапазонов. Это позволяет дополнительно сократить количество комбинаторной избыточности без использования дополнительной служебной информации.

Практическое значение.

1. Представление массива элементов верхнего перфорационного уровня в дифференциальном неравновесном позиционном пространстве обеспечивает дополнительные потенциальные возможности относительно сокращения комбинаторной избыточности, обусловленной: снижением динамического диапазона элементов верхнего перфорационного уровня за счет выявления минимальных значений; сокращением количества неравновесных позиционных чисел, предшествующих текущему НППЧ, но не удовлетворяющих условию дифференциального пространства.

2. Композиционная обработка позволяет: исключить количество незначимых старших разрядов в кодовых комбинациях сжатого представления; дополнительно увеличить степень сжатия НППЧ за счет обработки большего количества элементов.

Список литературы: 1. *Gonzales R.C.* Digital image processing / R.C. Gonzales, R.E. Woods. Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. 779 p. 2. *Wallace G.K.* The JPEG Still Picture Compression Standard // Communication in ACM. 1991. V.34, №4. P.31-34. 3. *Баранник В.В.* Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева. Монография, Харьков: ХУПС, 2009. 252 с. 4. *Красноруцкий А.А.* Дифференциальное кодирование низкочастотных составляющих // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2007. № 3(22). С. 19-22. 5. *Шинкарев В.В.* Методология формирования технологии компрессии дифференцированных изображений // Сучасна спеціальна техніка. 2009. №4. С. 45 – 54.

Поступила в редколлегию 19.11.2009

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник научного центра Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. 8 050-3038971.

Сидоренко Николай Федорович, Заслуженный машиностроитель Украины, канд. техн. наук, доцент, ГНПП «Объединение Коммунар» - НТ СКБ «ПОЛИСВИТ», главный инженер. Научные интересы: обработка и передача информации.

Шинкарев Валерий Владимирович, инженер Харьковского метрологического центра военных эталонов. Научные интересы: обработка и передача информации.

УДК 631.2 : 631.171 : 65.011.56

А.П. СЛЕСАРЕНКО, М.А. РОМАНЧЕНКО, О.С. СОРОКА

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В 3-ВИМІРНІЙ БАГАТОШАРОВІЙ СТРУКТУРІ З ТРУБЧАСТИМИ НАГРІВАЧАМИ ДЛЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ПРИМІЩЕННЯ

Будується математична модель 3-вимірної багаторівневої електротеплоаккумуляторної системи, призначеної для обігріву великого приміщення, яка має забезпечувати тепловий стандарт нагріву підлоги з урахуванням впливу навколишнього середовища. Математична модель надає можливість вирішення задач оптимального керування наявними енергоресурсами, що живлять систему, для здійснення заданих теплових стандартів у режимі реального часу.

1. Постановка проблеми

Концепція забезпечення теплових режимів виробничих споруд агропромислового комплексу, в основу якої покладено принцип організації подачі тепла в приміщення за схемою «знизу вгору», ефективного використання природних потоків тепла від нетрадиційних відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) і впровадження засобів регулювання енергопотоків у

обігрівній (опалювальній) системі, якою є запропонована авторами багаторівнева електротеплоакумулявальна система опалення (БЕТСО), сформульована в роботі [1].

В роботі [2] обґрунтовано методологію створення автоматизованих електротеплоакумулявальних установок, що забезпечують дотримання стандартів теплового режиму мікроклімату виробничих споруд різного функціонального призначення. Система автоматичного регулювання базується на використанні у контурі зворотного зв'язку блоку моделювання БЕТСО, основні вимоги до якої полягають у тому що, по-перше, для якісного регулювання необхідний досить високий ступінь наближення моделі до реального об'єкта й точність виконання числових розрахунків (висока точність моделі); по-друге, використання моделі в САР БЕТСО в режимі реального часу вимагає виконання необхідних прорахунків досить великого обсягу інформації за відносно короткий час (висока швидкість моделі). Отже, актуальним є створення адекватної рішенням означеної вище задачі керування математичної моделі.

Метою роботи є побудова математичної моделі багатофункціональної електронагрівальної системи, призначеної для обігріву великого приміщення, яка б забезпечувала одночасно дотримання теплового стандарту нагріву, а також можливість раціонального (або оптимального) керування всіма наявними енергоресурсами для його здійснення в режимі реального часу.

Основні задачі полягають у визначенні функціональних залежностей теплових полів на поверхні і в середині БЕТСО від сукупності незалежних зовнішніх впливових факторів для подальшої розробки системи структурно-функціонального керування обігріву приміщення на основі рішення зворотних задач теплопередачі.

Методи дослідження: теорія теплопередачі в енергоактивних середовищах; метод кінцевих інтегральних перетворювань для рівнянь математичної фізики.

2. Загальна характеристика БЕТСО та її граничних умов

Вирішення низки проблем – прогнозування теплового стану приміщення, забезпечення контролю та регулювання обігріву технологічно активних зон (ЗТА) приміщень АПК дозволяє запропонована нагрівальна система (НС) – БЕТСО, що забезпечує більш високий якісний рівень дотримання стандартів теплового режиму при збереженні енергоресурсів.

Розглянемо фізичну модель БЕТСО у вигляді прямокутної призми, верхня площина якої являє собою поверхню підлоги, а весь масив грюючої структури занурений у ґрунт. Структура БЕТСО в перерізі (площина xOy) розглянута в [1] при моделюванні 1-вимірної шаруватої структури. Будемо вважати, що в плані приміщення (як у повітрі, так і в ґрунті) існують певні усереднені температурні умови, але з кожного боку різні. Вісь Ox напрямлена угору з початком в середині нижньої грані, вісь Oy – по ширині БЕТСО, а вісь Oz – уздовж БЕТСО (рис. 1).

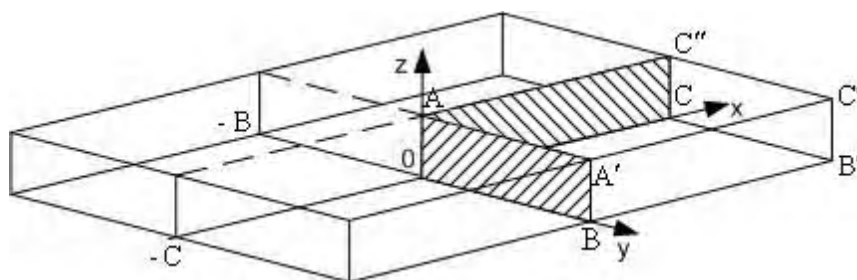


Рис. 1. Загальна схема БЕТСО

Отже, надалі розглядатимемо 3-вимірну модель БЕТСО, тепло в якій генерується при незалежному підведенні енергії до кожного нагрівального елемента блоку (ярусу) спеціальних електрообігрівників трубчастого типу (СЕТ), розташованих у площинах, паралельних площині yOz . Така прямокутна призма, яка має усередині шарувату структуру, представлена на рис. 1. Початок системи координат розташований в центрі основи призми з такими габаритними розмірами: висота A ($0 \leq x \leq A$); ширина $2B$ ($-B \leq y \leq B$); довжина дорівнює $2L$ ($-C \leq z \leq C$).

Шарувата структура БЕТСО в поперечному перерізі (переріз $0AA'B$) показана на рис. 2, де позначено: x_i – координати контакту суміжних шарів ($i = 1, 2, \dots, N$, N – кількість шарів), λ_i –

відповідні коефіцієнти теплопровідності, p_i – функції розподілу потужності джерел тепла по ширині смуги. З огляду на сказане вище стосовно умов розподілу тепла в плані приміщення будемо вважати, що всередині призми має місце симетричний розподіл температури в площинах xOz і xOy . Таким чином, можна обмежитись лише квадрантом $OСВ'В$ з нульовими граничними умовами для потоків тепла на гранях означеної області $0AC''C$ ($y = 0$) та $0AB'В$ ($x = 0$) (див. рис. 1).

Приймаємо дискретне симетричне по ширині смуги підведення потужності в шарах, де розташовані блоки СЕТ, вісі яких мають певні координати $y = y_{i,j}^c$. Кількість СЕТ для визначеності буде непарною, так щоб завжди був присутній СЕТ з координатою $y = 0$. Таким чином, розподіл густини теплової потужності, що підводиться до окремого i -го шару, має вигляд:

$$p_i(y) = \sum_{j = -(M_i - 1)/2}^{(M_i - 1)/2} p_{i,j} \cdot f(y - y_{i,j}^c), \quad (1)$$

де $p_{i,j}$ – густина потужності джерел тепла, розподілених у СЕТ, Вт/м³; M_i – кількість СЕТ в i -му шарі; $f_{i,j}$ – функція розподілу теплової потужності в області локалізації j -го трубчастого нагрівника із центром у точці $y = y_{i,j}^c$.

Інші припущення, прийняті в розглянутій моделі: 1) розподіл густини потужності в областях локалізації СЕТ приймається однаковим і незалежним від температурного режиму НС; 2) функція розподілу теплової потужності в області локалізації СЕТ приймається у вигляді трапецієподібної форми (рис. 2); 3) ступінь трапецієподібності ε припускає можливість варіювання; 4) кількість активних шарів N_A у шарах НС може бути довільною: $0 \leq N_A \leq N$; 5) зсув найближчої до бічної грані ($y = B$) труби від цієї грані вибирається однаковим для всіх активних шарів $l_{st} = B - y_{i,(M_i-1)/2}$; 6) відстань між трубами СЕТ вибирається однаковою $l_p = 2 \cdot (B - l_{st}) / M_i$.

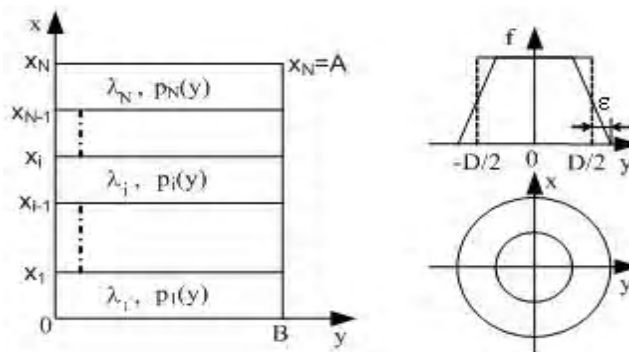


Рис. 2. Фізична модель БЕТСО (поперечний переріз) та розподіл потужності джерела тепла в СЕТ (праворуч)

Розподіл потужності виду (1) означає, що переріз «труби» має вигляд квадрата із стороною, довжина якої дорівнює товщині активного шару. Така заміна припускається з огляду на те, що для аналізу найбільш цікавим є розподіл температури на поверхні підлоги (верхня грань НС $x = A$), де розподіл теплового поля певною мірою вирівнюється, а різниця теплового поля від джерел квадратної форми перерізу і джерел круглої форми перерізу буде практично непомітною.

Активний шар будемо далі називати ярусом, причому відлік ярусів зручніше вести від поверхні підлоги в глибину нагрівальної системи. Граничні поверхні моделі відповідають таким атрибутам реальної НС:

1) верхня грань ($x = A$, $-B \leq y \leq B$, $-C \leq z \leq C$) відповідає поверхні підлоги, що омивається повітрям усередині приміщення там, де має місце конвекційний теплообмін:

$$-\lambda_N \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=A} = \alpha(t - t_c) \Big|_{x=A}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні підлоги (величину α вважаємо незалежною від температурного режиму); t_c – температура повітря в приміщенні на деякому віддаленні від поверхні підлоги; теплообмін за рахунок теплового випромінювання може бути врахований приблизно, маючи на увазі, що температурні перепади між поверхнею підлоги та оточуючими стінами і стелею приміщення невеликі;

2) основа призми ($x = 0, -B \leq y \leq B, -C \leq z \leq C$) знаходиться на достатній глибині у ґрунті (глибина термостатування), тому на її поверхні приймаються граничні умови 1-го роду:

$$t|_{x=0} = t_0; \quad (3)$$

3) на бічних гранях приймемо граничні умови 3-го роду такого виду ($i = 1, \dots, N$):

$$\left(t_i + h_y \frac{\partial t_i}{\partial y} \right) \Big|_{y=\pm B} = t_{0i}; \quad \left(t_i + h_z \frac{\partial t_i}{\partial z} \right) \Big|_{z=\pm C} = t_{0i}; \quad (4)$$

де $h_y = \lambda_{cp}/\alpha_y, h_z = \lambda_{cp}/\alpha_z$ – фактори тепловтрат через бічні та торцеві грані НС.

Величини h_y, h_z обрані постійними по всій висоті шаруватої структури з тією метою, щоб одержати аналітичне рішення. Чим менші ці величини, тим з більшим завищенням будуть отримані потужності джерел, що забезпечують заданий рівень розігріву НС (у тому числі поверхні підлоги). Усереднені величини теплопровідності шарів λ_{cp} (принаймні тих, де містяться пустотілі СЕТ) можуть бути отримані одним з відомих способів. Величини h_y, h_z можуть бути обрані різними. Температура ґрунту за межами НС приймається фіксованою і такою, що має певний заданий профіль, так що кожному шарові відповідає певна середня температура ґрунту на певній глибині $t_{0i} (i = 1, \dots, N)$. Отже, по глибині температура ґрунту змінюється від рівня $t_{01} = t_0$ (найнижчий шар НС, $i = 1$) до рівня $t_{0N} = t_n$ (для рівня поверхні підлоги із заданою температурою t_n).

3. Формулювання граничної задачі теплопровідності

Відшуканню підлягає функція сталого температурного розподілу усередині призми (температурне поле), обмеженої плоскими граничними поверхнями прямокутної форми. Усередині прямокутна призма структурована – вона складається із N однорідних плоских шарів, що граничать між собою в області суміжних границь, причому тепловий контакт шарів вважаємо неідеальним (має місце кінцевий термічний опір). Шукане усталене температурне поле в середині шаруватої структури $t = t(x, y, z)$ розпадається на N взаємозалежних температурних полів:

$$u_i = u_i(x, y, z), \quad (5)$$

які реалізуються (установлюються) у межах i -го однорідного шару.

Температурне поле в межах НС й умови за її межами, як прийнято вище, вважаємо симетричними відносно площин xOy й xOz , тому далі розглядаємо 1/4 частину НС, обмежену площинами симетрії й гранями, що мають тепловий контакт із навколишнім середовищем. Граничні умови на поверхні xOy й xOz відповідно такі:

$$\frac{\partial u_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad |y| \leq B; \quad \frac{\partial u_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad |z| \leq L; \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Функції $u_i = u_i(x, y, z)$, що відшукуються в областях $x_{i-1} \leq x \leq x_i, 0 \leq y \leq B, 0 \leq z \leq C$ ($i = 1, \dots, N$), задовольняють рівнянню теплопровідності виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{\lambda_i} p_i(y, z). \quad (7)$$

На верхній і нижній гранях мають бути виконані граничні умови, відповідно 3-го і 1-го роду:

$$-\lambda_N \frac{\partial u_N}{\partial x} \Big|_{x=A} = \alpha(u_N|_{x=A} - t_c); \quad 0 \leq y \leq B, \quad 0 \leq z \leq C; \quad (8)$$

$$u_i|_{x=0} = t_0; 0 \leq y \leq B, 0 \leq z \leq C. \quad (9)$$

Граничні умови на бічних гранях:

$$\left. \frac{\partial u_i}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; x_{i-1} \leq x \leq x_i, i = 1, \dots, N; \quad (10)$$

$$\left(u_i + h_y \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) \Big|_{y=B} = t_{0i}; x_{i-1} \leq x \leq x_i, i = 1, \dots, N. \quad (11)$$

Граничні умови на торцевих гранях:

$$\left. \frac{\partial u_i}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; x_{i-1} \leq x \leq x_i, i = 1, \dots, N; \quad (12)$$

$$\left(u_i + h_z \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \Big|_{z=C} = t_{0i}; x_{i-1} \leq x \leq x_i, i = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Укладання труб в активних шарах визначає вид функцій розподілу джерел $p_i(y, z)$. На рис. 3 показано в плані розміщення труб у деяких варіантах: 1) укладання суцільних труб по довжині НС; 2) секціонування труб; 3) секціонування труб з теплоізолюючими перегородками.

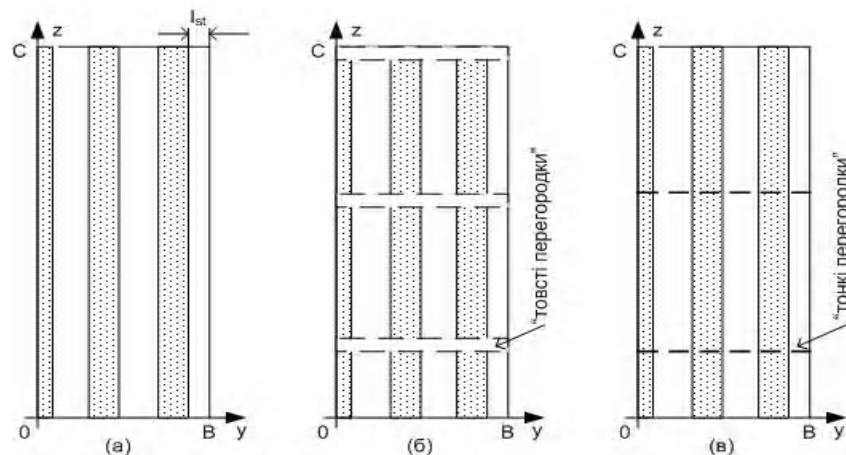


Рис. 3. Варіанти розподілу гріючих труб СЕТ в активних шарах: а - суцільні нагрівачі (кількість труб на ширині смуги $m = 5$); б - секціоновані труби із зазорами (кількість секцій $L = 5$); в - секціоновані труби із тонкими теплоізолюючими перегородками

Варіанти моделей НС на рис. 3 істотно відрізняються з точки зору побудови аналітичного рішення. Варіант (а) НС, що містить суцільні нагрівачі, характеризується однорідністю структури по осі $0z$ – аналітика реалізується методом кінцевих інтегральних перетворень (КІП) (подвійне перетворення). При цьому важливо підкреслити, що метод КІП дозволяє реалізувати “нерівномірний” спосіб нагрівання й по z -координаті (диференційовані зони) за рахунок відповідного виду підведення потужності в труби, наприклад, за рахунок східчастого виду підведення потужності й відповідного завдання функції розподілу $p_i(y, z)$. На практиці може бути реалізована технічно (з елементами комутації й керування) мультиплікативна схема підведення потужності в активний шар:

$$p_i(y, z) = p_i(y) \cdot q_i(z), \quad (14)$$

де вираз $p_i(y)$ відповідає рівнянню (1), що описує набір M труб із щільністю потужності $p_{i,j}$; вагова функція східчастого виду $q_i(z)$ описує диференційований нагрів поверхні підлоги в окремих зонах (ЗТА) уздовж НС. Їх рівні вибираються в інтервалі значень $0,5 \dots 2$ відносно

певної середньої температури для забезпечення технологічних завдань в приміщенні на одній окремій лінії підлоги.

Якщо на довжині НС організовано L секцій (L – непарне), то вони обмежені координатами:

$$\left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot l_{\text{sec.}} \leq z \leq \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot l_{\text{sec.}}, \quad k = -\frac{L-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{L-1}{2}, \quad (15)$$

де $l_{\text{sec.}} = 2C/L$ – довжина однієї секції.

Варіант (б) – практично одержати строге рішення в замкненому виді для структурованої по двох координатах НС навряд чи вийде, а практична користь незначна. Варіант (с) – замкнене рішення, очевидно, одержати можна, користь від такого рішення може бути в тім, щоб на строгій математичній моделі проаналізувати взаємний вплив температурних режимів суміжних (а також більш віддалених) секцій. Надалі будемо розглядати постановку й рішення задачі теплопровідності за варіантом (а) для одного квадранта, що показаний на рис. 3, а.

4. Побудова рішення граничної задачі теплопровідності для шаруватої призми

Рішення рівняння Пуассона (7) з набором зосереджених джерел виду (14) в кожному із шарів

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{\lambda_i} p_i(y) \cdot q_i(z) \quad (16)$$

будемо шукати методом КП [3].

Температурне поле в кожному із шарів будемо шукати у вигляді 2-х складових (відповідно до принципу суперпозиції):

$$u_i(x, y, z) = t_{0i} + v_{0i}(x, y, z) + v_i(x, y, z), \quad (17)$$

де функція

$$\tilde{v}_{0i}(x, y, z) = t_{0i} + v_{0i}(x, y, z), \quad (18)$$

є рішенням однорідного рівняння Лапласа

$$\Delta \tilde{v}_{0i} = 0 \quad (19)$$

з заданими граничними умовами (8)-(13), а функція $v_i(x, y, z)$ – є частковим рішенням вихідного неоднорідного рівняння з однорідними граничними умовами.

Нижче наведені окремо обидві задачі теплопровідності відносно шуканих функцій $v_i(x, y, z)$ і $v_{0i}(x, y, z)$ разом із відповідними граничними умовами:

$$\frac{\partial^2 v_{0i}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_{0i}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_{0i}}{\partial z^2} = 0, \quad (20) \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{\lambda_i} p_i(y) \cdot q_i(z), \quad (27)$$

$$v_{0i}|_{x=0} = t_0 - t_{0i}, \quad (21) \quad v_i|_{x=0} = 0, \quad (28)$$

$$-\lambda_N \frac{\partial v_{0N}}{\partial x} \Big|_{x=x_N} = \alpha [v_{0N}|_{x_N} - (t_c - t_{0N})], \quad -\lambda_N \frac{\partial v_N}{\partial x} \Big|_{x=x_N} = \alpha v_N|_{x=x_N}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial v_{0i}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (23) \quad \frac{\partial v_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (30)$$

$$\left(v_{0i} + h_y \frac{\partial v_{0i}}{\partial y} \right) \Big|_{y=B} = 0, \quad (24) \quad \left(v_i + h_y \frac{\partial v_i}{\partial y} \right) \Big|_{y=B} = 0, \quad (31)$$

$$\frac{\partial v_{0i}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (25) \quad \frac{\partial v_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (32)$$

$$\left(v_{0i} + h_z \frac{\partial v_{0i}}{\partial z} \right) \Big|_{z=C} = 0, \quad (26) \quad \left(v_i + h_z \frac{\partial v_i}{\partial z} \right) \Big|_{z=C} = 0. \quad (33)$$

Складене (повне) рішення (17) задовольняє вихідному рівнянню (16) із граничними умовами на зовнішніх граничних пласких поверхнях. Крім того, отримані рішення для кожного із шарів $i = 1, \dots, N$ повинні бути узгоджені на границях пласких шарів $x = x_i$ ($i = 1, 2, \dots, N - 1$) по температурах і теплових потоках на границях, причому для кожного із наборів функцій окремо, тобто для наборів $v_{0i}(x, y, z)$ і $v_i(x, y, z)$.

Використовуючи стандартну схему рішення таких задач методом КПП [3], виключимо послідовно диференціальні операції по “z” й “y”.

Ядро перетворення $K(z, v)$, що виключає операцію диференціювання по “z”, є рішенням граничної задачі для області $0 \leq z \leq C$:

$$\frac{\partial^2 K(z, v)}{\partial z^2} + v^2 K(z, v) = 0, \quad (34)$$

$$\left. \frac{\partial K(z, v)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left(K(z, v) + h_z \frac{\partial K(z, v)}{\partial z} \right) \Big|_{z=C} = 0. \quad (35)$$

Сформульована задача є задачею Штурма-Ліувіля на визначення власних чисел, рішення якої є функція $\cos(vz)$, що автоматично задовольняє 1-й умові (35) і, крім того, повинна задовольняти 2-й умові (35):

$$[\cos(vz) - h_z v \sin(vz)] \Big|_{z=C} = 0,$$

з чого витікає характеристичне рівняння:

$$\operatorname{ctg}(vC) = h_z v. \quad (36)$$

Визначений з (36) ряд власних чисел v_p^2 , $p = 1, 2, \dots$ дозволяє утворити систему власних функцій:

$$K_p(z) \equiv K_p(v_p z) = \cos(v_p z). \quad (37)$$

Застосуємо КПП до рівняння (20) з урахуванням КПП вихідної координатної функції $v_{0i}(x, y, z)$:

$$\bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p) = \frac{1}{C} \int_0^C K(v_p z) \cdot v_{0i}(x, y, z) dz. \quad (38)$$

Використання граничних умов дозволяє отримати послідовність рівнянь стосовно кожного шару структури, що розглядається:

$$\frac{\partial^2 \bar{v}_{0i}^p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_{0i}^p}{\partial y^2} - v_p^2 \bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p) = 0, \quad p = 1, 2, \dots \quad (39)$$

По знайденому КПП $\bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p)$ відновлення вихідної функції виконується за формулою:

$$v_{0i}(x, y, z) = \sum_{p=1}^P \frac{\cos(v_p z)}{N_p} \bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p), \quad p = 1, 2, \dots, \quad (40)$$

$$N_p = \frac{1}{C} \int_0^C \cos^2(v_p z) dz = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(h_z/C)}{1 + (v_p h_z)^2} \right]. \quad (41)$$

Рівняння (39), отримане шляхом застосування до вихідного рівняння КПП з ядром $K_p(z)$, вирішується щодо функцій $\bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p)$, які повинні задовольняти таким умовам:

$$\bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p) \Big|_{x=0} = (t_0 - t_{0i}) \cdot \operatorname{sinc}(v_p C), \quad i = 1, \dots, N - 1; \quad (42)$$

$$\left(\bar{v}_{0N}^p + \frac{\lambda_N}{\alpha} \cdot \frac{\partial \bar{v}_{0N}^p}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_N} = (t_0 - t_{0N}) \cdot \text{sinc}(v_p C); \quad i = N; \quad (43)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_{0i}^p}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \left(\bar{v}_{0i}^p + h_y \frac{\partial \bar{v}_{0i}^p}{\partial y} \right) \Big|_{y=B} = 0. \quad (44)$$

Зазначимо, що відповідно до напластування шарів граничні умови 3-го роду на бічній стінці НС дозволяють враховувати будь-який заданий профіль температурного розподілу у ґрунті, причому в межах окремого шару зовнішня температура ґрунту приймається постійною, яка дорівнює усередненій температурі за межами НС на рівні поточного шару $t_{0i}, i = 1, \dots, N$.

Ядро перетворення $K(y, \mu)$, що виключає операцію диференціювання по “у”, є рішенням граничної задачі для області $0 \leq y \leq B$:

$$\frac{\partial^2 K(y, \mu)}{\partial z^2} + \mu^2 K(y, \mu) = 0, \quad (45)$$

$$\frac{\partial K(y, \mu)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \left(K(y, \mu) + h_y \frac{\partial K(y, \mu)}{\partial y} \right) \Big|_{y=B} = 0. \quad (46)$$

Рішенням (45) з урахуванням 1-ї з умов (46) є функція $\cos(\mu y)$, що повинна бути підлегла ще й 2-й умові (46), тобто необхідно виконання рівняння:

$$\text{ctg}(\mu B) = h_y \mu. \quad (47)$$

Це рівняння породжує ряд власних чисел μ_q^2 і відповідно набір власних функцій:

$$K_q(y) \equiv K_q(\mu_q y) = \cos(\mu_q y), \quad q = 1, 2, \dots \quad (48)$$

Введемо КІП функцій $\bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p)$ по координаті “у”:

$$\bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, v_p) = \frac{1}{B} \int_0^B K_q(\mu_q y) \cdot \bar{v}_{0i}^p(x, y, v_p) dy. \quad (49)$$

Після 2-х послідовно проведених КІП вихідне диференціальне рівняння Лапласа у просторі зображень представляється у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \bar{v}_{0i}^{p,q}}{\partial x^2} - (v_p^2 + \mu_q^2) \bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, v_p) = 0, \quad q, p = 1, 2, \dots \quad (50)$$

Відповідно до перетворення (49) функції $\bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, v_p)$ повинні задовольняти таким граничним умовам на дні та підлозі:

$$\bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, v_p) \Big|_{x=0} = (t_0 - t_{0i}) \text{sinc}(v_p C) \text{sinc}(\mu_q B), \quad i = 1; \quad (51)$$

$$\left(\bar{v}_{0N}^{p,q} + \frac{\lambda_N}{\alpha} \frac{\partial \bar{v}_{0N}^{p,q}}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_N} = (t_0 - t_{0N}) \text{sinc}(v_p C) \text{sinc}(\mu_q B), \quad i = N. \quad (52)$$

Рішення (50) знаходиться у вигляді комбінацій гіперболічних функцій:

$$\bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, \nu_p) = c_i(q, p) \cdot \text{ch}[\omega_{qp}(x - x_i)] + d_i(q, p) \cdot \text{sh}[\omega_{qp}(x - x_i)], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (53)$$

де $\omega_{qp} = \sqrt{\mu_q^2 + \nu_p^2}$; коефіцієнти $c_i(q, p)$ та $d_i(q, p)$ – знаходяться шляхом вирішення системи $2N$ лінійних неоднорідних рівнянь, які утворюються з умов (51), (52), а також $2(N-1)$ умов узгодження наборів функцій $\bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, \nu_p)$ на $N-1$ границях шарів НС, модифікованих з урахуванням КПП:

$$\bar{v}_{0i}^{p,q} \Big|_{x=x_i} = \left(\bar{v}_{0,i+1}^{p,q} - \bar{\gamma}_{i+1}^* \lambda_{i+1} \frac{\partial \bar{v}_{0,i+1}^{p,q}}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_i} + (t_{0,i+1} - t_{0,i}) \text{sinc}(\nu_p C) \text{sinc}(\mu_q B), \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (54)$$

$$\left(\lambda_i \frac{\partial \bar{v}_{0,i}^{p,q}}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_i} = \left(\lambda_{i+1} \frac{\partial \bar{v}_{0,i+1}^{p,q}}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (55)$$

де $\bar{\gamma}_i^*$ – термічні контактні опори між i -м та $i+1$ -м шарами.

Оригінали шуканих функцій відновлюються за формулами:

$$\bar{v}_{0i}^p(x, y, \nu_p) = \sum_{q=1}^Q \frac{\cos(\mu_q y)}{M_q} \cdot \bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, \nu_p), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (56)$$

$$M_q = \frac{1}{B} \int_0^B \cos^2(\mu_q y) dy = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(h_y/B)}{1 + (\mu_q h_y)^2} \right]. \quad (57)$$

З урахуванням (40), (41) загальні вираження шуканих координатних функцій $v_{0i}(x, y, z)$ з (18) можуть бути записані через їхні образи КПП у вигляді:

$$v_{0i}(x, y, z) = \sum_{p=1}^P \frac{\cos(\nu_p z)}{N_p} \sum_{q=1}^Q \frac{\cos(\mu_q y)}{M_q} \cdot \bar{v}_{0i}^{p,q}(x; \mu_q, \nu_p). \quad (58)$$

Аналогічно будується рішення для функцій $v_i(x, y, z)$, які визначаються розподілом джерел тепла в НС. Воно може бути записано у вигляді подвійного ряду по власних функціях відповідних задач Штурма-Ліувіля:

$$v_i(x, y, z) = \sum_{p=1}^P \frac{\cos(\nu_p z)}{N_p} \sum_{q=1}^Q \frac{\cos(\mu_q y)}{M_q} \cdot \bar{v}_i^{p,q}(x; \mu_q, \nu_p). \quad (59)$$

Функції $\bar{v}_i^{p,q}(x; \mu_q, \nu_p)$ також визначаються через комбінації функцій гіперболічного синуса і косинуса від аргументів $\omega_{p,q}^2(x - x_i)$ з невизначеними коефіцієнтами. Останні визначаються шляхом вирішення систем $2N$ неоднорідних лінійних рівнянь в просторі зображень КПП.

Зазначимо, що згідно з принципом суперпозиції функції $v_{0i}(x, y, z)$ в рівнянні (17) відповідають за тепловий внесок навколишнього середовища – повітря та ґрунту $\{t_c, t_0, t_{0i}\}$ й підкоряються рівнянню Лапласа при відсутності джерел, а функції координат $v_i(x, y, z)$ визначаються розподілом джерел $\{p_i(y, z), i = 1, 2, \dots, N\}$ в середині НС при однорідних граничних умовах на границях НС. Обидві системи функцій задовольняють умовам узгодження температур і потоків тепла на границях шарів НС. Таким чином, загальне рішення граничної задачі щодо визначення розподілу усталеного температурного поля в багат шаровій 3-вимірній структурі у формі призми з довільно розташованими трубчастими джерелами тепла побудоване.

Створена відповідна комп'ютерна модель теплопередачі в такій моделі БЕТСО дозволяє вирішувати велику кількість питань стосовно оптимізації її теплового режиму, керування тепловими потоками тощо.

5. Висновки

Обґрунтована фізична модель й розроблена строга математична модель стаціонарного режиму теплопередачі запропонованої 3-вимірної багаторівневої (багатошарової) електро-теплоакумуляційної системи опалення, в якій містяться розподілені трубчасті джерела тепла. Кількість однорідних шарів та їх теплофізичні характеристики довільні.

Наукова новизна полягає в тому, що побудована система рівнянь визначає функціональну залежність температурних полів на поверхні БЕТСО і в її середині від сукупності незалежних розподілених у просторі впливових факторів, яка дозволяє вирішувати зворотні задачі, тобто знаходити розподіли джерел тепла в нетермоізолюваній НС за певними умовами щодо розподілів або значень температур.

Практична значущість полягає в тому, що рішення задачі теплопередачі доведено до створення комп'ютерної моделі, яка дозволяє проводити оптимізацію її теплових режимів, а також слугує основою для теоретико-експериментального рішення зворотних задач щодо розробки системи структурно-функціонального керування тепловими потоками (див., наприклад, [2]), реалізації різних функціональних режимів БЕТСО тощо.

Список літератури: 1. Вісн. ХДТУСГ ім. П. Василенка «Пробл. енергозабезпеч. та енергозбереж. в АПК України». Харків, 2004. Вип. 27. Т. 1. С. 245-250. 2. Романченко Н.А., Слесаренко А.П., Сорока А.С. Оптиміальне керування тепловими режимами мікроклімату в технологічно активних зонах виробничих споруд // АСУ и приборы автоматики. 2009. № 2. С. 113-120. 3. Положий Г. Н. Уравнения математической физики. М.: Высшая школа, 1964. 560 с.

Надійшла до редколегії 22.10.2009

Слесаренко Анатолій Павлович, лауреат Держ. премії України, д-р фіз.-мат. наук, професор, пров. наук. співроб. Инст. проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. Наукові інтереси: комплексне математичне моделювання, діагностика та ідентифікація теплових процесів; теплофізика; математична фізика та диференціальні рівняння; оптимальне керування тепловими режимами в енергетиці, радіоелектроніці, в елементах енергетичного, електронного та космічного обладнання. Захоплення та хобі: пошук невирішених проблем. Адреса: Україна, 61046, Харків, вул. Пожарського, 2/10, роб. тел. 95-95-64, дом. тел. 65-51-89.

Романченко Микола Анастасійович, канд. техн. наук, доцент каф. електротехнологій сільськогосподарського виробництва, завідувач кафедри Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Наукові інтереси: електротехнології та електроенергетика, проблеми ефективного використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії. Захоплення та хобі: бджільництво. Адреса: Україна, 61125, Харків, вул. Енгельса, 19, роб. тел. 712-28-33, дом. тел. 733-15-89.

Сорока Олександр Степанович, канд. фіз.-мат. наук, доцент каф. мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв ХНУРЕ. Наукові інтереси: радіофізика та електроніка, прикладна електродинаміка пристроїв НВЧ та КВЧ, математичне моделювання теплових та електромагнітних процесів у технологічних установках НВЧ. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Леніна, 14, роб. тел. 702-13-62, дом. тел. 336-82-24.

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
МАММОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКОГО
ЦЕНТРА**

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой и внедрением информационно-аналитической системы маммологического отделения онкологических центров Украины. Внедрение такой системы позволит решить ряд проблем, стоящих перед медицинскими учреждениями Украины, которые связаны с низкой информатизацией этих учреждений.

1. Введение

Проблема информатизации медицинских учреждений достаточно многопланова. Медицинские информационные системы представляют интерес не только как средства помощи врачу в оформлении документации, но и для руководителей медицинских учреждений, заведующих отделениями, специалистов по организации здравоохранения. Все они постоянно нуждаются во всевозможных статистических данных, оперативной и достоверной информации о заболеваемости, результатах диагностики, лечения и многих других данных. Информатизацию тысячи медицинских учреждений невозможно осуществить за столь короткое время. В соответствии с приказом Министерства здравоохранения Украины “О первоочередных мерах по информатизации в области здравоохранения” от 15.12.1997, №349 в 2001 году была принята Государственная программа информатизации здравоохранения, которая не реализована до сих пор. А оттягивание внедрения информатизации все больше отдаляет отечественную медицину от цивилизованных стран, позднее потребуются еще больше усилий, в том числе и финансовых.

Сейчас положение в области информатизации в медицинских учреждениях таково, что каждый медицинский центр вынужден искать спонсоров и т.д. для покупки программного обеспечения для автоматизации работы медицинского персонала и хозяйственной деятельности. И даже если найдется спонсор, готовый помочь, то открывается следующая проблема: на рынке Украины нет программного обеспечения, созданного нашими разработчиками для автоматизации работы медицинского персонала. Медицинским центрам приходится закупать его за границей, где развитие соответствующей отрасли имеет более широкие и прогрессивные масштабы и, что особенно важно, поддержку со стороны государства. В Украине есть компании, занимающиеся проектированием медицинского программного обеспечения, но они создают его, сотрудничая с зарубежными компаниями. Как следствие, программные продукты чрезвычайно сложно адаптировать для Украинских медицинских учреждений из-за различия законодательства, нормативных актов и технологий лечения. Еще одним немаловажным фактором является, то, что так как каждое медицинское учреждение применяет у себя определенное программное обеспечение, то в масштабах определенных отраслей медицины, не говоря о всей медицине в целом, практически нет возможности свести информацию в один реестр. Так, в обширном, важном, динамически развивающемся разделе медицины онкологии есть созданный в 1996г. канцер-реестр (адрес интернет ресурса <http://users.iptelecom.net.ua/~ucr/>). Канцер-реестр представляет собой собранную в одной базе данных информацию про онкобольных из всех онкологических центров, расположенных в Украине. Но этот реестр уже морально устарел, он требует замены на более современный, соответствующий запросам лечащих врачей, а также поддержке работы с различными программными продуктами, что очень сильно упростило бы как работу управляющего звена онкологических центров, так и возможность ведения более точной и информативной статистика по всему населению Украины.

На практике сотрудники маммологического отделения Харьковского онкологического центра столкнулись с проблемами внедрения у себя программного обеспечения (ПО) для

автоматизации работы отделения. Существующее ПО или не учитывает особенности деятельности отделения, или решение на основе существующего ПО является очень дорогостоящим для внедрения в онкологическом центре. Поэтому мы вместе с сотрудниками маммологического отделения Харьковского онкологического центра разработали информационно – аналитическую систему маммологического отделения онкологического центра (ИАС МО ОЦ), которая в перспективе имеет возможность расширения на весь онкологический центр и на всю отрасль.

2. Постановка задачи исследования

Основной целью информатизации маммологического отделения онкоцентра является повышение эффективности работы медперсонала. С точки зрения информационных технологий повышение производительности и эффективности работы медперсонала маммологического отделения онкоцентра должно вестись по следующим направлениям:

- уменьшение непроизводительных расходов времени сотрудников маммологического отделения Онкоцентра на регистрацию, поиск и оформление различных документов;
- введение безбумажной технологии учета лечебного и диагностического процессов, процессов управления маммологического отделения Онкоцентра;
- оптимальное распределение потоков пациентов по отделениям, кабинетам и специалистам в целях обеспечения равномерной загрузки врачей и оборудования, устранения очередей;
- планирование курса лечения;
- непрерывный мониторинг состояния пациентов МО ОЦ, оценка эффективности принятого курса лечения;
- коррекция курса лечения в зависимости от фактического состояния пациентов;
- автоматизация процесса формирования статистических отчетов по маммологическому отделению Онкоцентра;
- объективная оценка количества и качества труда медперсонала по методикам, предложенным сотрудниками маммологического отделения онкоцентра.

Для решения поставленной цели необходима комплексная информатизация МО ОЦ.

Такая информатизация предполагает создание информационно–аналитической системы МО ОЦ. ИАС МО ОЦ создается на базе сети персональных компьютеров и предназначена для автоматизации управления работой маммологического отделения Онкоцентра, лечебного и диагностического процессов, управления потоками пациентов.

3. Архитектура информационно-аналитической системы

Рассмотрим общую архитектуру системы. На рис. 1 представлена архитектура ИАС МО ОЦ, которая построена по типу многослойной архитектуры (layered architecture) [1,2].

