

# ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

*Збірник наукових праць*

*Тематичний випуск «Системний аналіз,  
управління та інформаційні технології»*

30'2012

Видання засноване Національним технічним університетом «ХПІ»  
у 2001 році

Держвидання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України  
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

## КООРДИНАЦІЙНА РАДА:

### Голова

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф.

### Секретар

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;  
Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Укр.  
Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.;  
А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;  
Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;  
М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;  
А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;  
В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;  
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;  
І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;  
В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.;  
Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;  
П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.;  
В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;  
С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;  
В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;  
В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;  
Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;  
В. С. Лупіков, д-р техн. наук, проф.;  
О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;  
В. І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.;  
П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;  
М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;  
В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;  
Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;  
Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;  
М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

### Відповідальний редактор

М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.

### Заст. відповідального редактора

О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

### Відповідальний секретар

М. І. Безменов, канд. техн. наук, проф.

І. П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.;  
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;  
О. Є. Єфімов, д-р техн. наук, проф.;  
І. В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.;  
В. П. Северин, д-р техн. наук, проф.;  
Л. М. Любчик, д-р техн. наук, проф.;  
Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.;  
Н. В. Шаронова, д-р техн. наук, проф.;  
М. О. Ястребенецький, д-р техн. наук, проф.

### АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».  
Кафедра «Системний аналіз і управління»,  
тел. (057) 707-61-03, (057) 707-66-54.  
E-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

УДК 681.5+519.7+519.8+004

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2012. – № 30. – 128 с.

У збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, студентами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств.

Для науковців, викладачів, аспірантів, студентів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, студентами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов.

Друкується за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ»,  
протокол № 6 від 25.05.2012 р.

ISSN 2079-0023

© Національний технічний університет «ХПІ», 2012 р.

**А. С. КУЦЕНКО**, д-р техн. наук, проф. каф. САиУ, НТУ «ХПИ»;  
**В. А. КОЛБАСИН**, канд. техн. наук, доц. каф. САиУ, НТУ «ХПИ»;  
**Д. В. КАЛИНИН**, магистрант каф. САиУ, НТУ «ХПИ»

## СЖАТИЕ ДАННЫХ КАРДИОГРАММ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Предлагается комбинация алгоритма сжатия звуковых данных с потерями IMA ADPCM и модификации словарного метода LZ77 для уменьшения объема записываемых данных кардиограмм во время суточного мониторинга по Холтеру. Первый алгоритм позволяет представить последовательность отсчетов в виде набора закодированных разниц между соседними элементами, а модифицированный LZ77 обеспечивает дальнейшую их компрессию за счет обработки повторяемых наборов данных. В результате, использование ADPCM приводит к сжатию данных в 4 раза, а модифицированный LZ77 улучшает этот показатель еще до 25%.

Запропонована комбінація алгоритму стиснення звукових даних із втратами IMA ADPCM та модифікації словникового методу LZ77 для зменшення об'єму записуваних даних кардіограм під час добового моніторингу за Холтером. Перший алгоритм дозволяє представити послідовність відліків у вигляді набору закодованих різниць між сусідніми елементами, а модифікований LZ77 забезпечує подальшу їх компресію за рахунок обробки повторюваних наборів даних. В результаті, використання ADPCM призводить до стиснення даних в 4 рази, а модифікований LZ77 покращує цей показник ще до 25%.

The combination of sound data lossy shrinking algorithm IMA ADPCM and dictionary technique LZ77 modification for recorded cardiogram data level reducing during Holter's diurnal monitoring is proposed. The first one allows to represent the sequence of samples as a set of coded differences between the sequential elements, and modified LZ77 provides the further compression of them for account of repeatable data sets processing. As a result, using of ADPCM leads to data compression by 4 times, and modified LZ77 enhances this rate to 25% more.

**Введение.** Несмотря на достижения диагностики, профилактики и лечения заболевания системы кровоснабжения продолжают занимать лидирующую позицию в причинах инвалидизации и смертности населения во многих странах, в частности, в Украине. Одной из причин такой тенденции является то, что самый важный орган человеческого тела склонен к многочисленным заболеваниям и скрыт от глаз врача. Что, в свою очередь, усложняет диагностику сердечнососудистых заболеваний.

В наше время, самым распространенным средством диагностики заболеваний сердца является электрокардиограф. Данный прибор позволяет записывать изменение разности электрических потенциалов сердца в процессе его сокращений, так называемую электрокардиограмму (ЭКГ). Однако для диагностики нарушений сердечного ритма часто требуется длительное, обычно суточное, наблюдение за пациентом, живущим обычным для него ритмом и образом жизни. Такой вид диагностики называется мониторингом ЭКГ по Холтеру.

Для выполнения Холтеровского мониторинга ЭКГ используются небольшие питаемые от аккумуляторов приборы, которые пациент на протяжении всего процесса мониторинга носит при себе. В этих приборах используются энергоэффективные процессоры со сравнительно низкой вычислительной производительностью. Однако результаты наблюдения в цифровом виде имеют довольно большой объем в сравнении с характеристиками подобных аппаратов, поэтому сжатие этих данных является актуальной проблемой.

Так как запись выполняется в режиме реального времени процессором с относительно низкой производительностью, выбор метода сжатия ограничен простыми методами сжатия. В данной работе исследуется возможность использования для сжатия данных кардиограмм совокупности метода сжатия с потерями IMA ADPCM и метода словарного сжатия LZ77.

**Алгоритм IMA ADPCM.** Метод компрессии звука IMA ADPCM (адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция, АДИКМ) [1] был разработан ассоциацией изготовителей и пользователей интерактивных мультимедийных систем (Interactive Multimedia Association, IMA), как единый стандарт, описывающий компрессию аудио и видеoinформации. Он основан на разработанном компанией Intel методе компрессии DVI.

Хотя в этом стандарте много деталей осталось неописанными, все существующие на сегодняшний день реализации IMA ADPCM работают одинаково. Поток аудиоданных преобразовывается в последовательность пакетов. Каждый пакет состоит из заголовка (от 2 до 8 байт), в котором записывается информация о состоянии кодека и последовательность 4-битных сжатых отсчетов.

В IMA ADPCM для хранения каждого отсчета используются 4 бита. Кодированный модуль делит разницу между двумя отсчетами на текущий размер шага и использует полученную величину в качестве очередного сжатого 4-битного выходного значения. Декомпрессор, наоборот, умножает кодовое значение на текущий размер шага и прибавляет полученный результат к предыдущему отсчету, получая тем самым очередной отсчет.

Для сокращения объема информации сам размер шага не хранится. Вместо этого компрессор хранит индекс в таблице, которая содержит в себе 89 возможных значений размера шага. Величины размеров шага изменяются в соответствии с экспоненциальным законом.

Важным элементом IMA ADPCM является механизм управления размером шага. В 4-битный отсчет записывается, представленное в прямом коде со знаком число в диапазоне от -7 до +7. Поскольку декомпрессору неизвестна величина следующего отсчета, он должен сделать выбор, базируясь на предыдущих значениях. Если полученное в результате преобразования приращения 4-битное число велико, вероятно, что следующее будет еще большим и для его размещения не хватит 4 бит. Если 4-битное представление приращения – величина небольшая, то это значит, что

имеющиеся 4 бита информации используются не в полной мере. В результате, если величина, получаемая при делении на размер шага, приближается к нулю – размер шага уменьшается, если она растет – шаг увеличивается.

Так как форма сигнала ЭКГ обычно мало меняется между двумя подряд идущими импульсами, можно попробовать использовать словарный метод сжатия LZ77 для кодирования повторяющихся участков сигнала.

**Словарное кодирование.** Основная идея метода LZ77 [2] состоит в использовании ранее считанных данных в качестве словаря. Кодер создает окно для входных данных и двигает его справа налево в виде строки символов, требующих сжатия, образуя скользящее окно. Оно разбивается на две части. Часть слева называется буфером поиска. Она будет служить текущим словарем, и в ней всегда содержатся символы, которые недавно пришли и были закодированы. Правая часть окна называется упреждающим буфером и содержит данные, которые будут сейчас закодированы. Обычно длина буфера поиска намного больше длины упреждающего буфера.

В ходе обработки данных кодер просматривает буфер поиска в обратном направлении (справа налево) и ищет в нем первое появление текущего символа из упреждающего буфера. Если он находит такой символ, то определяется, сколько совпадающих символов следует за ним. Запомнив позицию и длину найденной строки, кодер продолжает поиск, пытаясь найти более длинные совпадающие последовательности. Выбрав самую длинную из них, алгоритм кодирует ее в виде метки.

В общем случае, метка из LZ77 имеет три поля: смещение, длина и следующий символ в упреждающем буфере. Эта метка записывается в выходной поток, а окно сдвигается вправо (или входные данные сдвигаются влево) на количество позиций, которое соответствует длине совпадающей последовательности, а также еще на одну позицию для следующего символа. Если обратный поиск не выявил совпадение символов, то записывается метка со смещением 0 и длиной 0 [2].

Кодирование единичных символов в метки вида (0, 0, следующий символ) избыточно. Поэтому в данной работе используется идея метода LZSS [2], согласно которой к метке добавляется бит флага, указывающий на то, что находится после этого бита – закодированная последовательность, или следующий символ. Но, в отличие от оригинального метода, здесь предлагается указывать длину последовательности данных, для которых не найдено повторений, после флагового бита. Причем из-за малого размера кодов ADPCM не будут кодироваться повторения подстрок, имеющих малую длину, недостаточную чтобы окупить затраты на добавление метки повтора в поток данных. Минимальная длина повторяющейся строки, как и размер поля, определяющего число несжатых кодовых последовательностей, являются параметрами алгоритма и определяются экспериментально.

**Анализ полученных результатов.** Для определения характеристик предложенного метода сжатия было разработано специальное программное

обеспечение, реализующее методы ADPCM для первого этапа сжатия и методы LZ77 и его предложенную модификацию для второго этапа. При помощи программы был проанализирован набор из 50 записей ЭКГ длительностью порядка 60 минут с частотой дискретизации 100 Гц. Результаты приведены в таблице ниже.

Результаты сжатия ЭКГ предложенным методом

Вариант метода LZ77	Длина буфера поиска, бит	Коэффициент сжатия		
		Минимальная	Средняя	Максимальная
Обычный LZ77	8	3,36	4,21	4,96
	9	3,48	4,36	5,08
	10	3,6	4,49	5,16
Предложенная модификация	8	4,01	4,45	4,88
	9	4,02	4,56	5,02
	10	4,04	4,61	5,08

Проанализировав приведенные результаты, можно сказать, что предложенная двухэтапная схема в среднем обеспечивает более высокую степень сжатия по сравнению с применением только лишь алгоритма ADPCM, обеспечивающего коэффициент сжатия 4.

Также предложенная модификация метода LZ77 в целом обеспечила более приемлемые с практической точки зрения результаты сжатия, чем обычная версия этого алгоритма. Хотя максимальный коэффициент сжатия был достигнут именно для классического алгоритма, но для него же было получено увеличение объем результирующих данных. Предложенный алгоритм обеспечил несколько меньшие показатели сжатия в наилучшем случае, но и не привел к увеличению объема данных по сравнению с использованием только метода ADPCM. Эта его особенность является удобной для практического использования во встроенных устройствах, каковыми являются регистраторы ЭКГ по Холтеру.