Данная архитектура может быть достаточно просто изменена и интегрирована с другими стратегиями, что придает ей определенную гибкость при разработке корпоративных приложений [1,3].

Два верхних слоя(layer) предназначены для представления пользовательского интерфейса и перемещения по нему с помощью слоя пользовательского интерфейса (UI layer) и слоя презентации (presentation layer). Слой пользовательского интерфейса может быть реализован с помощью любой из многочисленных доступных технологий. В нашем случае была выбрана платформа WPF [4]. Слой пользовательского интерфейса соответствует шаблону MVP с пассивным представлением, это означает, что представления (верхний слой пользовательского интерфейса) управляются и подготавливаются слоем презентации. Презентаторы (presenters) ответственны за предоставление представлениям (views) данных, получение данных из представлений для сохранения в нижних слоях и за реагирование на события, созданные представлениями. На рис. 2 представлена диаграмма интерфейсов представлений (interface views) ИАС МО ОЦ, а на рис. 3 и 4 – диаграмма интерфейсов презентаторов (interface presenters) и диаграмма презентаторов ИАС МО ОЦ соответственно.

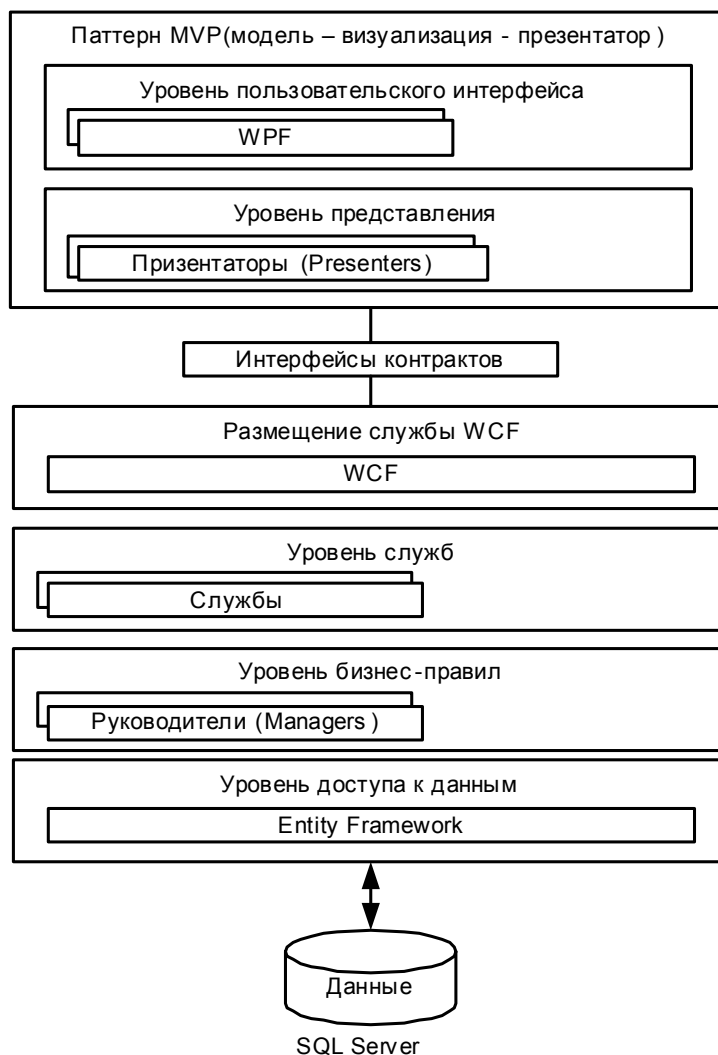


Рис. 1. Архитектура ИАС МО ОЦ

Презентаторы взаимодействуют с нижними слоями через платформу WCF. Презентатор вызывает службу (service) через платформу WCF, используя контракт службы в качестве руководства. Слой службы предоставляет службы через интерфейсы контрактов служб. Эти контракты позволяют презентаторам получать сведения о вызове служб. Слой службы ответственен за получение данных от презентаторов и вызов соответствующих методов слоя бизнес-правил, выполняющих соответствующую бизнес-логику, а также сбор и модификацию данных. При проектировании слоя бизнес-правил применялось архитектурное решение “модель предметной области” (Domain Model). Слой бизнес-правил реализован посредством системы классов руководителей (Managers), диаграмма которых приводится на рис. 5.

Слой бизнес-правил содержит бизнес-логику и код Language Integrated Query (LINQ) к сущностям (Entities). Код LINQ к сущностям ссылается на сущностную модель, автоматически созданную на основе платформы Entity Framework. При выполнении запросов LINQ платформа Entity Framework преобразует запрос LINQ в концептуальную сущностную модель (Entity Data Model), сопоставляет аспекты сущности уровню хранилища и создает запрос Structured Query Language (SQL) на выполнение для базы данных. На рис. 6 представлена диаграмма классов сущностей ИАС МО ОЦ.

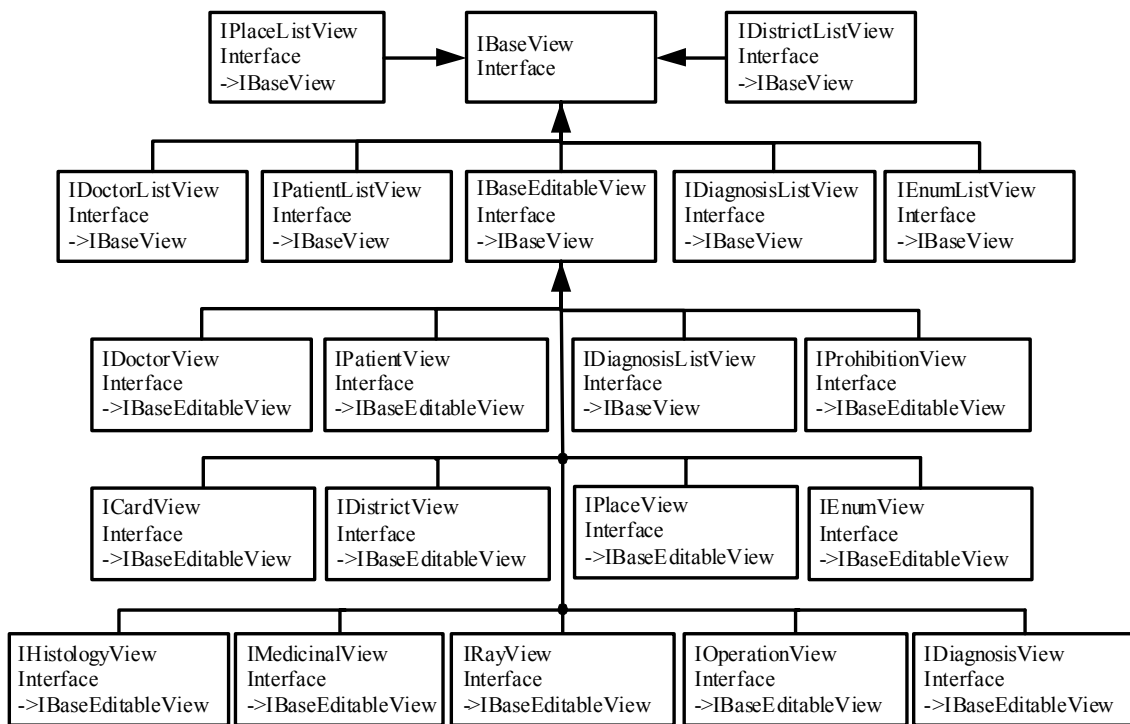


Рис. 2. Диаграмма интерфейсов представлений ИАС МО ОЦ

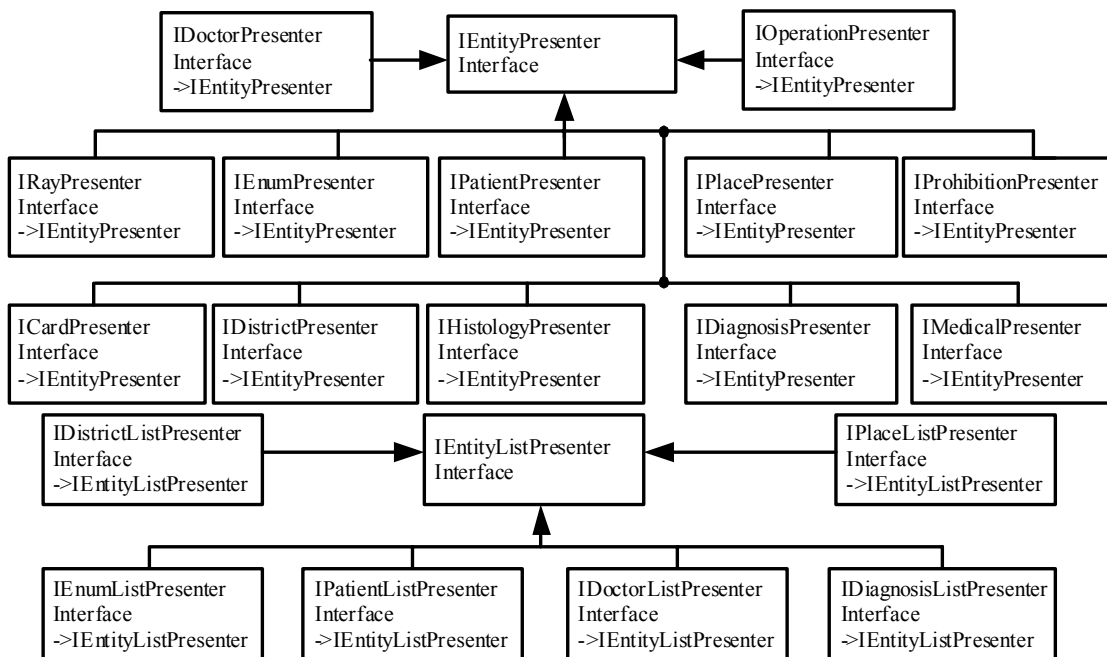


Рис. 3. Диаграмма интерфейсов презентаторов ИАС МО ОЦ

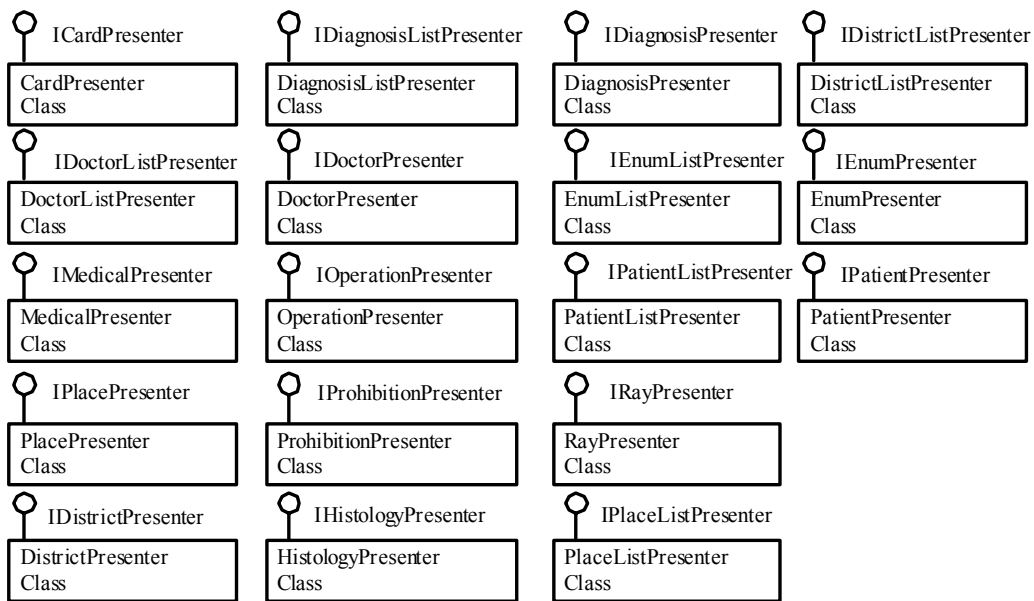


Рис. 4. Диаграмма классов презентаторов ИАС МО ОЦ

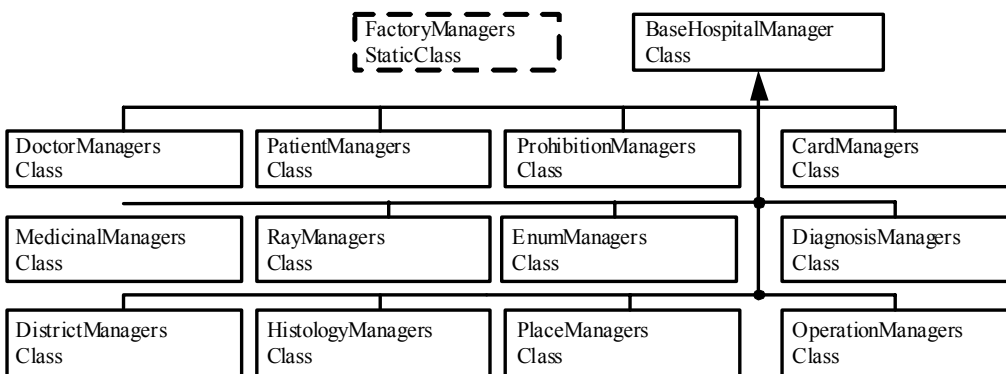


Рис. 5. Диаграмма классов руководителей ИАС МО ОЦ

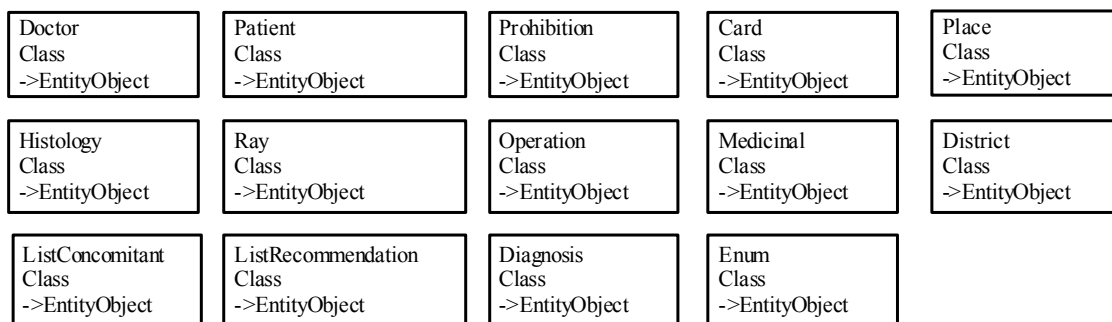


Рис. 6. Диаграмма классов сущностей ИАС МО ОЦ

Основными сущностями в структуре данных ИАС МО ОЦ являются Patient (пациент), Card (медицинская карта) и Doctor (врач). Связи представлены так, что у пациента может быть как одна медицинская карточка, так и несколько, врач же выступает, как лечащий врач и как «оператор». На рис. 7 представлена модель «сущность–связь» в нотации Чена [5] структуры данных ИАС МО ОЦ.

В ИАС МО ОЦ решаются такие проблемы: хранение полной и достоверной информации о всех пациентах, поступивших в отделение на лечение; возможность просмотра информа-

ции не только о тех пациентах, которые проходят курсы лечения в данный момент, но и о тех, кто уже проходил курс лечения, что значительно ускоряет работу медицинского персонала, которому теперь не требуется идти в архив и искать там информацию о пациенте. Теперь медицинскому персоналу достаточно сделать запрос в системе по данному пациенту и появится вся его история болезни. Также стоит отметить возможность статистической обработки информации о пациентах маммологического отделения и создания отчетов за произвольный период времени. На основе статистических отчетов можно выявить скрытые факторы и закономерности результатов лечебного процесса.

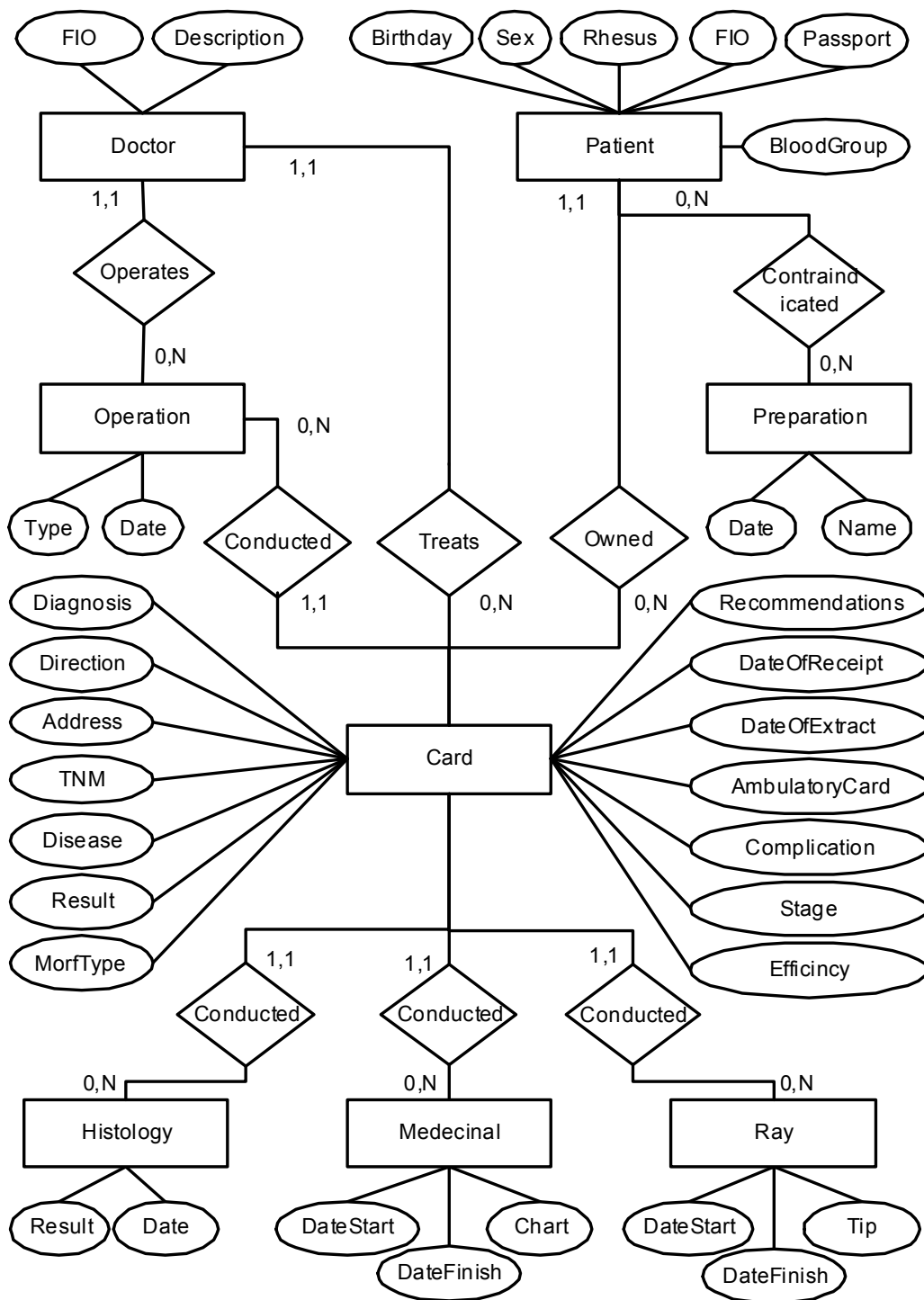


Рис. 7. Структура данных ИАС МО ОЦ

4. Выводы

Разработанная система внедрена в опытную эксплуатацию в маммологическом отделении Харьковского онкологического центра. Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые предложена информационная модель маммологического отделения Онкоцентра Украины. На базе данной модели разработана инновационная информационно-аналитическая система для государственных Онкоцентров Украины. Инновация данной системы заключается в том, что она представляет интерес не только как средство помощи врачу в оформлении документации, но и для руководителей медицинских учреждений, заведующих отделениями, специалистов по организации здравоохранения.

Практическая значимость заключается в том, что внедрение данной системы позволило уменьшить непроизводственные затраты времени работников маммологического отделения Онкоцентра на регистрацию, поиск и оформление документов о состоянии здоровья и лечения пациентов, автоматизировать формирование статистических отчетов по маммологическому отделению Онкоцентра и возможность формировать их в реальном масштабе времени.

В дальнейшем планируется развитие аналитической части ИАС ОМ ОЦ в целях проведения детального статистического анализа и построения многофакторной регрессионной модели пациентов, которая позволит выявить скрытые закономерности в диагнозах пациентов и построить прогноз эффективности применения методик лечения.

Список литературы: 1. *Нильссон Дж.* Применение DDD и шаблонов проектирования: проблемно-ориентированное проектирование приложений с примерами на C# и .NET.: Пер. с англ. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2008. 560 с. 2. *Papa J.* The Entity Framework In Layered Architectures // <http://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/cc700340.aspx>. 3. *Фаулер М.* Архитектура корпоративных программных приложений: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 544 с. 4. *Андерсон К.* Основы Windows Presentation Foundation. Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2008. 432 с. 5. *Кренке Д.* Теория и практика построения баз данных. СПб.: Питер, 2003. 800 с.

Поступила в редколлегию 14.11. 2009

Тевяшев Андрей Дмитриевич, проф., д-р техн. наук, зав. каф. прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование энергетических систем, теория стохастических моделей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 702-14-36.

Выходцев Евгений Иванович, научный сотрудник кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: теория принятия решений, информационные системы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 702-14-36.

Петров Константин Дмитриевич, студент факультета прикладной математики и менеджмента ХНУРЭ. Научные интересы: методы оптимизации, базы данных, информационные системы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

Домненко Сергей Николаевич, студент факультета прикладной математики и менеджмента ХНУРЭ. Научные интересы: базы данных, информационные системы, компьютерное моделирование, объектно – ориентированное программирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 702-14-36.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ВЫПУСКНИКОВ

Рассматриваются вопросы оценки качества образования на уровне ВУЗа, а также основные принципы квалиметрии. Для оценки качества выпускников предлагается использовать упрощенный метод квалиметрии. Описываются все этапы предлагаемой методики оценки качества выпускников, приводятся примеры показателей качества, рассматривается подход к определению коэффициентов важности показателей.

1. Введение

Уровень развития науки, техники, технологий во всех сферах жизнедеятельности государства требует наличия высококвалифицированного персонала. Сформировавшиеся в настоящее время рыночные механизмы хозяйствования в нашей стране, а также мировые тенденции развития экономики свидетельствуют о непрерывном росте требований, предъявляемых к квалификации специалистов, особенно специалистов с высшим образованием. Обеспечение высокого качества профессиональной подготовки специалистов по различным направлениям и специальностям для нужд экономики страны – основная задача национальной системы образования. Разработка, внедрение и использование современных достижений науки и техники невозможны без непрерывного улучшения качества системы образования в целом и особенно высшего образования.

В современных условиях принципиальное значение приобретает повышение эффективности организации и управления ВУЗами в области измерения результатов образовательной деятельности и качества образования. Это является достаточным основанием для активных поисков и повсеместного внедрения эффективных методов повышения качества высшего образования.

Определяющим фактором качества образования является уровень качества образовательных учреждений, а точнее – уровень качества оказываемых ими образовательных услуг. Для эффективного управления качеством образования, прежде всего, необходимо осуществить его оценку. В работе [1] отмечено, что основными объектами мониторинга применительно к системе высшего образования на уровне конкретного ВУЗа являются: выпускники, процесс предоставления образовательных услуг, ВУЗ в целом. Все эти объекты взаимосвязаны. При этом мониторинг ВУЗа в целом должен опираться на результаты мониторинга качества предоставления образовательных услуг, который, в свою очередь, должен учитывать результаты мониторинга качества выпускников. Данное исследование посвящено вопросам оценки качества выпускников.

Таким образом, *целью данного исследования* является повышение эффективности процесса управления качеством высшего образования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд взаимосвязанных *задач*:

- 1) анализ возможностей теоретической квалиметрии применительно к оценке качества выпускников;
- 2) разработка принципов оценки качества выпускников на основе одного из методов квалиметрии;
- 3) разработка дерева свойств выпускника ВУЗа, выбор показателей оценки;
- 4) разработка моделей и алгоритмов экспертного оценивания свойств выпускника;
- 5) разработка и реализация информационной технологии оценивания качества выпускника ВУЗа.

2. Принципы квалиметрической оценки качества

Для определения качества товаров или услуг в квалиметрии предлагается подход, который позволяет произвести количественную оценку показателей качества. В этом подходе предполагается, что в основе комплексной количественной оценки качества лежат следующие принципы [2]:

- 1) качество трактуется как совокупность свойств, которые классифицируются;
- 2) любые простые и некоторые сложные свойства, формирующие качество, могут быть измерены с помощью так называемого абсолютного показателя;
- 3) для графического выражения взаимосвязи различных свойств и качества в целом может быть использована иерархическая структура – дерево свойств;
- 4) помимо абсолютного показателя, для количественного выражения любого свойства, формирующего качество, используется и относительный показатель;
- 5) для характеристики любого из включенных в дерево свойств показателей используется также коэффициент важности свойства;
- 6) свойства надежности учитываются, главным образом, с помощью показателя сохранения эффективности;
- 7) комплексный показатель качества определяется функцией, которая может выражаться средними величинами разного вида.

В качестве методики оценки качества выпускников предлагается использовать упрощенную методику квалиметрической оценки. Процедура оценивания качества в рамках данной методики состоит из двух этапов [2, 3]:

- 1) разработка методики оценивания качества (определение ситуации оценивания, построение дерева свойств, определение эталонных и браковочных значений показателей, определение значений коэффициентов важности показателей);
- 2) использование методики оценивания качества (определение абсолютных значений показателей свойств, определение относительных значений показателей свойств, определение значения комплексного показателя качества).

При определении ситуации оценивания должны быть получены ответы на три группы вопросов [3, 4, 5]:

- 1) применение объектов оцениваемого типа;
- 2) использование вычислительных оценок качества;
- 3) технологии разработки методики оценивания качества.

На этапе построения дерева свойств определяется набор показателей, по которым оценивается качество. К набору показателей предъявляются строгие требования: он должен быть однозначно представлен (стандартизирован) и упорядочен (декомпозирован) в некоторую иерархическую структуру (дерево свойств) [6].

После определения ситуации оценивания и построения дерева свойств, каждому свойству, приведенному в дереве свойств, необходимо поставить в соответствие показатель, с помощью которого это свойство будет оценено [6]. Кроме того, необходимо определить единицы измерения и диапазон возможных значений, в пределах которого можно найти значения для каждого показателя.

На этапе определения показателей свойств определяются эталонные и браковочные значения. Вычисление эталонного значения заключается в том, чтобы выбрать такое значение показателя, которое на момент оценки качества является самым лучшим в мире. А браковочное значение определяется как такое, которое является ближайшим, но худшим (по отношению к допустимому) значением показателя. При этом допустимым принимается такое самое плохое значение, которое присутствует хотя бы у одного оцениваемого объекта.

Способы определения весомости свойств в квалиметрии делятся на стоимостные, вероятностные и экспертные [6]. Стоимостной способ предполагает определение весомости свойства на основе расчета денежных или трудовых затрат, необходимых для обеспечения существования этого свойства. Вероятностный способ исходит из предположения, что приближение показателя каждого свойства к эталонному значению для важных свойств больше, чем для свойств, имеющих меньшее значение. В этом случае степень приближения к эталону может рассматриваться как мера важности каждого свойства. Экспертный способ измерения важности свойств представлен следующими методами [6]: метод предпочтения; метод ранга; метод долей. Частным случаем метода долей является метод попарной оценки, который предлагается использовать в данной работе.

Способы измерения абсолютных значений показателей делятся на метрологические и экспертные. Измерения в метрологии осуществляются посредством технических средств. Экспертная оценка осуществляется на основе решения, принимаемого экспертами.

Известно, что у разных экспертов в соответствии с их вкусом, характером, спецификой знаний могут быть различные мнения по поводу одного и того же объекта оценивания, поэтому необходимо привлекать к оценке качества группу экспертов.

Точность групповой экспертной оценки во многом зависит от числа экспертов в группе. Поэтому возникает необходимость определения оптимального их числа. Важной задачей также является выбор экспертов.

На последнем этапе определяется комплексная оценка качества, которая характеризует связь между свойствами объекта и дает возможность объединить оценки отдельных свойств. Для обеспечения сопоставимости значений абсолютных показателей предварительно следует произвести их перевод в относительные. Основными способами расчета комплексной оценки являются методы среднего геометрического, среднего взвешенного, средней гармонической [6].

3. Методика оценки качества выпускников

Описание ситуации оценивания. В качестве объекта оценивания в данной работе рассматривается выпускник ВУЗа. После окончания ВУЗа выпускники занимаются поиском работы и устраиваются на различные предприятия и организации. Также выпускники могут продолжить свое образование и заниматься научной деятельностью, поступив в магистратуру или аспирантуру. Можно выделить следующие группы людей, которые необходимо учитывать при оценивании качества выпускников:

- 1) выпускники ВУЗов;
- 2) предприятия и организации, принимающие на работу выпускников;
- 3) преподаватели и другие работники ВУЗа;
- 4) абитуриенты.

Оценка качества выпускника позволит ему определить свой уровень среди других выпускников и оценить свои шансы при устройстве на работу, т.е. выпускник может произвести самооценку и увидеть результаты своего обучения в ВУЗе.

Работодатели могут использовать оценку качества выпускников ВУЗа при подборе работников на вакантные должности. Если для работодателей будет доступна информация об оценках выпускников ВУЗов, то они могут определить для себя, выпускников каких именно ВУЗов они бы хотели видеть на собеседованиях при приеме на работу. Или по оценкам они могли бы осуществить выбор между несколькими претендентами на вакантные должности.

ВУЗ может использовать оценку для обеспечения функционирования системы менеджмента качества. Оценка качества выпускников конкретного ВУЗа может значительно повлиять на его репутацию. А репутация ВУЗа в свою очередь важна и для администрации, преподавателей и других работников ВУЗа, поскольку он является местом их работы. Именно эта группа людей может непосредственно повлиять на качество выпускников.

Для абитуриентов и их родственников также важно знать оценки выпускников ВУЗов, поскольку они могли бы руководствоваться этой оценкой при выборе места обучения.

Оценка качества выпускника производится с условием того, что может оцениваться любой выпускник любого ВУЗа вне зависимости от факультета, кафедры, специальности и страны, в которой находится ВУЗ. При этом оценивание качества выпускников должно проводиться без учета затрат на его обучение. В методике предполагается, что будет производиться интегральная оценка качества выпускников.

С точки зрения погрешности, с которой определяются результаты количественного оценивания качества выпускников ВУЗа, используется упрощенный метод квалиметрии. Этот метод характеризуется максимально допустимой величиной погрешности и минимально допустимой величиной надежности итоговых результатов. В упрощенном методе предполагается, что значения показателя свойства принимаются как точечные без какого-либо суммирования или интегрирования. Упрощенный метод является менее трудоемким и более быстрым для получения результата, чем точный и приближенный методы [2].

Сопоставимость показателей качества выпускника должна быть функциональной и временной. Функциональная сопоставимость позволяет сравнивать значения показателей качества выпускников с показателями качества абитуриентов или студентов. Кроме того, результаты этих сравнений будут получены в единой шкале и в результате применения единых принципов получения значений показателей. А временная сопоставимость позволяет определить, как будет изменяться во времени значение показателя качества выпускника [4].

Комплексный показатель качества выпускников должен быть получен в шкале отношений, потому что оценки качества, выраженные в шкале отношений, позволяют определить, во сколько раз качество одного объекта выше (или ниже) качества другого [4, 7].

Методика оценки может использоваться многократно, потому что ее можно будет применять для оценки качества выпускников разных ВУЗов или структурных единиц (факультетов, кафедр). Поэтому технология вычисления значения показателя качества машинная.

Построение дерева свойств. Все свойства выпускника можно объединить в три основные группы: личностные качества, компетенции, профессиональные качества. Личностные качества отражают те свойства выпускника, которые должны быть присущи любому человеку. Компетенции представляют собой личную способность выпускника решать определенный класс профессиональных задач [8]. А профессиональные качества отражают те свойства выпускника, которые необходимы ему как специалисту.

В таблице приведено дерево свойств, по которому может быть осуществлена оценка качества выпускника.

Правомерность использования данного дерева свойств выпускника может быть обоснована тем, что при его построении были учтены правила его построения, приведенные в [3].

Дерево свойств выпускника

Уровень классификации					
0	1	2	3	4	
Качество выпускника	Личностные качества	Грамотность	Общая грамотность		
			Научная грамотность		
			Технологическая грамотность		
			Экономическая грамотность		
			Мультикультурная грамотность		
			Вербализация знаний		
		Мышление	Гибкость		
			Самоорганизация		
			Любознательность		
			Творчество		
			Высокое мышление	Умение анализировать	
				Умение сравнивать	
		Умение интерпретировать			
		Общение	Работа в команде		
			Сотрудничество		
			Коммуникабельность		
			Ответственность		
		Продуктивность	Навыки установления приоритетов		
			Навыки в распределении времени		
			Навыки работоспособности		
Навыки самокритичности					

Уровень классификации						
0	1	2	3	4		
	Компетенции	Волевые качества	Инициативность			
			Самостоятельность			
			Решительность			
			Целеустремленность			
			Настойчивость			
		Универсальные	Общенаучные	Умение находить и использовать необходимую информацию		
				Умение постоянного обновления знаний		
			Инструментальные	Навыки участника исследований		
				Навыки исполнительской дисциплины		
				Навыки планирования		
				Навыки использования оборудования		
			Социально-личностные	Владение языками как средством коммуникации		
				Здоровый образ жизни		
				Собственная позиция		
				Самосовершенствование		
			Профессиональные	Должностные	Законопослушность	
					Спектр должностей	
		Знание должностных инструкций				
		Кросс-функциональные		Целеполагание		
				Формирование профессиональных отношений		
				Развитие взаимоотношений с коллегами		
		Профильные		Способность применять инновации		
				Способность к анализу результатов работы		
				Ориентация на постоянное повышение квалификации		
		Профессиональные качества	Знания	Общетеоретическая подготовка		
				Знание базовых предметов специальности		
			Умения и навыки	Умение диагностировать чрезвычайные ситуации		
Умение использовать знания на практике						

На основе дерева свойств определяются показатели, с помощью которых можно оценить свойства выпускника.

Поскольку процесс определения самого лучшего и худшего в мире значения какого-либо показателя свойства выпускника является затруднительным, предполагается получить эталонные и браковочные значения путем экспертного опроса.

Определение значений весовых коэффициентов важности показателей. Каждому показателю присваивается коэффициент важности, равный весомости соответствующего свойства. Процедуру определения важности свойств можно представить в три этапа:

- 1) построение иерархии дерева свойств, формирование анкет и проведение экспертного опроса;
- 2) построение матриц парных сравнений и расчет локальных приоритетов, проверка согласованности матриц;
- 3) синтез глобальных приоритетов и проверка согласованности всей иерархии.

При определении важности свойств необходимо, чтобы эксперт попарно оценил все свойства относительно их влияния на общее для них свойство. Для проведения парных

сравнений в работе [9] рассматривается шкала, в соответствии с которой если элемент важнее, то в матрицу заносится целое положительное число от 1 до 9, в противном случае – обратное число (дробь). Равнозначные элементы получают оценку, равную 1.

После формирования матриц парных сравнений можно определить локальные приоритеты свойств, используя вычислительную процедуру метода анализа иерархий [9, 10].

Сначала определяются оценки компонент собственного вектора по следующей формуле: $x_i^{nk} = m_{nk} \sqrt{\prod_{j=1}^{m_{nk}} a_{ij}^{nk}}$, где x_i^{nk} – оценка i -й компоненты ($i = \overline{1, m_{nk}}$) собственного вектора матрицы парных сравнений k -й группы элементов ($k = \overline{1, k_n}$) на n -м уровне дерева свойств ($n = \overline{1, N}$); N – количество уровней иерархии; k_n – количество групп n -го уровня; m_{nk} – количество элементов k -й группы n -го уровня; a_{ij}^{nk} – элементы матрицы парных сравнений.

На следующем этапе определяются оценки вектора приоритетов: $P_i^{nk} = \frac{x_i^{nk}}{\sum_{i=1}^{m_{nk}} x_i^{nk}}$, где $P_i^{nk}, i = \overline{1, m_{nk}}$ – локальные приоритеты свойств k -й группы n -го уровня.

Для проверки согласованности матриц парных сравнений необходимо оценить максимальное собственное значение матрицы $\lambda_{\max}^{nk} : \lambda_{\max}^{nk} = \sum_{i=1}^{m_{nk}} \left(\sum_{j=1}^{m_{nk}} a_{ij}^{nk} \right) \cdot P_i^{nk}$.

Далее нужно рассчитать индекс согласованности (IS^{nk}) и отношение согласованности (OS^{nk}). Величина OS^{nk} должна быть порядка 10% или меньше, иначе данные будут считаться не согласованными:

$$IS^{nk} = \frac{\lambda_{\max}^{nk} - m_{nk}}{m_{nk} - 1}, \quad OS^{nk} = \frac{IS^{nk}}{SS_{m_{nk}}},$$

где $SS_{m_{nk}}$ – статистическая согласованность, которая зависит от размера матрицы (a_{ij}^{nk}).

Величины $SS_{m_{nk}}$ приведены в работах [10, 11].

Данные расчеты необходимо произвести для всех уровней и всех групп дерева свойств. Зная все локальные приоритеты, можно определить глобальные приоритеты (важность) свойств по формуле:

$$W_i^{nk} = \tilde{P}_i^{nk} * P_i^{nk}, \quad \forall i \in \overline{1, m_{nk}}, \quad k = \overline{1, k_n}, \quad n \in \overline{2, N},$$

здесь W_i^{nk} – глобальный приоритет i -го свойства, которое входит в k -ю группу n -го уровня дерева свойств; \tilde{P}_i^{nk} – локальный приоритет свойства, общий для всех свойств k -й группы на n -м уровне.

Важность $G_i (i \in I)$ показателя свойств выпускника определяется на основе глобальных приоритетов свойств из множества $\{W_i^{nk} : i \in \overline{1, m_{nk}}, k \in \overline{1, k_n}, n \in \overline{2, N}\}$.

В дальнейшем предполагается, что показатели отображают конечные свойства из дерева свойств, а их важность приравнивается к интегральной важности соответствующего свойства.

Применение методики оценивания качества. Для определения абсолютных значений показателей свойств выпускников используются экспертные оценки. При этом оценку может производить как один, так и несколько экспертов. Абсолютные значения показателей качества выпускника могут быть также получены в результате тестирования по специально разработанным тестам.

Относительные значения показателей определяются по формуле

$$r_i = \frac{|q_i - q_i^{\hat{a}\hat{d}}|}{|q_i^{\hat{y}\hat{d}} - q_i^{\hat{a}\hat{d}}|}, \quad i \in I,$$

где $i \in I$ – номер показателя; $q_i^{y\delta}$ и $q_i^{a\delta}$ – соответственно эталонное и браковочное значение показателя; r_i и q_i – относительное и абсолютные значения показателя.

Простейший способ расчета комплексной оценки с учетом важности показателей – метод среднего взвешенного [12, 13]:

$$K = \sum_{i \in I} G_i \cdot r_i,$$

где r_i – относительное значение i -го показателя; G_i – весомость i -го показателя.

Таким образом, с помощью данной методики можно оценить качество выпускников любого ВУЗа вне зависимости от факультета, кафедры и специальности. А на основе этой оценки можно оценить качество ВУЗа, его подразделений и высшего образования в целом.

4. Выводы

1) В качестве основного показателя деятельности ВУЗа рассматривается качество образования.

2) В качестве объекта мониторинга качества образования предлагается рассматривать выпускников ВУЗа.

3) Разработана методика оценки качества выпускников, основанная на принципах теоретической квалиметрии.

4) Предлагаемый пример реализации методики может быть использован для оценки качества образования как на уровне ВУЗа, так и на уровне его подразделений (факультет, кафедра).

5) Получаемые оценки выпускников могут широко применяться для целей управления ВУЗом, поскольку позволяют сравнивать различные ВУЗы, а также обеспечивают временную и функциональную сопоставимость.

6) Оценки выпускников могут быть использованы потенциальными работодателями как для составления рейтинга ВУЗов по определенным специальностям, так и для принятия решений о приеме на работу.

7) Реализация предлагаемой методики в информационной компьютерной технологии поддержки принятия решений позволит существенно повысить эффективность управления качеством образования на уровне ВУЗа.

Список литературы: 1. Качалов В.А. Возможности применения стандартов ИСО серии 9000 для квалиметрического мониторинга вузов // Проблемы управления качеством в вузах. 2000. №11. С. 82-91. 2. Азгальдов Г.Г. Общие сведения о методологии квалиметрии // Стандарты и качество. 1994. № 11. С. 10-16. 3. Азгальдов Г.Г. Практическая квалиметрия в системе качества: ошибки и заблуждения // Стандарты и качество. 1996. № 9. С. 2-5. 4. Азгальдов Г.Г. Определение ситуации оценивания качества // Стандарты и качество. 1995. № 12. С.14-16. 5. Афанасьева Т.В. К вопросу о внутренней оценке качества выпускников // <http://www.nmk.ulstu.ru/> (15.08.08) 6. Литвинова А.В. Управление качеством продукции. Учебное пособие. Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2001. 100 с. 7. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия для менеджеров. М., 1996. 203с. 8. Ильченко О.А. Компетентностный подход к формированию стандартов профессионального образования // Открытое образование. 2004. №4. С.4-8. 9. Саати Т.Л. Принятие решений: метод анализа иерархий. М., 1993. 314 с. 10. Саати Т.Л., Кернс К.П. Аналитическое планирование. Организация систем. Москва. Радио и связь. 1991. 224 с. 11. Евланов Л.Г., Кутузов В.А. Экспертные оценки в управлении. М., 1978. 133 с. 12. Тавер Е.И. Экспертный метод потребительской оценки качества продукции // Стандарты и качество. 1998. № 11. С. 44-46.

Поступила в редколлегию 12.10.2009

Чердниченко Ольга Юрьевна, канд. техн. наук, доц. каф. АСУ НТУ «ХПИ». Научные интересы: управление развитием социально-экономических систем, менеджмент качества образования. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, контактные телефоны: (057) 7076474, (067) 7547944, email: marxx75@mail.ru.

Золотьюк Наталия Валериевна, выпускница НТУ «ХПИ». Научные интересы – управление качеством в системе высшего образования. Увлечение: разработка web-сайтов. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Ленина, 63, кв. 43, тел. 80662488087, email: zelenkovo4ka@mail.ru.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ – ЗАДАЧА НЕЧЕТКОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Ставится задача комплектования аварийно-спасательной техники. Предлагается технология ее решения как задачи нечеткой многокритериальной оптимизации с использованием элементов метода анализа иерархий и метода построения функций принадлежности на основе попарных сравнений приоритетности целевых функций. Определяются ограничения, позволяющие на этапе предварительного анализа отсеять неперспективные варианты, и рассматриваются возможности применения других методов, относящихся к «мягким» вычислениям.

1. Введение

Современный мир живет в условиях непрекращающихся природных катаклизмов. Это цунами и ураганы, землетрясения, засухи, наводнения и пожары. К таким природным явлениям добавляются техногенные, экологические катастрофы, обусловленные ростом промышленного производства, а также угрозы, исходящие от отдельных субъектов, или вызванные другими, возможно случайными факторами. В развитых странах мира созданы специальные службы, оказывающие помощь людям, пострадавшим в указанных выше ситуациях. В Украине такие функции возложены на подразделения МЧС. Некий универсализм функций, выполняемых его сотрудниками, является причиной существования проблемы обеспечения и комплектования таких подразделений техническими средствами. В большинстве случаев их носителем является пожарный автомобиль, при этом имеем противоречие между необходимостью обеспечения универсальности аварийно-спасательной техники (АСТ) и ограниченностью его носителя. Необходимо решать задачу оптимального комплектования АСТ.

Такая задача имеет общие черты с известными задачами, в частности, с задачей об упаковке в контейнеры по весу или по стоимости и задачей о ранце [1,2]. Известными методами их решения является динамическое программирование, метод ветвей и границ, метод полного перебора, генетические алгоритмы, алгоритмы муравьиной колонии, «жадные» алгоритмы и др.

Особенностями таких задач и соответствующих методов решения являются четко заданные параметры объектов и одно- или двокритериальность. В отличие от них задача комплектования АСТ является многокритериальной задачей с нечетко заданными предпочтениями на множестве целевых функций. Кроме того, она есть неким аналогом задачи упаковки в контейнеры, т.е. трехмерной. При этом количество контейнеров считается заданным, а количество элементов АСТ – переменным.

2. Постановка задачи

Постановка задачи комплектования аварийно-спасательной техники выполнена в [4]. Приведем ее основные элементы. Пусть множество $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ представляет ассортимент АСТ. Каждый элемент множества X принадлежит к одному из классов множества $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, где $k \ll n$. Предположим, что в комплект должно входить оборудование из каждого $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ класса, $m < k$, т.е. необходимо выбрать по одному элементу из множеств $\{X_{i_1}^1, X_{i_2}^1, \dots, X_{i_m}^1\} \subset C_1, \dots, \{X_{i_1}^m, X_{i_2}^m, \dots, X_{i_m}^m\} \subset C_m$. Каждому элементу множества X поставим в соответствие совокупность значений: $X_q \rightarrow \langle F_{1q}, F_{2q}, \dots, F_{pq}, a_q, b_q, c_q \rangle$, где F_{iq} – значение i -го критерия оценки q -го элемента, $i = 1, p$, a_q, b_q, c_q – его габаритные размеры, $q = 1, n$.

Предположим, что один комплект АСТ K_i содержит элементы множества X , т.е. $K_i \subset X$. При этом могут существовать такие комплекты, количество элементов в которых не совпадает, т.е. $\exists i, j, i \neq j: |K_i| \neq |K_j|$. И еще одно требование, которое не является обяза-

тельным, но выполнение которого предпочтительно: в один комплект АСТ не входят два и больше элементов из одного класса, т.е. не существует таких $j, q, p: (X_{jq} \in K_i) \& (X_{jp} \in K_i)$.

Не ограничивая общность, предположим, что контейнер один, и он имеет форму прямоугольного параллелепипеда с габаритами a, b, c . Используя элементы метода последовательного анализа вариантов [3], исключим из рассмотрения те возможные решения, которые не удовлетворяют одному или нескольким условиям.

Очевидными являются такие ограничения:

1. $\sum_i (a_i \cdot b_i \cdot c_i) \leq a \cdot b \cdot c$, т.е. суммарный объем элементов комплекта не должен превышать общий объем контейнера.

2. $\forall i \max\{a_i, b_i, c_i\} < \max\{a, b, c\}$, указывающее на то, что если один элемент имеет хотя бы один габаритный размер, превышающий наибольший габарит контейнера, то такой комплект исключается.

Критериями, определяющими выбор того или иного комплекта АСТ, являются F_1 – функциональность, F_2 – мощность, F_3 – надежность, F_4 – цена. Имеем задачу многокритериальной оптимизации: найти комплект АСТ, соответствующий решению задачи

$$F_1 \rightarrow \max, F_2 \rightarrow \max, F_3 \rightarrow \max, F_4 \rightarrow \min, \quad (1)$$

при указанных выше ограничениях. Ее решение предваряет определение весовых коэффициентов критериальных функций.

3. Метод решения задачи комплектования АСТ при нечетких экспертных предпочтениях

В дальнейшем изложении будем использовать школу сравнений, предложенную проф. Т. Саати [5]. Так, значения элементов матрицы попарных сравнений будут такими:

- 1, если сущность А и сущность В имеет равную важность;
- 3, если сущность А умеренно превосходит сущность В;
- 5, если сущность А имеет существенное превосходство над сущностью В;
- 7, если сущность А значительно превосходит сущность В;
- 9, если сущность А имеет очень сильное превосходство над сущностью В;
- 2, 4, 6, 8 – соответствуют промежуточным утверждениям о важности.

Если при сравнении А и В имеем одно из указанных чисел, то при сравнении В с А получим обратную величину.

Определим приоритеты критериальных функций. Для этого выберем m экспертов, которые, используя шкалу, предложенную Т.Саати [5], осуществляют их сравнение. Получим матрицы

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & g_{12}^i & g_{13}^i & g_{14}^i \\ 1/g_{12}^i & 1 & g_{23}^i & g_{24}^i \\ 1/g_{13}^i & 1/g_{23}^i & 1 & g_{34}^i \\ 1/g_{14}^i & 1/g_{24}^i & 1/g_{34}^i & 1 \end{pmatrix}, i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Предположим, что компетентность w_i каждого из экспертов известна (если это не так,

то компетентность можно определить, используя метод, предложенный в [6]) и $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

Очевидно, что суждения эксперта при решении задачи сравнения альтернатив зачастую бывают несогласованными. Для осуществления возможности учета этого фактора для каждой матрицы $G_i, i = \overline{1, m}$, вычисляем индекс согласованности, который равен абсолютной величине отклонения размерности матрицы G_i и ее максимального собственного числа, т.е. $\delta_i = |4 - q_i|, i = \overline{1, m}$. Меньшее значение δ_i соответствует лучшей согласованности сравнений эксперта. Если δ_i достаточно большое, то матрицу, соответствующую суждениям такого эксперта, необходимо исключить из рассмотрения или выполнить определенные уточняющие процедуры.

На следующем шаге осуществляем сложение элементов матриц $G_i, i = \overline{1, m}$, находящихся над главной диагональю, с соответствующими весовыми коэффициентами. Остальные элементы результирующей матрицы G найдем как обратные величины к уже вычисленным элементам. Имея матрицу G , определим приоритеты критериальных функций [5] по формуле

$$p_i = \frac{(\prod_{j=1}^4 g_{ij})^{\frac{1}{4}}}{\sum_{i=1}^4 (\prod_{j=1}^4 g_{ij})^{\frac{1}{4}}}, i = \overline{1, 4}. \quad (3)$$

Таким образом, мы установили важность критериальных функций при определении того или иного варианта комплектования АСТ.

На следующем шаге необходимо оценить варианты комплектования АСТ по каждому из критериев $F_i, i = \overline{1, 4}$. Предположим, что после проведения предварительного анализа и проверки выполнения ограничений осталось p возможных вариантов. Аналогично предыдущему шагу необходимо получить четыре матрицы Q_i , элементы каждой из которых содержат значения парных сравнений вариантов комплектования по критериям $F_i, i = \overline{1, 4}$. Получить матрицы можно двумя способами. В первом из них элементы матрицы определяют традиционно, исходя из заключений экспертов для всех пар вариантов. Поскольку число таких вариантов даже в самых малоразмерных задачах довольно большое, то матрица попарных сравнений будет плохо согласованной и ее анализ и применение в дальнейших расчетах становится проблематичным. Рациональным представляется использовать другой способ получения матриц $Q_i, i = \overline{1, 4}$ [7,8]. Для этого необходимо определить только значения попарных сравнений для одного варианта комплектования АСТ, например, для первого. Все остальные элементы матриц рассчитываются по формуле:

$q_{kl} = \frac{q_{1l}}{q_{1k}}, k, l = \overline{1, p}$. Получим такие матрицы:

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & q_{12}^i & q_{13}^i & \dots & q_{1p}^i \\ 1/q_{12}^i & 1 & q_{13}^i / q_{12}^i & \dots & q_{1p}^i / q_{12}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/q_{1p}^i & q_{12}^i / q_{1p}^i & q_{13}^i / q_{1p}^i & \dots & 1 \end{pmatrix}, i = \overline{1, 4}. \quad (4)$$

Матрицы $Q_i, i = \overline{1, 4}$, являются хорошо согласованными. Далее вычисляем степени принадлежности каждого из вариантов комплектования соответствующим нечетким множествам (определяемых критериальными функциями):

$$\mu(K_j) = \frac{1}{wk_{1j} + wk_{2j} + \dots + wk_{pj}}, j = \overline{1, p}, \quad (5)$$

где wk_{ij} – элементы матриц $Q_i, i = \overline{1, 4}$. Таким образом, получим нечеткие множества:

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_1)}{K_1}; \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_2)}{K_2}; \dots; \frac{\mu_{\tilde{F}_i}(K_p)}{K_p} \right\}, \quad (6)$$

или

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{1 / (1 + \sum_{j=1}^p \frac{1}{q_{1j}^i})}{K_1}; \frac{1 / (1 + q_{12}^i + \sum_{j=3}^p \frac{q_{12}^i}{q_{1j}^i})}{K_2}; \dots; \frac{1 / (1 + q_{1p}^i + \sum_{j=2}^{p-1} \frac{q_{1p}^i}{q_{1j}^i})}{K_p} \right\}, i = \overline{1, 4}. \quad (7)$$

Значения, находящиеся в числителе, указывают на то, насколько функциональны, мощны, надежны и приемлемы по цене варианты комплектования (в знаменателе).

Учитывая, что наилучшим является тот вариант, который одновременно лучший по всем критериям, нечеткое решение \tilde{F} находим как пересечение критериев \tilde{F}_i :

$$\tilde{F} = \tilde{F}_1 \cap \tilde{F}_2 \cap \tilde{F}_3 \cap \tilde{F}_4 = \left\{ \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_1}(K_1)}{K_1}; \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_1}(K_2)}{K_2}; \dots; \frac{\min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_1}(K_p)}{K_p} \right\}. \quad (8)$$

Наилучший вариант тот, который является решением задачи поиска

$$\arg \max_{j=1,p} \min_{i=1,4} \mu_{\tilde{F}_i}(K_j). \quad (9)$$

Если учитывать важность критериальных функций, то подход к определению оптимального варианта комплектования остается неизменным, а выражение (7) переписывается следующим образом:

$$\tilde{F}_i = \left\{ \frac{(1/(1 + \sum_{j=1}^p \frac{1}{q_{1j}}))^{p_i}}{K_1}; \frac{(1/(1 + q_{i2}^i + \sum_{j=3}^p \frac{q_{1j2}^i}{q_{1j}}))^{p_i}}{K_2}; \dots; \frac{(1/(1 + q_{ip}^i + \sum_{j=2}^{p-1} \frac{q_{1jp}^i}{q_{1j}}))^{p_i}}{K_p} \right\}, i = \overline{1,4}. \quad (10)$$

Решение задачи (9) определяет оптимальный вариант комплектования и позволяет учитывать меру оптимальности его выбора, исходя из значения соответствующей функции принадлежности.

4. Практическая реализация метода комплектования АСТ

Пусть необходимо выбрать один из шести вариантов комплектования АСТ, исходя из суждений шести экспертов. На первом этапе осуществляем попарное сравнение критериальных функций. Получим такие матрицы:

$$G_1 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 5 & 7 \\ 0,14 & 1 & 1 & 5 \\ 0,2 & 1 & 1 & 7 \\ 0,14 & 0,2 & 0,14 & 1 \end{pmatrix}; G_2 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1 & 7 \\ 0,2 & 1 & 3 & 7 \\ 1 & 0,33 & 1 & 7 \\ 0,14 & 0,14 & 0,14 & 1 \end{pmatrix}; G_3 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 9 & 5 \\ 0,11 & 1 & 5 & 9 \\ 0,11 & 0,2 & 1 & 9 \\ 0,2 & 0,1 & 0,1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$G_4 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 5 & 7 \\ 0,1 & 1 & 5 & 7 \\ 0,2 & 0,2 & 1 & 9 \\ 0,14 & 0,14 & 0,1 & 1 \end{pmatrix}; G_5 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 & 5 \\ 0,3 & 1 & 1 & 1 \\ 0,2 & 0,2 & 1 & 9 \\ 0,14 & 0,14 & 0,1 & 1 \end{pmatrix}; G_6 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 7 & 1 \\ 0,2 & 1 & 9 & 5 \\ 0,14 & 0,1 & 1 & 9 \\ 1 & 0,2 & 0,1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Компетентности экспертов определены лицом, принимающим решения, и они равны:

$$\gamma_1 = 0,34; \gamma_2 = 0,24; \gamma_3 = 0,2; \gamma_4 = 0,14; \gamma_5 = 0,05; \gamma_6 = 0,03.$$

Максимальные собственные числа матриц $G_i, i = \overline{1,6}$ такие:

$$\lambda_1 = 4,35; \lambda_2 = 4,77; \lambda_3 = 5,45; \lambda_4 = 5,13; \lambda_5 = 4,26; \lambda_6 = 6,99.$$

Таким образом, индексы согласованности равны:

$$\delta_1 = 0,35; \delta_2 = 0,77; \delta_3 = 1,45; \delta_4 = 1,13; \delta_5 = 0,26; \delta_6 = 2,99.$$

Наилучшим образом согласованы суждения первого и пятого экспертов, суждения шестого эксперта необходимо корректировать.

Складывая матрицы $G_i, i = \overline{1,6}$ по описанной выше процедуре, получим матрицу

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 6,94 & 4,7 & 6,32 \\ 0,14 & 1 & 3,08 & 6,36 \\ 0,21 & 0,32 & 1 & 7,64 \\ 0,15 & 0,15 & 0,13 & 1 \end{pmatrix}.$$

Используя (3), рассчитаем приоритеты критериальных функций:

$$p_1 = 0,61; p_2 = 0,21; p_3 = 0,14; p_4 = 0,04.$$

Вычислим значения матриц $Q_i, i = \overline{1,4}$:

$$Q_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 0,9 & 0,33 & 0,7 \\ 0,33 & 1 & 0,67 & 0,3 & 0,11 & 0,23 \\ 0,5 & 1,5 & 1 & 0,45 & 0,17 & 0,35 \\ 1,11 & 3,33 & 2,22 & 1 & 0,37 & 0,78 \\ 3 & 9 & 6 & 2,7 & 1 & 2,1 \\ 1,43 & 4,29 & 2,86 & 1,29 & 0,48 & 1 \end{pmatrix}, Q_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 4 & 3 & 0,7 & 0,5 \\ 2 & 1 & 8 & 6 & 1,4 & 1 \\ 0,25 & 0,13 & 1 & 0,75 & 0,18 & 0,13 \\ 0,33 & 0,17 & 1,33 & 1 & 0,23 & 0,17 \\ 1,43 & 0,71 & 5,71 & 4,29 & 1 & 0,71 \\ 2 & 1 & 8 & 6 & 1,4 & 1 \end{pmatrix},$$

$$Q_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0,4 & 0,5 & 2 & 0,8 & 3 \\ 2,5 & 1 & 1,25 & 5 & 2 & 7,5 \\ 2 & 0,8 & 1 & 4 & 1,6 & 6 \\ 0,5 & 0,2 & 0,25 & 1 & 0,4 & 1,5 \\ 1,25 & 0,5 & 0,63 & 2,5 & 1 & 3,75 \\ 0,33 & 0,13 & 0,17 & 0,67 & 0,27 & 1 \end{pmatrix}, Q_4 = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 4 & 0,9 & 4 & 0,8 \\ 0,17 & 1 & 0,67 & 0,15 & 0,67 & 0,13 \\ 0,25 & 1,5 & 1 & 0,23 & 1 & 0,2 \\ 1,11 & 6,67 & 4,44 & 1 & 4,44 & 0,89 \\ 0,25 & 1,5 & 1 & 0,23 & 1 & 0,2 \\ 1,25 & 7,5 & 5 & 1,13 & 5 & 1 \end{pmatrix}.$$

Далее находим степени принадлежности каждого из вариантов комплектования соответствующим нечетким множествам:

$$\tilde{F}_1 = \left\{ \frac{0,12}{K_1}; \frac{0,38}{K_2}; \frac{0,25}{K_3}; \frac{0,11}{K_4}; \frac{0,04}{K_5}; \frac{0,09}{K_6} \right\},$$

$$\tilde{F}_2 = \left\{ \frac{0,10}{K_1}; \frac{0,05}{K_2}; \frac{0,41}{K_3}; \frac{0,31}{K_4}; \frac{0,07}{K_5}; \frac{0,05}{K_6} \right\},$$

$$\tilde{F}_3 = \left\{ \frac{0,13}{K_1}; \frac{0,05}{K_2}; \frac{0,06}{K_3}; \frac{0,26}{K_4}; \frac{0,10}{K_5}; \frac{0,39}{K_6} \right\},$$

$$\tilde{F}_4 = \left\{ \frac{0,05}{K_1}; \frac{0,36}{K_2}; \frac{0,24}{K_3}; \frac{0,05}{K_4}; \frac{0,24}{K_5}; \frac{0,05}{K_6} \right\}.$$

Нечеткое решение находим как пересечение критериев $\tilde{F}_i, i = \overline{1,4}$:

$$\tilde{F} = \left\{ \frac{0,05}{K_1}; \frac{0,05}{K_2}; \frac{0,06}{K_3}; \frac{0,05}{K_4}; \frac{0,04}{K_5}; \frac{0,05}{K_6} \right\}.$$

Учитывая значимость критериальных функций, уточним полученные результаты:

$$\tilde{F}_1 = \left\{ \frac{0,28}{K_1}; \frac{0,55}{K_2}; \frac{0,43}{K_3}; \frac{0,26}{K_4}; \frac{0,14}{K_5}; \frac{0,22}{K_6} \right\},$$

$$\tilde{F}_2 = \left\{ \frac{0,62}{K_1}; \frac{0,54}{K_2}; \frac{0,83}{K_3}; \frac{0,78}{K_4}; \frac{0,58}{K_5}; \frac{0,53}{K_6} \right\},$$

$$\tilde{F}_3 = \left\{ \frac{0,75}{K_1}; \frac{0,66}{K_2}; \frac{0,68}{K_3}; \frac{0,82}{K_4}; \frac{0,72}{K_5}; \frac{0,87}{K_6} \right\},$$

$$\tilde{F}_4 = \left\{ \frac{0,89}{K_1}; \frac{0,95}{K_2}; \frac{0,94}{K_3}; \frac{0,88}{K_4}; \frac{0,94}{K_5}; \frac{0,88}{K_6} \right\}.$$

Тогда, исходя из (8), получим нечеткое решение

$$\tilde{F} = \left\{ \frac{0,28}{K_1}; \frac{0,54}{K_2}; \frac{0,43}{K_3}; \frac{0,26}{K_4}; \frac{0,14}{K_5}; \frac{0,22}{K_6} \right\}.$$

Решением задачи (9) будет вариант комплектования АСТ K_2 , соответствующий максимальному значению функции принадлежности.

5. Выводы и перспективы

Рассмотренный метод комплектования АСТ является только одним возможным элементом технологий принятия решений, базирующимся на использовании теории нечетких множеств, которая является одной из составляющих парадигмы «Soft Computing» [9]. И, хотя не все ее положения имеют строгие доказательства, их применение целесообразно при решении задач, связанных с необходимостью учета субъективных суждений. Такой задачей и является комплектование АСТ. Рассматривая ее как задачу многокритериальной оптимизации, важно обращать внимание на значимость критериальных функций, поскольку ее учет прямо влияет на выбор решения – варианта комплектования.

К важным аспектам, которые необходимо учитывать при решении задачи, относится наличие переменного количества элементов в каждом варианте комплектации. Такое обстоятельство требует формального определения критериальных функций, поскольку для разного типа оборудования понятия и единицы измерения функциональности и мощности являются различными. Экспертам должна быть доступна информация о сравнительных характеристиках элементов АСТ одного класса, а также предусмотрена возможность приведения разнородных показателей к одной шкале.

Предложенный метод, кроме преимуществ, имеет и недостатки. Так, он ориентирован на определенное количество вариантов комплектования, которое не может измениться в процессе анализа, и полученные результаты не могут быть использованы для оценки нового варианта комплектования. Преодолеть ограничение метода предполагается с помощью других составляющих «Soft Computing», а именно нейронных сетей, эволюционного моделирования, нейро-нечетких сетей, а также их композиции. Это позволит осуществлять оценку того или иного варианта комплектования АСТ на основе уже построенной модели. Кроме того, возможно осуществить разработку процедуры устранения противоречий в оценках экспертов, что будет направлено на определенную объективизацию субъективных заключений.

Список литературы: 1. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: «Вильямс», 2006. 576 с. 2. Кормен Т., Лайзерсон Ч., Ривест Р., Штайк К. Алгоритмы: Построение и анализ. М.: «Вильямс», 2005. 1296 с. 3. Волкович В.Л. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович, О.Ф. Волошин и др. К.: Наук. думка, 1993. 312 с. 4. Снитюк В., Кучер П. Информационно-аналитические модели и эволюционные аспекты решения задачи комплектования // Искусственный интеллект. 2009. № 4. С. 268-273. 5. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование организации систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с. 6. Снитюк В.Е., Рифат Мохаммед Али. Модели и методы определения компетентности экспертов на базе аксиомы несмещенности // Вісник ЧІТІ. 2000. № 4. С. 121-126. 7. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. 320 с. 8. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 3. С.150-154. 9. Zadeh L. A. Fuzzy logic, neural network and soft computing // Communications of the ACM. 1994. Vol. 37, № 3. P. 77–84.

Поступила в редколлегию 05.11.2009

Снитюк Виталий Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой информационных технологий проектирования Черкасского государственного технологического университета. Адрес: Украина, 18006, Черкасы, бул. Шевченко, 460/603, тел.: (0472) 73-02-35, e-mail: snytyuk@gmail.com.

Кучер Павел Петрович, преподаватель Академии пожарной безопасности имени Героев Чернобыля. Адрес: Украина, 18000, Черкасы, ул. Оноприенко, 8, тел.: (067) 7523913, e-mail: kucherpp@ukr.net.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МЕТОД БИНОМИАЛЬНОГО НУМЕРАЦИОННОГО КОДИРОВАНИЯ

Предлагается быстродействующий метод биномиального нумерационного кодирования на основе комбинаторного алгоритма вычисления номера двоичной комбинации, использующего рекуррентные последовательности биномиальных коэффициентов. Приведено теоретическое обоснование правильности разработанного алгоритма биномиальной нумерации, а также его блок-схема. Рассматривается пример вычисления номера двоичной комбинации согласно быстродействующему методу биномиального нумерационного кодирования.

1. Введение

Методы нумерационного кодирования позволяют сжимать данные, вероятностные характеристики которых являются неизвестными. Это положительное качество выгодно отличает нумерационное кодирование от методов статистического сжатия, которым для эффективной работы необходимо, как правило, проведение предварительной оценки информации и составление таблиц условных вероятностей. Кроме того, получаемый при нумерации равномерный код, во-первых, упрощает меры синхронизации работы передающего и приемного устройств, а, во-вторых, является более устойчивым к сериям ошибочных изменений значений разрядов. Приведенные достоинства обеспечивают достаточно широкое распространение методов нумерационного кодирования, определяют актуальность и перспективу дальнейшей их разработки [1, 2].

Эффективность метода нумерации обеспечивается:

1) “разумными” ограничениями на элементы нумеруемых последовательностей, поскольку от содержания таких ограничений напрямую зависят существование и распространность нумеруемых последовательностей;

2) объемом вычислительных затрат при нахождении номера последовательности.

Особое место среди методов нумерации двоичных последовательностей занимает метод биномиального нумерационного кодирования, основанный на применении числовой функции биномиальной системы счисления [3, 4]. Практическую значимость данного метода обуславливает тот факт, что нумеруемыми последовательностями являются равновесные комбинации, поскольку в качестве ограничения рассматривается равенство количества двоичных единиц заданному фиксированному значению. Равновесный код широко используется в системах передачи информации, управления и шифрования данных. Более того, любую двоичную последовательность можно представить как равновесную при известном значении числа содержащихся в ней единиц. Таким образом, биномиальное нумерационное кодирование позволяет перечислять (сжимать) любые двоичные последовательности и генерировать любой равновесный код, содержащий заданное число единиц.

Следует отметить, что приведенными достоинствами биномиальной нумерации (сжатия) эффективно воспользоваться можно только в том случае, если скорость проведения вычислений номера будет достаточно высокой, а объем вычислительных затрат при этом небольшим и приемлемым с точки зрения требований аппаратно-программной реализации. Основной вклад в сложность вычислений номера вносит поиск значений весовых коэффициентов биномиальной числовой функции. В качестве весовых коэффициентов используются числа сочетаний, в параметрах которых присутствуют значения n – длины нумеруемой последовательности и k – количества содержащихся в ней двоичных единиц. Нахождение точных значений чисел сочетаний, как это требует числовая функция биномиальной системы счисления, при достаточно больших n и k сталкивается с определенными трудностями, основными из которых являются значительное время вычислений и переполнение разрядной сетки в связи с огромными значениями факториалов чисел. При этом следует отметить, что наиболее полно преимущества биномиального нумерационного кодирования

раскрываются при нумерации длинных последовательностей. Таким образом, для дальнейшего развития метода биномиального нумерационного кодирования важными являются задачи:

- увеличение скорости преобразования двоичной последовательности в номер;
- упрощение вычисления номера и, как следствие, снижение объема аппаратно-программных затрат при практической реализации.

В качестве одного из решений указанных выше задач предлагается использование рекуррентного алгоритма вычисления весовых коэффициентов биномиальной числовой функции. Предлагаемый алгоритм не требует применения сложных цифровых устройств при технической реализации и является весьма эффективным с точки зрения скорости его работы.

2. Метод биномиального нумерационного кодирования

В соответствии с методом биномиального нумерационного кодирования нумеруемыми (сжимаемыми) последовательностями являются последовательности $Y = (y_{n-1} \dots y_i \dots y_1 y_0)$,

сумма двоичных разрядов y_i которых удовлетворяет ограничению $\sum_{i=0}^{n-1} y_i = k$.

Такие двоичные последовательности представляют равновесный код с параметрами n – длина кодовой комбинации и k – количество содержащихся в ней единиц. При этом следует отметить, что любая двоичная последовательность может быть рассмотрена как равновесная при известном значении количества k составляющих ее единиц.

Переход от исходной последовательности $Y = (y_{n-1} \dots y_i \dots y_1 y_0)$ к соответствующему номеру F осуществляется в два этапа, на первом из которых производится преобразование $Y = (y_{n-1} \dots y_i \dots y_1 y_0)$ к биномиальному числу $X = (x_{r-1} \dots x_i \dots x_1 x_0)$, а на втором – преобразование биномиального числа $X = (x_{r-1} \dots x_i \dots x_1 x_0)$ в номер F . Первое преобразование выполняется в соответствии с системами ограничений для биномиальных чисел X [3, 4]:

$$\begin{cases} k \leq r \leq n-1 \\ q = k \\ x_0 = 1 \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} n-k = r-q \\ 0 \leq q \leq k-1 \\ x_0 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где r – длина биномиального числа X , а q – количество содержащихся в X двоичных единиц. Анализ ограничений (1) показывает, что первое преобразование состоит в отбрасывании в двоичной последовательности Y единиц справа до первого появления нуля или отбрасывании нулей справа до первого появления единицы.

Второе преобразование, заключающееся в получении номера F из биномиального числа $X = (x_{r-1} \dots x_i \dots x_1 x_0)$, осуществляется на основании числовой функции двоичной биномиальной системы счисления [3, 4]:

$$F = x_{r-1} C_{n-1}^{k-q_{r-1}} + \dots + x_i C_{n-r+i}^{k-q_i} + \dots + x_0 C_{n-r}^{k-q_0} = \sum_{i=0}^{r-1} x_i C_{n-r+i}^{k-q_i}, \quad (2)$$

где q_i – сумма единичных значений разрядов x_i от $(r-1)$ -го разряда до $(i+1)$ -го включительно:

$$q_i = \sum_{t=i+1}^r x_t, \quad (3)$$

здесь $q_{r-1} = x_r = 0$.

Весовой коэффициент i -го разряда в числовой функции (2) представляет собой число сочетаний $C_{n-r+i}^{k-q_i}$, которое зависит как от позиции $i = 0, 1, \dots, r-1$ рассматриваемого разряда, так и от суммы q_i предшествующих этому разряду двоичных значений x_i .

Общий алгоритм биномиального нумерационного кодирования двоичной последовательности длины n , содержащей количество k единиц, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий алгоритм биномиального нумерационного кодирования

Разработаны различные способы аппаратно-программной реализации биномиального нумерационного кодирования двоичных последовательностей, отличающиеся друг от друга такими характеристиками, как быстродействие и объем аппаратно-программных затрат [3, 4].

Наиболее высоким быстродействием обладает табличный способ нахождения номеров, где в качестве адреса (индекса) в таблице служит двоичная последовательность, которой соответствует ячейка с требуемым номером. Номера заранее заносятся в таблицу согласно биномиальной числовой функции. Данный способ реализуется с помощью устройств памяти. На вход устройства памяти подаются равновесные комбинации, а на выходе устанавливаются соответствующие номера. Однако с ростом длины двоичных последовательностей объем памяти, а следовательно, и аппаратно-программные затраты при реализации табличного способа резко возрастают.

Другим способом реализации рассматриваемого метода кодирования является способ последовательного перебора двоичных равновесных последовательностей, который обладает наименьшим быстродействием. Согласно этому способу последовательно перебираются равновесные комбинации, организованные в лексикографическом порядке, и одновременно с ними перебираются двоичные номера. Практическая реализация данного способа основывается на двух счетчиках, один из которых является биномиальным, а другой – обычным двоичным счетчиком. Синтез структуры биномиального счетчика осуществляется в соответствии с биномиальной числовой функцией. При относительно больших значениях длины равновесного кода количество всех возможных кодовых комбинаций становится весьма значительным, в связи с чем резко снижается скорость биномиальной нумерации кодовых последовательностей.

С точки зрения высокого быстродействия и малого объема аппаратно-программных затрат оптимальным способом реализации метода биномиального нумерационного кодирования можно считать способ, использующий комбинаторные рекуррентные соотношения для весовых коэффициентов числовой функции (2), в качестве которых служат числа сочетаний, поскольку именно нахождение чисел сочетаний требует значительных времени и объема аппаратно-программных затрат.

3. Вычисление биномиальных коэффициентов

Основными причинами, усложняющими процесс нахождения биномиальных коэффициентов C_n^k при больших значениях параметров n и k , являются:

- 1) огромные значения факториалов $n!$ и $k!$, используемых при вычислении C_n^k ;
- 2) большое количество выполняемых операций умножения и деления.

Избежать огромных значений факториалов, исключить операции деления и существенно снизить количество операций умножения позволяет метод вычисления биномиальных коэффициентов на основе канонического разложения чисел [5]. Метод основывается на разложении чисел сочетаний, а также факториалов их параметров на простые числа, возведенные в определенные степени. При этом операции умножения и деления сводятся к арифметическим операциям над степенями простых чисел. Недостатком данного метода является необходимость хранить или вычислять все простые числа до значения нижнего параметра числа сочетаний.

При программной реализации вычисления C_n^k часто используют алгоритм на основе рекуррентного соотношения

$$C_n^k = C_n^{n-k} = \frac{n-k+1}{k} \cdot C_n^{k-1}. \quad (4)$$

Данный метод является достаточно простым, однако при его аппаратной реализации возникают трудности, связанные с необходимостью выполнять операции умножения и деления над большими числами.

В работе [6] предлагается метод вычисления биномиальных коэффициентов при помощи последовательностей чисел сочетаний, в котором не применяются операции умножения и деления. В основу данного метода положены формулы рекуррентного разложения биномиальных коэффициентов следующего вида:

$$C_n^k = C_{n-1}^k + C_{n-2}^{k-1} + \dots + C_{n-k-1}^0, \quad (5)$$

$$C_n^k = C_{n-1}^{k-1} + C_{n-2}^{k-1} + \dots + C_{k-1}^{k-1}. \quad (6)$$

При вычислении C_{i+j}^j создается i -я последовательность биномиальных коэффициентов, содержащая $j+1$ элементов, где $i=0,1,\dots,n-k$, а $j=0,1,\dots,k$. Число сочетаний C_{i+j}^j при этом представляется как j -й элемент, расположенный в i -й последовательности. В случае необходимости определить коэффициент $C_{(i+1)+1}^j$ строится новая $(i+1)$ -я последовательность на основе i -й предшествующей. В общем виде i -я последовательность будет выглядеть как

$$C_i^0 \dots C_{i+j}^j \dots C_{i+k}^k. \quad (7)$$

При $i=n-k$ и $j=k$ число сочетаний $C_{i+j}^j = C_{n-k+k}^k = C_n^k$, т.е. k -й элемент $(n-k)$ -й последовательности представляет собой искомый биномиальный коэффициент C_n^k .

Начальная последовательность $i=0$ состоит из $(k+1)$ единиц согласно $C_0^0 = C_1^1 = \dots = C_k^k = 1$. Элементы следующей последовательности $i=1$ в соответствии с формулой (5) получаются в процессе суммирования единиц нулевой последовательности, начиная с самой левой и до номера искомого элемента включительно, который представляет собой значение верхнего параметра искомого числа сочетаний. Аналогично может быть получена вторая, третья и т.д. последовательности.

Для упрощения вычисления элементов новой последовательности можно воспользоваться значениями уже вычисленных элементов формируемой последовательности.

Теорема 1. В последовательностях биномиальных коэффициентов, построенных согласно рекуррентному разложению (5), сумма значений j -го элемента $(i-1)$ -й последовательности и $(j-1)$ -го элемента i -й последовательности представляет собой значение j -го элемента i -й последовательности:

$$C_{i+j}^j = C_{(i-1)+j}^j + C_{i+(j-1)}^{j-1}. \quad (8)$$

Доказательство. В выражении (8) перегруппируем переменные i и j в нижних параметрах чисел сочетаний: $C_{i+j}^j = C_{(i+j)-1}^j + C_{(i+j)-1}^{j-1}$. Введя переменную z вместо суммы $(i+j)$, приходим к известному правилу Паскаля: $C_z^j = C_{z-1}^j + C_{z-1}^{j-1}$. Теорема 1 доказана.

В результате для вычисления j -го элемента i -й последовательности биномиальных коэффициентов необходимо просуммировать j -й элемент предшествующей $(i-1)$ -й последовательности с $(j-1)$ -м элементом искомой i -й последовательности.

Пример. Вычислить значение биномиального коэффициента C_{10}^4 с помощью последовательности чисел сочетаний.

Решение. Поскольку номер искомого элемента в последовательности чисел сочетаний $j=4$, а сумма номеров строки и элемента $i+j=10$, то в соответствии с методом вычисления номер последовательности $i=6$. Таким образом, $j=\overline{0,4}$, $i=\overline{0,6}$ и, следовательно, необходимо построить семь последовательностей, состоящих из пяти биномиальных коэффициентов.

Последовательности биномиальных коэффициентов, получившиеся в результате применения метода для заданных параметров $n=10$ и $k=4$, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Пример вычисления C_{10}^4

$i \backslash j$	0	1	2	3	4
0	1	1	1	1	1
1	1	2	3	4	5
2	1	3	6	10	15
3	1	4	10	20	35
4	1	5	15	35	70
5	1	6	21	56	126
6	1	7	28	84	210

Число, расположенное на пересечении четвертого столбца и шестой строки, соответствует значению биномиального коэффициента с параметрами $n=10$ и $k=4$, т.е. $C_{10}^4 = 210$.

Рассмотренный метод вычисления биномиальных коэффициентов имеет следующие достоинства:

1) достаточно простая аппаратная реализация метода, поскольку содержит только операции сложения;

2) удобство применения для нумерационной функции (2), поскольку при вычислении биномиального коэффициента производится расчет биномиальных коэффициентов с меньшими значениями параметров, что соответствует порядку определения слагаемых суммы (2). Данная особенность позволяет ускорить процесс определения номера исходной последовательности.

4. Комбинаторный алгоритм вычисления номера двоичной комбинации

На основе общего алгоритма биномиального нумерационного кодирования, представленного на рис. 1, строится комбинаторный алгоритм вычисления номера двоичной комбинации.

Как следует из системы ограничений (1), преобразование равновесной комбинации Y в r -разрядное биномиальное число X (преобразование 1) может выполняться двумя способами: 1) отбрасыванием подряд расположенных $(n-r)$ нулей, начиная с $y_0=0$, до появления первой единицы, которая становится самым младшим единичным разрядом $x_0=1$ числа X ; 2) отбрасыванием подряд расположенных $(n-r)$ единиц, начиная с $y_0=1$, до появления первого нуля, который становится самым младшим нулевым разрядом $x_0=0$ числа X .

Переход от биномиального числа X к номеру F равновесной комбинации (преобразование 2) осуществляется на основании числовой функции биномиальной системы счисления (2). Значения биномиальных коэффициентов, входящих в состав числовой функции (2), вычисляются при помощи последовательности чисел сочетаний (7).

Теорема 2. Номер разряда i двоичного биномиального числа $X = (x_{r-1} \dots x_1 x_0)$, $i = 0, r-1$, связан с номером разряда $s \geq n-r$ двоичной равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$, имеющей число k единиц, следующим соотношением

$$i = s - n + r. \quad (9)$$

Доказательство. Двоичная равновесная комбинация $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$ характеризуется количеством n составляющих ее разрядов и числом k содержащихся в ней единиц. Получение r -разрядного биномиального числа $X = (x_{r-1} \dots x_1 x_0)$, которое соответствует Y , осуществляется на основе систем (1) ограничений. Как следует из (1), преобразование выполняется путем отбрасывания подряд стоящих единиц или нулей. Количество исключаемых двоичных разрядов составляет $(n-r)$. Тогда номер i разряда биномиального числа X отличается от номера s разряда равновесной комбинации Y на величину $(n-r)$, т.е. $i = s - n + r$. Поскольку минимальное значение $i_{\min} = 0$, то отсюда $s_{\min} = i_{\min} + n - r = n - r$ и, следовательно, должно быть $s \geq n - r$. Теорема 2 доказана.