**Выводы.** Предложенный метод сжатия позволяет увеличить степень сжатия ЭКГ в среднем до 4,5 раз. Он требует относительно малого количества вычислительных ресурсов и может найти применение при разработке систем суточного мониторинга ЭКГ по Холтеру.

**Список литературы:** 1. Кинтцель Т. Руководство программиста по работе со звуком / Т. Кинтцель. – М. : ДМК Пресс, 2000. – 432 с, ил. (Серия "Для программистов"). 2. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М. : Техносфера, 2004. – 368 с.

Надійшла до редколегії 08.05.2012

**А. С. КУЦЕНКО**, д-р тех. наук, профессор НТУ;  
**И. И. МАРЧЕНКО**, ассистент НТУ «ХПИ»

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ОКСИДНОГО ПЛЕНКИ ПРИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИОННОМ АЗОТИРОВАНИИ

Сформульована математична модель зміни товщини оксидного шару при іонному азотуванні металів і сплавів в залишковій атмосфері вакуумної камери. Отримано розрахунки характерних часів розпилення оксидних плівок при іонному азотуванні.

Сформулирована математическая модель изменения толщины оксидного слоя при ионном азотировании металлов и сплавов в остаточной атмосфере вакуумной камеры. Получены расчеты характерных времен стравливания оксидных пленок при ионном азотировании.

A mathematical model of thickness variation of the oxide layer during ion nitriding of metals and alloys in the vacuum chamber's residual atmosphere was formulated. Estimates of characteristic times of oxide films dissipation during ion nitriding were obtained.

**Введение.** На эффективность формирования нитридных слоев металлов и сплавов под воздействием ионного облучения влияют такие параметры, как температура образца, энергия пучка, плотность ионного тока. Одним из важных параметров технологического процесса является наличие и толщина оксидных слоёв на поверхности материала.

В работе [1] было показано, что наличие окисной пленки приводит к тому, что ионы азота не достигают поверхности обрабатываемого материала, из-за чего эффективность процесса ионной обработки падает.

На данный момент не существует математических моделей, описывающих изменение толщины оксидного слоя во время ионного облучения.

Целью данной работы являлось построение математической модели изменения толщины оксидного слоя при низкоэнергетическом ионном азотировании.

**Математическая модель изменение толщины оксидной плёнки.** Толщина оксидной пленки изменяется вследствие двух конкурирующих процессов. С одной стороны при ионном облучении с поверхности материала кислород удаляется вследствие процессов распыления, с другой – адсорбируется поверхностью из остаточной атмосферы.

Как известно из экспериментальных данных [2], оксидные плёнки могут образовываться из остаточной атмосферы. Скорость образования оксидного слоя можно оценить, исходя из кинетической теории газов [3]:

$$V_{od} = \frac{pN_A}{\rho\sqrt{2\pi\mu RT}}, \quad (1)$$

где  $p$  – парциальное давление кислорода,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $\rho$  – атомарная плотность кислорода,  $\mu$  – атомарная масса кислорода,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура.

Ионная обработка помимо имплантации вызывает распыление мишени, тем самым уменьшая толщину оксидного слоя. Скорость стравливания поверхности определяется распылением поверхностных атомов:

$$V_{spit} = \frac{j_a \cdot S_a(h, e_v)}{\rho}, \quad (2)$$

где  $j_a$  – плотность ионного тока,  $S_a(h, e_v)$  – интегральный коэффициент распыления, который зависит от текущей толщины оксидного слоя  $h$  и энергии пучка  $e_v$ .

Тогда изменение толщины оксидного слоя со временем можно описать следующим уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = \psi \left( \frac{pN_A}{\rho\sqrt{2\pi\mu RT}} - \frac{j \cdot S_a(h, e_v)}{\rho} \right), \quad (3)$$

где  $t$  – время, прошедшее от начала эксперимента. Толщина оксидной плёнки не может принимать отрицательные значения, для учета этого ограничения вводится функция  $\psi(q)$ :

$$\psi(q) = x\theta(q), \quad (4)$$

где  $\theta(q)$  – тэта-функция Хевисайда, заданная в форме

$$\theta(q) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Начальное условие для уравнения (3) может быть введено в виде

$$h(0) = h_0, \quad (6)$$

что соответствует наличию оксидной плёнки толщиной  $h_0$  в начале проведения эксперимента.

**Компьютерное моделирование изменения толщины оксидной плёнки.** В качестве материала, который подвергался ионной обработки, был

выбран алюминий ( $\rho = 50 \text{ ат/нм}^3$ ,  $\mu = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ). Уравнение (3) решалась численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка [4]. Значения интегрального коэффициента распыления  $S_a(h, e_v)$  вычислялись методом парных столкновений [5] для различных толщин оксидного слоя  $h$  для энергии осаждаемых ионов  $1 \text{ кэВ}$ . Из экспериментальных данных известно, что толщина оксида алюминия составляет  $5\text{-}10 \text{ нм}$  на начальном этапе облучения [6], поэтому при моделировании  $h_0$  было выбрано равным  $10 \text{ нм}$ .

На рис. 1 представлено изменение во времени толщины оксидного слоя в алюминии. Как видно из рисунка, за время порядка нескольких минут оксидный слой полностью стравливается, что соответствует экспериментальным данным [7].

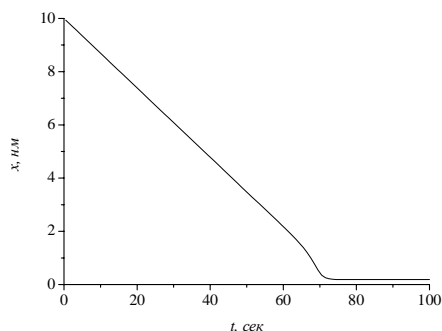


Рис 1 – Изменение толщины оксидного слоя в алюминии с ходом времени.

$$e_v = 1 \text{ кэВ}, j = 0.2 \text{ мА/см}^2, T = 500 \text{ К}.$$

На рис. 2 приведена зависимость времени полного стравливания оксидного слоя от давления остаточной атмосферы. Как видно из рисунка, при давлении остаточной атмосферы более  $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  оксидный слой не стравливается в процессе ионного облучения, что может приводить к уменьшению эффективности азотирования материалов. В то же время, при давлении менее  $10^{-4} \text{ Па}$ , значение времени, необходимого на стравливание оксидного слоя, меняется незначительно и составляет порядка четверти минуты.

В работе [8] были предложены математические модели ионного азотирования металлов и сплавов, заданные в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных. Эти модели могут быть уточнены путем учета влияния оксидного слоя на эффективность азотирования с помощью введения дополнительного уравнения, предложенного в данной работе (3).

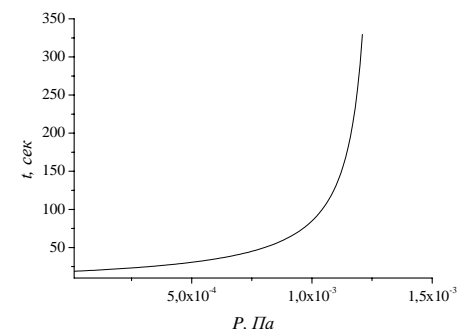


Рис. 2 – Время полного стравливания оксидного слоя в зависимости от давления остаточной атмосферы.  $e_v = 1 \text{ кэВ}$ ,  $j = 0.2 \text{ мА/см}^2$ ,  $T = 500 \text{ К}$ .

**Выводы.** В настоящей работе сформулирована математическая модель изменения толщины оксидного слоя при ионном азотировании металлов и сплавов в остаточной атмосфере вакуумной камеры. Проведены расчеты времени стравливания оксидного слоя алюминия для различных давлений остаточной атмосферы вакуумной камеры. Показано, что уменьшение парциального давления ниже определенных значений не будет оказывать значительного влияния на эффективность ионного азотирования.

Полученные результаты могут быть использованы для развития математических моделей низкоэнергетического высокодозового ионного азотирования.

**Список литературы:** 1. Марченко И. И. Влияние условий ионного облучения на эффективность азотирования алюминия / И. И. Марченко // Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2008. – № 26 : Темат. вып. : «Системный анализ, управление и информационные технологии». – С. 62–67. 2. Manova D. Oxygen behaviour during during PIII-nitriding of aluminium / D. Manova, S. Mandl, B. Rauschenbach // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. – 2001. – V. 178. – P. 291–296. 3. Лифшиц Е. М. Физическая кинетика / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М. : Наука, 1979. – 528 с. 4. Бахвалов Н. С. Численные методы. / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Бинум, 2001. – 720 с. 5. Biersak J. P. Computer Simulations of Sputtering / J. P. Biersak // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. – 1987. – B27. – P. 21–36. 6. Surface modification of aluminium by plasma immersion ion implantation / D. Manova, P. Hube, S. Mandl, B. Rauschenbach // Surf. Coat. Technol. – 2000. – V. 128-129. – P. 249–255. 7. Surface processes and diffusion mechanisms of ion nitriding of stainless steel and aluminium / W. Moller, S. Parascondola, T. Telbisova et. al. // Surf. Coat. Tech. – 2001. – V. 136. – P. 73-79. 8. Марченко И. И. Математическое моделирование влияния плотности ионного тока на эффективность ионного азотирования Fe, Cr и Fe-Cr-сплавов / И. И. Марченко, А. С. Мазманишвили // Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2007. – № 41 : Темат. вып. : «Системный анализ, управление и информационные технологии». – С. 9–16.

Надійшла до редакції 27.04.2012

**Н. А. МАРЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»;  
**Н. Ю. РИНГЕЛЬ**, магістрант НТУ «ХП»

## РОЗРОБКА РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ У МІСТІ

Розглядаються особливості розробки розподіленої системи для моделювання транспортних потоків у місті та аналізується рух автомобіля у складі транспортного потоку з урахуванням діючих на нього факторів.

Рассматриваются особенности разработки распределенной системы для моделирования транспортных потоков в городе и анализируется движение автомобиля в составе транспортного потока с учетом действующих на него факторов.

There have been reviewed feature of the development a distributed for the modeling of traffic in the city and analyzed the auto motion in the traffic flow, taking into account factors acting on it.

**Вступ.** В сучасних умовах руху гостро постає проблема управління транспортними потоками, особливо на міських вулицях і дорогах. Збільшення кількості транспортних засобів як особистих, так і суспільних, приводить до значного зростання інтенсивності і щільності руху транспортних потоків. У щільному транспортному потоці водій вже не вільний у виборі швидкості руху, він не завжди може зробити обгін і його поведінка значною мірою визначається загальним ритмом руху на дорозі [1].

Вирішення задачі моделювання автомобільних потоків у транспортній системі міста дає змогу проаналізувати роботу транспортної мережі, визначити та врахувати закономірності впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на характеристики транспортного потоку з метою підвищення ефективності функціонування транспортної мережі та пошуку ефективних стратегій управління транспортними потоками в місті. Таким чином, розробка розподіленої системи для моделювання транспортних потоків у місті є актуальною задачею.

**Постановка задачі.** Метою даної роботи є розробка розподіленої системи "клієнт-сервер" з централізованою базою даних, основним завданням якої буде аналіз транспортних потоків, оцінка перспективної швидкості, оцінка тривалості руху і пошук оптимальних маршрутів проїзду по центральній частині міста Харкова.