Теорема 3. Если в биномиальном числе $X = (x_{r-1} \dots x_1 x_0)$ последняя цифра $x_0 = 0$, то сумма единиц в соответствующей X равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_{n-r} 11 \dots 1)$ с нулевого по $(n-r-1)$ -й разряд

$$\sum_{s=0}^{n-r-1} y_s = n - r.$$

Доказательство. Количество единиц в равновесной комбинации Y

$$k = \sum_{s=0}^{n-1} y_s = \sum_{s=0}^{n-r-1} y_s + \sum_{s=n-r}^{n-1} y_s.$$

Так как из теоремы 2 следует $i = s - n + r$, то, перейдя к значениям x_i соответствующего биномиального числа X , при $s \geq n - r$ получим

$$k = \sum_{s=0}^{n-r-1} y_s + \sum_{i=0}^{r-1} x_i = \sum_{s=0}^{n-r-1} y_s + q.$$

Из системы (1) ограничений для числа X при $x_0 = 0$ находим $q = r - (n - k)$. Подставив в предыдущее выражение значение $q = r - (n - k)$, имеем

$$\sum_{s=0}^{n-r-1} y_s = k - q = k - r + (n - k) = n - r.$$

Теорема 3 доказана.

Следствие 1. Количество нулей в соответствующей $X = (x_{r-1} \dots x_1 x_0)$ равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_{n-r} 11 \dots 1)$ с нулевого по $(n-r-1)$ -й разряд равно нулю.

Теорема 4. Если в биномиальном числе $X = (x_{r-1} \dots x_1 x_0)$ последняя цифра $x_0 = 1$, то сумма единиц в соответствующей X равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_{n-r} 00 \dots 0)$ с нулевого по $(n-r-1)$ -й разряд

$$\sum_{s=0}^{n-r-1} y_s = 0.$$

Доказательство. В отличие от доказательства предыдущей теоремы из системы (1) ограничений при $x_0 = 1$ имеем $q = k$. Следовательно, из последнего выражения доказательства теоремы 3:

$\sum_{s=0}^{n-r-1} y_s = k - q = k - k = 0$. Теорема 4 доказана.

Следствие 2. Количество нулей в соответствующей $X = (x_{r-1} \dots x_i \dots x_1 0)$ равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_{n-r} 11 \dots 1)$ с нулевого по $(n-r-1)$ -й разряд равно $(n-r)$.

Введем следующие обозначения: n_s для переменной, которая представляет собой число разрядов в равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$ от нулевого до разряда s включительно:

$$n_s = s + 1; \quad (10)$$

k_s для переменной, которая представляет собой сумму двоичных разрядов равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$, начиная с нулевого и по разряд s включительно, т.е., другими словами, количество двоичных единиц на кодовом отрезке длины n_s :

$$k_s = \sum_{t=0}^s y_t; \quad (11)$$

m_s для переменной, которая представляет собой количество двоичных нулей равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$, начиная с нулевого и по разряд s включительно:

$$m_s = n_s - k_s. \quad (12)$$

Теорема 5 Сумма единичных значений k_s равновесной комбинации $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$ связана с суммой единичных значений q_{s-n+r} биномиального числа $X = (x_{r-1} \dots x_i \dots x_1 x_0)$ при $n-r \leq s \leq n-1$ следующим соотношением:

$$k_s = k - q_{s-n+r}. \quad (13)$$

Доказательство. Количество k двоичных единиц в равновесной комбинации Y

$$k = \sum_{t=0}^{n-1} y_t = \sum_{t=0}^s y_t + \sum_{t=s+1}^{n-1} y_t.$$

Согласно (11) первое слагаемое выражение есть не что иное как значение k_s . Что касается второго слагаемого, то здесь необходимо учесть, что, во-первых, в соответствии с теоремой 2 для номера s разряда равновесной комбинации Y выполняется $s = i + n - r$ и, следовательно, из условия теоремы $n - r \leq s \leq n - 1$ следует $0 \leq i \leq r - 1$; во-вторых, при $n - r \leq s \leq n - 1$ выполняются равенства $y_{n-r+1} = x_1$, $y_{n-r+2} = x_2$, ..., $y_{n-1} = x_{r-1}$. Принимая во внимание сказанное выше и $x_r = 0$, можно заключить, что второе слагаемое представляется как

$$\sum_{t=s+1}^{n-1} y_t = \sum_{t=s-n+r+1}^{r-1} x_t = \sum_{t=s-n+r+1}^r x_t = q_{s-n+r}.$$

Таким образом, $k = k_s + q_{s-n+r}$ или $k_s = k - q_{s-n+r}$. Теорема 5 доказана.

Теорема 6. Число сочетаний $C_{n-r+i}^{k-q_i}$ нумерационной функции (2) биномиальной системы счисления представляет собой k_s -й элемент $(m_s - 1)$ -й последовательности биномиальных коэффициентов (7):

$$j = k_s, \quad i = m_s - 1, \quad (14)$$

где $n - r \leq s \leq n - 1$.

Доказательство. Используя выражения (9) и (13) из теорем 2 и 5, значение i -го биномиального коэффициента $C_{n-r+i}^{k-q_i}$ нумерационной функции (2) можно записать как

$$C_{n-r+i}^{k-q_i} = C_{n-r+s-n+r}^{k-q_{s-n+r}} = C_s^{k_s}.$$

Чтобы определить значение $C_s^{k_s}$ при помощи последовательностей биномиальных коэффициентов (7), приведем его к виду C_{i+j}^j , воспользовавшись соотношениями (10) и (12):

$$C_s^{k_s} = C_{n_s-1}^{k_s} = C_{m_s-1+k_s}^{k_s}.$$

Как следует из полученного равенства, $j = k_s$, $i = m_s - 1$. Теорема 6 доказана.

Из соотношения (14) видно, что указателем на номер последовательности биномиальных коэффициентов является количество нулей в равновесной комбинации. При этом важно заметить, что новая последовательность рассчитывается на основе предыдущей и, следовательно, расчет чисел сочетаний должен начинаться с нулевой последовательности. Как видно из следствия 2, при переходе от равновесной комбинации Y к биномиальному числу X , для случая, когда разряд $x_0 = 1$, отсчет количества нулей начинается со значения $(n - r)$. Следовательно, возникает необходимость в вычислении неиспользуемых $(n - r)$ последовательностей. Это накладывает дополнительные временные затраты и уменьшает скорость преобразования равновесной комбинации Y в ее порядковый номер X . Для устранения этого недостатка воспользуемся свойством симметрии чисел сочетаний

$$C_{k_s+m_s-1}^{k_s} = C_{k_s+m_s-1}^{m_s-1}. \text{ При этом теперь}$$

$$j = m_s - 1, i = k_s. \quad (15)$$

Таким образом, алгоритм разбивается на две ветви. Первая ветвь соответствует случаю, когда последняя цифра биномиального числа X равна $x_0 = 1$ ($y_0 = 0$). Вычисление значения нумерационной функции (2) осуществляется при помощи суммирования значений $(m_s - 1)$ ячеек k_s последовательностей биномиальных коэффициентов в соответствии с равенствами (15). Вторая ветвь алгоритма соответствует случаю, когда последняя цифра биномиального числа X равна $x_0 = 0$ ($y_0 = 1$). Для этого случая вычисление значения нумерационной функции (2) осуществляется при помощи суммирования значений k_s ячеек $(m_s - 1)$ последовательностей биномиальных коэффициентов в соответствии с равенствами (14).

Количество чисел сочетаний, располагающихся в последовательности биномиальных коэффициентов, для первого случая составляет $(\max m_s - 1) + 1 = (m - 1) + 1 = m$, а для второго – $\max k_s + 1 = k + 1$.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рис. 2.

Для упрощения записи блок-схемы алгоритма обозначим через M_j переменную со значением биномиального коэффициента, расположенного в j -м элементе текущей i -й последовательности чисел сочетаний.

Рассмотрим работу алгоритма более подробно. Имеется некоторая равновесная комбинация $Y = (y_{n-1} \dots y_s \dots y_1 y_0)$ длиной n бит, содержащая k единиц (вес равновесной комбинации) и m нулей, номер которой необходимо вычислить.

Изначально производится обнуление счетчика единиц k_s , счетчика нулей m_s , счетчика позиции s и ячейки памяти N , в которой будет храниться номер F равновесной комбинации. Также на данном этапе формируется нулевая последовательность чисел сочетаний, содержащая единицы во всех элементах M_j . Счетчик позиции s определяет номер разряда равновесной комбинации Y , с которым работает алгоритм.

На первом этапе преобразования необходимо перейти от равновесной комбинации Y к биномиальному числу X . Из равновесной комбинации считывается s -й бит. Если соседние биты y_s и y_{s-1} равны между собой, то счетчик позиции s увеличивает свое значение на единицу и выполняется новый цикл проверки. В противном случае этап перехода от равновесной комбинации Y к биномиальному числу X считается завершенным. Счетчик позиции s будет указывать на младший разряд x_0 биномиального числа. Также на данном этапе производится подсчет количества k_s единиц и количества m_s нулей для текущего значения s .

На втором этапе производится вычисление номера F исходной равновесной комбинации Y . Как указывалось выше, в зависимости от значения y_0 алгоритм разделяется на две ветви. Первая ветвь соответствует случаю, когда $y_0 = 0$. Если значение y_s -го бита равно

нулю, то инкрементируется счетчик нулей m_s . В противном случае инкрементируется счетчик единиц k_s и вычисляется новая k_s -я последовательность биномиальных коэффициентов.

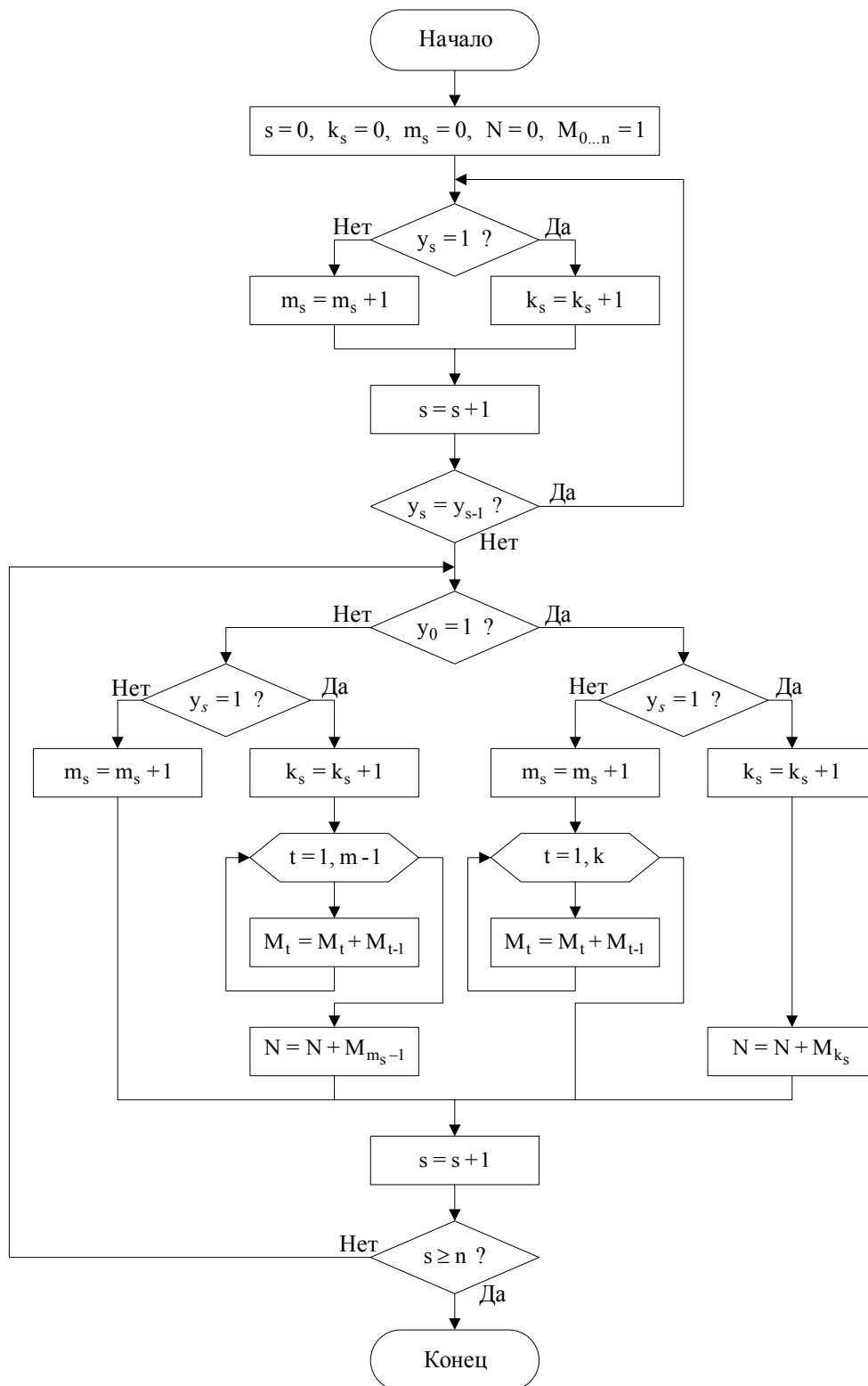


Рис. 2. Блок-схема комбинаторного алгоритма вычисления номера равновесной комбинации

Вычисление новой последовательности производится по циклу в соответствии с выражением (8). После перерасчета последовательности к номеру равновесной комбинации,

который хранится в ячейке памяти N , прибавляется (M_{m_s-1}) -й элемент текущей k_s -й последовательности биномиальных коэффициентов. Вторая ветвь, которая соответствует случаю $y_0 = 1$, выполняется аналогичным образом, с той лишь разницей, что указателем на номер последовательности является счетчик нулей m_s , а указателем на элемент последовательности является счетчик единиц k_s . После выполнения указанных операций счетчик позиции s увеличивается на единицу. Если содержимое счетчика позиции не достигло величины n , то производится выборка следующего y_s -го разряда из равновесной комбинации и цикл вычисления номера повторяется. В противном случае определение номера считается завершенным, а искомое значение хранится в ячейке памяти N .

5. Пример работы алгоритма вычисления номера двоичной комбинации

Согласно методу биномиального нумерационного кодирования вычислить номер для двоичной последовательности 11010100. Параметры заданной комбинации следующие: длина $n = 8$, количество единиц $k = 4$, количество нулей $m = 4$.

Сначала производится обнуление счетчиков $s = 0$, $k_s = 0$, $m_s = 0$ и ячейки памяти $N = 0$, хранящей искомый номер равновесной комбинации. Формируется нулевая последовательность биномиальных коэффициентов, состоящая из четырех элементов: 1 1 1 1.

Считывается нулевой разряд равновесной кодовой комбинации. Поскольку $y_0 = 0$, инкрементируется счетчик нулей $m_s = 1$ и осуществляется переход к следующему разряду с индексом $s = 1$. Поскольку разряды y_0 и y_1 равновесной комбинации равны между собой, повторяются те же действия, что и для нулевого разряда. Значения разрядов y_1 и y_2 уже не равны. Следовательно, двоичное биномиальное число, соответствующее исходной последовательности, получено и преобразование 1 завершено. При этом счетчики позиции, единиц и нулей содержат следующие значения: $s = 2$, $k_s = 0$, $m_s = 2$, а биномиальное число имеет вид 110101.

Поскольку нулевой разряд равновесной комбинации $y_0 = 0$, выполняется первая ветвь алгоритма. Так как $y_2 = 1$, то содержимое счетчика единиц увеличивается на единицу и становится $k_s = 1$. Счетчик нулей при этом сохраняет свое состояние $m_s = 2$. Далее, производится расчет первой последовательности биномиальных коэффициентов, которая теперь будет иметь следующий вид: 1 2 3 4. К содержимому ячейки памяти $N = 0$, хранящей номер равновесной комбинации, прибавляется значение $M_{m_s-1} = M_1$ первого элемента последовательности биномиальных коэффициентов, т.е. $N = N + M_1 = 2$.

Далее рассматриваются остальные разряды биномиального числа и выполняются аналогичные действия до тех пор, пока счетчик позиции s не достигнет значения $n = 8$.

Последовательности значений переменных для каждого цикла алгоритма представлены в табл. 2.

Таблица 2. Пример вычисления номера равновесной комбинации 11010100

s	y_s	k_s	m_s	k_s -я последовательность				Бином коэф.	N
0	0	0	1	1	1	1	1	---	0
1	0	0	2	1	1	1	1	---	0
2	1	1	2	1	2	3	4	2	2
3	0	1	3	1	2	3	4	---	2
4	1	2	3	1	3	6	10	6	8
5	0	2	4	1	3	6	10	---	8
6	1	3	4	1	4	10	20	20	28
7	1	4	4	1	5	15	35	35	63

В результате работы алгоритма был получен номер равновесной комбинации $N_{[11010100]} = 63_{\langle 10 \rangle} = 00111111_{\langle 2 \rangle}$.

6. Выводы

Разработанный комбинаторный алгоритм биномиальной нумерации двоичных комбинаций на основе рекуррентного вычисления последовательностей биномиальных коэффициентов позволяет достигнуть:

- достаточно существенного увеличения быстродействия метода биномиального нумерационного кодирования;
- снижения объема аппаратно-программных затрат при практической реализации биномиальной нумерации двоичных комбинаций.

Достигнутые результаты стали возможными благодаря исключению времязатратных операций умножения и деления над параметрами $k - q_i, n - r + i$ чисел сочетаний $C_{n-r+i}^{k-q_i}$, представляющих весовые коэффициенты числовой функции (2), и замене их простыми операциями сложения. Кроме того, снимается проблема переполнения разрядной сетки во время вычисления значений биномиальных коэффициентов, так как исчезает необходимость определения факториалов верхнего и нижнего параметров $C_{n-r+i}^{k-q_i}$. Полученный комбинаторный алгоритм биномиального нумерационного кодирования приобретает особую практическую значимость при больших значениях n и k сжимаемых двоичных последовательностей.

Список литературы: 1. Амелкин В.А. Методы нумерационного кодирования. Новосибирск: Наука, 1986. 155 с. 2. Cover, Thomas M. Enumerative Source Encoding / IEEE Transactions on Information Theory, vol. IT-19, No. 1. Jan. 1973. P. 73-77. 3. Борисенко А.А. Биномиальный счет. Теория и практика: Монография. Сумы: ИТД “Университетская книга”, 2004. 170 с. 4. Кулик И.А., Костель С.В., Скордина Е.М. Использование биномиальных чисел для сжатия бинарных изображений / Вісник СумДУ. 2009. № 2. с. 29-36. 5. Кулик И.А., Скордина Е.М. Метод вычисления биномиальных коэффициентов на основе канонического разложения чисел / Вісник СумДУ. 2008. № 1. С. 158-165. 6. Борисенко А.А. Введение в теорию биномиального счета: Монография. Сумы: ИТД “Университетская книга”, 2004. 89 с.

Поступила в редколлегию 12.11.2009

Кулик Игорь Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и компьютерной техники Сумского государственного университета. Научные интересы: системы сжатия и передачи данных, комбинаторное кодирование. Адрес: Украина, 40007, Сумы, ул. Римско-Корсакова, 2, тел. (0542) 33-55-39. e-mail: kulik@pe.sumdu.edu.ua.

Костель Сергей Викторович, аспирант кафедры электроники и компьютерной техники Сумского государственного университета. Научные интересы: нумерационное кодирование и сжатие информации, программирование. Адрес: Украина, 40007, Сумы, ул. Римско-Корсакова, 2, тел. (0542) 33-55-39. e-mail: eikt@ukr.net.

РАЗРАБОТКА БАЗОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, МОТИВИРОВАННЫХ ИНТЕРЕСАМИ

Разрабатывается базовая информационная структура системы поддержки принятия управленческих решений, мотивированных разнонаправленными интересами. На производственном примере рассматриваются процедуры объединения индивидуальных предпочтений в коллективное решение в условиях многокритериальности и неоднозначности влияющих факторов.

Актуальность проблемы. В связи с развитием автоматизированных систем управления все большее значение приобретают новые информационные технологии, особое место в которых занимает проблема принятия управленческих решений в производственных и технологических процессах при наличии нескольких критериев оптимизации. Такие процессы связаны, например, с расходом ресурсов, износом, усталостью и старением оборудования, безопасностью эксплуатации машин и механизмов. Критерии оптимальности в таких системах могут быть связаны, с одной стороны, с достижением максимальной полезности эксплуатации оборудования и полного использования производственных мощностей по выпуску продукции, а с другой – с безопасностью его использования, что требует щадящего режима эксплуатации, наличия дублирующих агрегатов, профилактических осмотров и ремонтов. Это вступает в противоречие с максимизацией выпуска на существующем оборудовании в ограниченные временные интервалы. В таких системах мотивация активности и управляющих действий основывается на стремлении к их реализации. Реализация интересов требует определенных действий, которые являются элементами управления. В рамках модели управления должны использоваться некоторые критериальные функции, описывающие качество управляющих решений. Однако, поскольку цель управления в таких интересо-ориентированных системах не может быть однозначно задана, это увеличивает элементы риска при принятии некачественных управленческих решений. Поэтому проблема нуждается в изначальной структуризации.

Анализ публикаций и достижений. Структуру управленческих решений можно представить иерархией, включающей цель, критерии, участников процессов, на которых распространяется рассматриваемое решение и альтернативные варианты решения. Существуют многочисленные примеры, когда элементы верхнего уровня управления зависят от элементов нижних уровней. В свою очередь элементы даже одного уровня могут зависеть друг от друга. Поэтому необходимы процедуры объединения индивидуальных суждений в коллективное решение. Кроме того, следует учитывать предложенный В.М. Глушковым принцип своевременности принятия решений [1]. Слишком поспешные решения могут оказаться неудачными, а затягивание процесса принятия решения может привести к упущенным возможностям. Эффективное решение должно быть своевременным, полным (комплексным) и оптимальным. Изучение проблем многокритериального выбора с учетом индивидуальных предпочтений показывает, что довольно эффективно развиваются модели и методы теории выбора, экспертных систем, имитационного моделирования, динамического программирования [2-4], ориентированные на достижение целей, обозначенных внутренним развитием производственных, в том числе и экономических объектов. Вместе с тем вопросы учета разнонаправленных интересов хозяйствующих субъектов в них не рассматриваются.

К нерешенным частям общей проблемы относится выбор управляющих альтернатив в зависимости от ситуации, которые недоступны непосредственному наблюдению и нуждаются в диагностике.

Целью исследования является разработка базовой информационной структуры, способствующей отысканию компромиссных решений в условиях разнонаправленности интересов хозяйствующих субъектов.

Изложение основного материала. В работе принято допущение, что структура объекта интересов не фиксирована и субъект может ее выбирать, т.е. предполагается задание некоторого множества G альтернатив структуры управления. Возможно два варианта стратегии: тактический, предполагающий осуществлять их последовательный перебор на каждом шаге принятия решений, и стратегический, предполагающий, что структурная альтернатива должна оставаться постоянной в течение некоторого временного интервала.

Тактический вариант стратегии предусматривает декомпозицию главной цели до того уровня детализации, когда для нижнего уровня иерархии целей можно сформулировать критерии, позволяющие адекватно описать степень достижения целей при принятии той или иной альтернативы (рис. 1).

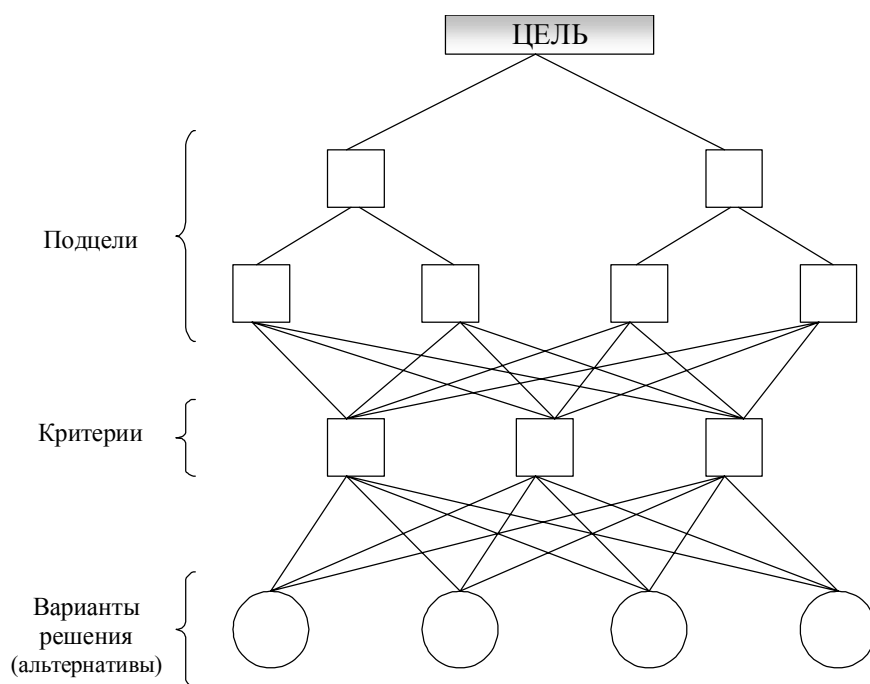


Рис. 1. Декомпозиция целей

В тактических альтернативах полагают, что все множества в базовой информационной структуре конечны и считают, что альтернативами окончательного выбора должны быть не элементы соответствующих множеств: управляющих Y , структурных G и диагностики X , а правила, по которым осуществляется выбор этих множеств. Управляющие альтернативы выбираются в каждый момент времени $n=1,2,\dots$ из множества Y только в зависимости от ситуаций $x \in X$. Существуют ограничения $Y_x \subseteq Y$ на допустимость выбора альтернатив в зависимости от ситуации $x \in X$, т.е. стратегия управления определяется независимо от состояния. В то же время некоторые ситуации недоступны непосредственному наблюдению и нуждаются в диагностике. При этом существуют ограничения $X_s \subset X$ на допустимость ситуаций в качестве альтернатив диагностики в зависимости от состояний $s \in S$.

Априорные действия о направленности своих намерений хозяйствующий субъект может выражать с помощью некоторой функции $\omega^g(Y \times S \times X)$, называемой функцией полезности.

Качество стратегии управления описывается критерием ожидаемой полезности, в то время как качество стратегии диагностики – критерием риска. Поскольку критерий качества стратегии управления имеет смысл ожидаемой полезности, то в его структуре должна

использоваться функция полезности $\omega^g(Y \times S \times X)$, которая в свою очередь зависит от структурной альтернативы $g \in G$.

Передаточную функцию, определяющую вероятности переходов из $S \times Y$ в S на заданном периоде $g \in G$, обозначим через $q^g(S|S \times Y)$.

Носителем априорной информации является задание распределения $\beta(S)$ на множестве S ограничений $[X_s \subseteq X, s \in S]$ на допустимость ситуаций в качестве альтернатив диагностики, а также ограничений $[Y_x \subseteq Y, x \in X]$ на допустимость управляющих альтернатив в зависимости от ситуаций.

С учетом этого базовая информационная структура принимает вид:

$$I = \{S, \beta(S), X, [X_s \subseteq X, s \in S], Y, [Y_x \subseteq Y, x \in X], G, q^g(S|S \times Y), \omega^g(Y \times (S \times X))\}, g \in G$$

Полнота информационной структуры может быть установлена лишь по итоговым результатам исследования проблемы.

Для иллюстрации методологии решения проблемы рассмотрим производственную задачу определения прибыли предприятия по выпуску двух видов продукции при ограничениях на имеющиеся ресурсы. В качестве параметров базовой информационной структуры I приняты S – множество состояний системы, определяемое видом используемого ресурса, состоящее из трех элементов S_1, S_2, S_3 и характеризуемое набором сырьевых полуфабрикатов. Для работы в таких условиях производственному предприятию необходимы две характеристики: x_1 – объем выпуска изделия A (в наших обозначениях это структурная альтернатива g_1) и x_2 – объем выпуска изделия B (в наших обозначениях это альтернатива g_2). Эти характеристики образуют множество ситуаций $X = \{x_1, x_2\}$. При этом задано множество структурных альтернатив $G = \{g_1, g_2\}$. Ограничения на допустимость ситуаций будут определяться общими ресурсами по выпуску изделий для сырья данного вида и при условии, что с возрастанием x_1 величина x_2 должна быть уменьшена $X_{S_i} = \{x_1, x_2\}$. $F = w^g(Y \times S \times X)$ – функция полезности, определяемая через прибыль от реализации оптимального количества продукции, Y – управляющие альтернативы по переводу состояния системы S , характеризуемое значением F , в значение F_{\max} ; $q^g(S|S \times Y)$ – передаточная функция, характеризующая производственный технологический процесс. Таким образом, базовая информационная структура I априорных данных должна содержать носители априорной информации об условиях выбора управляющих альтернатив, структурных альтернатив и альтернатив диагностики. Такая структура не сводится к информационным структурам известных моделей управляемых процессов, в то время как для частных случаев из нее следуют информационные структуры некоторых известных моделей стохастического управления, в частности модели линейного программирования. В работе [5, с. 62] показано, что для каждой фиксированной структуры некоторое множество допустимых значений элементов кортежа параметров модели, каждое из которых удовлетворяет системе ограничений. Задача параметрической идентификации модели многокритериального оценивания не имеет единственного точечного решения, т.е. границы многогранника решений не принадлежат множеству допустимых значений параметров модели, поэтому точечную оценку необходимо выбирать внутри допустимой области из решений, наиболее устойчивых к вариациям положения границ многогранника. Такими оценками являются центр тяжести многогранника допустимых значений (средняя точка) или Чебышевское решение, т.е. точка, максимально или минимально удаленная от границ многогранника. В связи с тем, что все ограничения линейные, задача определения оценок параметров сводится к стандартной задаче линейного программирования.

При работе предприятия происходит столкновение разнонаправленных интересов: максимальное снабжение ресурсов сдерживается ограничениями на имеющиеся в наличии производственные мощности, качество продукции сдерживается ценовой политикой и покупательной способностью населения, соблюдение нормативов и технических условий определяет сорт выпускаемого товара. Однако для достижения корпоративной устойчивости предприятия – обеспечения максимизации прибыли хозяйствующие субъекты в своей

профессиональной деятельности должны находить компромиссы. На производственном примере рассмотрены процедуры объединения индивидуальных предпочтений в коллективное решение в условиях многокритериальности и неоднозначности влияющих факторов.

Предприятие – винсовхоз им. Солодухина, г. Каховка, специализируется на выпуске виноградных и яблочных соков. Мощности предприятия позволяют в течение 20 дней обеспечить технологическую переработку в объемах от 5 до 10 тыс.т для виноградного сырья и 2 тыс.т для яблочного.

Для производства двух видов продукции А и В предприятие использует три вида сырья. Нормы расхода сырья каждого вида на изготовление продукции для яблочного сока приведены в [6, с. 501] и соответствуют ГОСТ 18192-72 (табл. 1). В ней же указана прибыль от реализации одного литра изделия каждого вида и общее количество сырья данного вида, которое необходимо предприятию.

Таблица 1

Вид сырья, сорт яблок	Норма расхода сырья на 1 л, кг		Общее количество сырья, тыс.т
	А	В	
Антоновка, Пепин лондонский, Джона голд, Айдаред	11,74	16,1	2,09
Белый налив, Боровинка, Байкет, Кальвин снежный	10,85	14,4	2,31
Ренет Симиренко, Голден Делижес, Розмарин белый	7,51	10,3	1,13
Прибыль от реализации единицы продукции, грн	0,64	0,81	

Здесь индексами А и В обозначены: натуральный А и осветленный В яблочный сок, полученный путем экстракции. Задача планирования – обеспечить такой объем выпуска, при котором прибыль предприятия от реализации всей программы была бы максимальной. Обозначим через x_1 количество единиц продукции вида А, а через x_2 – количество единиц продукции В. Принимаем, что сбыт обеспечен, и что изделия А и В могут производиться в любых соотношениях. Поскольку производство продукции ограничено имеющимся в распоряжении предприятия сырьем каждого вида, то количество изготавливаемых изделий не может быть отрицательным. Следовательно, должны выполняться неравенства:

$$\begin{cases} 11,74x_1 + 16,1x_2 \leq 2,09 \cdot 10^6, \\ 10,85x_1 + 14,4x_2 \leq 2,31 \cdot 10^6, \\ 7,51x_1 + 10,3x_2 \leq 1,13 \cdot 10^6, \\ x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Эта система ограничений показывает, что количество сырья, расходуемое на изготовление продукции, не может превысить имеющихся запасов. Общая прибыль от реализации x_1 изделий А и x_2 изделий В составит $F = 0,64x_1 + 0,81x_2$.

Это и будет целевая функция. Таким образом, среди всех неотрицательных решений данной системы линейных неравенств требуется найти такое, при котором функция F принимает максимальное значение.

Для решения сформулированной задачи используем ее геометрическую интерпретацию, определив многоугольник решений. В неравенствах системы ограничений при условиях неотрицательности переменных знаки неравенств необходимо заменить на знаки точных равенств, получив соответствующие прямые:

$$\begin{cases} 11,74x_1 + 16,1x_2 = 2,09 \cdot 10^6, & (1) \\ 10,85x_1 + 14,4x_2 = 2,31 \cdot 10^6, & (2) \\ 7,51x_1 + 10,3x_2 = 1,13 \cdot 10^6, & (3) \\ x_1 = 0, & \\ x_2 = 0. & \end{cases}$$

Как следует из приведенной системы уравнений значения x_1 и x_2 должны быть по порядку величины соизмеримы с числами, стоящими в правой части уравнения, поэтому для выбора соответствующего масштаба необходимо вычислить характерные точки. Положив в первое уравнение $x_2 = 0$, получим $x_1 = 0,17 \cdot 10^6$ л. Положив в это же уравнение $x_1 = 0$, получим $x_2 = 0,104 \cdot 10^6$ л. Произведя аналогичные вычисления для двух других уравнений системы, найдем характерные точки этих прямых: $x_1 = 0,06 \cdot 10^6$ л при $x_2 = 0$ и $x_2 = 0,16 \cdot 10^6$ л при $x_1 = 0$ для второго уравнения; $x_1 = 0,065 \cdot 10^6$ л при $x_2 = 0$ и $x_2 = 11,5 \cdot 10^6$ л при $x_1 = 0$ для третьего уравнения.

Все эти прямые пересекаются между собой, что свидетельствует о равной значимости ограничений на ресурсы.

Каждая прямая делит плоскость чертежа на две полуплоскости. Для исследования степени принадлежности полуплоскости рассматриваемой системе ограничений необходимо координаты произвольной точки пространства подставить в соответствующее неравенство. Пересечение полученных полуплоскостей и определяет многоугольник решений данной задачи (рис.2.), где индексами 1, 2, 3 обозначены соответствующие уравнения системы.

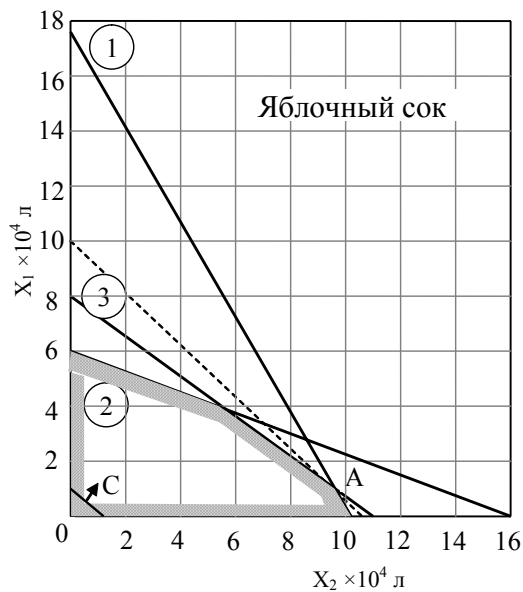


Рис. 2. Многоугольник решений задачи определения прибыли при равной значимости ограничений на ресурсы

Координаты любой точки, принадлежащей этому многоугольнику решений, удовлетворяют исходной системе неравенств и условию неотрицательности переменных. В этом многоугольнике решений и должна находиться функция F , определяющая прибыль предприятия. Чтобы найти в пределах этого многоугольника точку с максимальным значением F , необходимо в аналитическом представлении этой функции, положив $x_1 = 1$ и $x_2 = 1$, построить вектор C , перемещая который в направлении, указанном стрелкой до последнего пересечения с внешней границей многоугольника (пунктирная прямая), получить искомую точку A . Ее координаты найдем как точку пересечения прямых:

$$\begin{cases} 11,74x_1 + 16,1x_2 = 2,09 \cdot 10^6, \\ 7,51x_1 + 10,3x_2 = 1,13 \cdot 10^6. \end{cases}$$

Решив эту систему уравнений, получим $x_1 = 1,2 \cdot 10^4$ л и $x_2 = 9,5 \cdot 10^4$ л. Следовательно, если предприятие изготовит $1,2 \cdot 10^4$ л изделий вида А и $9,5 \cdot 10^4$ л продукции вида В, оно получит максимальную прибыль $F_{\max} = 0,64 \cdot 9,5 \cdot 10^4 + 0,81 \cdot 1,2 \cdot 10^4 = 7,05 \cdot 10^4$ грн.

Аналогичные расчеты выполнены и для другого предприятия – винсовхоза «Белозерский» по выпуску виноградных соков, производственные данные которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Вид продукта	Стоимость одного литра, грн	Вид сырья	Нормы расхода сырья на одно изделие, кг		Общее количество сырья, тыс.т
			А	В	
Марочный сок	12	85% Рислинг, Ркацители 15% других сортов	1,666	1,797	5
Высший сорт	6	Лидия, Изабелла, один или несколько европейских сортов	1,455	1,561	7,5
1-й сорт	5	Смесь европейских сортов	1,250	1,375	10
		Прибыль от реализации единицы продукции, грн	0,41	0,64	

Ограничения на ресурсы при выпуске виноградного сока представлены следующей системой неравенств:

$$\begin{cases} 1,666x_1 + 1,797x_2 \leq 5 \cdot 10^6, & (4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1,455x_1 + 1,561x_2 \leq 7,5 \cdot 10^6, & (5) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1,250x_1 + 1,375x_2 \leq 10 \cdot 10^6, & (6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1 = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_2 = 0. \end{cases}$$

Целевая функция $F = 0,41x_1 + 0,64x_2$. Многоугольник решений представлен на рис. 3, координаты точки А(2,6;3,2). Как следует из рис. 3, прямая 1, описываемая первым уравнением системы, не пересекает прямые 2 и 3, следовательно, в пределах многоугольника решений выпуск изделий А и В для уравнения (4) может быть любым, т.е. ограничения на ресурсы, описываемые уравнением (4), не оказывают существенного влияния на получаемую прибыль. Существенные ограничения имеют только ресурсы, выражаемые уравнениями (5) и (6). Получаемая путем оптимизации объемов выпуска прибыль составляет $3,114 \cdot 10^4$ грн.

В совокупности введенные параметры и ограничения определяют динамическое равновесие системы и служат основой построения модели принятия управляющих решений, мотивированных интересами, в условиях информационной структуры I с тактическими структурными альтернативами.

Следует отметить, что базовая информационная структура I изначально не ориентирована на построение критериев, вытекающих из принципа разнообразия интересов. Поэтому возникает необходимость преобразований структуры I в другие нужные структуры.

В базовой информационной структуре I задана передаточная функция $q^g(S|S \times Y)$, определяющая вероятности переходов из $S \times Y$ в S. Однако согласно концепции ситуацион-

ного управления, альтернативы $y \in Y$ могут выбираться лишь в зависимости от ситуаций $x \in X$. Это требует преобразования заданной передаточной функции в передаточную функцию $Q^g(X|X \times Y)$ из $X \times Y$ в X . Такое преобразование возможно лишь в том случае, если задано распределение $\beta(S)$. В этих условиях информационную структуру I можно преобразовать в структуру полезности U_n :

$$U_n = \{X, Y, [Y_x \subset Y, x \in X], G, w^g(X \times Y), Q_n^g(X|X \times Y), g \in G\},$$

здесь $w^g(X \times Y)$ – функция полезности на $(X \times Y)$, формируемая по правилу $w^g(x, y) = w^g(S^*, x, y)$, где

$$S^* = \begin{cases} \arg \max w^g(S, x, y): x \in X_s, y \in Y_x, & y \in Y_x, \\ \arg \min w^g(S, x, y), & y \notin Y_x. \end{cases}$$

В представленных выражениях $w^g(S, x, y)$ – функция полезности, заданная в базовой информационной структуре, а $Q_n^g(X|X \times Y)$ – передаточная функция из $X \times Y$ в X .

Управляющие альтернативы $y \in Y$ могут выбираться лишь в зависимости от ситуаций $x \in X$, поэтому заданная в структуре функция полезности $w^g(S, x, y)$ должна быть преобразована к виду, в котором она зависит лишь от пары переменных $x, y \in X \times Y$ и не зависит от состояния. Преобразование I в U является структурным преобразованием полезности.

Согласно концепции ситуационного управления, проблема принятия управленческих решений, мотивированных интересами, сводится к отысканию устойчивого компромисса между стремлением к максимизации ожидаемой полезности и минимизации риска возможных потерь. В связи с неоднозначностью и неопределенностью некоторых составляющих базовой информационной структуры при ее использовании могут возникнуть ситуации риска. Следует отметить, что понятия риск и неопределенность различны. Понятие неопределенность относится к ситуациям, при которых возможны различные варианты развития событий, но вероятности их наступления не известны. Понятие риск связано с ситуациями, когда можно предвидеть и перечислить все возможные результаты и рассчитать вероятность каждого из них. Интерпретация вероятности зависит от характера события, имеющего определенную долю неопределенности. Объективное понимание события основывается на частоте повторения результатов. Однако если ранее подобных событий не было, интерпретация результатов может быть выполнена субъективными методами, основанными на личном опыте и мнениях лиц, принимающих решения, или экспертов. Если вероятности определяются субъективно, разные люди могут присваивать разным результатам разные вероятности. Это значит, что разная информация или разные возможности обработки одной и той же информации могут служить причиной различной оценки субъективной вероятности разными людьми [7, с. 149].

Необходимая для формирования критерия риска информационная структура R должна содержать передаточную функцию $q^g(S|S \times Y)$ из $S \times Y$ в S и использовать в своем построении вместо функции полезности функцию возможных потерь полезности $r^g(S|S \times Y)$:

$$r^g(S, x, y) = \left| w^g(S, x, y) - \max_{x \in X} \max_{y \in Y} w^g(s, x, y), (s, x, y) \in (S, X, Y) \right|$$

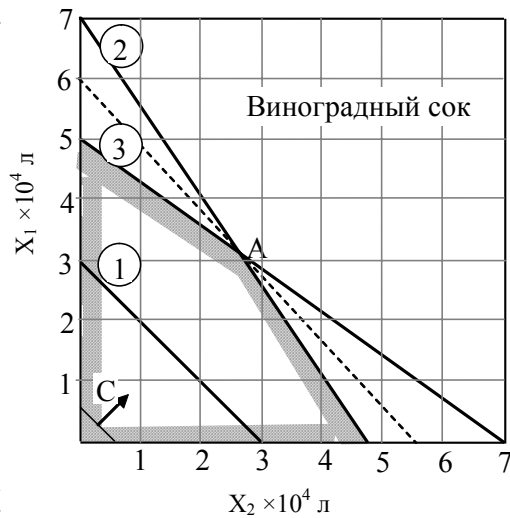


Рис. 3. Многоугольник решений при разной значимости ограничений на ресурсы

$$R = \{S, X, [X_s \in X, s \in S], Y, G, q^g(S \times Y), r^g(X \times S \times Y), g \in G\}.$$

Как следует из приведенной формулы, снизить риск можно путем уменьшения функции потерь полезности $r^g(S, x, y)$. Это может быть достигнуто за счет диверсификации, т.е. распределения ресурсов среди множества рискованных ситуаций, исходы которых напрямую не связаны между собой. Тезис «не следует класть яйца в одну корзину» подтверждает это. Отыскание компромисса при распределении ресурсов с учетом разнонаправленных интересов хозяйствующих субъектов является необходимым элементом возрастания функции полезности.

В развитии перспектив использования информационных структур моделей принятия решений очень важно установить причины и следствия. Для этого может быть использована дедуктивная логика, где вывод результата осуществляется на основе предположений [8, с. 125]. Эта процедура представляет собой последовательный линейный подход с множеством заключений по этапам, после чего возникает проблема их обобщения [9, 115]. Решение этой проблемы требует интуиции и опыта, так как логика мало говорит о том, как на основе различных заключений получить интегрированный результат. Другим способом является холистический подход, в котором все рассматриваемые факторы объединяются в иерархию, допускающую наличие зависимостей между элементами.

Выводы. Проблема принятия управленческих решений в организационных системах должна рассматриваться в контексте интересов, связанных с использованием системы. Формализация проблемы принятия решений в условиях многокритериального выбора, основанная на принципах учета разнонаправленных интересов и структурных преобразований, может быть конструктивно реализована на базовой информационной структуре с тактическими структурными альтернативами. На производственном примере оптимизации объемов выпуска двух товаров для обеспечения максимизации прибыли рассмотрены процедуры объединения индивидуальных суждений в коллективное решение. Введенные параметры и ограничения могут служить основой построения модели динамических равновесий, определяющей управление процессами реализации интересов таким образом, чтобы достигался общий корпоративно необходимый результат.

Список литературы: 1. Глушков В.М. Введение в АСУ. К.: Техника, 1972. 312 с. 2. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Пер. с англ. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с. 3. Баранов В.В. Процессы принятия управляющих решений, мотивированных интересами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 296 с. 4. Харари Ф. Теория графов / Пер. с англ. М.: Едиториал УРСС, 2003. 296 с. 5. Крючковский В.В., Петров Э.Г. Проблемы формализации процессов принятия решений // Проблемы информационных технологий. 2008. № 1. С. 57-64. 6. Справочник по производству консервов. М.: Пищевая промышленность, 1974. Т.4. «Консервы из растительного сырья» / Под ред. Рогачова В.И. 7. Пиндайк Р., Рубинфельд Д. Микроэкономика / Пер. с англ. СПб.: Питер. 2008. 608 с. 8. Баранов В.В. Оптимальные методы диагностики управляемых стохастических систем // Техническая кибернетика. 1994. С. 120-131. 9. Баранов В.В. Последовательные методы идентификации и адаптивного управления в стохастических системах // Кибернетика и системный анализ. 1992. С. 100-120.

Поступила в редколлегию 14.11.2009

Бабичев Сергей Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики Херсонского национального технического университета. Научные интересы: интеллектуальные системы принятия решений; методы обработки многомерных данных; сети Байеса; автоматизированные системы технической диагностики. Адрес: Украина, 73000, Херсон, ул. Краснощекиной, 2, кв 11, тел. 8-0552-491037, E-mail: bsa63@mail.ru

Погребняк Ирина Федоровна, аспирантка кафедры общей и прикладной физики Херсонского национального технического университета. Научные интересы: интеллектуальные системы принятия решений; методы обработки многомерных данных. Адрес: Украина, 73033, Херсон, пр. Строителей, 27-а, кв. 65, тел. 066-46-16-789, E-mail: irina_p78@mail.ru

Шарко Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики Херсонского национального технического университета. Научные интересы: автоматизированные системы технической диагностики; акустический метод неразрушающего контроля; системы поддержки принятия решений. Адрес: Украина, 73008, Херсон, Бериславское шоссе, 24б, кв 8, тел: 8-0552-344109.

ІЄРАРХІЧНИЙ АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРОНОГРАМ

Розглядається інформаційно-екстремальний ієрархічний алгоритм розпізнавання електронограм, одержаних в електронній мікроскопії в режимі мікродифракції, який дозволяє підвищити функціональну ефективність навчання системи при збільшенні потужності алфавіту класів. Оброблення електронограм в полярних координатах дозволило зробити алгоритм інваріантним до зсуву та повороту.

Вступ

Розпізнавання одержаних в електронній мікроскопії в режимі мікродифракції електронограм є важливою науково-практичною задачею [1], актуальною в металургійній та хімічній промисловості, геології, кристалографії та інших галузях. Існуючі аналітико-геометричні методи розпізнавання електронограм [2] вимагають значних часових витрат і потребують високого рівня кваліфікації особи, що приймає рішення. Більшість відомих машинних алгоритмів розпізнавання зображень [2-4] орієнтовано на розв'язання модельних задач, які виключають перетин класів, характеризуються невисокою достовірністю розпізнавання і потребують на підготовчому етапі навчання нормалізації апріорно деформованих образів, що на практиці, як правило, є ускладненим.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання ідей і методів інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології), що ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи розпізнавання шляхом введення в процесі навчання додаткових інформаційних обмежень [5]. У працях [6,7] досліджувалися у рамках ІЕІ-технології питання аналізу і синтезу систем розпізнавання електронограм за неієрархічним алгоритмом, який є чутливим до збільшення потужності алфавіту класів розпізнавання. У статті розглядається питання стиснення та оброблення відеоінформації в інформаційно-екстремальних алгоритмах навчання системи розпізнавання електронограм, які мають ієрархічну структуру.

1. Постановка задачі

Розглянемо задачу загального синтезу системи розпізнавання зображень. Нехай ефективність навчання розпізнаванню реалізацій класу X_m^o , $m = \overline{1, M}$, характеризується значенням E_m критерію функціональної ефективності (КФЕ). Відома навчальна матриця $\|y_{m,i}^{(j)}\|$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, n}$, де N, n – кількість ознак розпізнавання і випробувань відповідно. Рядок матриці $\{y_{m,i}^{(j)} \mid i = \overline{1, N}\}$ утворює j -ту реалізацію образу, а стовпець $\{y_{m,i}^{(j)} \mid j = \overline{1, n}\}$ – навчальну вибірку з генеральної сукупності значень i -ї ознаки розпізнавання. Треба для структурованого вектора параметрів функціонування системи розпізнавання $g_m = \langle g_{m,1}, \dots, g_{m,q}, \dots, g_{m,Q} \rangle$, які будемо називати параметрами навчання і для яких відомі обмеження $R_q(g_1, \dots, g_Q) \leq 0$, шляхом організації послідовних ітераційних процедур знайти екстремальні значення координат вектора g_m , що забезпечують максимум КФЕ навчання системи розпізнавання:

$$E_{\max}^* = \max_G E_m, \quad (1)$$

де G – область допустимих значень параметрів навчання.

На етапі екзамену треба за побудованими на етапі навчання системи розпізнавання вирішальними правилами визначити належність реалізації образу, що розпізнається, до відповідного класу розпізнавання із заданого алфавіту $\{X_m^o\}$.

Метою роботи є підвищення достовірності та оперативності розпізнавання електронограм за ІЕІ-технологією при збільшенні потужності алфавіту класів розпізнавання.

2. Алгоритм навчання системи розпізнавання

Математичну (категорійну) модель процесу навчання системи розпізнавання за ІЕІ-технологією подамо у вигляді діаграми відображень множин. При обґрунтуванні гіпотези нечіткої компактності має місце нечітке розбиття $\tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|} \subset \Omega$, де Ω – простір ознак розпізнавання. Введемо оператор θ нечіткої факторизації простору ознак: $\theta: Y \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|}$ і оператор класифікації $\psi: \tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|} \rightarrow I^{|\mathcal{I}|}$, який перевіряє основну статистичну гіпотезу про належність реалізацій $\{x_m^{(j)} | j=\overline{1, n}\}$ нечіткому класу X_m^o . Тут l – кількість статистичних гіпотез. Оператор $\gamma: I^{|\mathcal{I}|} \rightarrow \mathfrak{Z}^{|\mathcal{Q}|}$ шляхом оцінки статистичних гіпотез формує множину точнісних характеристик $\mathfrak{Z}^{|\mathcal{Q}|}$, де $q=|\mathcal{Q}|$ – кількість точнісних характеристик. Оператор $\phi: \mathfrak{Z}^{|\mathcal{Q}|} \rightarrow E$ обчислює множину значень інформаційного КФЕ, який є функціоналом точнісних характеристик. Контур оптимізації геометричних параметрів нечіткого розбиття $\tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|}$ шляхом пошуку максимуму КФЕ навчання розпізнаванню реалізацій класу X_m^o замикається оператором $\Gamma: E \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|}$.

Структурну діаграму відображень множин у процесі навчання за базовим інформаційно-екстремальним алгоритмом показано на рис. 1.

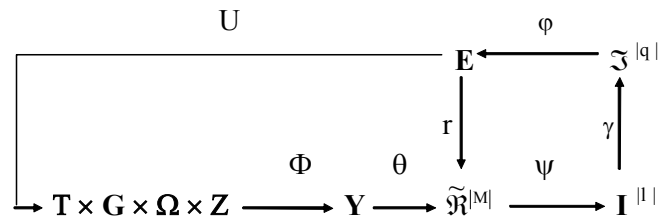


Рис. 1. Діаграма відображень множин у процесі навчання системи розпізнавання

Оператор $U: E \rightarrow G \times T \times \Omega \times Z$ регламентує процес навчання і дозволяє оптимізувати параметри його плану, які визначають, наприклад, обсяг і структуру випробувань, черговість розгляду класів розпізнавання та інше.

Вхідною інформацією для навчання за базовим алгоритмом є багатовимірна навчальна матриця $\|y_{m,i}^{(j)} | m=\overline{1, M}; i=\overline{1, N}; j=\overline{1, n}\|$, де M, N, n – кількість класів, ознак розпізнавання та векторів-реалізацій класів відповідно; система полів контрольних допусків $\{\delta_{k,i}\}$ на ознаки розпізнавання і рівні селекції $\{\rho_m\}$ координат еталонних векторів-реалізацій, які за замовчуванням дорівнюють 0,5 для всіх класів розпізнавання.

Основні етапи реалізації алгоритму:

1. Побудова ієрархічної структури алфавіту класів розпізнавання. При цьому перший ярус структури складається з типових представників якісно відмінних класів електронограм, які визначають алфавіт класів розпізнавання $\{X_m^{(1)}\}$, а наступні яруси – з представників їх класів та підкласів. Кожна гілка вищого ярусу утворює страту, яка визначає свій алфавіт класів розпізнавання $\{X_{k,m}^{(r)}\}$, де k, r – номери страт і ярусів відповідно.

2. Для кожного класу будується спектрограма яскравості шляхом оброблення електронограми у полярних координатах за умови, що центр електронного пучка приймається за центр електронограми.

3. Для кожного алфавіту формується вхідна навчальна матриця $\|y_{k,m,i}^{(j)}\|^{(r)}$, вектори-реалізації якої утворюються шляхом квантування у часі відповідної спектрограми яскравості.

4. Для кожного алфавіту формується бінарна навчальна матриця $\|x_{k,m,i}^{(j)}\|^{(r)}$, елементи якої дорівнюють

$$x_{k,m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{k,m,i}^{(j)} \in \delta_{K,i}; \\ 0, & \text{if } y_{k,m,i}^{(j)} \notin \delta_{K,i}. \end{cases} \quad (2)$$

5. Формування масиву еталонних двійкових векторів $\{x_{k,m,i} \mid m = \overline{1, M}, i = \overline{1, N}\}$, елементи якого визначаються за правилом:

$$x_{k,m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{k,m,i}^{(j)} > \rho_{k,m}; \\ 0, & \text{if else,} \end{cases} \quad (3)$$

де $\rho_{k,m}^{(r)}$ – рівень селекції координат вектора $x_{k,m}^{(r)} \in X_{k,m}^{(r)}$.

6. Розбиття множини еталонних векторів на пари найближчих «сусідів»: $\mathfrak{R}_{k,m}^{[2]} = \langle x_m, x_1 \rangle$, де x_1 – еталонний вектор сусіднього класу $X_{k,m}^{(r)}$, за таким алгоритмом:

- а) структурується множина еталонних векторів, починаючи з вектора x_1 базового класу X_1^0 , який характеризує найбільшу функціональну ефективність системи розпізнавання;
- б) будується матриця кодових відстаней між еталонними векторами розмірності $M \times M$;
- в) для кожного рядка матриці кодових відстаней знаходиться мінімальний елемент, який належить стовпчику вектора, найближчого до вектора, що визначає рядок. За наявності декількох однакових мінімальних елементів вибирається з них будь-який, оскільки вони є рівноправними;

г) формується структурована множина елементів попарного розбиття $\{\mathfrak{R}_{k,m}^{[2]} \mid m = \overline{1, M}\}$, яка задає план навчання.

7. Оптимізація кодової відстані $d_{k,m}^{(r)}$ відбувається за рекурентною процедурою. При цьому приймається $E_{k,m}^{(r)}(0) = 0$.

8. Процедура закінчується при знаходженні максимуму КФЕ в робочій області визначення його функції: $E_{k,m}^{*(r)} = \max_{\{d\}} E_m$, де $\{d\} = \{d_1, \dots, d_k, \dots, d_{\max}\} \in [0; d(x_m \oplus x_1) - 1]$ - множина радіусів концентрованих гіперсфер, центр яких визначається вершиною еталонного вектора $x_{k,m}^{(r)} \in X_{k,m}^{(r)}$. При цьому множина $\{d\}$ є так само множиною кроків навчання системи розпізнавання.

Таким чином, базовий алгоритм навчання є ітераційною процедурою пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ в робочій області визначення його функції:

$$d_{k,m}^{*(r)} = \arg \max_{\{d\}} E_{k,m}^{*(r)}. \quad (4)$$

Параметри навчання системи розпізнавання за базовим алгоритмом – оптимальні кодові відстані $\{d_{k,m}^{*(r)}\}$ і оптимальні еталонні вектори-реалізації $\{x_{k,m}^{*(r)}\}$ для заданого алфавіту $\{X_{k,m}^{(r)}\}$ є обов'язковими вхідними даними для функціонування системи розпізнавання в режимі екзамену, тобто безпосереднього прийняття рішень.

Таким чином, основною функцією базового алгоритму навчання у рамках ІЕІ-технології є обчислення на кожному кроці навчання інформаційного КФЕ і організація пошуку його глобального максимуму в робочій області визначення функції критерію з метою визначення оптимальних геометричних параметрів розбиття простору ознак на класи розпізнавання.

Як критерій оптимізації параметрів навчання у рамках ІЕІ-технології може розглядатися будь-яка статистична інформаційна міра, яка є функціоналом від точнісних характеристик. Широкого використання в алгоритмах навчання набула модифікація інформаційної міри Кульбака [7], в якій розглядається відношення правдоподібності у вигляді логарифмічного відношення повної ймовірності правильного прийняття рішень P_1 до повної ймовірності по-

милкового прийняття рішень P_f . Для рівномірних гіпотез, що характеризує найбільш важкий у статистичному розумінні випадок прийняття рішень, міру Кульбака подамо у вигляді

$$\begin{aligned}
 E_{k,m}^{(r)} &= \log_2 \frac{P_{t,k,m}}{P_{f,k,m}} * [P_{t,k,m} - P_{f,k,m}] = \left| \begin{array}{l} P_{t,k,m} = 0,5D_{1,k,m} + 0,5D_{2,k,m}; \\ P_{f,k,m} = 0,5\alpha_{k,m} + 0,5\beta_{k,m}. \end{array} \right| = \\
 &= \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{D_{1,k,m} + D_{2,k,m}}{\alpha_{k,m} + \beta_{k,m}} \right) [(D_{1,k,m} + D_{2,k,m}) - (\alpha_{k,m} + \beta_{k,m})] = \\
 &= \log_2 \left(\frac{2 - (\alpha_{k,m} + \beta_{k,m})}{\alpha_{k,m} + \beta_{k,m}} \right) [2 - (\alpha_{k,m} + \beta_{k,m})], \quad (5)
 \end{aligned}$$

де $D_{1,k,m}, D_{2,k,m}, \alpha_{k,m}, \beta_{k,m}$ – точнісні характеристики розпізнавання реалізацій класу $\{X_{k,m}^{(r)}\}$: перша і друга достовірності, помилки першого та другого роду відповідно.

3. Реалізація ієрархічного алгоритму розпізнавання електронограм

Для реалізації прикладу роботи системи розпізнавання електронограм використовувались отримані на просвічуючому електронному мікроскопі електронограми, зображені на рис. 1.

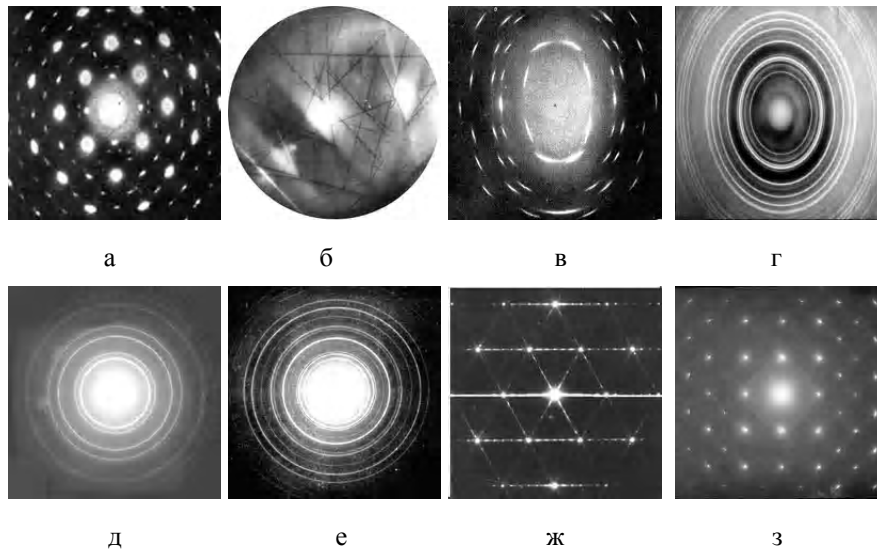


Рис. 2. Електронограми: а – мозаїчного монокристалу; б – з Кікучі-лініями; в – текстури; г – полікристалу; д – алюмінію; е – NaCl; ж – тодоракіту; з – золота

Оброблення електронограм, зображених на рис. 2, здійснювалось у полярних координатах, які дозволяють зробити електронограми, що досліджуються, інваріантними до зсуву і повороту. При обробленні зображень в полярних координатах рядок навчальної матриці – вектор-реалізація образу формувався з ознак розпізнавання, які обчислювалися за формулою

$$\Theta_j = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i}{N}, \quad (6)$$

де Θ_j – числове значення спектра в j -му радіусі кола зчитування, $j = \overline{1, R}$; θ_i – значення яскравості в i -му пікселі, $i = \overline{1, N}$; N – загальна кількість пікселів у колі зчитування.

Було побудовано ієрархічну структуру, яка зображена на рис. 2.

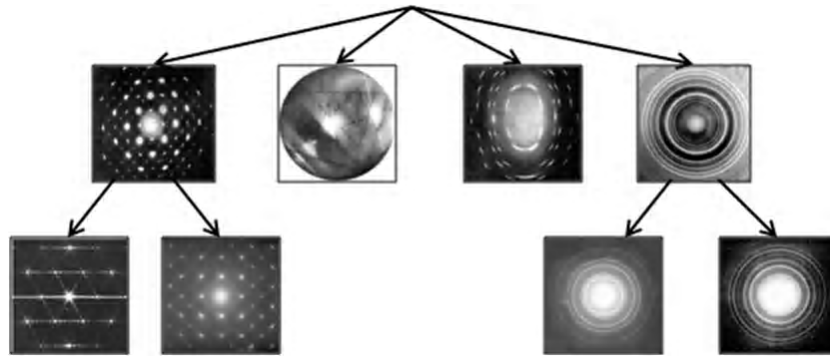


Рис. 3. Ієрархічна структура алфавіту класів розпізнавання

На першому ярусі ієрархічної структури (рис. 3) розташовано чотири класи основних типів електроннограм: монокристалу – клас $X_1^{(1)}$ (електроннограми з рефlekсами у вигляді плям), з Кікучі-лініями – клас $X_2^{(1)}$, текстури – клас $X_3^{(1)}$ (з рефlekсами у вигляді дуг) та полікристалу – клас $X_4^{(1)}$ (концентричні кільця). На другому ярусі розташовані: тодорокіт – клас $X_{1,1}^{(2)}$, золото – клас $X_{1,2}^{(2)}$ та алюміній – клас $X_{4,1}^{(2)}$ і NaCl – клас $X_{4,2}^{(2)}$.

Базовий алгоритм навчання проводився при значенні параметра поля контрольних допусків δ дорівнює 15. Графік залежності усередненого КФЕ від радіуса контейнера для класу $X_4^{(1)}$ зображений на рис. 4.

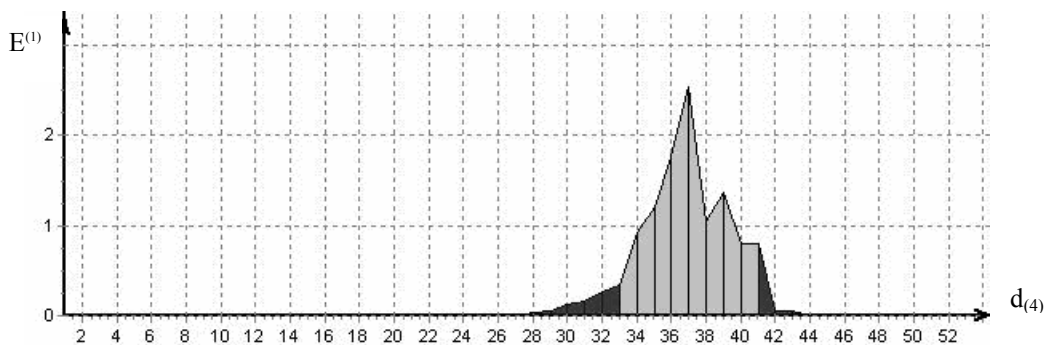


Рис. 4. Графік залежності КФЕ від радіуса контейнера для класу $X_4^{(1)}$

Світла ділянка на графіку рис. 4 визначає робочу область, в якій проводиться пошук глобального максимуму КФЕ (5). Аналіз графіка показує, що максимальне значення КФЕ для класу досягається при значенні радіуса контейнера $d = 37$ і становить 2,53. При цьому мають місце такі точнісні характеристики: перша достовірність $D1=0,9$, друга достовірність $D2=0,9$, помилка першого роду $\alpha = 0,1$, помилка другого роду $\beta = 0,1$.

Середнє значення КФЕ після проведення навчання для першого ярусі ієрархічної структури дорівнює $\bar{E} = 2,01$.

З метою перевірки працездатності розробленого ієрархічного алгоритму в режимі екзамену на монітор комп'ютера електронного растрового мікроскопа РЕМ-103М виробництва ВАТ «Selmi» (Суми, Україна) транслювалася електроннограма алюмінію, яка в ієрархічній структурі (див. рис. 3) знаходиться у другому ярусі (клас $X_{4,1}^{(2)}$). Результати екзамену наведено на рис. 5.

Аналіз рис. 5 показує, що у режимі екзамену електроннограма, що розпізнавалася, була правильно віднесена до відповідного класу за максимальним значенням геометричної (дистанційної) функції належності реалізації образу відповідному гіперсферичному контейнеру і обчислювалася за формулою

$$\mu_{k,m}^{(r)} = 1 - \frac{d(x_{k,m}^* \oplus x^{(j)})}{d_{k,m}^*}, \quad (8)$$

де $x_{k,m}^{*(r)}$, $x^{(j)}$ – еталонний вектор-реалізація класу $X_{k,m}^{(r)}$ і реалізація класу, що розпізнається, відповідно; $d_{k,m}^*$ – оптимальний радіус контейнера класу $X_{k,m}^{(r)}$, побудований на етапі навчання.



Рис. 5. Інтерфейс програми в режимі проведення екзамену

Таким чином, ієрархічний алгоритм екзамену складається з послідовних процедур визначення максимальної функції належності (8) реалізації, що розпізнається, класу першого ярусу ієрархічної структури, переходу на відповідну страту другого ярусу, визначення максимальної функції належності для алфавіту класів цієї страти і так до тих пір, поки не буде знайдено фінальну вершину, яка не утворює свою страту.

Висновки

1. Запропоновано ієрархічний інформаційно-екстремальний алгоритм розпізнавання електроннограм, одержаних в електронній мікроскопії у режимі мікродифракції, який шляхом оптимізації у процесі навчання параметрів функціонування за інформаційним критерієм дозволяє підвищити достовірність розпізнавання та зменшити чутливість системи до збільшення потужності інформаційного фонду електроннограм. При цьому оброблення електроннограм у полярних координатах дозволяє забезпечити інваріантність алгоритму розпізнавання до їх зсуву та повороту.

2. У перспективі при розширенні інформаційного фонду електроннограм для побудови безпомилкових за навчальною вибіркою вирішальних правил необхідно здійснювати оптимізацію додаткових просторово-часових параметрів функціонування системи розпізнавання.

Список літератури: 1. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов: Пер. с англ. / Под ред. Б.К. Вайнштейна. М.: Наука. 1983. 320 с. 2. Васильев В.И. Распознающие системы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка. 1983. 422 с. 3. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern Classification, second ed. John Wiley & Sons, New York, 2001. 738 p. 4. Shalkoff R.J. Digital image processing and computer vision. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1989. 489 p. 5. Красноясовський А.С. Інформаційний синтез інтелектуальних систем керування, що навчаються: Підхід, що ґрунтується на методі функціонально-статистичних випробувань. Суми: Видавництво СумДУ, 2003. 257 с. 6. Красноясовський А.С., Козинець М.В., Шелехов І.В. Розпізнавання електроннограм в електронній мікроскопії // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2002. Вып. 12. С. 140–146. 7. Довбиш А.С., Мартиненко С.С. Інформаційно-екстремальний метод розпізнавання електроннограм // Вісник СумДУ. Технічні науки, 2009. №2. С. 85-91.

Надійшла до редколегії 14.11.2009

Довбиш Анатолій Степанович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформатики Сумського державного університету. Наукові інтереси: інформаційний аналіз і синтез інтелектуальних систем, що навчаються (самонавчаються). Адреса: Україна, 40035, Суми, вул. Заливна, 7, кв. 40, р.т. (0542) 77-08-27, e-mail: kras@id.sumdu.edu.ua.

Алтиннікова Катерина Василівна, аспірантка кафедри інформатики Сумського державного університету. Наукові інтереси: інформаційний аналіз і синтез інтелектуальних систем, що навчаються (самонавчаються). Захоплення та хобі: туризм та плавання. Р.т. (0542) 77-08-27, e-mail: meja13@mail.ru.

МОДЕЛИ ЯЗЫКА – МОДЕЛЬ СКЛОНЕНИЯ СЛОВСОЧЕТАНИЙ

Демонстрируется механизм моделирования естественного языка средствами и методами алгебры предикатов: строится математическая модель склонения словосочетаний русского языка, являющаяся композицией моделей склонения регулярных имен существительных, полных непряжательных и притяжательных имен прилагательных. Для соединения моделей склонения отдельных частей речи используется метод композиции моделей, формализованных посредством алгебры предикатов, по набору переменных.

Введение. Совершенствование развития машинной обработки естественно-языковой информации является одной из важнейших задач компьютеризации и информатизации [1]. Попытки решить проблему полноценной обработки информации, представленной на естественном языке, путем составления специально предназначенных для этого компьютерных программ, наталкиваются на значительные трудности. Эти попытки предпринимались на протяжении более 50 лет, объемы выполняемых работ катастрофически растут, а до полноценной обработки информации еще очень далеко. Это наглядно видно на качестве современного машинного перевода, распознавания рукописного текста и звучащей речи. По-прежнему крайне ограничены возможности общения человека с компьютером на естественном языке. [2]

Решение этих задач существенно сдерживается недостаточной глубиной формального описания механизмов языка. Компьютер – это математическая машина, в нем не удастся привести в действие неформализованные знания о языке, которыми располагает лингвистика [3]. Если из анализа языка удастся извлечь более доскональный алгебраический язык, это значительно увеличит возможности разработчиков информационных систем, новых информационных технологий [4]. В 80-х годах был создан такой математический аппарат, он получил название алгебра предикатов. С помощью данного аппарата были математически описаны механизмы склонения отдельных частей речи русского языка: склонение полных непряжательных [3] и притяжательных [5] имен прилагательных, имен существительных субстантивного склонения [6], глаголов [7]. В данной работе представлена математическая модель склонения словосочетаний русского языка, являющаяся композицией моделей склонения регулярных имен существительных, полных непряжательных и притяжательных имен прилагательных.

Цель работы – построить модель склонения словосочетаний. Для достижения поставленной цели следует решить такие задачи: 1) исследовать соответствующий лингвистический материал; 2) задать математическое описание моделей склонения регулярных имен существительных, полных непряжательных и притяжательных имен прилагательных; 3) применить метод композиции моделей, формализованных с помощью алгебры предикатов, по набору переменных к построению модели склонения словосочетаний.

1. Склонение регулярных имен существительных, полных непряжательных и притяжательных имен прилагательных

Процесс склонения имен в грамматиках [8, 9] представляется с помощью *парадигматической* таблицы. В ее ячейках указаны формы слова в зависимости от контекста, в который оно помещено. Тип влияния контекста на окончание слова определяется только значениями грамматических признаков: рода, числа, падежа, признаков одушевленности и архаичности словоформы. Ячейки таблицы пронумерованы таким образом, чтобы каждому типу соответствовало в точности одно имя. В работах [3,5,6] отмечено 28 типов склонения для регулярных имен существительных и полных имен прилагательных.

Существуют слова, которые склоняются по-разному, но многие же слова склоняются однотипно. Все слова одного типа склонения имеют парадигматические таблицы с одними и теми же окончаниями. Всего имеется одиннадцать типов склонения регулярных имен существительных [6], семь типов склонения полных непряжательных имен прилагатель-

ных [3] и четыре типа склонения притяжательных имен прилагательных [5]. У притяжательных и непритяжательных имен прилагательных один тип склонения общий. Каждый тип склонения имеет в точности одно имя (порядковый номер от 1 до 21).

Таким образом, существуют следующие признаки, которые однозначно определяют выбор нужной словоформы: грамматические – *число, падеж, род, признаки одушевленности, архаичности*, лексикографические – *последняя буква основы слова, признак ударности и смягчения слова* для имен существительных и непритяжательных имен прилагательных и *суффикс основы слова* для притяжательных имен прилагательных.

2. Математическое описание склонения регулярных имен существительных, полных непритяжательных и притяжательных имен прилагательных

Для формального описания процесса склонения имен прилагательных и существительных для каждого грамматического и лексикографического признака вводим свою предметную переменную: x_1 – *род* формы слова со значениями М – мужской, Ж – женский, С – средний; x_2 – *число* формы слова со значениями Е – единственное, М – множественное; x_3 – *падеж* формы слова со значениями И – именительный, Р – родительный, Д – дательный, В – винительный, Т – творительный, П – предложный; x_4 – *признак одушевленности* формы слова со значениями О – одушевленный, Н – неодушевленный; x_5 – *признак употребляемости* формы слова со значениями С – современная, А – архаичная; s – суффикс основы слова со значениями * – суффикс отсутствует, ОВ, ЕВ, ЫН, ИН, Н, НИН; y_1 – последняя буква основы слова – Б, В, Д, З, Л, М, Н, П, Р, С, Т, Ф, Г, К, Х, Ж, Ч, Ш, Щ, Ц, А, Е, Й, О, У, Ы, Ю, Я, И; y_2 – *признак ударности основы слова* со значениями У – ударная, Б – безударная основа; *признак смягчения основы слова* – y_3 со значениями М – мягкая основа, Т – твердая основа.

Введем также предметные переменные для обозначения типа влияния контекста, типа склонения и окончания слова: r – *тип влияния контекста* со значениями 1-28, s – *тип склонения* слова со значениями 1-21; z – *окончание* формы слова со значениями: * (окончание отсутствует – нулевое), А, Я, У, Ю, Е, О, Ы, И, Ё, Ъ, Й, ЯЯ, ЮЮ, ЕЕ, ИЕ, ОЙ, ЕЙ, ОМ, ЕМ, ОЮ, ЕЮ, ИЙ, ЫМ, ИМ, ЫЕ, ЫХ, ИХ, АЯ, УЮ, ОЕ, ЫЙ, АМ, АХ, ЯХ, ЕВ, ОВ, ЕМ, ЁВ, ЁЙ, ЁМ, ЁЮ, ЯМ, ОГО, ЕГО, ОМУ, ЕМУ, ЫМИ, ИМИ, АМИ, ЯМИ.

Используя материалы, изложенные в работах [3, 5, 6], зададим модели склонения каждой из частей речи: $\alpha_a = (M_a, P_a)$ – модель склонения полных непритяжательных имен прилагательных, $\alpha_n = (M_n, P_n)$ – модель склонения регулярных имен существительных и $\alpha_{ap} = (M_{ap}, P_{ap})$ – модель склонения притяжательных имен прилагательных.

Обратим внимание на то, что данные модели (M_a, P_a) , $(\alpha \in A, A = \{a, n, pa\})$ являются *многоосновными*, т.е. их носители M_a представимы в виде декартова произведения множеств $M_\alpha = M_{1\alpha} \times M_{2\alpha} \times \dots \times M_{mn}$. Отметим также, что предикат P_a каждой из моделей (M_a, P_a) представим в виде конъюнкции бинарных предикатов $P_\alpha = \bigwedge_{i=1, n} P_{i\alpha}$. Развернутое

описание данных предикатов можно найти в указанных выше работах соответственно. В данный же момент нас интересует общий вид каждой из трех моделей.

Носитель модели для склонения регулярных имен существительных $\alpha_n = (M_n, P_n)$ представим в виде декартова произведения следующих множеств:

$$M_n = M_{x_{1n}} \times M_{x_{2n}} \times M_{x_{3n}} \times M_{x_{4n}} \times M_{x_{5n}} \times M_m \times M_{y_{1n}} \times M_{y_{2n}} \times M_{y_{3n}} \times M_{sn} \times M_{zn}.$$

Множества M_{in} , $i \in V$, $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, s, z\}$ имеют вид:

$$M_{x_{1n}} = \{М, Ж, С\}; M_{x_{2n}} = \{Е, М\}; M_{x_{3n}} = \{И, Р, Д, В, Т, П\}; M_{x_{4n}} = \{О, Н\}; M_{x_{5n}} = \{С, А\}; M_{y_{1n}} = \{Б, В, Д, З, Л, М, П, Т, Ф, Е, Н, Р, С, Ж, Ч, Ш, Щ, Ц, Г, К, Х, А, Й, О, У, Ы, Ю, Я, И\}; M_{y_{2n}} = \{У, Б\}; M_{y_{3n}} = \{Т, М\}; M_{sn} = \{\overline{1}, 1\}; M_m = \{\overline{1}, 25\};$$

$$M_{zn} = \{*, А, Я, У, Ю, Е, О, Ы, И, Ё, Ъ, Й, ЯЯ, ЮЮ, ЕЕ, ИЕ, ОЙ, ЕЙ, ОМ, ЕМ, ОЮ, ЕЮ, ИЙ, ЫМ, ИМ, ЫЕ, ЫХ, ИХ, АЯ, УЮ, ОЕ, ЫЙ, АМ, АХ, ЯХ, ЕВ, ОВ, ЕМ, ЁВ, ЁЙ, ЁМ, ЁЮ, ЯМ, ОГО, ЕГО, ОМУ, ЕМУ, ЫМИ, ИМИ, АМИ, ЯМИ, ЯХ\}$$

Предикат модели P_n имеет вид:

$$P_n(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, s, z) = P_{1n}(x_1, r) \wedge P_{2n}(x_2, r) \wedge P_{3n}(x_3, r) \wedge P_{4n}(x_4, r) \wedge P_{5n}(x_5, r) \wedge \\ \wedge P_{6n}(y_1, s) \wedge P_{7n}(y_2, s) \wedge P_{8n}(y_3, s) \wedge P_{9n}(r, z) \wedge P_{10n}(s, z).$$

Для модели склонения полных непряжательных имен прилагательных $\alpha_a = (M_a, P_a)$ имеем:

$$P_a(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, s, z) = P_{1a}(x_1, r) \wedge P_{2a}(x_2, r) \wedge P_{3a}(x_3, r) \wedge \\ \wedge P_{4a}(x_4, r) \wedge P_{5a}(x_5, r) \wedge P_{6a}(y_1, s) \wedge P_{7a}(y_2, s) \wedge P_{8a}(y_3, s) \wedge P_{9a}(r, z) \wedge P_{10a}(s, z).$$

$$M_a = M_{x_{1a}} \times M_{x_{2a}} \times M_{x_{3a}} \times M_{x_{4a}} \times M_{x_{5a}} \times M_{r_a} \times M_{y_{1a}} \times M_{y_{2a}} \times M_{y_{3a}} \times M_{s_a} \times M_{z_a},$$

где

$$M_{x_{1a}} = \{М, Ж, С\}; M_{x_{2a}} = \{Е, М\}; M_{x_{3a}} = \{И, Р, Д, В, Т, П\}; M_{x_{4a}} = \{О, Н\}; M_{x_{5a}} = \{С, А\}; M_{r_a} = \{\overline{1,19}\}; M_{y_{2a}} = \{У, Б\}; \\ M_{y_{1a}} = \{Б, В, Д, З, Л, М, П, Т, Е, Н, Р, С, Ж, Ч, Ш, Щ, Ц, Г, К, Х\}; M_{y_{3a}} = \{Т, М\}; M_{s_a} = \{\overline{1,21,8}\}; M_{z_a} = \{ААЯЯ, УЮЮ, ЮЮЕЕ \\ ОЕ, ОЙ, ЕЙ, ОМ, ЕМ, ОГО, ЕГО, ОМУ, ЕМУ, ОЮ, ЕЮ, ИЙ, ИМ, ИМ, ИЕ, ИЕ, ИХ, ИХ, ИМИ, ИМИ\}.$$

Для модели склонения притяжательных имен прилагательных $\alpha_{ap} = (M_{ap}, P_{ap})$ предикат модели P_{ap} имеет вид:

$$P_{ap}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, c, s, z) = P_{1ap}(x_1, r) \wedge P_{2ap}(x_2, r) \wedge P_{3ap}(x_3, r) \wedge P_{4ap}(x_4, r) \wedge \\ \wedge P_{5ap}(x_5, r) \wedge P_{6ap}(c, s) \wedge P_{7ap}(r, z) \wedge P_{8ap}(s, z).$$

Носитель модели:

$$M_{ra} = M_{x_{1ra}} \times M_{x_{2ra}} \times M_{x_{3ra}} \times M_{x_{4ra}} \times M_{x_{5ra}} \times M_{r_a} \times M_{c_{ra}} \times M_{s_{ra}} \times M_{z_{ra}}.$$

Множества M_{ira} , $i \in V$, $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, c, s, z\}$ имеют вид:

$$M_{x_{1ra}} = \{М, Ж, С\}; M_{x_{2ra}} = \{Е, М\}; M_{x_{3ra}} = \{И, Р, Д, В, Т, П\}; M_{x_{4ra}} = \{О, Н\}; M_{x_{5ra}} = \{С, А\}; \\ M_{r_a} = \{\overline{1,22}\}; M_{c_{ra}} = \{*, ОВ, ЕВ, ЫН, ИН, Н, НИН\}; M_{s_{ra}} = \{19, 20, 21, 16\}; \\ M_{z_{ra}} = \{*, А, Я, У, ИЕ, ОЙ, ЕЙ, Ю, Е, О, ЯЯ, ЮЮ, ЕЕ, ОМ, ЕМ, ОГО, ЕГО, \\ ОМУ, ЕМУ, ОЮ, ЕЮ, ИЙ, ИМ, ИМ, И, И, ИЕ, ИХ, ИХ, ИМИ, ИМИ\}.$$

3. Математическое описание склонения словосочетаний.