Початковими даними для системи є схема центральної частини міста Харкова та інформація про розташовані на ній вулиці.

В системі передбачається реалізація можливості пошуку об'єкта на карті, вимірювання відстані між об'єктами, пошук оптимального маршруту для різних умов руху з можливістю обрати допоміжні пункти маршруту, можливість перегляду визначних місць та можливість зв'язку користувачів з

адміністратором системи для збору оперативної інформації про стан доріг та інтерфейс для роботи адміністратора. Крім цього, необхідно розробити структуру бази даних для зберігання картографічної інформації, інформації для аутентифікації адміністраторів та інформаційних повідомлень.

**Опис програмної реалізації розподіленої системи.** Для програмної реалізації поставленого завдання була обрана мова PHP та сервер баз даних MySQL. Цей вибір обумовлений тим, що мова PHP є однією з найпопулярніших серверних скриптових мов, що переважає своєю простотою, швидкістю виконання та широкою функціональністю. Ще одна безумовна перевага обраної мови полягає в тому, що PHP розповсюджується безкоштовно з відкритими вихідними кодами (в рамках стратегії Open Source), що дає змогу не тільки вивчати та використовувати код для розробки нових додатків, а й брати участь у його доопрацюванні [2].

Клієнтська частина програми розроблена з використанням сучасних технологій jQuery і AJAX, завдяки чому здійснюється миттєве завантаження даних з сервера без перезавантаження сторінки. Використання бібліотеки jQuery UI дає змогу з легкістю створювати насичений інтерфейс користувача в веб-додатках з використанням анімації, ефектів, а також набору віджетів [3].

**Математичні методи моделювання транспортних потоків у місті.** В основу математичного моделювання автомобільного руху покладено дослідження швидкісного режиму руху потоку. На швидкість руху транспортних засобів в умовах міста впливає значна кількість факторів, основними з яких є:

- геометричні параметри дороги;
- погодно-кліматичні умови;
- інтенсивність руху і склад транспортного потоку;
- розмітка проїжджої частини;
- обмеження швидкості знаками дорожнього руху.

Для оцінки середньої швидкості руху транспортного потоку на окремому елементі дороги використано емпіричну залежність, яка враховує вплив дорожніх умов та інтенсивність руху [4]:

$$V = v \cdot V_0 - \alpha \cdot K_\alpha \cdot N, \quad (1)$$

де  $v$ ,  $\alpha$ ,  $K_\alpha$  – коефіцієнти, які враховують, відповідно, вплив стану дорожнього покриття залежно від погодно-кліматичних умов, складу руху та розмітки проїжджої частини на швидкість руху потоку;

$V_0$  – середня швидкість автомобіля в вільних умовах на даному елементі дороги, яка враховує вплив поєднання геометричних характеристик ділянки дороги та складу руху, км/год;

$N$  – інтенсивність руху в двох напрямках у певну годину доби, авт/год.

Інтенсивність руху обчислюється для певного часу доби. За основу береться середньодобова інтенсивність, яка, в свою чергу, залежить від пропускної здатності даного відрізка шляху. Тоді інтенсивність руху на певному відрізку дороги в залежності від часу доби визначається наступним чином:

$$N = K_{zod} \cdot P, \quad (2)$$

де  $K_{zod}$  – коефіцієнт переведення середньої інтенсивності руху в інтенсивність у певну годину доби;

$P$  – практична пропускна спроможність, авт/год.

Значення транспортної затримки на регульованих перехрестях залежить в основному від режиму роботи світлофорної сигналізації та оцінюється значенням середньої затримки одного автомобіля в напрямку, що розглядається. Для розрахунку оцінки середньої затримки транспортного засобу на перехресті використовується формула Ф. Вебстера [5]:

$$t_{\Delta p} = \frac{T_c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2N(1-x)} - 0,65 \left( \frac{T_c}{N} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)}, \quad (3)$$

де  $T_c$  – величина циклу світлофору, сек;

$\lambda$  – відношення тривалості сигналу, що дозволяє рух, до величини циклу світлофору, долі одиниці;

$N$  – інтенсивність руху транспортних засобів в напрямку, що розглядається, од/сек;

$x$  – міра насичення конкретного напрямку руху (відношення інтенсивності руху до пропускної спроможності), долі одиниці.

Формула (3) дозволяє визначити затримку на регульованих перехрестях враховуючи регулярний та випадковий характер прибуття автомобілів, а також враховує похибку при розрахунку по першим двом складовим формули. Розрахунок інтенсивності транспортного потоку, що поїде на перехресті у певному напрямку виконується виходячи з розрахунку загальної кількості рядів на даному відрізку шляху.

**Основні результати та висновки.** В даній роботі було розроблено математичну модель, засновану на дослідженні швидкісного режиму руху потоку та отримано емпіричну залежність швидкості від геометричних характеристик дороги, складу руху, часу доби та погоднo-кліматичних умов, а також використано формулу для розрахунку оцінки середньої затримки транспортного засобу на перехресті.

На рис. 1 представлено зміну тривалості руху протягом доби для маршруту довжиною понад 3,5 км через центральну частину Харкова від

перехрестя вул. Культури та вул. Леніна до перехрестя вул. Пушкінської та Театрального провулка.

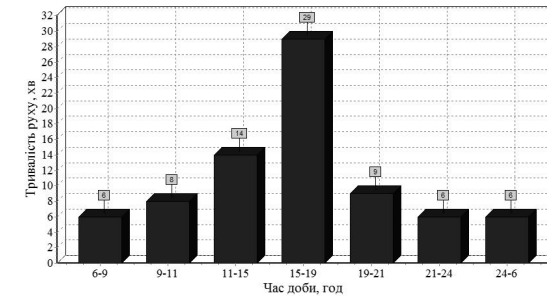


Рис. 1 – Зміна тривалості руху протягом доби для маршруту довжиною 3,5 км

Розглянувши отриману діаграму, можна зробити висновок, що, як і очікувалось, найдовша тривалість руху спостерігається у години пік, а найменша тривалість руху вночі. Таким чином, отримана діаграма підтверджує адекватність розробленої моделі.

Результат пошуку оптимального маршруту проїзду для описаного маршруту представлено на рис. 2.

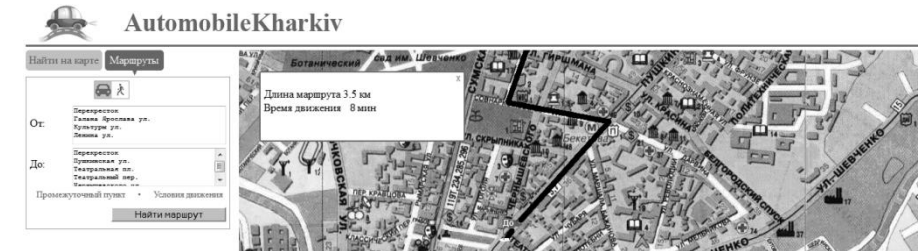


Рис. 2 – Результат пошуку оптимального маршруту проїзду

Таким чином, була розроблена розподілена система для моделювання транспортних потоків у місті. Розподілена система була перевірена на кросбраузерність та дає можливість користувачам знаходити оптимальні маршрути проїзду при заданих умовах руху.

**Список літератури:** 1. Семенов В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В. В. Семенов – М. : ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2004. 2. Котеров Д. В. РНР 5 / Д. В. Котеров, А. Ф. Костарев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 1104 с. 3. Офіційний сайт бібліотеки jQuery UI: <http://jqueryui.com/>. 4. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц / В. В. Сильянов – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 352 с. 5. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец – М. : Транспорт, 1990. – 255 с.

Надійшла до редколегії 10.05.2012

**Е. П. ГОМОЗОВ**, канд. физ.-мат. наук, доцент НТУ «ХПИ»;  
**И. А. АХИЕЗЕР**, бакалавр, НТУ «ХПИ»

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КУРСА АКЦИЙ НА ОСНОВЕ МГУА

Розглянуто задачу визначення вартості акцій. Визначено найкращий вид моделі. Обрана модель використана для прогнозування курсу акцій.

Рассмотрена задача определения стоимости акций. Определен наилучший вид модели. Выбранная модель использована для прогнозирования курса акций.

The problem of determining the quotes of stocks considered. Determine the best type of model. The selected model is used to predict of stock price.

**Введение.** В соответствии с ЕМН, рынки должны быть почти всегда равновесны, постарбитражные модели линейны. Классическими подходами к оценке финансовых активов на основе ЕМН являются фундаментальный и технический анализ. Хотя всегда существовали проблемы в прогнозировании бифуркаций курсов ценных бумаг (длин флэтов и трендов, точек перелома трендов, «мыльных пузырей», обрушений рынка), на современных рынках те очень редкие и очень сильные колебания доходности, которые ранее считались несущественными и отбрасывались при проверке распределений на нормальность, на самом деле оказались очень важными. В настоящий момент существует гипотеза относительно функционирования фондовых рынков – FMH [1], которая создавалась как альтернатива ЕМН и придает особое значение влиянию информации и инвестиционным горизонтам в поведении инвесторов. Есть попытки создать новые или модифицированные гипотезы поведения фондовых рынков – синергетическая модель, мультиагентная модель, модификация ЕМН на основе так называемой теории «игровой вероятности».

Из теории динамических систем следует, что сеть современных фондовых рынков должна включать в себя неустойчиво структурно неустойчивые рынки. Среди достаточно распространенных методов математического моделирования можно назвать: классический и фрактальный анализ временных рядов [2,3], общий фрактальный анализ [4], методы дифференциальных уравнений в частных производных [5], нейронные сети [6], многофакторной регрессионный анализ, генетический алгоритм, методы теории бифуркаций [7] и так далее. Однако практически все публикуемые исследования носят в основном теоретический характер, прогнозы, как правило, требуют большого количества наблюдений, плохо работают в окрестностях бифуркаций и не имеют компьютерной модели, которая могла бы строить прогнозы в режиме реального времени.

**Постановка задачи.** На первом этапе исследования исходных данных – курсов акций на базе классического и фрактального анализа временных рядов получить модели временных рядов для оценки и прогнозирования курса акций и построить по ним прогнозы. На втором этапе – из рассмотренных компаний выбрать те, по курсам акций которых получились самые плохие прогнозы, и проанализировать поведение «бифуркационных параметров» прогнозных моделей. На третьем этапе – использовать для прогнозирования курсов акций отобранных компаний Метод Группового Учёта Аргументов (МГУА), поскольку эта модель может учитывать влияние нескольких внешних факторов на изменение курса. Помимо формальных математических вычислений в модели используются экспертные методы прогнозирования, которые учитывают тенденцию спроса и предложения.

**Источники исходных данных.** Интернет-сайты [www.nyce.net](http://www.nyce.net); [mfd.ru](http://mfd.ru); [www.cmegroup.com](http://www.cmegroup.com); [tfc-charts.w2d.com](http://tfc-charts.w2d.com); [www.eia.gov](http://www.eia.gov); [www.fxclub.org](http://www.fxclub.org). Все входные данные имеют дневную дискретность. Было взято  $2^{12}=4096$  наблюдений для каждой компании IBM, KO, DIS, PASS, CSCO; компаний, входящих в базу индекса Доу-Джонса (Dow Jones Industrial Index); и самого индекса Доу-Джонса. Исходя из того, что временной ряд – это набор наблюдений за одинаковые промежутки времени, на этапе обработки информации была проведена сплайн-интерполяция входных данных для замещения отсутствующих членов временного ряда.