Для построения модели склонения словосочетаний (M, P) , состоящей из регулярных существительных, притяжательных и полных непряжательных прилагательных, используем метод композиции моделей по набору переменных, описанный в работе [10]. Введем набор переменных, несущественных для каждого из предикатов M_α и P_α ($\alpha \in A, A = \{a, n, pa\}$). Основываясь на результатах разложения, приведенных в работе [11], вводим переменные: $p_1 \in M_{p_1}, M_{p_1} = \{п., кр.\}$, обозначающую краткость формы непряжательного имени прилагательного; $p_2 \in M_{p_2}, M_{p_2} = \{\text{непр., пр.}\}$, обозначающую вид имени прилагательного: притяжательного или непряжательного; $p_3 \in M_{p_3}, M_{p_3} = \{\text{прил., сущ.}\}$ – переменная, обозначающая часть речи; $p_4 \in M_{p_4}, M_{p_4} = \{\text{регул., нерег.}\}$ обозначает регулярность имени существительного. Множество M и предикат P модели склонения словосочетаний (M, P) имеют вид:

$$M(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, c, s, z, p_1, p_2, p_3) = \\ = \bigvee_{\alpha_{p_i} \in M_{p_i}, i=1,4} M_{\alpha_{p_1} \alpha_{p_2} \alpha_{p_3} \alpha_{p_4}}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, c, s, z) \wedge p_1^{\alpha_{p_1}} p_2^{\alpha_{p_2}} p_3^{\alpha_{p_3}}; \\ P(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, c, s, z, p_1, p_2, p_3) = \\ = \bigvee_{\alpha_{p_i} \in M_{p_i}, i=1,4} P_{\alpha_{p_1} \alpha_{p_2} \alpha_{p_3} \alpha_{p_4}}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, c, s, z) \wedge p_1^{\alpha_{p_1}} p_2^{\alpha_{p_2}} p_3^{\alpha_{p_3}};$$

С учетом данных формул и приведенного выше описания моделей α_a , α_n и $\alpha_{ар}$ множество M и предикат P модели склонения словосочетаний будут иметь следующий вид:

$$P(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, r, y_1, y_2, y_3, c, s, p, z) = P_1(x_1, r) \wedge P_2(x_2, r) \wedge P_3(x_3, r) \wedge \\ \wedge P_4(x_4, r) \wedge P_5(x_5, r) \wedge P_6(y_1, s) \wedge P_7(y_2, s) \wedge P_8(y_3, s) \wedge P_9(c, s) \wedge P_{10}(r, z) \wedge \\ \wedge P_{11}(s, z) \wedge P_{12}(s, p_1) \wedge P_{13}(s, p_2) \wedge P_{14}(s, p_3); \quad (1)$$

$$M = M_{x_1} \times M_{x_2} \times M_{x_3} \times M_{x_4} \times M_{x_5} \times M_r \times M_c \times M_{y_1} \times M_{y_2} \times M_{y_3} \times M_s \times M_z \times M_{p_1} \times M_{p_2} \times M_{p_3} \times M_{p_4};$$

$$M_{x_1} = \{M, Ж, C\}; M_{x_2} = \{E, M\}; M_{x_3} = \{И, Р, Д, В, Т, П\}; M_{x_4} = \{О, Н\}; M_{x_5} = \{C, A\}; M_r = \{1, 2, 8\}; M_{y_3} = \{Б, В, Д, З, Л, М, Г,$$

П, Т, Ф, Е, Н, Р, С, Ж, Ч, Ш, Щ, Ц, К, Х, А, Й, О, У, Ы, Ю, Я, И\}; $M_{y_3} = \{Б, В, Д, З, Л, М, П, Т, Ф, Е, Н, Р, С, Ж, Ч, Ш, Щ, Ц,$

$$Г, К, Х, А, Й, О, У, Ы, Ю, Я, И\}; M_{y_1} = \{У, Б\}; M_{y_2} = \{Т, М\}; M_c = \{*, ОВ, ЕВ, ЫН, ИН, НИ\}; M_s = \{1, 2\}; M_{p_1} = \{п, кр\};$$

$$M_{p_2} = \{пр, непр\}; M_{p_3} = \{прил, сущ\}; M_z = \{*, А, Я, У, Ю, Е, О, Я, Ю, Ю, Е, Е, И, Е, О, И, Е, О, М, Е, М, О, Г, О, Е, Г, О,$$

О, М, У, Е, М, У, О, Ю, Е, Ю, И, Й, Ы, М, И, М, Ы, И, Ы, Е, Ы, Х, И, Х, Ы, М, И, М, И, М, А, Я, У, Ю, О, Е, Ы, Ы, А, М, А, М, И,

А, Х, Я, Х, Е, В, О, В, Е, М, Ё, Ё, В, Ё, Ё, Ё, М, Ё, Ю, Ы, Я, М, Я, М, И, Ё\}.

Бинарные предикаты в формуле (1) имеют следующий вид:

$$P_1(x_1, r) = x_1^M (r^1 \vee r^6 \vee r^7 \vee r^8 \vee r^9 \vee r^{19} \vee r^{22}) \vee (x_1^M \vee x_1^C) (r^2 \vee r^3 \vee r^4 \vee r^5 \vee r^9 \vee r^{10}) \vee \\ \vee x_1^Ж (r^{11} \vee r^{12} \vee r^{10} \vee r^{13} \vee r^{14} \vee r^{15} \vee r^{16}) \vee x_1^C (r^{17} \vee r^{27} \vee r^{28}) \vee (x_1^Ж \vee x_1^C) (r^{25} \vee r^{26}) \vee \\ \vee (x_1^Ж \vee x_1^M) (r^{18} \vee r^{21}) \vee (x_1^M \vee x_1^Ж \vee x_1^C) (r^{20} \vee r^{23} \vee r^{24});$$

$$P_2(x_2, r) = x_2^E (r^1 \vee r^2 \vee r^3 \vee r^4 \vee r^5 \vee r^6 \vee r^7 \vee r^8 \vee r^9 \vee r^{10} \vee r^{11} \vee r^{12} \vee r^{13} \vee r^{14} \vee \\ \vee r^{15} \vee r^{16} \vee r^{17}) \vee x_2^M (r^{18} \vee r^{19} \vee r^{20} \vee r^{21} \vee r^{22} \vee r^{23} \vee r^{24} \vee r^{25} \vee r^{26} \vee r^{27} \vee r^{28});$$

$$P_3(x_3, r) = x_3^И (r^1 \vee r^{11} \vee r^{18} \vee r^{27}) \vee x_3^P (r^2 \vee r^3 \vee r^{12} \vee r^{19} \vee r^{25}) \vee x_3^Д (r^4 \vee r^5 \vee r^{20}) \vee (x_3^Д \vee x_3^П) r^{13} \vee \\ \vee x_3^Б (r^6 \vee r^7 \vee r^8 \vee r^{14} \vee r^{21} \vee r^{22} \vee r^{26} \vee r^{28}) \vee x_3^Т (r^9 \vee r^{15} \vee r^{16} \vee r^{23}) \vee x_3^П (r^{10} \vee r^{24}) \vee (x_3^И \vee x_3^Б) r^{17};$$

$$P_4(x_4, r) = x_4^Н (r^6 \vee r^{21} \vee r^{28}) \vee x_4^О (r^7 \vee r^8 \vee r^{22} \vee r^{26}) \vee (x_4^Н \vee x_4^О) (r^1 \vee r^2 \vee r^3 \vee r^4 \vee r^5 \vee r^9 \vee r^{10} \vee r^{11} \vee r^{12} \vee \\ \vee r^{13} \vee r^{14} \vee r^{15} \vee r^{16} \vee r^{17} \vee r^{18} \vee r^{19} \vee r^{20} \vee r^{23} \vee r^{24} \vee r^{25} \vee r^{27});$$

$$P_5(x_5, r) = x_5^C (r^2 \vee r^4 \vee r^7 \vee r^{15}) \vee x_5^A (r^3 \vee r^5 \vee r^8 \vee r^{16}) \vee (x_5^C \vee x_5^A) (r^1 \vee r^6 \vee r^9 \vee r^{10} \vee r^{11} \vee \\ \vee r^{12} \vee r^{13} \vee r^{14} \vee r^{17} \vee r^{18} \vee r^{19} \vee r^{20} \vee r^{21} \vee r^{22} \vee r^{23} \vee r^{24} \vee r^{25} \vee r^{26} \vee r^{27} \vee r^{28});$$

$$P_6(y_1, s) = (y_1^Б \vee y_1^В \vee y_1^Д \vee y_1^3 \vee y_1^Л \vee y_1^М \vee y_1^П \vee y_1^Т \vee y_1^Н \vee y_1^Р \vee y_1^С) (s^1 \vee s^2 \vee s^8 \vee s^{12} \vee s^{17}) \vee \\ \vee (y_1^Н \vee y_1^Р \vee y_1^С) s^{16} \vee (y_1^Ж \vee y_1^Ч \vee y_1^Ш \vee y_1^Щ) (s^4 \vee s^9 \vee s^{15} \vee s^{18}) \vee \\ \vee y_1^Ц (s^1 \vee s^5 \vee s^{14}) \vee (y_1^Г \vee y_1^К \vee y_1^Х) (s^3 \vee s^{13} \vee s^{18}) \vee y_1^Ф (s^1 \vee s^2 \vee s^8) \vee y_1^И (s^7 \vee s^{11}) \vee \\ \vee (y_1^А \vee y_1^Й \vee y_1^О \vee y_1^У \vee y_1^Ы \vee y_1^Ю \vee y_1^Я) (s^6 \vee s^{10});$$

$$P_7(y_2, s) = y_2^У (s^2 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^6 \vee s^7 \vee s^{12} \vee s^{13} \vee s^{14} \vee s^{15} \vee s^{16}) \vee (y_2^У \vee y_2^Б) (s^1 \vee s^3) \vee \\ \vee y_2^Б (s^8 \vee s^9 \vee s^{10} \vee s^{11} \vee s^{17} \vee s^{18});$$

$$P_8(y_3, s) = y_3^Т (s^1 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^9 \vee s^{12} \vee s^{14} \vee s^{17} \vee s^{18}) \vee y_3^М (s^2 \vee s^6 \vee \\ \vee s^7 \vee s^8 \vee s^{10} \vee s^{11} \vee s^{13} \vee s^{15} \vee s^{16});$$

$$P_9(c, s) = (c^{ИН} \vee c^{НИН}) s^{19} \vee c^* s^{21} \vee c^H s^{16} (c^{ОВ} \vee c^{ЕВ} \vee c^{ЫН}) s^{20};$$

$$P_{12}(p_1, s) = p_1^{\text{полн}}(s^{12} \vee s^{13} \vee s^{14} \vee s^{15} \vee s^{16} \vee s^{17} \vee s^{18} \vee s^{19} \vee s^{20} \vee s^{21}) \vee p_1^{\text{кр}}(t^1 \vee t^2 \vee \dots \vee t^k),$$

где $t_i, i = \overline{1, k}$ – типы склонения кратких непритяжательных имен прилагательных;

$$\begin{aligned} P_{10}(r, z) = & (r^1 \vee r^6)(z^* \vee z^b \vee z^й \vee z^ИЙ \vee z^БЙ \vee z^ОЙ) \vee (r^2 \vee r^3 \vee r^7 \vee r^8)(z^A \vee z^Я \vee z^ОГО \vee z^ЕГО) \vee \\ & \vee (r^4 \vee r^5)(z^y \vee z^Ю \vee z^ОМУ \vee z^ЕМУ) \vee r^9(z^БЫМ \vee z^ИМ \vee z^ОМ \vee z^ЕМ \vee z^ЁМ) \vee \\ & \vee r^{10}(z^E \vee z^И \vee z^ОМ \vee z^ЕМ) \vee r^{11}(z^A \vee z^Я \vee z^АЯ \vee z^ЯЯ) \vee r^{12}z^Ы \vee (r^{12} \vee r^{13})(z^E \vee z^И \vee z^ОЙ \vee z^ЕЙ) \vee \\ & \vee r^{14}(z^y \vee z^Ю \vee z^ЮЮ \vee z^УЮ) \vee r^{15}(z^ОЙ \vee z^ЕЙ \vee z^ЁЙ) \vee r^{16}(z^ОЮ \vee z^ЕЮ \vee z^ЁЮ) \vee r^{17}(z^O \vee z^E \vee z^EE \vee z^OE) \vee \\ & \vee (r^{18} \vee r^{21})(z^Ы \vee z^И \vee z^ИЕ \vee z^БЕ) \vee (r^{19} \vee r^{22})(z^ЫХ \vee z^ИХ \vee z^ОВ \vee z^ЕВ \vee z^ЁВ \vee z^ЕЙ) \vee \\ & \vee r^{20}(z^БЫМ \vee z^ИМ \vee z^АМ \vee z^ЯМ) \vee r^{23}(z^БЫМИ \vee z^ИМИ \vee z^АМИ \vee z^ЯМИ) \vee r^{20}(z^БЫМ \vee z^ИМ \vee z^АМ \vee z^ЯМ) \vee \\ & \vee r^{23}(z^БЫМИ \vee z^ИМИ \vee z^АМИ \vee z^ЯМИ) \vee r^{24}(z^ЫХ \vee z^ИХ \vee z^АХ \vee z^ЯХ) \vee \\ & \vee (r^{25} \vee r^{26})(z^* \vee z^b \vee z^й \vee z^ИХ \vee z^ЫХ \vee z^ЕЙ) \vee (r^{27} \vee r^{28})(z^Ы \vee z^И \vee z^A \vee z^Я \vee z^ИЕ \vee z^БЕ); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{11}(s, z) = & (s^1 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^9 \vee s^{19} \vee s^{20}) \wedge (z^* \vee z^A \vee z^y) \vee (s^1 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^9) \wedge \\ & \wedge (z^AM \vee z^АМИ \vee z^AX) \vee (s^1 \vee s^3 \vee s^{19} \vee s^{20})z^O \vee (s^1 \vee s^3)z^OB \vee (s^1 \vee s^3 \vee s^9 \vee s^{12} \vee s^{13} \vee \\ & \vee s^{18} \vee s^{19} \vee s^{20})(z^ОЙ \vee z^ОМ \vee z^ОЮ) \vee (s^1 \vee s^5 \vee s^{19} \vee s^{20})z^Ы \vee (s^3 \vee s^4 \vee s^2 \vee s^6 \vee s^7 \vee \\ & \vee s^8 \vee s^9 \vee s^{10} \vee s^{11} \vee s^{21})z^И \vee (s^2 \vee s^8)z^b \vee (s^2 \vee s^6 \vee s^7 \vee s^8 \vee s^{10} \vee s^{11}) \wedge \\ & \wedge (z^Я \vee z^Ю \vee z^ЯМ \vee z^ЯМИ \vee z^ЯХ) \vee (s^1 \vee s^2 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^6 \vee s^7 \vee s^{14} \vee s^{15} \vee s^{16} \vee s^{21}) \wedge \\ & \wedge (z^EM \vee z^ЕЮ) \vee (s^8 \vee s^{10})(z^ЁМ \vee z^ЁЮ \vee z^ЁЙ) \vee (s^5 \vee s^6 \vee s^7)z^EB \vee \\ & \vee (s^1 \vee s^2 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^6 \vee s^7 \vee s^8 \vee s^9 \vee s^{11} \vee s^{21})(z^ЕЙ \vee z^E) \vee (s^6 \vee s^7 \vee s^{10} \vee s^{11})z^й \vee \\ & \vee s^{10}z^E \vee (s^{10} \vee s^{11})z^ЁВ \vee s^{11}(z^ЁМ \vee z^ЕЮ) \vee (s^{12} \vee s^{14})z^БЫЙ \vee (s^{12} \vee s^{14} \vee s^{17} \vee s^{19} \vee s^{20}) \wedge \\ & \wedge (z^ЫХ \vee z^БЫМ \vee z^БЫМИ) \vee (s^{12} \vee s^{14} \vee s^{17})z^БЕ \vee (s^{12} \vee s^{14} \vee s^{13} \vee s^{15} \vee s^{17} \vee s^{18}) \wedge \\ & \wedge (z^АЯ \vee z^УЮ) \vee (s^{12} \vee s^{13} \vee s^{17} \vee s^{18}) \wedge (z^OE \vee z^ОГО \vee z^ОМУ) \vee s^{19}(z^ОГО \vee z^ОМУ) \vee \\ & \vee (s^{13} \vee s^{15} \vee s^{16} \vee s^{21})z^ИЙ \vee (s^{13} \vee s^{15} \vee s^{16} \vee s^{18})z^ИЕ \vee (s^{13} \vee s^{15} \vee s^{16} \vee s^{18} \vee s^{21}) \wedge \\ & \wedge (z^ИХ \vee z^ИМ \vee z^ИМИ) \vee (s^{14} \vee s^{15} \vee s^{16})(z^EE \vee z^ЕГО \vee z^ЕМУ \vee z^ЕЙ) \vee \\ & \vee s^{16}(z^ЯЯ \vee z^ЮЮ) \vee s^{21}(z^ЕГО \vee z^ЕМУ) \vee s^{21}(z^Я \vee z^Ю). \end{aligned}$$

$$P_{13}(p_2, s) = p_2^{\text{непр}}(s^{12} \vee s^{13} \vee s^{14} \vee s^{15} \vee s^{17} \vee s^{18}) \vee p_2^{\text{пр}}(s^{19} \vee s^{20} \vee s^{21}) \vee (p_2^{\text{непр}} \vee p_2^{\text{пр}})s^{16};$$

$$\begin{aligned} P_{14}(p_3, s) = & p_3^{\text{сущ}}(s^1 \vee s^2 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^6 \vee s^7 \vee s^8 \vee s^9 \vee s^{10} \vee s^{11}) \vee \\ & \vee p_3^{\text{прил}}(s^{12} \vee s^{13} \vee s^{14} \vee s^{15} \vee s^{16} \vee s^{17} \vee s^{18} \vee s^{19} \vee s^{20} \vee s^{21}). \end{aligned}$$

$$P_{15}(p_4, s) = p_4^{\text{рег}}(s^1 \vee s^2 \vee s^3 \vee s^4 \vee s^5 \vee s^6 \vee s^7 \vee s^8 \vee s^9 \vee s^{10} \vee s^{11}) \vee p_4^{\text{перег}}(r^1 \vee r^2 \vee \dots \vee r^k).$$

Здесь $r^i, i = \overline{1, k}$ – типы склонения нерегулярных имен существительных.

Выводы. Основным результатом работы является построение модели флективной обработки словосочетаний русского языка. *Научная новизна.* На основании метода композиции моделей по набору переменных [10] впервые построена математическая модель склонения словосочетаний русского языка (в предыдущих работах рассматривались лишь разрозненные модели склонения и спряжения именных частей речи). *Практическая значимость.* Предложенный проект является одним из компонентов, которые можно использовать в существующих системах и на пути создания будущих систем автоматической обработки текстовой информации (поддержка и реализация БД, баз знаний, ЭС, системы компьютерного перевода и т.п.), систем автоматизированного проектирования новых информационных технологий и других систем искусственного интеллекта. *Перспективы*

дальнейших исследований в данном направлении состоят в проведении всестороннего анализа алгебологической структуры естественного языка. Построена лишь модель склонения словосочетаний, состоящих из регулярных имен существительных и притяжательных и полных непритяжательных имен прилагательных. Необходимо описать и другие аспекты грамматики: словообразование, грамматика словосочетаний, состоящих из остальных частей речи, и т.д. Далее необходимо было бы объединить полученные модели в одну общую модель, которая будет решать необходимые естественно-языковые задачи.

Список литературы: 1 Широков В. А. Феноменология лексикографических систем. К.: Наук. думка, 2004. 327 с. 2. Шабанов-Кушнарченко Ю.П., Хаханов В.И., Процай Н.Т., Вечирская И.Д., Лецинский В.А., Иванюлов А.А., Обризан В.И. Логическая сеть как технология моделирования естественного языка. Научно-практическая конференция «Информационные технологии – в науку и образование». Харьков, Украина, 21-22 марта 2005. 3. Бондаренко М.Ф., Чикина В.А., Шабанов-Кушнарченко Ю.П. Модели языка // Бионика интеллекта. 2004. №1(61). С.27-37. 4. Четвериков Г.Г. Алгебро-логичні засоби моделювання природної мови. (Повідомлення 1) // Біоніка інтелекту. 2004. №1(61). С.42-45. 5. Процай Н.Т. Модели языка – склонение притяжательных имен прилагательных // Бионика интеллекта. 2004. №2(63). С.58-65. 6. Лецинский В.А. Модели бинарных логических сетей и их применение в искусственном интеллекте. Дисс. ... канд. техн. наук. Х.: ХИРЭ, 2006. 163с. 7. Дударь З.В., Иванюлов А.А., Климушев В.В., Обризан В.И. Логическая сеть для модели глагольной флексии русского языка // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Харьков. 2006. № 4/2. С. 80-89. 8. Зализняк А. А. Грамматический словарь русского языка. М.: Русский язык, 1977. 879 с. 9. Грамматика русского языка. М.: АН СССР, 1960, т. 1, 719 с.; т. 2, ч. 1, 702 с.; ч. 2, 440 с. 10. Процай Н.Т. О методе композиции моделей // Вестник «ХПИ». 2008. № 13. С.45 – 49. 11. Процай Н.Т. Метод декомпозиции моделей по набору переменных // Сб. трудов конференции Современные научные достижения. 01-14 февраля 2008 г. С. 30–33

Поступила в редколлегию 20.12.2009

Процай Наталья Тимофеевна, ассистент кафедры компьютерной математики и математического моделирования НТУ «ХПИ». Научные интересы: алгебраическая логика, модели языка. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел. 707-63-51.

УДК 681.326:519.613

С.А. ЗАЙЧЕНКО, Е.И. ЛИТВИНОВА, И.А. ПОБЕЖЕНКО

МОДЕЛЬ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЫСОКОУРОВНЕВЫХ ОПЕРАТОРОВ LTL-ЛОГИКИ

На основе анализа математического аппарата линейной темпоральной логики в применении к верификации цифровых систем разрабатывается модель интерпретации высокоуровневых операторов LTL-логики для проверки справедливости формул во время симуляции – режим глобального времени.

1. Введение

Актуальность исследования. Наиболее сложной и дорогостоящей составляющей современного цикла проектирования систем на кристаллах (SoC – System-on-Chip) является функциональная верификация. Под функциональной верификацией понимают процесс поиска, обнаружения и устранения ошибок в модели системы, приводящих к нарушению спецификации. Согласно мнению экспертов индустрии автоматизации проектирования электроники (EDA – Electronic Design Automation), при использовании архитектуры ASIC (Application Specific Integrated Circuit) доля верификации в проектных затратах превышает 70%. Такая высокая стоимость достижения качества системы определяется многими аспектами:

- неизбежным большим количеством ошибок и недоработок, допускаемых инженерами в модели системы, в тестах, а также непосредственно в спецификации системы;
- несовершенством средств диагностирования в системах автоматизации, затрудняющим локализацию и устранение причины возникновения ошибки;
- недостаточной производительностью и точностью программных систем автоматизации, повышение качества которых растет в несколько раз медленнее увеличения сложности обрабатываемых моделей.

Комплексное решение перечисленных проблем, способное в значительной степени снизить затраты на верификацию систем на кристалле, есть ключевая настоящая задача индустрии EDA. Согласно материалам публикаций ведущих мировых компаний данной сферы (Cadence Design Systems, Synopsys Inc., Mentor Graphics Corporation, IBM, Intel, Sun Microsystems, Cisco Systems Inc., Atrenta, Aldec Inc.), существенные их усилия сосредоточены на выработке эффективных комплексных методов верификации систем, способных:

- в несколько раз снизить вероятность возникновения ошибок за счет уменьшения участия человека в рутинных элементах процесса;
- обеспечить обнаружение и диагностирование абсолютного большинства допущенных неточностей на ранних фазах проектирования для сокращения времени устранения возникшей проблемы;
- на порядок улучшить производительность и надежность систем автоматизации верификации за счет повышения уровня абстракции как самих моделей, так и тестовых воздействий.

Цель исследования – существенное уменьшение стоимости функциональной верификации систем на кристаллах при помощи новых моделей и методов проверки темпоральных ассерций в рамках процесса анализа поведения системы под влиянием тестовых воздействий.

Для достижения цели необходимо решить следующие *задачи*: 1. Анализ и состояние проблемы в части описания математического аппарата линейной темпоральной логики в применении к верификации цифровых систем; формальной семантики языковых стандартов описания ассерций (распространенные языки описания ассерций и их свойства). 2. Анализ режимов интерпретации локального и глобального времени. 3. Разработка модели интерпретации высокоуровневых операторов LTL-логики для проверки справедливости формул во время симуляции – режим глобального времени.

Объект исследования – проектируемая цифровая система, содержащая миллионы вентилях, реализуемая в кристаллах программируемой логики, представленная на HDL-языках описания аппаратуры, а также программная среда и набор тестов, обеспечивающих комплексную функциональную верификацию модели проектируемой системы.

Предмет исследования – модели и методы функциональной верификации проектируемой цифровой системы, использующие линейную темпоральную логику и языки описания ассерций, а также программные средства, осуществляющие процесс функциональной верификации методом имитационного моделирования.

2. Математический аппарат линейной темпоральной логики в применении к верификации цифровых систем

2.1. Моделирование параллельных систем и ограничений. Любая система на кристалле является параллельной (concurrent). В общем случае под параллельными понимаются программно-аппаратные системы с несколькими параллельными процессами, которые непрерывно обмениваются сообщениями с внешней средой. Для таких цифровых систем характерны следующие признаки:

параллельность – компоненты системы могут одновременно выполнять различные задачи и периодически обмениваться друг с другом синхронизирующими сообщениями;

недетерминированность – следующее состояние системы либо неизвестно, либо частично известно;

бесконечность существования – в отличие от функциональных систем, параллельная система не обязательно имеет конечное состояние.

Большинство цифровых аппаратных систем имеют конечное число состояний, определяющееся набором достижимых значений всех сигналов. В отличие от аппаратных систем, большинство программных систем, где применяются динамические структуры данных, имеют бесконечное число состояний, что значительно усложняет процессы их верификации.

Задача верификации параллельных систем состоит в доказательстве наличия или отсутствия в их работе определенных последовательностей состояний, называемых ограничениями. Если число состояний конечно, представляется возможным формальное доказательство удовлетворения системой заданных ограничений.

Очевидно, анализ работы параллельных систем также как и анализ ограничений предполагают формальные рассуждения об изменении состояния системы с течением времени. Формальное утверждение о том, что система всегда или в выбранном интервале времени удовлетворяет заданному логико-временному ограничению последовательностей состояний, называется темпоральным утверждением или темпоральной ассерцией. Необходимы формальные механизмы для моделирования параллельных систем и механизмы описания ассерций.

В целях верификации модели параллельных систем удобно представлять в виде структур Крипке [1]:

$$M = (\Sigma : 2^D \cup \{\text{true}, \text{false}\}, S, S_0, R, L), \quad (1)$$

где M – моделируемая система; Σ – алфавит системы, или множество всех атомарных высказываний (все возможные значения переменных системы D); S – множество состояний системы; $S_0 \subseteq S$ – начальное состояние системы; $R \subseteq S \times S$ – функция переходов между каждым из состояний; $L : S \times \Sigma \rightarrow \{0,1\}$ – функция, называемая оценкой, сопоставляющая каждое из состояний с подмножеством атомарных высказываний, справедливым для данного состояния. Выражение вида $L(s \in S, p \in \Sigma) = 1$ означает, что атомарное высказывание p истинно в состоянии s , а выражение вида $L(s \in S, p \in \Sigma) = 0$ означает противоположное.

Каждой реальной вычислительной процедуре в рассматриваемой параллельной системе должен соответствовать некоторый вычислительный путь в рамках структуры (1). Такой вычислительный путь называется справедливым (fair). Вычислительный путь, не имеющий соответствующей процедуры в рассматриваемой системе, называется несправедливым (unfair). Задачей верификации является доказательство корректности поведения систем исключительно на множестве достижимых вычислительных путей. В определенных случаях задача верификации может быть применена не ко всей системе (1), а лишь к ее подмножеству. Интересующая часть модели в таких случаях выделяется при помощи ограничений справедливости (fairness constraints).

По своей природе структура Крипке является конечным автоматом, у которого отсутствуют входные переменные, выходы, а функция перехода R зависит только от внутреннего состояния. В литературе подробно описаны алгоритмы перехода от традиционных моделей конечных автоматов к структурам Крипке и алгоритмы обратного перехода [2].

2.2. Становление математического аппарата темпоральной логики. Проблема определения понятия времени является одним из центральных философских вопросов, и попытки формализации логики, учитывающей время, известны со времен древнегреческих философов. Среди основных характеристик, описанных в литературе моделей времени, выделяют следующие:

- дискретность или непрерывность времени;
- элементарная единица времени: миг или интервал;
- конечность или бесконечность времени;
- наличие/отсутствие начального и конечного момента времени;
- последовательность или цикличность времени;
- линейный или древовидный характер времени;
- направление времени (вперед, назад);
- относительность или абсолютность времени.

Наиболее распространены два принципиальных типа моделей времени, различающиеся по выбранному типу элементарной временной единицы: точечные и интервальные. Точечная модель представляет собой множество моментов времени (миги) и допускает операции сравнения между моментами (равенство, ранее, позднее). Точечная модель дискретна, транзитивна, ациклична и бесконечна. Для рассуждения о прошлых и будущих событиях в точечной модели используется некоторая нулевая точка, соответствующая текущему времени. Интервальная модель допускает не только операции сравнения между элементарными промежутками времени, а также разрешает анализ пересечений и включений

интервалов. Интервальная модель может быть как дискретной, так и непрерывной, она также ациклична и бесконечна.

Современная темпоральная логика в ее применении к компьютерным наукам была описана Pnueli в 1977 г. [3], в работах которого было предложено применять набор операторов моделирования времени для задания спецификаций и верификации сложных параллельных систем. Такая логика относится к классу точечных моделей, течение времени считается дискретным.

Темпоральная логика позволяет задать порядок событий во времени без внесения понятия времени в явном виде. Применение темпоральной логики для описания ограничений параллельных систем показало свою эффективность в таких распространенных задачах как:

- спецификация требований к параллельным системам;
- планирование запуска программных процессов и потоков под управлением операционной системы;
- синхронизация работы параллельных процессов;
- верификация цифровых систем.

2.3. Основные классы и операторы темпоральной логики. Существует два основных класса темпоральной логики, применяемых для задач верификации систем с конечным числом состояний:

- линейная темпоральная логика (LTL – Linear Temporal Logic);
- ветвящаяся темпоральная логика (CTL – Computation Tree Logic).

Линейная темпоральная логика одновременно рассматривает лишь один возможный сценарий изменения будущих состояний системы, центральным понятием здесь является вычислительный путь. Ветвящаяся темпоральная логика одновременно рассматривает несколько возможных вариантов изменения будущих состояний системы, центральным объектом здесь является дерево вычислительных процессов.

В применении к функциональной верификации систем оба класса темпоральной логики характеризуются различными свойствами. LTL-логика более проста в понимании для пользователя, более естественна при написании формул, так как течение времени имеет линейный характер. Кроме того, линейное представление времени сочетается с принципами динамического моделирования системы. CTL-логика более универсальна при описании вычислительных процессов и ограничений общего плана. Она удобна для методов формальной верификации – для проверки свойств и доказательства дедуктивных теорем. Однако древовидное представление течения времени (несколько сценариев будущего) не подходит для методов динамической верификации, где выбор конкретных вычислительных путей определяется не методом проверки модели, а входной тестовой последовательностью. В данном исследовании рассматривается применение темпоральной логики в рамках процесса имитационного моделирования системы (в HDL-симуляторе), соответственно свойства LTL-логики необходимо рассмотреть более подробно.

2.4. Классификация LTL-ограничений. С точки зрения цели специфицирования различают два принципиальных вида темпоральных ограничений, которые можно задавать при помощи утверждений темпоральной логики:

- инвариантные ограничения (safety) – заданная последовательность состояний никогда не случится (например, ресурс никогда не будет использован двумя процессами одновременно);
- достижимые ограничения (liveness) – желаемая последовательность состояний будет достигнута (например, пришедший запрос когда-нибудь обязательно будет обработан).

Типичным инвариантным ограничением будет формула вида $G(\neg f)$ (нечто плохое не произойдет ни на одном из вычислительных путей), или подобного вида $G(f)$ (некоторое условие безопасности должно соблюдаться для всех вычислительных путей).

В качестве достижимого ограничения наиболее часто может выступать формула вида $F(f)$ (хотя бы в одном из случаев нечто желаемое обязательно будет зафиксировано).

2.5. LTL-ограничения с тактовыми переменными. Модель параллельных систем (1) подразумевает дискретное течение времени при переходе из состояния в состояние, при

котором интервал изменения времени при выполнении перехода не оговаривается. Для верификации реальных систем на кристалле применяется уточненная структура Крипке, учитывающая тактирование. Множество переменных системы здесь разделено на информационные D и тактовые C :

$$M^C = (\Sigma : 2^D \cup \{\text{true}, \text{false}\}, C, S, S_0, R, L, \Delta), \quad (2)$$

где Σ, D, S, S_0, R, L унаследованы из базовой структуры (1); C – множество тактовых переменных; $\Delta : S \times S \times C, \Delta \geq 0$ – функция временного сдвига, задающая изменение тактовой переменной $c \in C$ при переходе между смежными состояниями. Переход $s_i \Rightarrow s_j$ называется тактовым, если изменяется хотя бы одна тактовая переменная:

$$R(s_i, s_j) = 1, \exists c \in C, \Delta(s_i, s_j, c) > 0. \quad (3)$$

Только тактовый переход может изменить параметр времени. Считается, что изменения информационных переменных происходят мгновенно.

Формулы с учетом тактовых переменных рассматривают только те переходы между состояниями вычислительного пути, в которых имеет место сдвиг времени. Для таких формул используется специальная форма записи с указанием тактовой переменной:

$$\pi \models^c f. \quad (4)$$

Вычислительный путь π , для которого выполняется следующее соотношение, называется тактовым циклом относительно тактовой переменной c :

$$\left\{ \begin{array}{l} |\pi| > 0, \\ \pi^{|\pi|-1} \models c, \\ \exists j, 0 \leq j < (|\pi| - 1), \pi^j \not\models c. \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Учет тактовых переменных влияет на семантику некоторых операторов LTL. Например, оператор X в варианте с тактированием рассматривает не любое следующее изменение состояния системы, а только следующий тактовый переход (с точки начала анализа должны быть достигнуты моменты текущего j и следующего k тактового перехода):

$$\pi \models^c X(f) \Rightarrow \exists j, k, 0 \leq j < k < |\pi|, \left\{ \begin{array}{l} \pi_{0..j} \not\models c, \\ \pi_{j..j} \models c, \\ \pi_{j+1..k} \not\models c, \\ \pi_{k..k} \models c, \\ \pi_k / \models^c f \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Семантика остальных темпоральных операторов с учетом тактирования видоизменяется аналогичным образом.

2.6. Формальная проверка LTL-ограничений. Для формальной проверки LTL-ограничений применяют модель недетерминированных автоматов Вьсchi [4]:

$$A = \{Q, \Sigma, \delta, I, F\}, \quad (7)$$

где Q – множество всех состояний системы; Σ – конечный алфавит системы; δ – функция перехода между состояниями по набору утверждений из алфавита; $I \in Q$ и $F \in Q$ – подмножества начальных и конечных (удовлетворяющих) состояний системы соответственно. Пусть имеется слово, представляющее собой последовательность булевых продвижений a_0, a_1, \dots в рамках алфавита системы, такое, что каждому i соответствует некоторое состояние системы $q_i \in Q$, и для всех i выполняется соотношение $(q_i, a_i, q_{i+1}) \in \delta$. Тогда множество $L(A)$ всех возможных слов, порождаемых автоматом A , называется языком, принимаемым автоматом.

Автоматы Вьсchi отличаются от традиционных моделей конечных автоматов по двум принципиальным признакам:

– традиционный конечный автомат способен определить принадлежность моделируемому языку входной последовательности конечной длины; автоматы Вьсchi рассматривают бесконечные последовательности;

– в традиционном варианте модели успешное считывание автоматом входной последовательности определяется завершением процесса в удовлетворяющем состоянии; в варианте автоматов Вьсchi успешным проходом считают ситуацию, когда последовательность проходит через одно из удовлетворяющих состояний бесконечное число раз.

Существует ряд алгоритмов трансформирования любой LTL-формулы к модели автомата Вьсchi [5-7] и минимизации автоматов [8].

Модель верифицируемой системы (1) может быть приведена к виду:

$$\begin{aligned} Q = S, I = S_0, \\ (s \in S, P \in \Sigma, s' \in S) \in \partial \Leftrightarrow (s, s') \in R, L(s) = P. \end{aligned} \quad (8)$$

Задача формального определения удовлетворения системы некоторой LTL-формуле сводится к сопоставлению языков, принимаемых автоматом $L(A_M)$, соответствующим верифицируемой системе, и автоматом $L(A_f)$, сконструированным для LTL-формулы:

$$L(A_M) \subseteq L(A_f). \quad (9)$$

Пересечение двух автоматов Вьсchi осуществляется при помощи операции декартового произведения компонент-множеств. Результирующая модель является двумерным автоматом Вьсchi:

$$\begin{aligned} A' = A_M \times A_{-f} = \{Q', \Sigma', \partial', I', F'\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} Q' = Q_M \times Q_{-f}, \\ \Sigma = \Sigma_M \times \Sigma_{-f}, \\ I' = I_M \times I_{-f}, \\ F' = F_M \times F_{-f}, \\ \partial' = (\partial_M, \partial_{-f}). \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Более рациональным вариантом с точки зрения вычислительной сложности является трансформация задачи (10) к задаче пересечения $L(A_M)$ с автоматом, обратным интересующей LTL-формуле [9]. Очевидно, если существует хотя бы одна последовательность событий, принимаемая как автоматом системы, так и автоматом обратной формулы, то система не удовлетворяет интересующему свойству:

$$L(A_M) \cap L(A_{-f}) = L(A_M \cap A_{-f}) = L(A_M \times A_{-f}) = \emptyset. \quad (11)$$

Система M удовлетворяет LTL-формуле f , если язык автомата (10) не принимает ни одной входной последовательности. Чтобы опровергнуть данный факт (т.е. доказать несоблюдение системой интересующего ограничения) с учетом особенностей условия удовлетворения автоматов Вьсchi, требуется найти в автомате A' хотя бы один цикл, для которого выполняется совокупность следующих условий:

1. Достижимость цикла из множества начальных состояний I' .
2. Наличие в цикле хотя бы одного состояния, принадлежащего F' .
3. Сильная связность цикла, т.е. из каждого входящего в цикл состояния должен существовать хотя бы один непустой путь в каждое из других состояний цикла.