**Анализ исходных данных.** На первом этапе для моделирования прогнозного курса акций в рамках гипотезы FMH, которая является глобальной, измеряет безусловную дисперсию и имеет дело со всеми инвестиционными горизонтами, использовались процессы типа Парето-Леви, которые имеют фрактальные свойства.

В результате прогнозирования курсов на основе модели ARFIMA-FIGARCH [8], на втором этапе исследования, выяснилось, что наибольший интерес с точки зрения неопределенности прогноза занимает индекс Dow Jones. В самом деле, значение параметра  $\alpha=1$  является «бифуркационным» в том смысле, что при переходе значений  $\alpha$  через единицу меняется тип временного ряда. Хотя в любом случае, при  $\alpha \sim 1$ , мы имеем дело с чисто фрактальным распределением, однако, в этом случае историческую среднюю доходность и историческую волатильность не имеет смысла рассматривать для прогнозирования курсов акций, а прогнозные значения параметра  $\alpha$  на срок в две недели для индекса Dow Jones были достаточно близки к единице. Далее, на основе несколько модифицированной нами методики Дидье Сорнета [8], строился ряд критических точек  $t^n$  на временной оси, в которых вероятность резкого ценового скачка является максимальной, и прогнозные значения этого показателя на срок в две недели для индекса Dow Jones попадали в этот интервал. Теперь, в соответствии с [9], понятие внутреннего состояния курса в момент времени  $t$  определяется далее как значение



функции индекса фрактальности  $\mu(t)$  на предшествующем интервале  $\tau_\mu=32$  дня. Это, для данного случая, минимальный предшествующий интервал, где  $\mu(t)$  еще можно вычислить с приемлемой точностью ( $R^2 \approx 0,98$ ). С точки зрения фрактальной геометрии значение  $\mu(t)$ , характеризует количество локальных экстремумов ценового графика, или «дрожание» цены на любом фиксированном масштабе. При  $\mu(t)=0,5$  такое «дрожание» соответствует броуновскому движению, участки с повышенным значением  $\mu(t)>0,5$  соответствуют флэтам, а участки с пониженным значением  $\mu(t)<0,5$  – трендам. Далее для рядов курсов определялись прогнозные значения  $\mu(t)$  на срок в две недели. Оказалось, что наиболее неопределенное поведение также демонстрирует индекс Dow Jones.

**Решение задачи.** На третьем этапе было выбрано прогнозирование курса индекса Dow Jones на основе МГУА, программная реализация модели МГУА и сравнение результатов прогнозов курса индекса Dow Jones на основе МГУА и ARFIMA-FIGARCH. Используемая нами модель МГУА сформулирована в терминах нейросетевой архитектуры, называемой полиномиальной сетью [10,11].

Использованный нами индуктивный алгоритм отыскания модели оптимальной структуры состоит из следующих основных шагов. Задана выборка  $D = \{(x_n, y_n)\}_{n=1}^N, x \in R^m$ . Выборка разбивается на обучающую и тестовую. Обозначим через  $(l, c)$  – подмножества индексов из  $\{1, \dots, N\} = W$ , удовлетворяющие условиям разбиения:  $l \cup c = W, l \cap c = \emptyset$ . Матрица  $X_l$  состоит из тех векторов-строк  $x_n$ , для которых индекс  $n \in l$ . Вектор  $y_l$  состоит из тех элементов  $y_n$ , для которых индекс  $n \in l$ .

Далее используем полиномом Колмогорова–Габона:

$$Y = \omega_0 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \omega_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \omega_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

В этой модели  $x = \{x_i, i \in \overline{1, m}\}$  – множество свободных переменных; вектор-параметры  $\omega$  – весовые коэффициенты:

$$\omega = \langle \omega_i, \omega_{ij}, \omega_{ijk}, \dots | i, j, k, \dots = 1, \dots, m \rangle.$$

Базовая модель линейна относительно параметров  $\omega$  и нелинейна относительно свободных переменных  $x$ . Выбираем целевую функцию — внешний критерий, описывающий качество модели. Индуктивно порождаются модели-претенденты. При этом вводится ограничение на длину полинома базовой модели. Тогда базовая модель представима в виде

линейной комбинации заданного числа  $F_0$  произведений свободных переменных:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_1^2, x_1 x_2, x_2^2, \dots, x_m^R),$$

где  $f$  – линейная комбинация. Аргументы этой функции переобозначаются следующим образом:

$$x_1 \rightarrow a_1, x_2 \rightarrow a_2, \dots, x_1^2 \rightarrow a_\alpha, x_1 x_2 \rightarrow a_\beta, x_2^2 \rightarrow a_\gamma, \dots, x_m^q \rightarrow a_{F_0}.$$

Для линейно входящих коэффициентов задается одноиндексная нумерация  $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_{F_0})$ . Тогда модель может быть представлена в виде

линейной комбинации  $y = \omega_0 + \sum_{i=1}^{F_0} \omega_i a_i = \omega_0 + (\omega, a)$ , где  $(\omega, a)$  – скалярное произведение.

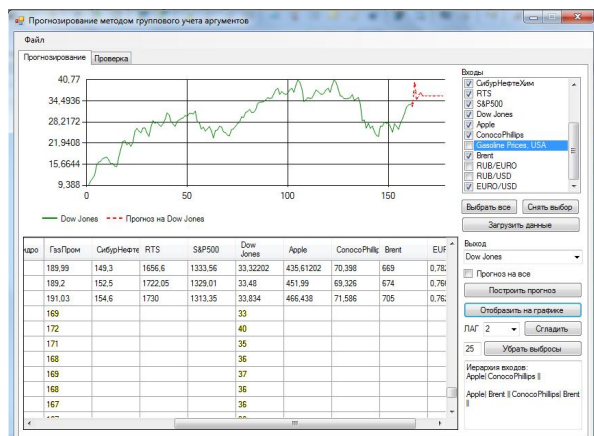
Каждая порождаемая модель задается линейной комбинацией элементов  $\{(\omega_i, a_i)\}$ , в которой множество индексов  $\{i\} = s$  является подмножеством  $\{1, \dots, F_0\}$ .

Настраиваются параметры моделей. Для настройки используется внутренний критерий — критерий, вычисляемый с использованием обучающей выборки. Каждому элементу вектора  $x_n$  – элемента выборки  $D$  ставится в соответствие векторов  $a_n$ , алгоритм построения соответствия указан выше. Строится матрица  $A_W$  – набор векторов-столбцов  $a_i$ . Матрица  $A_W$  разбивается на подматрицы  $A_l$  и  $A_c$ . Наименьшую невязку  $|y - z|$ , где  $z = A_W \omega_G$  доставляет значение векторов параметров  $\omega_G$ , который вычисляется методом наименьших квадратов:

$$\omega_G = (A_G^T A_G)^{-1} A_G^T y_G, \text{ где } G = \{l, c, W\}.$$

**Проверка модели.** При получении модели мы проверяем её на 80% от количества имеющихся данных и строим прогноз на 20% данных. Считаем среднюю абсолютную ошибку и выбираем подходящую модель. При больших выбросах и необратимых матрицах мы используем экспертные методы оценки результатов.

**Практическое применение.** На основе модели МГУА была создана простая финансово-аналитическая система прогнозирования курсов. Ниже на рисунке приведен пример построения прогноза курса индекса Dow Jones на две пост прогнозных недели:



Результаты прогнозирования

**Вывод.** Построенная финансово-аналитическая система способна давать более точные результаты по сравнению с применением для прогнозирования моделей ARIMA и ARFIMA-FIGARCH даже и в «критических» для этих моделей случаях. В дальнейшем построенную финансово-аналитическую систему на основе МГУА вполне возможно улучшить за счет разработки корректных методов подбора наиболее влияющих на прогноз факторов, а также комбинируя модель МГУА с другими методами прогнозирования курса акций и точек перелома тренда.

**Список литературы:** 1. Федоров А. В. Анализ финансовых рынков и торговля финансовыми активами. / А. В. Федоров – СПб. : Питер. 2007. – 240 с. 2. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. / Ю. П. Лукашин – М. : Финансы и статистика, 2003. – 415 с. 3. Гуляева О. С. Фрактальный анализ валютных временных рядов. / О. С. Гуляева, В. П. В. П. Цветков, И. В. Цветков // Финансы и кредит – 2007. – № 9. – С. 30–35 4. Peters E. Fractal Market Analysis. Applying Chaos Theory to Investment&Economics. / E Peters – J. Wiley&Sons, Inc. – New York, 1994. – 167 с. 5. Black F. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. / F. Black, M Scholes // Bell Journal of Economics and Management Science – 1973. – № 4. – С. 141–183 6. Ширяев В. И. Финансовые рынки: Нейронные сети, хаос и нелинейная динамика. изд.2, испр. и доп. / В. И. Ширяев – М. : Финансы и статистика. 2009. – 466 с. 7. Sornette D. Critical market crashes, / D. Sornette // – Physics Reports. – 2003. – № 378. – С.1–98. 8. Гомозов С. П. Моделирование оценки стоимости акций. / С. П. Гомозов, I. O. Сорокоумов, О. В. Яновский // – Вісник НТУ «ХП». – 2010. – № 67. – С. 34–38. 9. Дубовиков М. М. Размерность минимального покрытия и локальный анализ фрактальных временных рядов. / М. М. Дубовиков, А. В. Крайнев, Н. В. Старченко // Вестник РУДН. Серия прикладная и компьютерная математика. – 2004. – Т. 3 – № 1. – С. 30–44. 10. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. / А. Г. Ивахненко – Киев : Техника, 1975. – 312 с. 11. Степашко В. С. Анализ эффективности критериев структурной идентификации прогнозирующих моделей. – Проблемы управления и информатики. – 1994. – № 3–4 – С. 13–22.

Надійшла до редколегії 17.03.2012

**А. И. ФИЛИПЕНКО**, д-р техн. наук, профессор ХНУРЭ, Харьков;  
**Е. М. АНПИЛОГОВ**, канд. техн. наук, доц. ХНУРЭ, Харьков;  
**И. Е. АНПИЛОВА**, инженер-стажер ХНУРЭ, Харьков

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТОРЦОВ НАКОНЕЧНИКОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ НА ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Розроблена технологія доводки світлових наконечників на основі водорозчинних паст з використанням надтвердих та «м'яких» абразивних матеріалів. Проведений аналіз експериментальних досліджень по існуючій та запропонованій технології, по якості оброблювальних поверхонь.

Разработана технология доводки световых наконечников на основе водорастворимых паст с применением сверхтвердых и «мягких» абразивных материалов. Проведен анализ экспериментальных исследований по существующей и предлагаемой технологии, по качеству обрабатываемых поверхностей.

О technology of processing light waveguide connectors on the basis of water-soluble pastes with use of superhard and “soft” abrasive materials is developed. An analysis of experimental studies in the quality of processing surfaces is carried out according and suggested technologies.

Основным направлением развития систем обработки и передачи информации является использование оптического диапазона электромагнитных волн, что дает значительные преимущества по быстродействию и надежности такой аппаратуры. При этом важное значение имеют конструктивные особенности и технология изготовления компонентов световодных систем передачи информации.

В настоящее время требования к качеству обработки деталей компонентов волоконно-оптических линий связи сформулированы на основе влияния отдельных геометрических параметров на оптические характеристики этих компонент. В частности, при обработке торца штекера разъемного соединения важной задачей является обеспечение минимального переходного затухания, что, в свою очередь, требует глубокого исследования зависимости геометрических и физико-химических параметров поверхностей оптического наконечника от применяемой технологии доводки.

Перенести результаты исследований из других областей формообразования поверхности затруднительно, так как в типовом случае обрабатываемая структура оптического наконечника состоит из весьма незначительных по площади, чередующихся участков металла, полимера, стекла с различными физико-химическими свойствами.

Процесс доводки торца оптического наконечника должен обеспечить достижение заданной точности размеров, параметров качества поверхности,

минимальные изменения физико-химических свойств материалов. Соблюдение требований обеспечит стабильность работы соединения.

Существующая технология обработки торцевой поверхности наконечников разъемных соединений световодов предполагает подрезку наконечника преимущественно алмазным кругом на специальных станках, обеспечивающих перпендикулярность торца цилиндрической, так называемой базовой поверхности. Размер зерна алмазного круга лежит в пределах 10–15 мкм и, естественно, вызывает соответствующие дефекты на поверхности торца. После подрезки эта поверхность соответствует  $R_a = 1$  мкм и перпендикулярна базовой поверхности с погрешностью 5 мкм на обрабатываемом диаметре. Длина базовой поверхности соответствует номинальной с припуском 1–2 мкм. Следующей операцией является полирование торца на полировальных кругах из кожи последовательно окисью железа и оптическим полиритом в течение 15–20 минут. Наконечник и полировальный круг совершают сложное движение друг относительно друга» что предполагает нивелирование условий обработки наконечника с различных сторон и различных наконечников в касете. Благодаря большой емкости кассеты длительность полирования не является существенным препятствием, ограничивающим производительность.

После полирования шероховатость поверхности световода доводится до 0,025 мкм по параметру  $R_a$ , что вполне удовлетворяет требованию, исходя из допустимого переходного затухания» вызываемого шероховатостью.

Однако вследствие малых размеров обрабатываемых площадей отдельных материалов (порядка десятка квадратных микрометров) и их различных физико-химических свойств на торцах кварцевой жилы и стеклянного капилляра при подрезке появляются дефекты в виде трещин и сколов. Размеры дефектов сравнимы с размерами обрабатываемых площадей и не устраняются полировкой, что приводит к значительным потерям передаваемой через компоненты энергии и искажению информации. Но основная опасность заключается в инициировании дефектами последующего разрушения кварцевой жилы и капилляра в процессе климатических и других видов воздействий.

Для решения поставленной задачи авторами проведен анализ причин, способствующих появлению дефектов и эксперименты, подтверждающие сделанные выводы.

Так при подрезке торца кругом на основе связанного абразива на границе перехода между различными материалами появляются трещины и вырывы хрупкого стекла из образца. Величина и количество дефектов мало зависят от относительной скорости инструмента и детали. Однако, размеры, материал и форма абразивного зерна имеют решающее значение. Так называемые «мягкие» абразивы с менее острыми гранями дают значительно меньшее число и размеры дефектов, но производительность, стоимость и некоторые параметры качества обработки при работе с таким инструментом не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Тем более что в настоящее

время актуальной стала проблема создания универсальной технологии, позволяющей вести обработку наконечников, как в условиях цеха специализированного промышленного предприятия, так и в полевых условиях без использования громоздкого и энергоемкого оборудования.

Предположение, что обработка торца не связанным абразивом после подрезки при небольших относительных скоростях инструмента и детали даст положительные результаты, подтвердилось при предварительных экспериментах. В этих экспериментах были применены серийные алмазные и эльборовые пасты на жировой и водорастворимой основе в сочетании со стальным притиром [1–3].

Обработка наконечников после подрезки алмазным кругом с размером зерна 10 мкм проводилась его шлифованием последовательно пастами АСМ 10/7 ПВМ, АСМ 3/2 ПВМ и АСМ 2/1 ПОМ с удельным давлением 35 кПа и относительной скоростью 2 м/с, продолжительность обработки на каждой ступени составляла 1–2 минуты. При этом суммарный съем припуска равен 25–30 мкм. Шероховатость поверхности кварца в пределах  $R_a = 0,032$  мкм и наконечника из нержавеющей стали ГОСТ 5632-72  $R_a = 0,063$  мкм. Наблюдалась значительная выборка клеевого материала на основе эпоксидов (см. рис. 1), которая достигала 3–4 мкм по глубине. Дефекты в виде сколов размером до 5 мкм присутствовали, в основном, на материале капилляра, причем их размеры и количество в значительной мере отличались от партии к партии образцов, что можно отнести к различным физическим свойствам стекла капилляра в них.

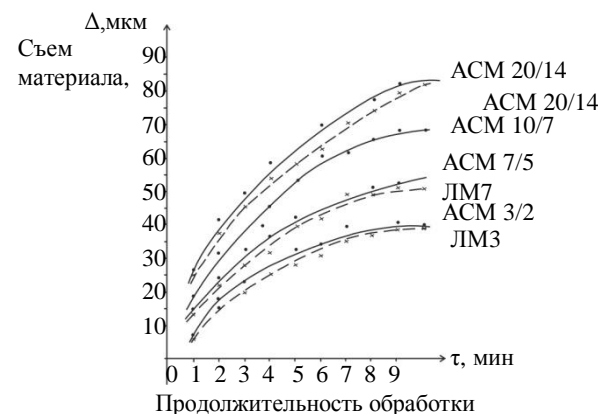


Рис. 1 – Зависимость съема материала от продолжительности обработки

В последующем была проведена серия экспериментов с различными материалами абразивов, притиров, а также относительных скоростей и давлений (см. рис. 2, 3).

Из всех вариантов сочетаний этих факторов наиболее приемлемым оказалось применение притира, покрытого лавсановой калькой ТУ 6–17–71–80 с нанесенной на ее поверхность абразивно-доводочной смесью на основе синтетического алмаза (для предварительной шлифовки) кубического нитрида бора (для финишной доводки).

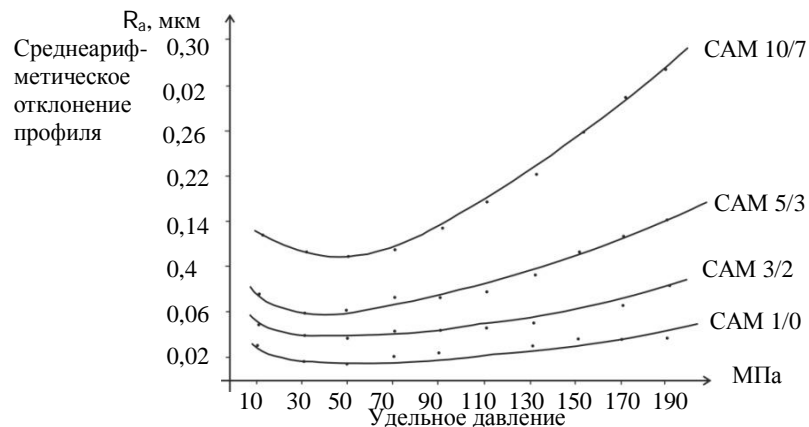


Рис. 2 – Зависимость среднеарифметического отклонения профиля от удельного давления

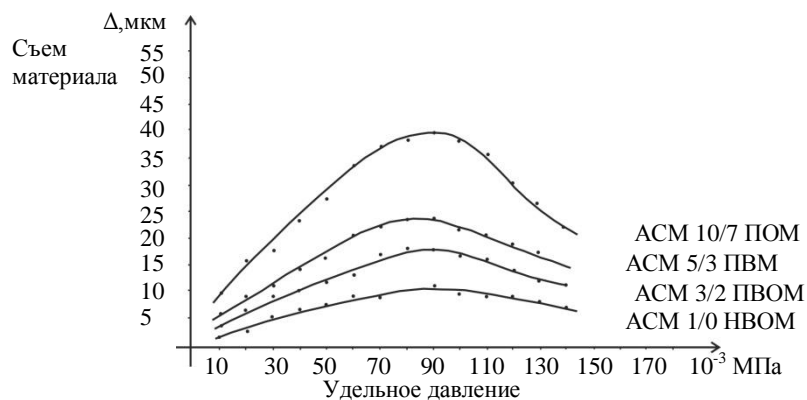


Рис. 3 – Зависимость съема материала от удельного давления

Для получения удовлетворяющей предъявляемым требованиям поверхности торца наконечника световода в этом случае достаточно двух переходов после подрезки. Предварительная шлифовка осуществляется алмазной пастой, основными компонентами которой являются порошок

синтетического алмаза размером АС 5/3 мкм и концентрацией 3 % по массе в высокомолекулярном соединении. Шлифовка осуществляется на станке с вращающимся притиром и колебательными движениями параллельно притиру кассеты с деталями. Это позволяет поставить практически все обрабатываемые детали в равные условия. Такая шлифовка в течение 2–3 минут при относительной скорости перемещения притира 2 м/с и удельном давлении 35 кПа позволяет снять припуск на детали порядка 20–25 мкм, что практически гарантирует удаление дефектного слоя с трещинами и смолами материала жилы и капилляра (см. рис. 3).

Это несколько противоречит установившемуся мнению о том, что зернистость абразива в 2–3 мкм не может дать такого качества поверхности. Но в результате предварительных исследований обнаружен процесс интенсивного дробления зерен этого абразива и скругление его граней, что и обеспечивает незначительную шероховатость в результате обработки.

По результатам контроля геометрических параметров наконечников (после их обработки) установлены значительные колебания длины базовой поверхности. Даже при соблюдении стабильности всех учитываемых факторов при обработке, этих колебаний не удалось исключить.

Для решения этой задачи авторами разработано специальное приспособление к станкам с вращающимся притиром, которое позволяет обеспечивать точность длины базовой поверхности и отклонение от перпендикулярности относительно этой поверхности в пределах 2–3 мкм.

Предлагаемые составы на синтетических жирных спиртах с применением поверхностно-активных веществ позволяют улучшить санитарно-гигиенические условия труда на операциях доводки, так как вместо органических растворителей (спирт, бензин, керосин и т.д.) применяется техническая вода с температурой 30–40°C для удаления составов доводки с обработанной поверхности.

Таким образом, решена задача получения отвечающих предъявляемым требованиям торцевых поверхностей штекеров разъемных соединителей и переключателей ВОЛС, обеспечивающих минимальное переходное затухание.

**Список литературы:** 1. Невлюдов И. Ш. Водорастворимая абразивная паста для обработки прецизионных деталей приборов / И. Ш. Невлюдов, Е. М. Анпилогов. – Х. : ХЦНТИ, 1980. – 4 с. 2. Невлюдов И. Ш. Устройство для обработки оптических наконечников / И. Ш. Невлюдов, Л. П. Лещенко [и др.] // А. С. № 1610454. – Бюл. № 44. – 1990. – 4с. 3. Анпилогов Е. М. Паста для обработки деталей из стальных и алюминиевых материалов / Анпилогов Е. М. [и др.] // Патент № 48199. – Бюл. №52010. – 4 с.