Последнее условие является необходимым для бесконечного прохождения бесконечной последовательности через удовлетворяющее состояние. Обнаруженный цикл, удовлетворяющий перечисленным условиям, и путь из начального состояния к данному циклу составляют верификационный контр-пример, т.е. вычислительный путь, опровергающий свойство системы. Анализ вычислительной сложности формальной проверки LTL-ограничений, подробно рассмотренный в работе [9], демонстрирует нелинейную зависимость времени проверки от числа состояний системы и структурной сложности интересующей LTL-формулы (“взрыв состояний” – state explosion) [10]:

$$O(L(A_M \times A_{-f})) = O(|Q_M| * 2^{|Q_{-f}|}). \quad (12)$$

Такая высокая стоимость формальной проверки накладывает существенные ограничения на применимость метода к крупным моделям. При оценке применимости формальных методов проверки следует также учесть факт экспоненциального роста количества состояний при переводе формулы LTL в автоматную модель $A_{\neg f}$. Производительность рассмотренного метода существенно улучшается определением ограничений справедливости, исключающих из рассмотрения недостижимые состояния.

2.7. Проверка LTL-ограничений динамическими методами. Альтернативным методом верификации LTL-формул является проверка выполнения темпоральных ограничений во время имитационного моделирования системы (симуляции) [11]. Требуется исполняемое представление верифицируемой системы (1), например, скомпилированная модель на языках описания аппаратуры – Verilog/VHDL. Представляется возможным построить некоторый наблюдающий конечный автомат, реализующий LTL-формулу, подключаемый к программесимулятору, и сигнализирующий о нарушениях ограничений. Такой тип верификации обладает рядом преимуществ и недостатков по сравнению с формальными методами:

1) Проблема “взрыва состояний” ограничивает практическую применимость формальных методов на больших компонентах ($>2^{20}$ состояний). Динамические методы не моделируют пространство состояний в явном виде, поэтому применимы к компонентам на несколько порядков более сложным, чем предельные компоненты формальных методов.

2) Формальные методы требуют построения моделей на высоком уровне абстракции. Возникают проблемы адекватности и точности этих абстракций. Модели для динамических методов могут быть существенно более детализированными.

3) Формальные методы гарантируют полное покрытие достижимых состояний системы. Покрытие при использовании динамических методов на несколько порядков ниже, поскольку оно определяется внешним тестом, исполняемым симулятором.

4) Формальные методы гарантируют 100% точность обнаружения нарушений или подтверждения удовлетворения заданных ограничений на вычислительных путях бесконечной длины. Динамические методы могут обнаружить лишь нарушение инвариантного ограничения или достижение желаемой последовательности в рассмотренных симуляцией отрезках вычислительных путей. Если анализ ограничения не завершен по окончании теста, симуляция не может гарантировать, что свойство будет выполняться или опровергаться при расширении теста дополнительными векторами.

Для проверки LTL-формулы во время симуляции должен быть построен традиционный детерминированный конечный автомат:

$$A = \{\Sigma, Q, q_0, F, \delta\}, \quad (13)$$

где Σ – алфавит системы; Q – множество всех состояний автомата; $q_0 \in Q$ – единственное начальное состояние; $F \subseteq Q$ – множество конечных состояний; $\delta: Q \times \Sigma$ – функция переходов. Нарушением инвариантного ограничения будет считаться попадание автомата в одно из состояний F , так же как и успешный анализ желаемой последовательности. Непопадание в такую ситуацию по завершению анализа означает незавершенный анализ, и может быть разрешено в зависимости от выбранных ограничений условной справедливости.

Поскольку автомат (13) определен как детерминированный, возможные опциональные ветвления в темпоральных ограничениях должны преобразовываться в набор индивидуальных свойств, не имеющих ветвления. В таком случае результат верификации определяется конъюнкцией индивидуальных вычислений в случае инвариантного ограничения и дизъюнкцией в случае поиска желаемой последовательности.

Проверка LTL-формул во время симуляции характеризуется линейной сложностью относительно количества состояний в наблюдающем автомате и не зависит от сложности верифицируемой системы, что существенно лучше, чем оценка (12) для формальных методов. Однако следует учесть, что проблема “взрыва состояний” проявляется и в динамических методах: в общем случае количество состояний в автомате (13) для LTL-операторов растет экспоненциально в зависимости от структурной сложности формулы.

3. Формальная семантика языковых стандартов описания ассерций (распространенные языки описания ассерций и их свойства)

На прикладном уровне спецификация ограничений, использующих математический аппарат линейной темпоральной логики, описанный выше, осуществляется при помощи языков описания ассерций. Первое поколение LTL-языков зародилось в рамках исследовательских работ, ориентированных на методы формальной верификации [12, 13].

Несколько позже ведущими EDA-компаниями был предложен ряд языков, направленных на использование LTL для проверки свойств системы во время симуляции. Важной особенностью этих языков являлась простота стыковки верификационных моделей с сигналами реальной HDL-модели проверяемой цифровой системы. К наиболее известным языкам этого поколения относятся:

– Язык OpenVera Assertions (OVA), предложенный компанией Synopsys как часть унифицированного маршрута функциональной верификации OpenVera, реализованного в симуляторе VCS [14]. Данный язык полностью ориентировался на динамические методы. Внешне синтаксис языка слабо напоминает формальные описания и более похож на Verilog. В настоящее время язык постепенно исчезает с EDA-рынка.

– Язык Sugar, позднее переименованный в Property Specification Language (PSL), предложенный компанией IBM. Данный язык в равной степени ориентируется как на динамические, так и на формальные методы. Кроме того, в PSL существуют конструкции не только LTL, но и CTL-логики. PSL предоставляет различные нотации для булевого уровня (элементарные выражения могут быть заданы на языке Verilog, VHDL, SystemC, SystemVerilog, GDL по желанию пользователя). Также предлагаются альтернативные нотации для темпоральных операторов: предоставляется выбор между математическим (операторы называются F, X, U, G, также как и в оригинальной математической нотации) и прикладным стилями (операторы именуются ключевыми словами на английском языке). В 2005г. язык был стандартизирован, и в настоящее время известен как IEEE-1850 Property Specification Language.

– Язык SystemVerilog (раздел Concurrent Assertions), предложенный EDA-консорциумом Accellera, называемый HDVL-языком (Hardware Description & Verification Language). Наиболее мощный язык с точки зрения предоставляемых языковых конструкций и степени интеграции верификационной модели с моделью проверяемой цифровой системы. Изначально ориентировался только на динамические методы, однако в результате стандартизации в виде документа IEEE-1800 в 2005г., а также в предстоящей в 2009г. редакции в язык были введены конструкции для формальных методов. В перспективе язык может вытеснить остальные LTL-языки с рынка EDA, поскольку продвигается большинством лидеров рынка.

В данной работе большая часть описания LTL-ассерций использует язык PSL в силу близости его синтаксиса к математической форме. Большинство конструкций темпорального уровня из языков OVA и SystemVerilog подобны конструкциям PSL по сути и отличаются, в основном, стилем синтаксиса и стыковки с HDL-моделями.

Во всех трех языках выделяют три уровня иерархии модели верификации:

1. Булев уровень (Boolean Layer) – уровень примитивных логических выражений, исчисляемых за один временной слот, являющихся строительными примитивами для конструкций других уровней.

2. Темпоральный уровень (Temporal Layer) – уровень последовательностей и темпоральных свойств, задающих отношения между сигналами с течением времени, являющийся набором последовательностных регулярных выражений (SERE – Sequential Extended Regular Expressions).

3. Верификационный уровень (Verification Layer) – уровень верификационных директив, определяющих предназначение описываемых темпоральных формул, обеспечивающий интеграцию верификационной модели с проверяемой цифровой системой, другими компонентами тест-бенча.

В случае динамических методов анализ языковых конструкций позволяет ответить – выполняется ли некоторая темпоральная формула верифицируемой системой на наблюдаемом линейном отрезке вычислительного пути, заданном выполненным тестом.

Последовательностные регулярные выражения PSL. Ключевой темпоральной абстракцией в языке PSL являются последовательностные регулярные выражения (SERE): любое булево выражение, включая константы, является SERE; если c – булево выражение, а r_1, r_2 – SERE, то следующие выражения также являются SERE; $\{r\}$ – скобки, влияющие на приоритет темпоральных операторов; $\{r_1; r_2\}$ – непересекающаяся конкатенация; $\{r_1 : r_2\}$ – пересекающаяся конкатенация, или склеивание; $\{r_1\} | \{r_2\}$, $\{r_1\} \& \{r_2\}$, $\{r_1\} \& \& \{r_2\}$ – последовательностные логические операторы OR, AND, INTERSECT соответственно; $[*0]$ – специальное SERE, означающее пустой вычислительный путь; $r[*]$ – бесконечная репетиция SERE; $r@c$ – оператор присвоения тактового контекста.

Ниже представлена формальная семантика конструкций SERE на некотором конечном вычислительном пути π :

1. Скобки влияют лишь на приоритет последовательностных операторов, и не влияют на интерпретацию выражения-операнда r :

$$\pi \models \{r\} \Leftrightarrow \pi \models r. \quad (14)$$

2. Булево выражение b справедливо на отрезке единичной длины, если оно выполняется в единственном состоянии системы на данном пути:

$$\pi \models b \Leftrightarrow |\pi| = 1, \pi^0 \models b. \quad (15)$$

3. Непересекающаяся конкатенация SERE справедлива, если π можно представить как конкатенацию двух отрезков, на каждом из которых по отдельности справедливы SERE-операнды:

$$\pi \models \{r_1; r_2\} \Leftrightarrow \exists \pi', \pi'', \begin{cases} \pi = \pi' \pi'', \\ \pi' \models r_1, \pi'' \models r_2. \end{cases} \quad (16)$$

4. Пересекающаяся конкатенация SERE подобна непересекающейся, с той разницей, что первый отрезок, составляющий конкатенацию, имеет единственную общую точку со вторым отрезком:

$$\pi \models \{r_1 : r_2\} \Leftrightarrow \exists \pi', \pi'', l, \begin{cases} \pi = \pi' l \pi'', |l| = 1, \\ \pi' l \models r_1, \pi'' l \models r_2. \end{cases} \quad (17)$$

5. Последовательностная конъюнкция и дизъюнкция SERE определяются результатами вычислений по отдельности, а для конъюнкции накладывается дополнительное ограничение на одновременное завершение анализа операндов:

$$\begin{aligned} \pi \models r_1 | r_2 &\Leftrightarrow (\pi \models r_1) \vee (\pi \models r_2), \\ \pi \models r_1 \& \& r_2 &\Leftrightarrow (\pi \models r_1) \wedge (\pi \models r_2). \end{aligned} \quad (18)$$

6. Оператор пересечения последовательностей подобен конъюнкции последовательностей, однако здесь снимается требование одновременности завершения анализа формул-операндов:

$$\pi \models r_1 \& r_2 \Leftrightarrow \pi \models \{\{r_1\} \& \& \{r_2; \text{true}[*]\}\} | \{\{r_1; \text{true}[*]\} \& \& \{r_2\}\}. \quad (19)$$

7. Оператор включения подпоследовательности в последовательность:

$$\pi \models \{r_1\} \text{within} \{r_2\} \Leftrightarrow \{\{\text{true}[*]\}; r_1; [\text{true}[*]]\} \& \& \{r_2\}. \quad (20)$$

8. Бесконечная репетиция выполняется либо на пустом отрезке, либо на конкатенации двух отрезков, на первом из которых выполняется формула-операнд, а на втором отрезке репетиция справедлива по рекурсии:

$$\pi \equiv r[*] \Leftrightarrow \begin{cases} \pi \equiv [*0], \\ \exists \pi', \pi'', \begin{cases} \pi = \pi' \pi'', \pi' \neq \varepsilon, \\ \pi' \equiv r, \\ \pi'' \equiv r[*] \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

Наиболее часто применяемыми регулярными выражениями являются непересекающиеся конкатенации (называемые операторами временного сдвига в SystemVerilog и OVA), а также репетиции.

Целое константное выражение, задающее число итераций в репетициях, называется репликатором. При помощи репетиций удобно моделировать часто требуемые вычисления циклического характера, поэтому в PSL введен богатый синтаксический набор производных формул, основанных на репетициях. По принципу временного сдвига между итерациями репетиции делятся на:

- консекьютивные последовательностные репетиции $r[*n]$ – итерации сменяются с использованием оператора непересекающейся конкатенации;
- неконсекьютивные булевы репетиции $b[=n]$ – итерации с успешным выполнением булевого выражения могут быть разделены произвольным числом незначащих тактов;
- галолирующие булевы репетиции $b[\rightarrow]$ – итерации с незначащими интервалами произвольной длины, обязательно завершающимися успешным выполнением булевого операнда.

С точки зрения детерминированности количества итераций репетиции могут иметь одиночный или интервальный репликатор, означающий возможное ветвление. Репликаторы, в свою очередь, могут иметь значения 0 (операнд не будет выполнен ни разу), любое конечное целое число итераций, а также значение бесконечности (операнд повторяется неограниченное число раз).

4. Режимы интерпретации локального и глобального времени

Очевидно, многие предоставляемые языком PSL темпоральные свойства в неявном виде подразумевают параллельный анализ пересекающихся последовательностей, в том числе с возможными вариантами ветвления времени. Такая выразительность семантики необходима для адекватного отображения требований спецификации, выраженных естественным языком, и хорошо согласуется с формальными методами. При интерпретации формул во время симуляции, напротив, наиболее благоприятным случаем является линейная последовательность состояний.

Суть проблемы заключается в экспоненциальном росте количества состояний при трансформировании языковых конструкций к модели детерминированного автомата (13). Одной из характерных конструкций, приводящих к существенному расширению компонентов автомата, является отрицание продвижения последовательности. Пусть имеется простейшая последовательность $r = \{a;b;c\}$. На рис. 1,а показан эквивалентный автомат, а на рис. 1,б – его комплемент $r' = -(\{a;b;c\})$. Поскольку отрицание последовательности нужно рассматривать как несоблюдение условий в любом из его состояний, то из каждого состояния, кроме завершающего, следует по дополнительному переходу к конечному состоянию:

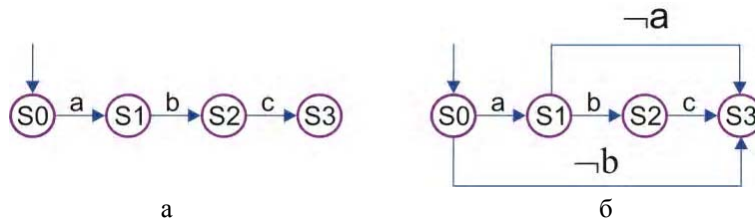


Рис. 1. Комплементирование последовательности в виде автомата

Но наибольшую степень роста компонентов автомата дают операторы G, F и U, представление которых в виде автомата генерирует циклические переходы. Особую сложность для преобразования в детерминированный автомат представляют выражения конъюнкции и дизъюнкции, имеющие в качестве операндов формулы с использованием перечисленных выше глобальных операторов. Реализация таких выражений требует сложных комбинаций декартового произведения и комплементирования автоматов-операндов, что делает производительность проверки формул во время симуляции мало реалистичной. Пусть имеется формула $f = G(\{a; b\}) \vee F(\{c; d\})$. Оценим количество состояний в эквивалентном проверяющем автомате. Для удобства приведем формулу к конъюнктивной нормальной форме $\neg(G(\neg\{a; b\}) \wedge F(\neg\{c; d\}))$. На рис. 2, а и б показаны представления формул-операндов в виде отдельных автоматов:



Рис. 2. Реализация глобальных LTL-операторов в виде автоматов

Каждая из формул-операндов порождает по 3 состояния и по 4 перехода. Реализовав конъюнкцию при помощи декартового произведения, получим следующий двумерный автомат, в развернутом виде представленный на рис. 3. Очевидно, комплементирование этого более сложного автомата способно лишь увеличить число переходов при инверсии успешных и неудачных переходов. Таким образом, в итоговом автомате имеется 9 состояний и 18 переходов. Учитывая динамику роста компонентов автомата, несмотря на относительную простоту последовательностей-операндов, процедура анализа постепенно теряет производительность. Добавление по одному дополнительному состоянию в последовательностях-операндах увеличит число состояний до 12, а число переходов – до 24. Неутешительная перспектива становится очевидной, если учесть факт, что требования спецификации реальных систем имеют существенно большую последовательностную глубину и степень ветвления.

В определенной степени на размер автомата (17) могут повлиять различные общеизвестные методы минимизации количества состояний. Однако в целях более существенного ограничения динамики роста компонентов автомата используется так называемое простое подмножество языковых конструкций, обрабатываемое в режиме локального времени. На семантику ряда LTL-операторов накладываются структурные ограничения на допустимые операнды, а интерпретация глобальных темпоральных операторов упрощается.

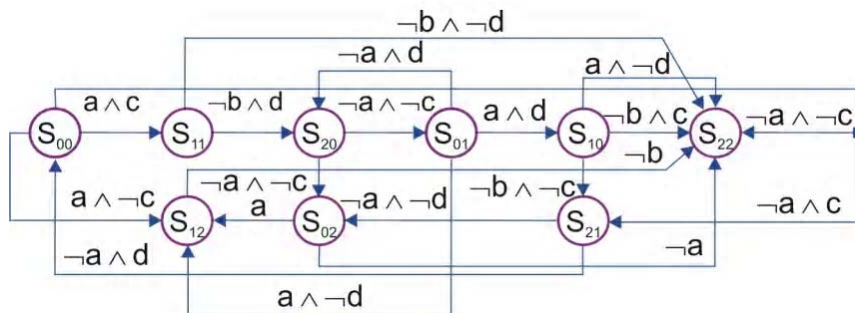


Рис. 3. Конъюнкция глобальных LTL-операторов в виде автомата

В частности, на операнды темпоральных свойств в простом подмножестве накладываются следующие ограничения:

1. Допускается отрицание только булевого выражения. Отрицание последовательностей или темпоральных свойств запрещается.

2. Не допускается помещение в оператор `never` операндов, не являющихся последовательностью или булевым выражением, поскольку такая конструкция при преобразовании к базовым LTL-операторам приведет к необходимости отрицания последовательности, а значит, к нарушению п. 1.

3. Операндом оператора `eventually!` может быть только последовательность или булево выражение для ограничения степени ветвления времени, порождаемого данным оператором.

4. Не более одного операнда логических операторов дизъюнкции и импликации, а также ни один из операндов оператора логической эквивалентности не может быть не булевым.

5. Операнды таких операторов, как `until*`, `before*`, `next_e*`, `next_event_e*` могут быть только булевыми.

Иначе упрощение простого подмножества можно назвать дополнительным уровнем линеаризации времени [15]. Такое упрощение в значительной степени ограничивает рост количества состояний и переходов в представляющем формулу автомате. Формулы простого подмножества доступны в понимании и практическом применении инженерами для ежедневных нужд верификации. Однако их использование ограничивает выразительность формул и ухудшает желаемую близость верификационных определений к требованиям спецификации, выраженным естественным языком.

Под уплощением интерпретации глобальных темпоральных операторов понимают такое преобразование LTL-формул, при котором единственный результат, связываемый с вычислительным путем бесконечной длины, заменяется бесконечным множеством результатов для всех возможных конечных вычислительных путей, начинающихся с различных начальных моментов времени. В частности, интерпретация ключевых глобальных темпоральных операторов, отображенная в табл. 1, такова, что на каждый из вычислительных путей, существующих в рамках рассматриваемого теста, накладывается отдельное независимое ограничение. Такой способ интерпретации повышает производительность анализа за счет устранения теоретически бесконечной фазы ветвления и предоставляет детальную диагностическую информацию о каждом проанализированном отрезке.

Таблица 1. Режимы интерпретации темпоральных операторов

Формула PSL	Полноценная интерпретация	Упрощенная интерпретация
<code>always f</code>	$\pi \models \text{always } f \Leftrightarrow \pi \models G f$ $\forall k, 0 \leq k < |\pi|, \pi_k \models f \Rightarrow 1$ Единственный результат	$\pi \models \text{always } f \Leftrightarrow \forall k, k < |\pi|, \pi_k \models f$ $\forall k, 0 \leq k < |\pi|,$ $\{\pi_0 \models f \Rightarrow 1, \dots, \pi_k \models f \Rightarrow 1, \dots\}$ Множественный результат
<code>never f</code>	$\pi \models \text{never } f \Leftrightarrow \pi \models \neg(G \neg f)$ $\exists k, 0 \leq k < |\pi|, \pi_k \not\models f \Rightarrow 1$ Нет ограничений на операнд	$\pi \models \text{never } f \Leftrightarrow \forall k, k < |\pi|, \pi_k \not\models f$ $\forall k, 0 \leq k < |\pi|,$ $\{\pi_0 \not\models f \Rightarrow 1, \dots, \pi_k \not\models f \Rightarrow 1, \dots\}$ Операнд может быть только булевым выражением или последовательностью
<code>eventually! f</code>	$\pi \models \text{eventually! } f \Leftrightarrow \pi \models F f$ $\exists k, 0 \leq k < |\pi|, \pi_k \models f$ Нет ограничений на операнд, путь, на котором операнд справедлив, должен существовать	$\pi \models \text{eventually! } f \Leftrightarrow \pi \models \{[*]; f\}$ Операнд может быть только булевым выражением или последовательностью, удовлетворяющий путь может не существовать

Режим глобального времени. Использование только простого подмножества (режима локального времени) значительно облегчает реализацию проверки формул в симуляторах. Такая верификация эффективна при необходимости детальной диагностики блока, в котором уже обнаружена функциональная ошибка, и основной целью является локализация. Полноценная интерпретация формул LTL-логики при динамической верификации дает единый результат для всех вычислительных путей. Такой подход скрывает детальные результаты

вычислений на каждом пути и, в первую очередь, эффективен для быстрого обнаружения функциональных проблем блока. Оба подхода можно эффективно сочетать в цикле функциональной верификации системы. Сначала все темпоральные формулы следует проверить в режиме глобального времени. В случае обнаружения нарушений с конкретными верификационными утверждениями проблемные формулы следует проверить в диагностическом режиме с упрощенной интерпретацией.

Фактором, препятствующим полноценной интерпретации LTL-операторов во время симуляции, является большая ресурсоемкость при реализации с использованием детерминированных конечных автоматов. Решив данную проблему, можно получить уникальные возможности для верификации. Использование полноценной интерпретации высокоуровневых операторов LTL-логики для проверки справедливости формул во время симуляции будем называть режимом глобального времени. Такое название исходит из наличия единственного результата, что отличает данный режим от множественного результата в случае интерпретации в стиле простого подмножества.

Пусть имеется PSL-свойство $\text{property } p = \text{always}\{a; b\} \mid \Rightarrow \{[*2]; c\}$, означающее, что для всех вычислительных путей последовательность событий $a = 1$ на первом такте, $b = 1$ на следующем такте должна сопровождаться событием $c = 1$ в прошествии трех тактов. Ниже представлена математическая интерпретация данной формулы:

$$\forall k, k < |\pi|, \left[\begin{array}{l} \pi_k \mid = a, \left[\begin{array}{l} \pi_{k+1} \mid = b, \pi_{k+4} \mid = c \\ \pi_{k+1} \mid \neq b \end{array} \right] \\ \pi_k \mid \neq a \end{array} \right] \Rightarrow \pi_{k..} \mid = p \quad (22)$$

В упрощенном варианте интерпретации данной формулы для любого k – для каждого рассматриваемого такта моделирования – будет дан ответ об удовлетворении формулы на данном вычислительном пути. Соответственно, если рассмотрено 10 тактов, то будет дано 10 несвязанных между собой ответов о справедливости формулы. В варианте же интерпретации глобального времени, будет дан единственный ответ для всего цикла моделирования, причем справедливым он будет лишь тогда, когда все рассмотренные вычислительные пути удовлетворяют верифицируемой формуле.

Ниже представлены (табл. 2) результаты моделирования на одинаковом тесте в двух режимах. Как показано в примере, в упрощенном режиме для 6 векторов имеется 6 ответов об удовлетворении формулы, ответ для вычислительного пути, начинающегося с первого такта, является отрицательным, в то же время для последующих вычислительных путей результат положительный. В режиме глобального времени имеется единственный результат, поскольку на 5 такте выясняется ошибка на первом вычислительном пути, и дальнейшая обработка не имеет смысла.

Таблица 2. Режим интерпретации глобального времени

#	a	b	c	simple	global time
1	1	0	1	-	-
2	1	1	0	-	-
3	1	1	1	-	-
4	0	0	0	PASS ³ PASS ⁴	-
5	0	0	0	FAIL ¹ PASS ⁵	FAIL ⁰
6	0	0	1	PASS ² PASS ⁶	-

Подмена темпоральных свойств на упрощенные последовательностные элементы требует некоторых вычислительных затрат на анализ. Разумеется, эти затраты превышают полноценную интерпретацию лишь в том случае, если решить проблему роста количества состояний.

Пусть имеется PSL-свойство $\text{property } p = \text{eventually}\{a; b; c\}$:

$$\pi \mid = \text{eventually}\{a; b; c\} \Leftrightarrow \pi \mid = \{[*]; a; b; c\}; \quad (23)$$

$$\pi \models \text{eventually!}\{a; b; c\} \Leftrightarrow \pi \models X!\{a; b; c\} . \quad (24)$$

Эквивалентную роль повторной активации последовательности-операнда по завершению анализа неудачного вычислительного пути играют бесконечная репетиция[*] в упрощенной модели и простое темпоральное свойство в режиме глобального времени соответственно. При идентичности функционального поведения двух режимов интерпретации использование репетиции с бесконечным интервалом требует большего объема вычислительных ресурсов с генерацией дополнительных циклов между состояниями. Вариант глобального времени здесь лишь блокирует верификацию при появлении успешного события, не накапливая никаких дополнительных данных в памяти.

Аналогично, существенных дополнительных затрат требует упрощенная интерпретация семейств темпоральных операторов *until* и *before*. Учитывая значительные ограничения на языковое подмножество, допустимое для операндов этих операторов, их использование при типичной реализации становится нерациональным с точки зрения производительности, несмотря на семантическую выразительность. Пусть имеется свойство *property* $p = a \text{ until } b[*2]$. Его семантика в двух режимах анализа такова:

$$\pi \models a \text{ until } b[*2] \Leftrightarrow \pi \models \{a[*0 : \infty]; b[*2]\} ; \quad \pi \models a \text{ until } b[*2] \Leftrightarrow \pi \models [a \text{ W } b[*2]] . \quad (25)$$

Упрощенная интерпретация использует функцию репетиции с неограниченными минимальным и максимальным интервалами. Разумеется, при переводе к автомату (15) это существенно меньшая модель, чем полноценная интерпретация. Однако задействованный вид репетиции является одной из наиболее проблематичных конструкций с точки зрения сложности порождаемых циклических переходов между состояниями.

Время одной итерации верификации при типичной интерпретации LTL-формул можно оценить следующим соотношением:

$$N_{\text{CLK}} \times (\bar{t}_{\text{SIM}} + N_A \times \bar{t}_{\text{ev}}) , \quad (26)$$

где N_{CLK} – число тактов моделирования; \bar{t}_{SIM} – среднее время моделирования одного такта; N_A – число ассерций в модели; \bar{t}_{ev} – среднее время обработки ассерции на одном такте. Следует отметить, что это суммарное время одинаково вне зависимости от результатов верификации. В режиме глобального времени соотношение изменяется:

$$N_{\text{CLK}}^{\text{MAX}} \times \bar{t}_{\text{SIM}} + \sum_{i=1}^{N_A} N_{\text{CLK}}^i \times \bar{t}'_{\text{ev}} . \quad (27)$$

Здесь число тактов моделирования может быть меньше и соответствует максимальному числу тактов, необходимому для выявления единственного ответа для каждой из ассерций. Это число различно для каждой из них. Кроме того, за счет более легковесных структур данных в режиме глобального времени типичное время анализа ассерции на одном такте будет меньше. При сравнении соотношений (26) и (27) становится очевидным:

- время анализа в режиме глобального времени ни при каких обстоятельствах не может быть больше времени анализа в обычном режиме;
- наибольший эффект снижения вычислительных затрат происходит при быстром выявлении нарушений (много ошибок на ранних фазах проектирования), когда значительно сокращается число тактов, на которых активно анализируется ассерция.

5. Выводы

1. Задача функциональной верификации параллельных систем, представляемых в виде структур Крипке, состоит в проверке логико-временных ограничений между атомарными высказываниями, ассоциированными с состояниями системы на всех возможных вычислительных путях. Утверждения об удовлетворении системой определенных ограничений, называемые ассерциями, отражают требования спецификации в виде формальной математической формулы, использующей аппарат темпоральной логики, который пришел в компьютерную инженерию из философии. В применении к верификации, в формальных методах используют логику CTL, в то время как логика LTL более совместима с динамическими

верификационными методами. Формальная проверка LTL-ограничений предполагает представление ассерций и верифицируемых систем в виде автоматов Buchi, способных установить принадлежность моделируемому ограничению последовательностей состояний бесконечной длины. Результат верификации определяется отсутствием достижимых из начальных состояний бесконечных циклов при декартовом произведении двух автоматов Buchi. Экспоненциальная сложность формальной проверки накладывает существенные ограничения на применимость метода к крупным моделям. Лучшую производительность верификации LTL-ограничений обеспечивают динамические методы, функционирующие путем конвертирования LTL к детерминированному конечному автомату. Несмотря на проблему низкого покрытия пространства состояний системы (зависящую от внешнего теста) в динамических методах, а также нелинейный рост размера проверяющих автоматов в зависимости от структурной сложности формулы, использование LTL-логики во время симуляции способно обеспечить обнаружение большинства функциональных нарушений с более приемлемой производительностью по сравнению с формальными методами.

2. Наиболее популярными языками описания ассерций являются PSL и SystemVerilog, характеризующиеся булевым, темпоральным и верификационным уровнями конструкций. Семантическая выразительность логико-временных соотношений с использованием данных языков определяется наличием широкого набора параметризуемых последовательностных регулярных выражений и темпоральных свойств. Языковые стандарты формально определяют понятие простого подмножества, ограничивающего набор допустимых конструкций таким образом, чтобы заблокировать возможности экспоненциального роста количества состояний при конвертировании LTL-формулы в конечные автоматы. Простое подмножество рекомендовано к применению в динамических методах, однако его использование ограничивает выразительность формул и ухудшает желаемую близость формальных ограничений к требованиям спецификации.

3. Научная новизна. Предложена модель интерпретации высокоуровневых операторов LTL-логики для проверки справедливости формул во время симуляции – режим глобального времени. Такой подход скрывает детальные результаты вычислений на каждом пути и, в первую очередь, эффективен для быстрого обнаружения функциональных проблем блока. Напротив, простое подмножество предполагает упрощенную интерпретацию глобальных темпоральных операторов, называемую режимом локального времени. Оба подхода можно эффективно сочетать в цикле функциональной верификации системы, применяя режим глобального времени для быстрого выявления нарушений, а затем режим локального времени для детальной диагностики и локализации.

Список литературы: 1. Clarke E., Grumberg O., Peled D. Model Checking. 6th edition, MIT Press, 2008. 313p. 2. Burch J.R., Clarke E.M., Long D.E. Representing circuits more efficiently in symbolic model checking // 28th ACM/IEEE Design Automation Conference, 1991, pp. 403-407. 3. Pnueli A. The Temporal Logic of Programs // Proceedings of the 18th IEEE Symposium Foundations of Computer Science (FOCS 1977). 1977. P. 46-57. 4. Buchi J.R. On a decision method in restricted second order arithmetic // Proceedings of International Congress on Logic, Methodology and Philosophy of Science, Stanford University Press, 1960. P. 1-11. 5. He A., Wu J., Li L. An Efficient Algorithm for Transforming LTL Formula to Buchi Automaton // International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2008. P. 1215-1219. 6. Gastin P., Oddoux D. Fast LTL to Buchi automata translation // 13th International Conference on Computer Aided Verification (CAV 2001), volume 2102 of Lecture Notes in Computer Science. P. 53-65. 7. Giannakopoulou D., Lerda F. From states to transitions: Improving translation of LTL formulae to Buchi automata // 22nd International Conference on Formal Techniques for Networked and Distributed Systems (FORTE 2002), volume 2529 of Lecture Notes in Computer Science. 2002. P. 308-326. 8. Etessami K., Holzmann G. J. Optimizing Buchi automata // 11th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR 2000), volume 1877 of Lecture Notes in Computer Science, 2000. P. 153-167. 9. Safra S. On the complexity of omega-automata // 29th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1988. P. 319-327. 10. Valmari A. The state explosion problem // Lectures on Petri Nets I: Basic Models, volume 1491 of Lecture Notes in Computer

Science, 1998. P. 429-528. **11.** *Fernandez J.C., Jard C., Jeron T., Viho A.* Using on-the-fly verification techniques for the generation of test suits // Proceedings of 1996 Workshop of Computer-Aided Verification. 1996. P. 348-359. **12.** *Voeten J.P.M., Van der Putten P.H.A., Geilen M.C.W., Stevens M.P.J.* Formal modelling of reactive hardware/software systems // ProRISC/IEEE'97, Utrecht : STW, Technology Foundation, 1997. P. 663—670. **13.** *Ribeiro O., Fernandes J., Pinto L.* Model Checking Embedded Systems with PROMELA // 12th IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS'05). 2005. P. 378-385. **14.** *Bergeron J., Cerny E., Hunter A., Nightingale A.* Verification Methodology Manual for SystemVerilog. Springer, 2006. 528 p. **15.** *Ruah S., Fisman D., Ben-David S.* Automata Construction for On-The-Fly Model Checking PSL Safety Simple Subset. IBM, Tech. Rep. H-0234. 2005. 22 p.

Поступила в редколлегию 22.11.2009

Зайченко Сергей Александрович, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ, начальник отдела разработки компании Aldec-Kharkov Ltd. Научные интересы: системы автоматизированного проектирования, моделирования и верификации цифровых систем на кристаллах. Увлечения: литература, музыка, футбол. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (097)-367-62-93. E-mail: Sergei.Zaychenko@aldec.com

Литвинова Евгения Ивановна, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и автоматизации производства РЭС и ЭВС ХНУРЭ. Научные интересы: алгоритмизация задач автоматизированного проектирования электронных вычислительных средств, автоматизация диагностирования и встроенный ремонт компонентов цифровых систем в пакете (SiP). Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-421.

Побеженко Ирина Александровна, аспирантка кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем и сетей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-421. E-mail: kiu@kture.kharkov.ua.

УДК 658.51:621.315.592

А.Г. ПЕТРОВ, В.Р. ПЕТРЕНКО

РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОПРОДУКТОВИХ БАГАТОСТАДІЙНИХ ДИСКРЕТНИХ ВИРОБНИЦТВ

Наводиться структура об'єктної імітаційної моделі (ІМ) багатопродуктових багатостадійних дискретних виробництв (ББДВ), узагальнений кортежний опис її структурних елементів. Виділяються основні типи структурних елементів, для елементів кожного типу описуються властивості та множини подій, які обробляються або генеруються. Наводиться формалізований опис методів елементів кожного типу. Результати роботи можуть слугувати основою для алгоритмічної та програмної реалізації ІМ ББДВ.

1. Вступ

До ББДВ можуть бути віднесені виробництва, структура яких представляється послідовністю виробничих ланок, що реалізують технологічні операції по обробці продуктів (точніше, напівпродуктів) декількох видів. Основні особливості ББДВ можна охарактеризувати так:

- продукти передаються з однієї операції на іншу передавальними партіями, величина яких в загальному випадку може бути різною для різних операцій;
- кожна виробнича ланка містить обладнання декількох типів, які відрізняються тривалістю процесу обробки, об'ємом споживаних ресурсів та кількістю одночасно оброблюваних продуктів. Будь-який вид продуктів може оброблятися на обладнанні будь-якого типу, але з різною економічною ефективністю:

- з кожною технологічною операцією зв'язані вхідний і вихідний накопичувачі продуктів, вмістимість яких може бути обмежена;
- інтегральним показником впливу стохастичних збурень технологічних процесів на хід виробничого процесу виступає коефіцієнт виходу кондиційних продуктів на кожній операції;
- значна кількість видів браку на кожній операції, причому деякі з них можуть бути регенеровані шляхом обробки на деяких попередніх операціях (наявність зворотного матеріального зв'язку).

Типовим представником ББДВ може слугувати виробництво кремнієвих структур, особливості якого розглянуті в [1].

Неможливість отримання адекватних аналітичних моделей функціонування виробництв класу ББДВ зумовлює необхідність використання для вирішення задач оперативного управління ходом виробництва імітаційного моделювання. Метод імітаційного моделювання в найзагальнішому вигляді може бути визначений як експериментальний метод дослідження реальної системи по її імітаційній моделі, який поєднує особливості експериментального підходу і специфічні умови використання обчислювальної техніки. Схематично процес імітаційного моделювання може бути представлений на рис. 1.

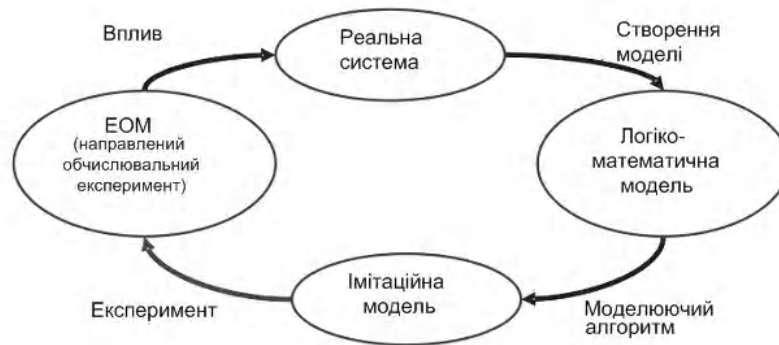


Рис. 1. Схема імітаційного моделювання

Особливістю імітаційного моделювання є те, що імітаційна модель дозволяє відтворювати модельовану систему зі збереженням її логічної структури і поведінкових властивостей (послідовності чергування в часі подій, що відбуваються в системі), тобто динаміки взаємодій. Побудова імітаційної моделі полягає в описі структури, структурних елементів і процесів функціонування модельованої системи.

Щоб розробити імітаційну модель, необхідно: представити реальну систему як сукупність взаємодіючих елементів; алгоритмічно описати функціонування окремих елементів; описати процес взаємодії різних елементів між собою та зовнішнім середовищем.

Можна виділити методи імітаційного моделювання:

- агентне моделювання – відносно новий напрям в імітаційному моделюванні, яке, як правило, використовується для дослідження розподілених систем, динаміка функціонування яких визначається не глобальними правилами і законами (як в інших парадигмах моделювання), а навпаки, коли ці глобальні правила і закони є результатом індивідуальної активності членів групи. Мета агентних моделей – отримати уявлення про ці глобальні правила, загальну поведінку системи, виходячи з припущень про індивідуальну, приватну поведінку її окремих активних об'єктів і взаємодію цих об'єктів у системі. Агент – сутність, що володіє активністю, автономною поведінкою, може приймати рішення відповідно до деякого набору правил, взаємодіяти з оточенням, а також самостійно змінюватися;

- дискретно-подійне моделювання – підхід до моделювання, що пропонує абстрагуватися від безперервної природи подій і розглядати лише основні події модельованої системи, такі як: «чекання», «обробка замовлення», «рух з вантажем», «розвантаження» та інші. Дискретно-подійне моделювання найбільш розвинене і має величезну сферу застосування – від логістики і систем масового обслуговування до транспортних і виробничих систем. Цей вид моделювання найбільш підходить для моделювання виробничих процесів. Заснований Джеффри Гордоном в 1960-х роках;

- системна динаміка – парадигма моделювання, коли для досліджуваної системи будуються графічні діаграми причинних зв'язків і глобальних впливів одних параметрів на інші в часі, а потім створена на основі цих діаграм модель імітується на комп'ютері. По суті, такий вид моделювання краще за інші парадигми моделювання допомагає зрозуміти суть причинно-наслідкових зв'язків, що мають місце між об'єктами і явищами. За допомогою системної динаміки будують моделі бізнес-процесів, розвитку міста, моделі виробництва, динаміки популяції, екології, розвитку епідемії. Метод заснований Дж. Форрестером в 1950-х роках.

На сьогодні відома значна кількість різноманітних інструментальних засобів для імітаційного моделювання. Зокрема, це ISS 2000 [2], MODSIM III [3], GPSS-World [2,4], SIMSCRIPT II.5 [5], VSE [6], SimuLink [7], Stella, Think, T-Prolog [8], Triad.Net, AnyLogic, PDO [9], eM-Plant, Powersim, Transyt, Tecnomatix Plant Simulation і ін. Деякі з них забезпечують реалізацію якогось одного методу імітаційного моделювання (наприклад, GPSS-World реалізує дискретно-подійне моделювання), а деякі – комбінацію різних методів (наприклад, AnyLogic підтримує всі три методи моделювання). Огляд всіх можливостей цих інструментальних засобів не є метою даної роботи, тому обмежимося лише фіксацією деяких характеристик, які властиві більшості з перелічених засобів і які в певній мірі відображають сучасні тенденції розвитку систем імітаційного моделювання. Зокрема, це: певна універсальність, тобто орієнтованість на достатньо широке коло предметних областей; об'єктно-орієнтований підхід до побудови моделей; наявність бібліотек базових об'єктів і засобів їх поповнення; наявність засобів візуального проектування моделі і візуалізації результатів моделювання; можливість зміни поведінки базових об'єктів шляхом модифікації існуючих або реалізації нових методів цих об'єктів за допомогою вбудованої мови програмування; наявність засобів планування імітаційних експериментів і управління їх реалізацією.

Необхідно відмітити, що використання універсальних систем імітаційного моделювання найбільш ефективно при проектуванні різноманітних виробничих, логістичних систем, систем управління ними або при їх дослідженні з метою визначення оптимальних значень параметрів або режимів функціонування. Але їх використання при вирішенні задач оперативного управління ходом виробництва є малоефективним. Це обумовлено, по-перше, суттєвими проблемами спрягання цих систем з системами оперативного управління, громіздкістю можливого їх вирішення і суттєвими додатковими фінансовими витратами, а по-друге, необхідністю наявності на підприємстві спеціалістів по використовуваній системі імітаційного моделювання. В даному випадку більш ефективним є розробка спеціалізованої імітаційної моделі об'єкта управління і вбудовування її в систему оперативного управління. При цьому для реалізації імітаційної моделі, як правило, використовуються ті ж самі засоби, що і для реалізації системи оперативного управління. Розробка підходів до створення таких спеціалізованих імітаційних моделей на сьогодні є актуальною проблемою. Окремі спроби її вирішення описані в літературі. Наприклад, в роботі [10] для цього використовується математичний апарат мереж Петрі, в роботі [11] – комбінація методу Монте-Карло і методів теорії напівмарківських процесів. Всі ці підходи не можуть в повній мірі врахувати особливості розглянутого ББДВ і для своєї реалізації потребують значного об'єму апріорної інформації.

2. Постановка задачі

Мета даної роботи – опис структурних елементів імітаційної моделі ББДВ, що базується на:

- інтегральному врахуванні стохастичних збурень технологічних процесів виробничих ланок через коефіцієнти виходу кондиційних продуктів, що моделюються за допомогою ARIMA-моделей або заданих законів розподілу випадкових величин;
- моделюванні відмов обладнання на основі використання закону розподілу рідких подій;
- використанні об'єктно-орієнтованого підходу до опису функціонування виробничих ланок.

Основне призначення імітаційної моделі – це її використання при вирішенні задачі оперативного управління запуском продуктів в обробку. При цьому може вирішуватися як пряма задача імітаційного моделювання – скільки готової продукції і через який час буде отримано при відомому на поточний момент часу векторі запуску продуктів в обробку, так і

зворотня задача – визначення необхідного вектора запуску продуктів в обробку і часу упередження для отримання заданої кількості готової продукції. Крім того, за допомогою імітаційної моделі можуть бути вирішені й інші задачі, пов'язані з функціонуванням виробничої системи: визначення раціональних міжопераційних страхових запасів, планування ремонтного обслуговування, управління ресурсами та ін.

3. Структура імітаційної моделі

Імітаційна модель являє собою сукупність об'єктів (невеликої кількості типів) і процесів їх взаємодії один з одним (рис.2).

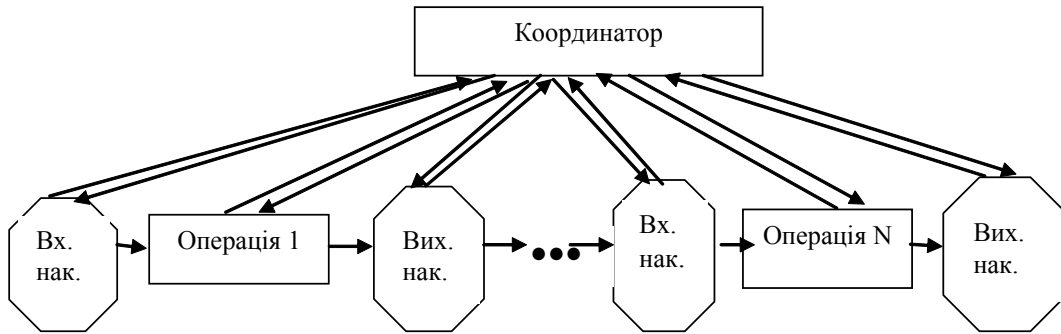


Рис. 2. Структура імітаційної моделі

Базовими типами об'єктів є: «Операція», «Вхідний накопичувач», «Вихідний накопичувач», «Координатор». Структура об'єкта кожного типу може бути описана кортежем $\langle P, M, E_IN, E_OUT \rangle$, де P – множина властивостей (полів) об'єкта, M – множина методів об'єкта, E_IN – множина подій, на які реагує об'єкт, E_OUT – множина подій, які генерує об'єкт. Імітаційна модель при цьому має дворівневу структуру, на верхньому рівні якої функціонує об'єкт типу «Координатор», а на нижньому – необхідна кількість (визначається структурою виробничого процесу) об'єктів інших розглянутих типів.

4. Опис структурних елементів моделі

Об'єкт типу «Операція» - основний структурний елемент нижнього рівня. Цей об'єкт містить в собі набір полів, методів та подій, необхідних для виконання моделювання технологічної операції і визначення результатів обробки продуктів на даній технологічній операції.

Елемент «Операція» містить в собі такі *поля*: OP – порядковий номер операції в технологічному процесі; I – кількість типів обладнання; n_i , $i = 1, I$ – кількість одиниць i -го типу обладнання; d_i^j – кількість одночасно оброблюваних одиниць j -го продукту на одиниці обладнання i -го типу (об'єм загрузки); τ_i^j – тривалість процесу обробки продуктів типу j на обладнанні i -го типу (з врахуванням підготовчих і контрольних операцій); M – кількість типів ресурсів, що використовуються в процесі обробки; $r_m(t)$ – поточна наявна кількість ресурсу типу m ; $r_{m,i}^j$ – витрата ресурсу m -го типу на процес обробки продуктів j -го типу на обладнанні i -го типу; $IN^j(t)$ – поточний об'єм j -го напівпродукту у вхідному накопичувачі; $S_{ki}(t) \in \{0, 1, 2\}$ – поточний стан k -ї одиниці обладнання i -го типу, $k = \overline{1, n_i}$, де 0 – реалізує процес обробки, 1 – очікує завантаження, 2 – знаходиться на ремонті; L – кількість видів браку, що повертається на регенерацію; $B_{il}^j(t)$ – поточний коефіцієнт l -го виду регенованого браку при обробці j -го виду продукту на обладнанні i -го типу, $l = \overline{1, L}$; OP_l^j – номер операції, на яку передається на регенерацію брак типу l , отриманий при обробці продукту j -го типу, $l = \overline{1, L}$; $j = \overline{1, J}$; fB_{il}^j – закон розподілу B_{il}^j ; $\eta_i^j(t)$ – поточний коефіцієнт виходу кондиційного продукту виду j при обробці на обладнанні i -го типу; $OUT^j(t)$ – поточний об'єм j -го продукту в вихідному накопичувачі; $VZ_i^j(t)$ – кількість одиниць обладнання i -го типу, назначених для обробки продукту типу j ; $f\eta_i^j$ – закон розподілу η_i^j ; $ARIMA(\eta_i^j(t-k, \tau_i^j))$, $k = \overline{1, 2..K}$; \mathbf{B} – $ARIMA$ -модель послідовності спостережень η_i^j , \mathbf{B} – вектор параметрів моделі; $P^j(t)$ – поточний пріоритет j -го виду продукту; z_m – вартість одиниці ресурсу m -го типу; C^j – умовна ціна одиниці j -го продукту після обробки на даній операції; VP^j – об'єм

передавальної партії j -го продукту на наступну операцію; $RR \in \{1, 2, 3\}$ – режим роботи, що визначає кількість змін; $zm(t)$ – номер поточної зміни.

Події, на які реагує об'єкт «Операція»: E1 – зміна стану вхідного накопичувача напівпродуктів; E2 – зміна поточного стану ресурсів на даній операції; E3 – закінчення процесу обробки на будь-якій одиниці обладнання; E4 – закінчення формування передавальної партії продуктів; E5 – початок зміни; E6 – кінець зміни; E7 – повернення обладнання з ремонту.

Елемент генерує події: E8 – «Завантаження» та E9 – «Результат обробки».

Методи об'єкта «Операція»:

O_M1 – «Завантаження обладнання». Метод ініціюється при настанні однієї з подій: E1, E2, E3, E5, E7. Суть його полягає в тому, що при наявності обладнання зі статусом $S_{ki}(t)=1$, $k = \overline{1, n_i}$, $i = \overline{1, I}$ і наявності напівпродуктів у вхідному накопичувачі відбувається назначення їх для обробки на вільному обладнанні при наявності необхідної кількості ресурсів всіх видів.

Черговість вибору напівпродуктів для обробки визначається відповідно до їх пріоритетів $P_j(t)$, $j = \overline{1, J}$. Вибір того чи іншого типу обладнання, вільного на момент виконання даного методу, для обробки продукту з найвищим поточним пріоритетом виконується по запропонованому авторами критерію максимуму умовного прибутку [12]. Метод також генерує подію E8 – «Завантаження».

O_M2 – «Запит інформації про стан вхідного накопичувача».

Метод викликається з методу *O_M1* і оновлює значення $IN^j(t)$, $j = \overline{1, J}$.

O_M3 – «Визначення результату обробки». Метод ініціюється при настанні події E3. Він визначає кількість кондиційних продуктів і кількість бракованих продуктів по кожному з регенерованих видів браку:

$$KP_i^j(t) = d_i^j \eta_i^j(t); VP_{ii}^j(t) = d_i^j V_{ii}^j(t). \quad (1)$$

Відповідно до значення OP_i^j змінюється значення відповідного вхідного накопичувача (операції OP_i^j) – збільшується на величину $VP_{ii}^j(t)$. Генерується подія E9 («Результат обробки»). У випадку, коли $OUT^j(t-1) + \sum_i KP_i^j \geq VP^j$, $j = \overline{1, J}$, генерується подія E4.

O_M4 – «Генерація значень $V_{ii}^j(t)$ ». Метод генерує значення $V_{ii}^j(t)$ відповідно до закону розподілу fV_{ii}^j . Він визивається з методу *O_M3*.

O_M5 – «Генерація значень $\eta_i^j(t)$ ». Метод визивається з методу *O_M3*. Він генерує значення $\eta_i^j(t)$ відповідно до моделі ARIMA ($\eta_i^j(t-k \tau_i^j)$, $k=1, 2, \dots, K$; \mathbf{B}), або з використанням закону розподілу $f\eta_i^j$.

Елемент типу «Вхідний накопичувач» містить такі поля:

OP – номер технологічної операції, для якої накопичувач є вхідним;

$IN^j(t)$, $j = \overline{1, J}$ – кількість напівпродуктів j -го виду в накопичувачі на поточний момент часу.

Методи елемента:

VxH_M1 – «Поповнення накопичувача», ініціюється при настанні події E4, згенерованої об'єктом «Операція» з номером OP-1. Метод змінює стан накопичувача відповідно до (2) і генерує подію E1:

$$IN^j(t) = IN^j(t) + VP_{(OP-1)}^j(t), \quad j = \overline{1, J}. \quad (2)$$

VxH_M2 – «Зменшення накопичувача», ініціюється при настанні події E8, згенерованої об'єктом «Операція» з номером OP. Метод змінює стан накопичувача так:

$$IN^j(t) = IN^j(t) - \sum_i n_i^j(t) d_i^j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (3)$$

де $n_i^j(t)$ – кількість одиниць обладнання i -го типу, виділених для обробки продуктів j -го виду при останній реалізації методу *O_M1* об'єкта «Операція» з номером OP.

Елемент типу «Вихідний накопичувач» містить такі поля:

OP - номер об'єкта «Операція», для якої накопичувач є вихідним;

$OUT^j(t)$, $j=1, J$ – кількість напівпродуктів j – го виду в накопичувачі на поточний момент часу.

Методи елемента:

VixH_M1- «Поповнення», ініціюється при настанні події E9, згенерованої об'єктом «Операція» з номером OP. Метод змінює стан накопичувача так:

$$OUT^j(t) = OUT^j(t) + \sum_i KP_i^j(t), \quad j = \overline{1, J}. \quad (4)$$

VixH_M2- «Зменшення» - ініціюється при настанні події E4, згенерованої об'єктом «Операція» з номером OP. Метод змінює стан накопичувача таким чином:

$$OUT^j(t) = OUT^j(t) - VP^j, \quad j = \overline{1, J}. \quad (5)$$

Елемент типу «Координатор» містить такі поля:

PV^j – планові об'єми випуску продукту j -го виду;

$FV^j(t)$ – фактичний поточний об'єм випуску продукту j -го виду;

$NORM_m^j$ – планова норма витрати ресурсу m -го виду на одиницю готової продукції j -го виду;

$S_REM_{ki}^f(m\Delta t, m = 1, 2..)$ – графік початку профілактичного ремонту k -ї одиниці i -го типу обладнання на f -й операції;

$E_REM_{ki}^f(m\Delta t, m = 1, 2..)$ – графік закінчення профілактичного ремонту k -ї одиниці i -го типу обладнання на f -й операції;

SZ_m^f – страховий запас ресурсу m -го виду на f -й операції ;

$MINPR_m^f$ – мінімальний об'єм поповнення ресурсу m -го виду на f -й операції;

$fOT_i^f(P)$ – розподіл відмов обладнання i -го типу на f -й операції за період P ;

$f\tau B_i^f$ – розподіл часу відновлення роботи одиниці i -го типу обладнання на f -й операції;

$P1$ – період моніторингу стану ресурсів;

$P2$ – період моніторингу стану планових ремонтів обладнання;

$P3$ – період генерації відмов обладнання.

Методи елемента:

K_M1- «Ресурси», ініціюється з періодом $P1$. Метод порівнює фактичний стан ресурсів на кожній операції зі страховим запасом. Якщо фактичний стан не відповідає страховому запасу, то відбувається поповнення ресурсу на $MINPR_m^f$. При цьому контролюється, щоб витрата ресурсу m -го виду на випуск j -го продукту не перевершила величину $P^j \times NORM_m^j$.

Для тих операцій, на яких поповнюються ресурси, генерується подія E2.

K_M2- «Пріоритети продуктів», ініціюється на початку зміни. Метод визначає пріоритети продуктів відповідно до відношення нев'язки плану до планового об'єму по j -му виду продукту:

$$P^j(t) = \frac{PV^j - FV^j(t)}{PV^j}, \quad (6)$$

або встановлює їх відповідно до наданих директив.

K_M3 - Ремонти», ініціюється з періодом $P2$. Метод відповідно до графіків початку та закінчення планових ремонтів технологічного обладнання ($S_REM_{ki}^f(m\Delta t, m = 1, 2..)$,

$E_REM_{ki}^f(m\Delta t, m = 1, 2..)$) змінює значення полів $S_{ki}(t)$ об'єктів типу «Операція», які визначають поточний стан k -ої одиниці обладнання i -го типу. Крім того, при поверненні обладнання з ремонту для відповідних операцій генерується подія E7.

K_M4 – «Моделювання відмов обладнання», ініціюється з періодом $P3$. Для всіх операцій, використовуючи $fOT_i^f(P)$, метод генерує кількість одиниць обладнання кожного

типу, які вийшли з ладу, і відповідно змінює їх стан ($S_{ki}(t)=2$). Для цього обладнання з використанням $r_{CV}_i^f$ генерується значення часу відновлення його працездатності і відповідно до нього складається графік зміни стану обладнання ($S_{ki}(t)=1$) і генерації подій E_7 .

K_{M5} - «Зміна», ініціюється відповідно до розкладу змін. Метод генерує події E_5 і E_6 .

Висновки

1. З врахуванням особливостей ББДВ запропонована дворівнева структура об'єктно-орієнтованої імітаційної моделі виробничого процесу, що включає невелику кількість типів структурних елементів, завдяки чому може бути успішно використана в системі оперативного управління ходом виробництва.

2. Розглянуті основні структурні елементи імітаційної моделі, наведено їх узагальнений короткежний опис. Визначено склад об'єктів кожного типу структурних елементів, описані їх поля, події та основні методи, що надає можливість їх програмної реалізації на будь-якій об'єктно-орієнтованій мові програмування.

3. Подальші роботи доцільно присвятити розробці програмних реалізацій класів, що відповідають розглянутим типам структурних елементів імітаційної моделі, і інструментального засобу для синтезу імітаційної моделі заданої структури, проведення імітаційних експериментів і інтеграції імітаційної моделі до складу системи оперативного управління.

Список літератури: 1. *Петренко В.Р.* Оперативне управління багатопродуктовими багатостадійними виробництвами і математичні методи / В. Р. Петренко, А. Г. Петров // Нові технології. 2008. № 4(22). С. 99-104. 2. *Томашевский В.Н.* Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова // М.: Бестселлер, 2003. 416с. 3. *Johnson G.D.* Networked simulation with HLA and MODSIM III CACI Products Company / G.D. Johnson // Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation – a bridge to the future. Vol. 2. Phoenix, 1999. P.1060-1070. 4. *Рыжиков Ю.И.* Имитационное моделирование. Теория и технология / Ю.И. Рыжиков // СПб.: Корона принт; М.: Альтекс-А, 2004. 384с. 5. *Kiviat P.J.* SIMSCRIPT II.5 Programming Language / P.J. Kiviat, H.M. Markowitz, R. Villaneva / Ed. E.C. Russell. Los Angeles: CACI. 1997. 6. *Balci O.* Visual Simulation Environment technology transfer / O. Balci, A.I. Bertelrud, C.M. Esterbrook, R.E. Nance // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. N.Y.: ACM Press, 1997. P. 1323-1329. 7. *Гультяев А.* Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс / А. Гультяев // СПб.: Питер, 2000. 432 с. 8. *Beasley J.E.* O.R. education – a survey of young O.R. workers / J.E. Beasley, G. Whitchurch // Operational Research Society. 1984. N 35. P. 281- 288. 9. *Емельянов В.В.* Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО / В.В. Емельянов, С.И. Ясиновский // М.: АНВИК, 1998. 427с. 10. *Вислоух С.П.* Моделювання та оптимізація роботи виробничих систем засобами мереж Петрі / С. П. Вислоух, О. М. Чабан // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». 2008. № 36. С. 118-123. 11. *Клименко А.В.* Система автоматизации имитационного моделирования последовательных вероятностных технологических процессов производства / А. В. Клименко, И. В. Максимей, В. С. Смородин // Проблемы програмування. 2008. № 1. С. 87-97. 12. *Петренко В.Р.* Конструювання критерію ефективності оперативного управління у умовах багатопродуктового багатостадійного дискретного виробництва / В. Р. Петренко, А. Г. Петров // Нові технології. 2009. № 1(23). С. 17-25.

Надійшла до редколегії 16.12.2009

Петров Андрій Григорович, ст. викладач кафедри комп'ютеризованих систем автоматики Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. Наукові інтереси: автоматизовані системи оперативного управління виробництвом. Адреса: Україна, 39600, м. Кременчук, вул. Пролетарська, 24/37, тел.: (05366) 3-11-44.

Петренко Василь Радіславович, д-р техн. наук, доцент, проректор з наукової роботи, завідувач кафедри інформатики Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. Наукові інтереси: інформаційні технології, автоматизація процесів керування виробництвом напівпровідникових матеріалів. Адреса: Україна, 39600, м. Кременчук, вул. Пролетарська, 24/37, тел.: (05366) 3-11-44, E-mail: pvr@ient.net.

РЕФЕРАТИ

УДК 621.391.175

Математична модель надійності відновлювальної технічної системи / М.С. Подцикін // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.4-8.

Побудована дискретна математична модель відновлювальної технічної системи для вирішення завдання підтримки її надійності на оптимальному рівні. Марківський процес покладений в основу моделі. Оптимальна стратегія управління обчислюється для стаціонарного режиму.

Бібліогр.: 7 назв.

UDC 621.391.175

Mathematical model of reliability of the restored technical system / N.S. Podzikin // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.4-8.

A discrete mathematical model of the restored technical system is built for the decision of task of maintenance of its reliability at the optimum level. A markov process is fixed in basis of model. Optimum strategy of management is calculated for the stationary mode.

Ref.: 7 items.

УДК 004.942:621.6:622.691

Стохастична модель квазістаціонарного неізотермічного режиму транспорту природного газу в газотранспортних системах / А.Д.Тевяшев, А.А. Мамедова, В.А.Фролов // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С. 9-17.

Предметом дослідження даної роботи є проблема математичного моделювання квазістаціонарних неізотермічних режимів транспорту природного газу в газотранспортній системі. Для підвищення адекватності моделі використано стохастичний підхід.

Бібліогр.: 7 назв.

UDC 004.942:621.6:622.691

Stochastic model of the quasi-stationary not isothermal mode of transport natural gas in gas-transport system / A.D.Tevyashev, A.A.Mamedova, V.A.Frolov // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P. 9-17.

Object of research of the given work is the problem of mathematical modelling quasi-stationary not isothermal modes of transport of natural gas in gas-transport systems. For increase of adequacy of model the stochastic approach is used.

Ref.: 7 items.

УДК 681.326:519.713

Інфраструктура логічного аналізу асоціативних таблиць / В.І. Хаханов, О.О. Гузь, Tiecoura Yves, Ngene Christopher Umerah, В.І. Копанев // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.18-29.

Запропоновано предикатну алгебру асоціативних матриць, що дозволяє виконувати аналіз взаємодії вхідного вектора з n-мірним алгебрологічним простором, який визначається за допомогою упорядкованих і структурованих таблиць проблемно-орієнтованих даних, що являють собою асоціативні моделі поведінки логічних об'єктів. Для оцінки взаємодії векторів у алгебрологічному просторі розроблено універсальний критерій якості, що дозволяє знаходити і оцінювати квазіоптимальні рішення в задачах асоціативно-логічного аналізу інформації. Наведено приклади використання алгебри і предикатних процедур для розв'язання традиційних задач логічного аналізу, які підтверджують ефективність та практичну спрямованість алгебраїчних моделей.

Іл. 2. Бібліогр.: 16 назв.

UDC 681.326:519.613

Infrastructure for associative matrix logical analysis / V.I. Hahanov, O.A. Guz, Tiecoura Yves, Ngene Christopher Umerah, V.I. Kopanев // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.18-29.

Proposed infrastructure is designed for the logical analysis of associative tables (matrices) to analyze the interaction of an input vector and n-dimensional algebra-logical space specified by using the ordered and structured tables for problem-oriented data, which are the associative models of logical object behavior. To determine the interaction of vectors in the algebra-logical space a universal quality criterion is developed. It allows finding and evaluating a quasi-optimal solution for the problems of associative and logical information analysis. Examples of infrastructure and algebra-logical procedures to solve the traditional problems of logical analysis, confirming the effectiveness and practical value of algebraic model, are represented.

Fig. 2. Ref.: 16 items.

УДК 621.327

Метод композиції перфорованих нерівноважних чисел / В.В. Бараннік, М.Ф. Сидоренко, В.В. Шинкарьов // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.30-36.

Висловлено обґрунтування та основні етапи розробки методу композиційної збірки нерівноважних перфорованих позиційних чисел на основі масивів нижнього діапазонного і верхнього диференційованого діапазонного рівнів. Побудовано диференціальний опис масивів верхнього перфораційного рівня, який враховує наявність однорідної структури динамічних діапазонів перепадів на межі контуру і основного фону зображення. Показано, що композиційні перфоровані числа на відміну від нерівноважних позиційних чисел володіють властивостями для потенційного підвищення ступеня стискування.

Лл. 1. Бібліогр.: 5 назв.

UDC 621.327

A method of composition is a perforation of non-equilibrium numbers / V.V. Barannik, B.V. Ostroumov, V.V. Shinkarev // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.30-36.

A ground and basic design of method of the composition assembling times is expounded non-equilibrium perforation of position numbers on the basis of arrays lower range and overhead the differentiated range levels. Differential description of arrays is built overhead perforation of level, taking into account the presence of homogeneous structure of dynamic ranges of overfalls on the scopes of contour and basic background of image. Shown, that composition perforation of number in a difference from non-equilibrium position numbers possess properties for the potential increase of degree of compression.

Fig. 1. Ref.: 5 items.

УДК 631.2 : 631.171 : 65.011.56

Моделювання стаціонарної теплопередачі в 3-вимірній багат шаровій структурі з трубчастими нагрівачами для системи оптимального керування тепловим режимом приміщення / А.П. Слісаренко, М.А. Романченко, О.С. Сорока // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.36-45.

Побудовано математичну модель 3-мірної багаторівневої електротеплоаккумулюючої системи, призначеної для обігріву великого приміщення, що повинна забезпечувати тепловий стандарт нагрівання підлоги з урахуванням впливу навколишнього середовища. Математична модель дає можливість вирішувати завдання оптимального керування наявними енергоресурсами, що харчують систему, для здійснення заданих теплових стандартів у режимі реального часу.

Лл. 3. Бібліогр.: 3 назви.

UDC 631.2 : 631.171 : 65.011.56

Modeling of a stationary heat transfer in 3-D multi-layer structure with tubular heaters for system of optimum control of a thermal mode of a premise / A.P. Slesarenko, N.A. Romantchenko, A.S. Soroka // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.36-45.

The mathematical model of 3-D multifunctional multilevel electroheating and accumulating system, intended for heating a large premise is constructed which should simultaneously provide the thermal standard of heating of a floor in view of influence of an environment, and possibility of optimum control of available power resources for its realization in a mode of real time.

Fig. 3. Ref.: 3 items.

УДК 004.42, 614.2:007

Інформаційно-аналітична система маммологічного відділення онкологічного центру / А.Д. Тевяшев, Є.І. Виходцев, К.Д. Петров, С.М. Домненко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.46-52.

Досліджено проблеми інформатизації онкологічних центрів в Україні шляхом розробки та впровадження інформаційно-аналітичної системи маммологічного відділення онкологічного центру.

Лл. 7. Бібліогр.: 5 назв.

UDC 004.42, 614.2:007

Information-analytical system mammalogic department in an oncologic hospital center / A.D. Tevyashev, E.I. Vihodcev, K.D. Petrov, S.M. Domnenko // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.46-52.

The work is devoted to solving the problem of informatization for oncologic centers in Ukraine by means of development and introduction the analytic computer system for mammalogic department in an oncologic hospital center.

Fig. 7. Ref.: 5 items.

УДК 681.518

Оцінка якості освіти на основі кваліметричної оцінки випускників / О.Ю. Чередніченко, Н.В. Золотко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.53-59.

Розглянута проблема оцінювання якості освіти у вищому навчальному закладі. Як основні об'єкти моніторингу на рівні вищого навчального закладу розглянуті: випускники, процес надання освітніх послуг та вищий навчальний заклад в цілому. Описане питання оцінювання якості випускників. Для отримання комплексної оцінки якості запропоновано використання спрощеного методу кваліметрії. Розглянуто усі етапи методики оцінювання якості, запропоновано приклад дерева властивостей та показників якості випускника. Для визначення важливості показників запропоновано використання експертного методу, який базується на парних порівняннях. Комплексний показник якості випускника розраховано методом середнього зваженого.

Табл. 1. Бібліогр.: 12 назв.

UDC 519.2

The educational quality assessment based on qualimetry estimation of graduating students / O.Y. Cherednichenko, N.V. Zolotko // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.53-59.

The paper is devoted to the problem of educational quality assessment at the Higher Educational Establishment. As the main objects of monitoring are considered the follows: graduating students, the process of educational services assignment, and Higher Educational Establishment as a whole. The issues of quality assessment of graduating students are considered in this work. The simplified qualimetry method for integrated quality assessment was suggested. All stages of this method were considered in the paper in details. The sample of features tree and the measures of quality of graduating students are suggested. For determination of the measures weight is suggested to use the expert method based on pair comparisons. The integrated measure of quality of graduating students is calculated by weighted average method.

Tab. 1. Ref.: 12 items.

УДК 004.89:614.841.4

Комплектування аварійно-рятувальної техніки – задача нечіткої багатокритеріальної оптимізації / В.Є. Снитюк, П.П. Кучер // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.60-65.

Розглянуто задачу комплектування аварійно-рятувальної техніки як задачу нечіткої багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано метод її розв'язання, що базується на використанні елементів теорії нечітких систем..

Бібліогр.: 9 назв.

UDC 004.89:614.841.4

Completing the emergency rescue technics - a problem fuzzy multiobjective optimization / V.E. Snytyuk, P.P. Kucher // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.60-65.

The problem to completing the rescue technics as problem of fuzzy multiobjective optimization is considered. The method of its solving, which based on use fuzzy system theory elements is offered.

Ref.: 9 items.

УДК 621.397.6

Швидкодіючий метод біноміального нумераційного кодування / І.А. Кулик, С.В. Костель // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.66-76.

Розглянуто швидкодіючий метод біноміального нумераційного кодування інформації, побудований на основі комбінаторного алгоритму розрахунку номера двійкової комбінації. Наведена блок-схема алгоритму та теоретичне обґрунтування правильності її побудови. Розглянуто приклад розрахунку номера двійкової комбінації.

Табл. 2. Іл. 2. Бібліогр.: 6 назв.

UDC 621.397.6

Fast operating method of binomial enumerative coding / I.A. Kulyk, S.V. Kostel // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.66-76.

The paper expounds fast operating method of binomial enumerative coding based on a combinatorial algorithm for calculating a number of binary combinations. In the paper a block diagram of the algorithm is described, and correctness of it construction is grounded theoretically. An example of binary code number calculation is considered.

Tab. 2. Fig. 2. Ref.: 6 items.

УДК 620.179.16

Розробка базової інформаційної структури системи підтримки прийняття рішень, що мотивовані інтересами / С.А. Бабічев, І.Ф. Погребняк, О.В. Шарко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.77-84.

Розроблена базова інформаційна структура, яка сприяє пошуку компромісних рішень в умовах багатокритеріальності. Розглянута задача визначення прибутку підприємства в умовах обмеження на ресурси, що є, для виробництва двох видів продукції. Побудовані багатокутники рішень задачі визначення прибутку при рівних та різних значеннях обмежень на ресурси. Представлена процедура об'єднання індивідуальних переваг у колективне рішення для побудови моделі динамічної рівноваги.

Табл. 2. Іл. 3. Бібліогр.: 9 назв.

UDC 620.179.16

Development of base informative structure of the system of support of making decision, explained interest / S.A. Babichev, I.F. Pogrebnyak, A.V. Sharko // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.77-84.

A base informative structure, cooperant searching for of compromise decisions in the conditions of mnogokriterial'nosti, is in-process developed. The task of determination of income of enterprise is considered in the conditions of limit on present resources for the production of two types of products. The polygons of decisions of task of determination are built arrived at equal and different znachimostyakh limits on resources. Procedure of association of individual preferences is presented in a collective decision for the construction of model.

Tab. 2. Fig. 3. Ref.: 9 items.

УДК 681.518:004.93.1'

Ієрархічний алгоритм розпізнавання електронограм / А.С. Довбиш, К.В. Алтиннікова // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.85-90.

Розглянуто метод розпізнавання електронограм, одержаних в режимі мікродифракції, в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології, що ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи розпізнавання в процесі її навчання. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення системи розпізнавання електронограм. Побудовано ієрархічну структуру для етапів навчання та екзамєну.

Іл. 5. Бібліогр.: 7 назв.

UDC 681.518:004.93.1'

Hierarchical algorithm of electronograms recognition / A.S. Dovbysh, K.V. Altynnikova // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.85-90.

The article describes the method of recognition electronograms, gained in a microdiffraction mode, in context of information-extreme intellectual technology, which based on recognition system information capacity maximization in study and exam processes. Algorithm and software of recognition system were developed. The hierarchical structure for study and exam phases was build.

Fig. 5. Ref.: 7 items.

УДК 519.7

Моделі мови – модель відмінювання словосполучень / Н.Т. Процай // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.91-96.

Описано введення в моделювання механізмів природної мови засобами та методами біоніки інтелекту.

Бібліогр.: 11 назв

UDC 519.7

Language Model – Declension of Combinations of Words / N.T. Protsay // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P. 91-96.

Introduction to the modeling of the mechanisms natural language by means and methods of the bionics intelligence.

Ref.: 11 items.

УДК 681.326:519.613

Модель інтерпретації високорівневих операторів LTL-логіки / С.О. Зайченко, Є.І. Литвинова, І.О. Побіженко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.96-111.

На основі аналізу математичного апарату лінійної темпоральної логіки щодо верифікації цифрових систем розроблено модель інтерпретації високорівневих операторів LTL-логіки для перевірки справедливості формул під час симуляції – режим глобального часу.

Табл. 2. Іл. 3. Бібліогр.: 15 назв.

UDC 681.326:519.613

Interpretation model for highlevel LTL logic statements / S.S. Zaychenko, E.I. Litvinova, I.O. Pobizhenko / Management Information System and Devices. 2009. N 149. P. 96-111.

A model for the interpreting high-level LTL logic statements to test of formulae when simulating in the mode of global time is proposed. It is based on analyzing the mathematical apparatus of linear temporal logic for the verification of digital systems.

Tab. 2. Fig. 3. Ref.: 15 items.

УДК 658.51:621.315.592

Розробка структурних елементів імітаційної моделі багатопродуктових багатостадійних дискретних виробництв / А.Г. Петров, В.Р. Петренко // АСУ та прилади автоматики. 2009. Вип. 149. С.111-117.

Наведені структура об'єктної імітаційної моделі (ІМ) багатопродуктових багатостадійних дискретних виробництв (ББДВ), узагальнений кортежний опис її структурних елементів. Виділені основні типи структурних елементів, для об'єктів кожного типу описані властивості та множини подій, які обробляються або генеруються. Наведено формалізований опис методів об'єктів кожного типу. Результати роботи можуть слугувати основою для алгоритмічної та програмної реалізації ІМ ББДВ.

Іл. 2. Бібліогр.: 12 назв.

UDC 658.51:621.315.592

Elaboration of structural elements of simulation model of multiproducts multistages of discrete productions / A.G. Petrov, V.R. Petrenko // Management Information System and Devices. 2009. N 149. P.111-117.

Structure of object simulation model (SM) of multiproducts multistage discrete productions (MMDP), corteges description of generalized structural elements is present in work. The basic types of structural elements are selected, for each type of objects the properties and plurals of events which are processed or generated are described. The formalized description of methods for each type of objects is present. Job performances can serve as basis for algorithmic and programmatic realization of SM MMDP.

Fig. 2. Ref.: 12 items.

ПРАВИЛА

оформления рукописей для авторов научно-технического сборника

"АСУ и приборы автоматики"

Формат страницы — А4 (210x297мм), поля: сверху, справа, слева, снизу – 30 мм. Редактор: PageMaker 6.0, 6,5 (можно, но нежелательно Word), гарнитура Times New Roman Суг, кегль – 11 пунктов, межстрочное расстояние — 110 %, табуляция — 5 мм.

Объем рукописи – до 10 с. (языки: русский, украинский, английский). Содержание должно отражать актуальность исследования, постановку задачи, цель, сущность, научные и практические результаты, сравнение с лучшими аналогами, выводы.

Структура рукописи: заголовок, аннотация, текст, литература, реферат на украинском и английском языках, сведения об авторах.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ

УДК 519.713

И.О. ФАМИЛИЯ

НАЗВАНИЕ РУКОПИСИ

Аннотация (абзац 5-10 строк, кегль 10) помещается в начале статьи и содержит информацию о результатах описанных исследований.

Основной текст можно разделять на 2 и более подразделов с заголовками, выделенными полужирным шрифтом, пронумерованными арабскими цифрами, как показано в следующей строке.

1. Название раздела

Рисунки и таблицы (черно-белые, контрастные) помещаются в текст после первой ссылки в виде *переносимых объектов* и отдельно нумеруются, при наличии более одного рисунка (таблицы), арабскими цифрами. Рисунок содержит подрисовочную центрированную подпись (текстовая строка, расположенная вне рисунка, кегль 10) под иллюстрацией, как показано на рис. 1.

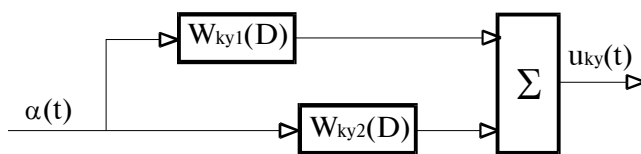


Рисунок 1. Двухзвенная система

Табличный заголовок располагается справа над таблицей, что иллюстрируется табл.1. Редакторы: CorelDraw, Table Editor и др.

Формулы нумеруются при наличии ссылок на них в рукописи. Рекомендуемый кегль формульного набора: обычный (переменная) – 11 пунктов, крупный индекс – 8, мелкий индекс (над- и подиндекс) – 8, крупный символ (основной) – 12, мелкий (индексный) математический символ – 10:

$$F_{i+j} = \sum_{i=1}^{b^k} F_j^i - \prod_{j=1}^{1+h^2} P_{R_{j+i}} + F^{j-1} + X^{\sum n^k} \quad (1)$$

Формат переменных (желательно не курсивом – без наклона) в тексте и формулах должен быть идентичным. В тексте над- и подиндексы составляют 70 % от кегля, которые рекомендуется опускать (поднимать) на 17 (33) % относительно основной строки.

Список литературы (включает опубликованные источники, на которые имеются ссылки в тексте, заключенные в квадратные скобки) печатается без отступа, кегль 9 пунктов.

Образец окончания текста рукописи (литература, сведения об авторах, реферат) представлен ниже.

Список литературы: 1. *Фамилия И.О.* Название книги. Город: Издательство, 1900. 000 с. 2. *Название сборника / Под ред. И.О. Фамилия.* Город: Издательство, 1900. 000 с. 3. *Фамилия И.О.* Название статьи / Название журнала. Название серии. 1997. Т. 00, № 00. С. 00-00.

Поступила в редколлегию 00.00.00

Фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и место работы. Научные интересы. Адрес, контактный телефон.

Рефераты на украинском и английском языках. Текст аннотации не должен дублировать реферат.

УДК 000.000.00

Назва статті українською мовою / Ініціали. Прізвище // АСУ та прилади автоматики. 2000. Вип. 00. С. 000-000.

Текст реферату.

Табл. 00. Іл. 00. Бібліогр.: 00 назв.

UDC 000.000.00

Title of paper / Initials. Surname // Management Information System and Devices. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2000. N 00. P. 000-000.

Text.

Tab. 00. Fig. 00. Ref.: 00 items.

Представление материалов

Рукопись, реферат, сведения об авторах — в одном файле, *поименованном фамилией первого автора*, на дискете 3,5 дюйма. Твердая копия материалов — для граждан Украины — в одном экземпляре: рукопись, подписанная авторами, рефераты, акт экспертизы, внешняя рецензия, подписанная доктором наук, заявление на имя главного редактора со сведениями об авторах.

Адрес редакции: Украина, 61166, Харьков, просп. Ленина, 14, ХНУРЭ, комната 321, тел. 70-21-326.

E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua.

Тематика статей, публикуемых в сборнике:

- Компьютерная инженерия
- Математическое моделирование
- Оптимизация и процессы управления
- Автоматизация проектирования и диагностика
- Информационные интеллектуальные системы
- Проектирование интегральных схем и микросистем
- Компьютерные технологии в образовании

Відповідальний випусковий В.І. Хаханов
Редактор О.П. Гужва
Комп'ютерна верстка Г.В. Хаханова, С.В. Чумаченко

Підп. до друку 27.12.2009. Формат 60x84¹/₈. Умов. друк. арк. 14,4.
Тираж 300 прим. Ціна договірна.

Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ).
Україна, 61166, Харків, просп. Леніна, 14.

Віддруковано ФОП Андреев К.В.
Україна, 61166, Харків, просп. Леніна, 14.