Надійшла до редколегії 10.05.2012

**О. В. ЄФІМОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХП»;  
**О. Д. МЕНЬШИКОВА**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»;  
**В. Л. КАВЕРЦЕВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»

### **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОТЛІВ-УТИЛІЗАТОРІВ ПАРО- І ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК**

Розглянуто математичну модель розрахунку парового котла-утилізатора ГТУ. Подані логіко-структурна блок-схема математичної моделі та ітераційний алгоритм розрахунку. Розроблений комплекс програм призначений для проведення теплових розрахунків парових котлів-утилізаторів будь-якої конструктивної схеми на різних навантаженнях і видах палива.

Рассмотрена математическая модель расчета парового котла-утилизатора ГТУ. Представлены структурная блок-схема математической модели и итерационный алгоритм расчета. Разработанный комплекс программ предназначен для проведения тепловых расчетов паровых котлов-утилизаторов любой конструктивной схемы на разных нагрузках и видах топлива.

The simulator steam boiler- utilizer considered is this article. The logical-structural scheme of mathematical model and the generalized iterative algorithm of steam boiler-utilizer calculation are submitted. The program-realizing algorithm of calculation is described.

Висока енергоємність і залежність економіки України від значних обсягів традиційного органічного палива, імпортованого за цінами світового рівня (газу – 44%, нафти – 17%, вугілля – 22%) для потреб енергетики, складна екологічна ситуація в країні, виснаження (у не дуже віддаленій перспективі) запасів всіх видів викопного палива ускладнюють енергетичну ситуацію в державі. Це, у свою чергу, викликає необхідність здійснення планомірної державної політики по енергозбереженню у всіх сферах суспільного виробництва України.

Багатьма фахівцями та вченими обґрунтовуються можливість збереження традиційних енергетичних ресурсів за рахунок впровадження технологій, у яких виробляється електрична та теплова енергія. В основному серед таких технологій розглядаються можливості когенерації при використанні газо- і паротурбінних установок. Сьогодні розроблені технології загального виробництва теплової й електричної енергії, які здатні не тільки задовольнити як більших, так і дрібних споживачів, але й значно рентабельніші, чим паротурбінні технології, які застосовуються сьогодні на підприємствах і ТЕЦ.

Звичайно технологія когенерації реалізується за допомогою газотурбінної установки (ГТУ) простого типу, у якій після газової турбіни встановлений котел-утилізатор. У ньому за рахунок залишкової теплоти відпрацьованих газів генерується пара або одержують гарячу воду, які використовуються для технологічних потреб виробництва або

теплофікаційних потреб. Друга технологія спільного виробництва електричної та теплової енергії, що стає все більше розповсюдженою в усьому світі, – газопарова технологія. Реалізується вона бінарної газо- паротурбінною установкою з паротурбінним теплоутилізаційним контуром, з якого основну частину зробленої пари подають на парову турбіну, пов'язану з електрогенератором, і при необхідності відбирають частину пари на теплофікаційні потреби.

Більше половини електростанцій, які будуються сьогодні у світі, будуть працювати по бінарному циклу, оскільки ККД установок бінарного циклу перевищив 55%, а одинична потужність установки може бути більше 500 МВт. Витрата палива майже вдвічі менша, чим у паротурбінних блоків, які зараз експлуатуються.

Увесь цей процес модернізації теплоенергетики, що спостерігається в індустріально розвинених країнах, є надзвичайно актуальним і для економіки та енергетики України. Тому когенерація, як одна з найбільш ресурсозберігаючих технологій, повинна займати визначальне місце в державній програмі підвищення енергоефективності і в першу чергу – в зв'язку з проблемою зменшення обсягів споживання країною природного газу. Впровадження когенераційних технологій має наслідком пряме скорочення обсягів газу, що споживався підприємством, зменшення витрат на енергоносії і зменшення собівартості продукції.

Роботи із проектування таких установок, а також по модернізації і реконструкції вже існуючих котельних установок, припускають рішення складних технічних завдань у вигляді виконання різноманітних розрахунків для визначення оптимальних характеристик котельного встаткування. Ці технічні завдання можуть бути вирішені на основі широкого використання сучасної обчислювальної техніки, систем і методів автоматизованого проектування.

Відомо, що автоматизоване проектування є дуже актуальним, що стрімко розвивається напрямком науково-технічного прогресу, оскільки дозволяє істотно скоротити строки розробки нових казанів і модернізації експлуатованих, підвищити їхню якість шляхом оптимізації конструкцій і режимів експлуатації.

Основу існуючих САПР котельних установок становлять математичні моделі теплових розрахунків і їхні комплекси, що реалізують, програм, що включають у себе сучасні методи багатofакторної оптимізації [1].

У цей час розроблено досить багато версій моделей і програм теплових розрахунків котлів різних типорозмірів [1–8]. Ці математичні моделі й програми мають різне функціональне призначення: деякі з них призначені для проведення конструктивних розрахунків, інші – для виконання перевірочних або оптимізаційних, діагностичних розрахунків і досліджень.

У даній статті описана розроблена математична модель теплового розрахунку парового котла-утилізатора, що працює в складі газотурбінної

установки або парогазотурбінної установки. Алгоритм і логіко-структурна схема моделі дозволяють робити розрахунок усього різноманіття елементів і схемних рішень, застосовуваних для котлів-утилізаторів в умовах сучасного проектування і виготовлення.

При моделюванні були зроблені наступні допущення:

- формули для визначення величин узяті з [9];
- гази, використовувані в котлах-утилізаторах чисті без часточок золи;
- склад газів близький до складу повітря, тому при обчисленні коефіцієнтів теплопровідності, в'язкості й критерію Прандтля застосовувалися програми інтерполяції табличних даних [9] для повітря;
- з моделі виключені розрахунки повітропідігрівників тому що в КУ за ГТУ вони відсутні.

Логічна блок-схема моделі теплового розрахунку котла-утилізатора представлена на рис. 1. Реалізований у моделі алгоритм складається з 4-х ієрархічних рівнів:

1-й рівень – керуюча програма;

2-й рівень – програми розрахунку теплового балансу котлів-утилізаторів, що працюють у режимах утилізації тепла газів за газовою турбіною або в режимі з підтопом ;

3-й рівень – програми розрахунку основних конструктивних елементів;

4-й рівень:

4.1 – програми розрахунку термодинамічних і теплофізичних параметрів теплоносіїв і робочих середовищ (води, пари, повітря й димових газів);

4.2 – програми розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі для нагрівних, випарних і пароперегрівних поверхонь для умов променистого теплообміну в газових потоках і для конвективного теплообміну. У програмах ураховується характер обтікання – подовжній або поперечний, тип поверхні – гладка або ребрена, тип пучка труб – коридорний або шаховий, робоче середовище – повітря, димові гази, вода, пара;

4.3 – програма розрахунку коефіцієнтів теплопередачі для різних теплообмінних поверхонь;

4.4 – програма розрахунку температурного напору для випадків прямого теплоносіїв, протитоку, послідовно-змішаного, паралельно-змішаного і перехресного струмів;

Керуюча програма в автоматизованому діалоговому режимі будує структуру теплової схеми котла, організовує обчислювальний процес і вводить вихідні дані, необхідні для роботи всього комплексу програм і розрахунку окремих елементів котла.

При моделюванні котла-утилізатора використовується великий перелік вихідної інформації. Для зручності користувача вся вихідна інформація компонується по технологічному принципі, що полегшує її підготовку. Ця інформація компонується у вигляді файлів і передається як вихідні параметри

в програми, оформлені як процедури. Всі файли, що містять інформацію, постачені коментарями.

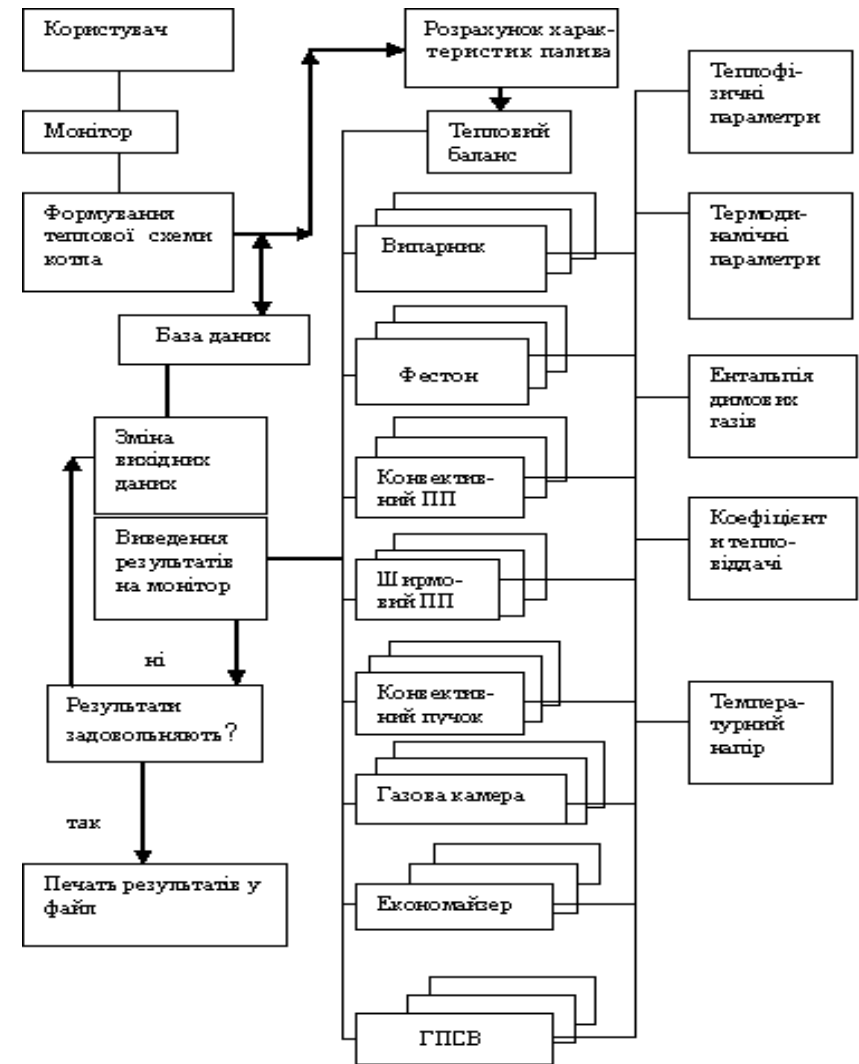


Рис. 1 – Логічна блок-схема теплового розрахунку котла-утилізатора ГТУ

Вихідною інформацією для теплового розрахунку котла-утилізатора є: значення витрати палива, паропродуктивності, об'єму і температури продуктів згоряння на вході в котел, температури відхідних газів,

температури та тиску перегрітої (насиченої) пари, температури і тиску живильної води, склад димових газів, відсоток продувки, наявність, тип і теплосприйняття пароохолодників.

Вихідною інформацією для розрахунків параметрів нагрівальних, випарних і пароперегрівних поверхонь є їхні геометричні характеристики: діаметр труб і їхня товщина; кроки труб; тип пучка – коридорний або шаховий. Крім того, як вихідна інформація використовуються коефіцієнти використання й теплової ефективності, а також характер взаємного руху потоків теплоносіїв і робочих тіл.

Програми розрахунку теплового балансу котла містять у собі розрахунки обсягів газоподібних продуктів згоряння, об'ємних часток трьохатомних газів, еталпії газу на вході в котел, значень корисної теплоти, ентальпії відхідних, втрат теплоти, ККД котла, кількості виробленої перегрітої пари. Крім цього, розраховується таблиця значень ентальпій димових газів для заданих значень коефіцієнтів надлишку повітря та розрахункового температурного діапазону газів 0 – 2000 °С із інтервалом температур 100 °С.

Блок-схема алгоритму програми розрахунку теплового балансу котла наведено на рис. 2.

Вихідними даними для розрахунку котла-утилізатора є витрата природного газу на газову турбину, кг/с; паропроductивність, кг/с, витрата димових газів на вході в котел, м<sup>3</sup>/с; температура газів на вході в котел, °С; температура відхідних газів, °С; температура перегрітої пари, °С; тиск перегрітої пари, МПа; температура живильної води, °С; температура холодного повітря, °С; вміст палива: води, %; двоокису вуглецю, %; сірководню, %; кисню, %; метану, %; етану, %; пропану, %; бутану, %; пентану, %; бензолу, %; азоту, %; вологовміст, г/м<sup>3</sup>; теплота згоряння палива, кДж/м<sup>3</sup>; частка продувки, %; установка пароохолодника – ПО відсутній; – ПО встановлено перед КПП, – ПО встановлено в розтин між 2 частинами КПП; – ПО встановлено після КПП; теплосприйняття пароохолодники, кДж/кг; тип ПО задається ознакою, якщо пароохолодник, що впорскує, то k\_po=1, якщо пароохолодник поверхневий, то k\_po=2; втрати від хімічного недопалювання, %; втрати від зовнішнього охолодження, %; модель враховує – задано об'ємну витрату й склад газів перед КУ чи задано витрату й склад природного газу перед ГТУ. Крім того, модель враховує працює котел з підтопом чи котел працює в режимі утилізації; масова витрата газів після ГТ, кг/с; надлишок повітря в ГТУ; витрата води через газовий підігрівник, температура води на вході в ГП, °С; температура води на виході із ГП, °С.

Програми розрахунків конструктивних елементів котла містять у собі розрахунки елементів із прямиоточним, протиточним або складним взаємним рухом теплоносіїв і робітничих середовищ для конвективного та ширмового пароперегрівників, водяного економайзера (у тому числі з ділянкою кипіння), повітропідігрівника, випарника, конвективного пучка, фестона, газового підігрівника сітьової води й екранів газових камер.

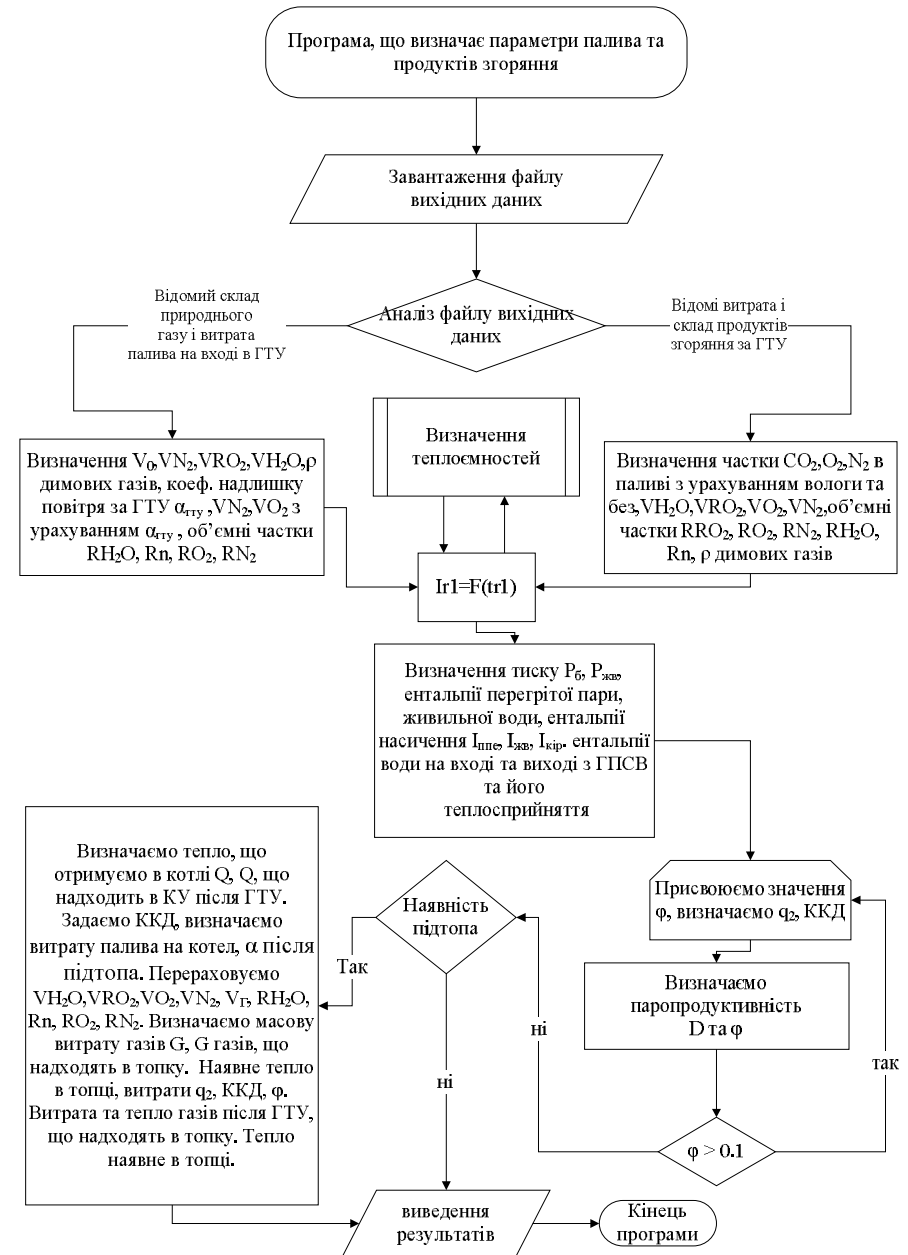


Рис. 2 – Блок-схема алгоритму програми розрахунку теплового балансу котла

Ці програми дозволяють по заданих параметрах, типу взаємного руху теплоносіїв і робітничих середовищ на вході в елемент, по типі теплообміну, по характеристиках поверхонь нагрівання визначити параметри теплоносіїв і робітничих середовищ на виході з елемента. Алгоритми розрахунків відповідають нормам теплового розрахунку котлів [9].

Процес розрахунку здійснюється у вигляді послідовних ітерацій. Він закінчується, коли розрахункова різниця теплосприйняття поверхонь стає менше заданої величини. Ця величина становить, як правило, для екранів газових камер і додаткових поверхонь 10 %, а для ширмових поверхонь, конвективних пучків, пароперегрівників, випарників, водяних економайзерів і повітропідігрівників – 2%. Відносна погрішність теплового балансу всього котла не повинна перевищувати 0,5%.

Кількість типів поверхонь, що розраховуються, теплообміну визначається існуючим досвідом конструювання котлів-утилізаторів [10-13].

Пакет програм для розрахунків термодинамічних і теплофізичних властивостей теплоносіїв і робітничих середовищ є складовою частиною програм 4-го рівні логічної структури моделі. Він призначений для апроксимації й інтерполяції значень таблиць термодинамічних і теплофізичних параметрів води, водяної пари [14], повітря й димових газів [9], кривих (наприклад, рис. 3) значень шуканих параметрів. До складу цього пакета входять більше 50 програм.

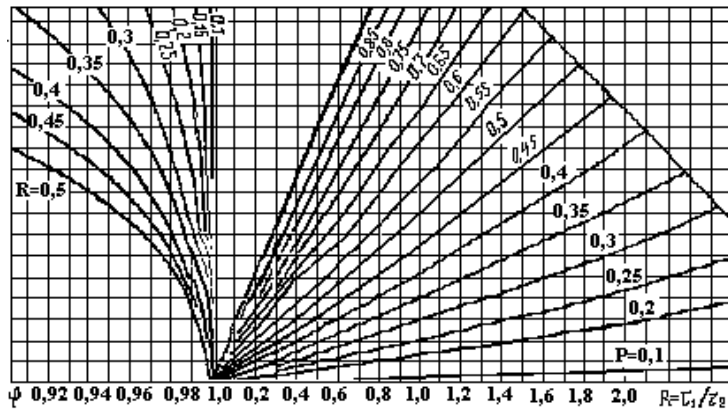


Рис. 3 – Номограма для определения температурного напора

Програми термодинамічного розрахунку параметрів води й водяної пари визначають: значення тиску по температурі та значення температури по тиску на лінії насичення; значення тиску, температури й ступені сухості пари по ентropії й ентальпії; значення питомих об'ємів, ентropії й ентальпії води й пара по тиску й температурі; значення температури води по тиску й ентальпії; значення температури й ступеня сухості пари по тиску й ентальпії; значення

ентальпії пари по тиску й ентropії. Вони застосовні для областей докритичного тиску.

Програми розрахунків теплофізичних параметрів води й водяної пари визначають значення коефіцієнтів динамічної й кінематичної в'язкості, теплоємності, критерію Прандтля. Вони застосовні для розрахункових тисків від 0,1 до 40 МПа й температур від 0 °С до 700 °С, а також на лінії насичення. Програми розрахунків теплофізичних параметрів для повітря визначають значення критерію Прандтля, коефіцієнтів кінематичної в'язкості й теплопровідності. Вони застосовні в діапазоні температур 0 – 2300°С. Програми розрахунків термодинамічних і теплофізичних параметрів для димових газів визначають: значення температур – по ентальпіям, коефіцієнтів теплоємності – по температурах, критерії Прандтля, коефіцієнти кінематичної в'язкості й теплопровідності. Вони застосовні для температур, що лежать у діапазоні 0–2300 °С. Для димових газів, що мають склад, відмінний від середнього, для діапазону об'ємних часток водяних парів у них  $r_{H_2O} = 0 - 0,29$  ураховуються відповідні відхилення коефіцієнтів кінематичної в'язкості, теплопровідності та критерію Прандтля. Робота програмного комплексу починається з формування розрахункової теплової схеми котла-утилізатора. Із цією метою вводиться число теплообмінних поверхонь, розташованих по ходу газів, і число елементів по ходу робочого середовища (води, пароводяної суміші й пари). Потім у діалоговому режимі, відповідно до обраної схеми котла, задаються типи теплообмінних поверхонь, розташовуваних одна за одною. Як ми вже відзначали, розроблена математична модель припускає розрахунок наступних типів поверхонь: екрани газової камери, фестони, ширмові й конвективні пароперегрівники, випарники різних конструкцій, водяні економайзери. Для пароводяного тракту барабанних котлів до цього переліку додається барабан.

Після автоматизованого формування теплової схеми котла-утилізатора виконується його тепловий розрахунок в ітераційному режимі. Кількість ітерацій при коректному завданні вихідних даних становить 3 – 4. Одержані результати для зручності конструктора-проектувальника оформлені у вигляді таблиці заданих у якості вихідних даних параметрів, результатів розрахунку теплового балансу й таблиць значень теплових і конструктивних характеристик, певних для всіх поверхонь нагрівання. Розроблений комплекс програм призначений для проведення теплових розрахунків парових котлів-утилізаторів за ГТУ будь-якої конструктивної схеми для газоподібного палива.

**Список літератури:** 1. Левин М. М. Система КРОКУС – автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок / М. М. Левин, П. И. Волковицкая, Ю. П. Лаптин и др. // Энергетика и Электрификация. – 2001. № 7. – С. 45–48. 2. Бернаджевский В. С. Математические модели – основа систем автоматизированного проектирования паровых котлов / В. С. Бернаджевский // Теплоэнергетика. –1997. № 9. – С. 20–23.



3. *Бернаджевский В. С.* Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ / *В. С. Бернаджевский, Н. М. Оскорбин* // Теплоэнергетика. – 2002. № 8. – С. 48–50.
4. *Виленский Т. В.* Тепловые конструкторские расчеты поверхностей нагрева парогенератора на ЭВМ / *Т. В. Виленский* // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. № 9. – С. 99–103.
5. *Хорьков Н. С.* Пакет программ для моделирования парового котла на ЭВМ третьего поколения / *Н. С. Хорьков, Н. Д. Михайкина, Т. Б. Сизова* // Теплоэнергетика. – 1981. – № 9. – С. 45–48.
6. *Терентьев В. Д.* ППП для теплового расчета котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов / *В. Д. Терентьев, Ю. Н. Кузнецов, Б. Я. Певзнер, А. А. Костюченко* // Труды ЦКТИ. – 1984. Вып. 210. – С. 72–74.
7. *Безгрешнов А. Н.* Блок-схема расчета тепловых схем барабанных котлов / *А. Н. Безгрешнов, Е. М. Шукин, Б. Н. Шлейфер* // Теплоэнергетика. – 1983. № 5. – С. 26–28.
8. *Ефимов А. В.* Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций / *А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова, Адель Аль Тувайни* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 7. – С. 72–78.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. – М. : Энергия, 1973. – 296 с.
10. *Воинов А. П.* Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / *А. П. Воинов, В. А. Зайцев, Л. И. Куперман, Л. Н. Сидельников*. – М. : Энергоатомиздат, – 1989. – 270 с.
11. *Воинов А. П.* Паровые котлы на отходящих газах / *А. П. Воинов, Л. И. Куперман, С. П. Сушон*. – К. : Вища школа, – 1983. – 176 с.
12. Котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические. Отраслевой каталог. – М. : ЦНИИТЭИТяжмаш, – 1990. – 124 с.
13. *Куперман Л. И.* Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности // *Л. И. Куперман, С. А. Романовский, Л. Н. Сидельковский*. – К. : Вища школа, – 1986. – 279 с.
14. *Ривкин С. Л.* Термодинамические свойства воды и водяного пара // *С. Л. Ривкин, А. А. Александров*. – М. : Энергия. – 1975. – 78 с.

*Надійшла до редколегії 05.02.2012*

УДК 51–7:368.025.1:21

*А. А. КУЛИК*, магистрант НТУ «ХПИ»

## **О РАСЧЕТЕ ПРЕМИЙ ПРИ ОБЯЗАТЕЛЬНОМ СТРАХОВАНИИ АВТОГРАЖДАНСКОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ**

На прикладі страхового портфелю однієї страхової компанії досліджено вплив тарифних класів, що були введені на законодавчому рівні для легкових автомобілів, на частоту страхових позовів та розмір страхових відшкодувань при страхуванні цивільно-правової відповідальності власників наземних транспортних засобів. Виконано розрахунок коригуючих коефіцієнтів для цих класів. Проведено порівняння отриманих результатів з параметрами розрахунку премій, що встановлені Регулятором.

На примере страхового портфеля одной страховой компании исследовано влияние тарифных классов, законодательно введенных для легковых автомобилей, на частоту страховых исков и размер страховых выплат при страховании гражданской-правовой ответственности владельцев наземных транспортных средств. Выполнен расчет корректирующих коэффициентов для этих классов. Проведено сравнение полученных результатов с параметрами расчета премий, установленных Регулятором.

This work examines the impact of the legislative for automobiles tariff classes on the frequency of insurance claims and the amount of insurance payments at the compulsory third party car insurance by

using the example of insurance portfolio of one insurance company. Adjustment coefficients are calculated for these classes. Achieved results are compared with statutory parameters for calculation of insurance premium.

**1. Введение.** В соответствии с Законом [1] в Украине страхование гражданско-правовой ответственности владельцев наземных транспортных средств (в дальнейшем – ОСАГО) является обязательным видом страхования. В настоящее время ОСАГО один из наиболее распространенных видов страхования в стране, а для ряда страховых компаний основной вид деятельности.

Порядок реализации ОСАГО определяется Законом [2], которым, в частности, предусмотрена жесткая регламентация тарифной политики страховых компаний. А именно, Закон предопределяет фиксированный набор тарифных классов, в соответствии с которым расчет страховой премии в ОСАГО всеми компаниями производится по одинаковой схеме, использующей базовую константу (базовый платеж) и систему корректирующих коэффициентов, соответствующих тарифным классам.

При введении Закона [2] в действие (01.01.2005 г.) базовый платеж был рассчитан в рамках объединения страховщиков – моторно-транспортного страхового бюро Украины (МТСБУ) и отражал некоторые усредненные характеристики сложившегося к тому времени рынка ОСАГО и априорные предположения о развитии этого рынка. Введение тарифных классов и системы корректирующих коэффициентов определялись исключительно на основе априорных соображений и зарубежного опыта данного вида страхования.

В процессе развития рынка ОСАГО в Украине параметры расчета премий пересматривались [3], однако, основная концепция – централизация расчета – сохранялась.

В связи с этим значительный интерес представляет анализ адекватности директивно (Законом) введенных тарифных классов и параметров расчета премий страховому портфелю конкретной страховой компании.

В настоящей работе на примере одной страховой компании частично исследуется указанная задача.

## **2. Постановка задачи**

В автомобильном страховании владельцы транспортных средств (ТС) объединяются в «классы однородности» (в дальнейшем – факторы), примерами которых могут служить тип ТС (легковые автомобили, грузовые автомобили и т.д.), стаж водителя, территория преимущественного использования ТС и т.п.

Факторы, как правило, рассматриваются на нескольких уровнях. Так, в соответствии с Законом [2] фактор «Легковые автомобили» изменяется на четырех уровнях, определяемых объемом двигателя автомобиля.

Априори предполагается, что фактор, по отношению к которому сформирована однородная группа, оказывает значимое влияние на

изменчивость некоторого рассматриваемого показателя, а выделенные уровни фактора отличаются друг от друга по степени этого влияния. В автомобильном страховании в качестве показателей, характеризующих ситуацию в группе однородности в целом и непосредственно влияющих на размер страховой премии, обычно рассматриваются частота страховых исков и среднее значение страховой выплаты.

Таким образом, Закон [2], вводя в ОСАГО факторы и уровни факторов (тарифные классы), предполагает их значимое влияние на указанные показатели, количественным выражением которого является предусмотренная Законом система корректирующих коэффициентов.

Задачами данной работы являются исследование влияния уровней фактора «Легковые автомобили» на частоту страховых исков и размер страховых выплат, а также расчет соответствующих значений корректирующих коэффициентов.

Базой анализа является страховой портфель одной страховой компании. Рассмотрены данные о годовых договорах страхования, заключенных в 2008 г.

### 3. Анализ влияния объема двигателя легкового автомобиля на частоту страховых исков

Согласно Закону [1] фактор «Легковые автомобили» изменяется на четырех уровнях, определяемых объемом (в кубических сантиметрах) двигателя автомобиля. А именно, легковые автомобили с объемом двигателя до 1600 кубических сантиметров (кодировка В1), легковые автомобили с объемом двигателя в диапазоне 1600 – 2000 кубических сантиметров (кодировка В2), легковые автомобили с объемом двигателя в диапазоне 2000 – 3000 кубических сантиметров (кодировка В3) и легковые автомобили с объемом двигателя, превышающем 3000 кубических сантиметров (кодировка В4).

Анализ влияния объема двигателя на частоту страховых исков проводится с использованием аппарата статистической проверки статистических гипотез [4].

В качестве основной гипотезы принимается предположение об отсутствии статистической зависимости между объемом двигателя легкового автомобиля и частотой страховых исков, т.е.

$$H_0 : p_1 = p_2 = p_3 = p_4, \quad (1)$$

где  $p_1 - p_4$  – частоты страховых исков в классах легковых автомобилей, характеризуемых объемами двигателей В1–В4 соответственно.

Конкурирующая гипотеза состоит в предположении о том, что основная гипотеза не верна.

В таблице 1 приведено распределение частоты страховых исков по типам легковых автомобилей.

Таблица 1 – Частота страховых исков

	ТИПЫ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ				ДЛЯ ФАКТОРА В ЦЕЛОМ
	В1	В2	В3	В4	
Число договоров страхования ( $n$ )	317 213	60 680	49 127	6 378	433 398
Число исков ( $m$ )	1 384	372	274	46	2 076
Частота страховых событий ( $p$ )	0.0044	0.0061	0.0056	0.0072	0.0048

Внешний анализ поведения частоты страховых исков (рис. 1) показывает отсутствие монотонного роста частоты в зависимости от объема двигателя легкового автомобиля, который предполагается Законом [2].

Формальное тестирование статистической гипотезы  $H_0$  показывает, что гипотеза отвергается при уровне значимости 0,05.

Аналогичный результат получен при проверке гипотезы о равенстве частот для каждой пары классов.

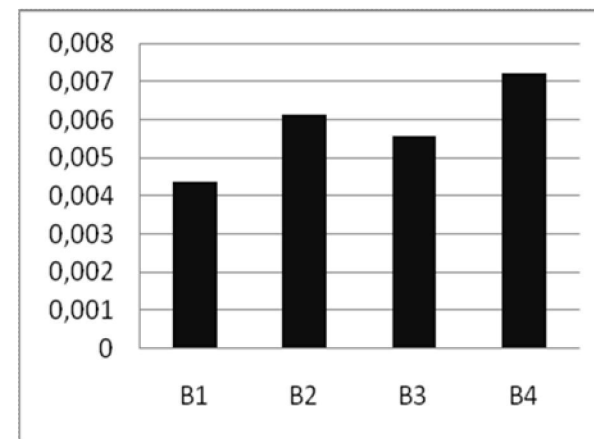


Рис.1 – Изменение частоты страховых исков в зависимости от объема двигателя легкового автомобиля

Таким образом, в рамках анализируемых данных предусмотренные Законом [2] классы легковых автомобилей В1–В4 действительно различаются по степени влияния на частоту страховых исков. Однако подчеркнем при этом, что отмеченное отсутствие монотонного роста частот страховых исков не соответствует монотонному росту директивных корректирующих коэффициентов (таблица 3).

#### 4. Анализ влияния объема двигателя легкового автомобиля на размеры страховых выплат

Предварительный анализ влияния объема двигателя легкового автомобиля на размеры страховых выплат проводился на базе результатов дескриптивного анализа статистических данных, часть которых приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Дескриптивный анализ размеров страховых выплат (грн.) в классах легковых автомобилей

VARIABLE	N	MEAN	ST DEV	MIN	MEDIAN	MAX
B1	817	7220.43	7067.70	263	4662	49951
B2	233	7592.72	7634.87	293	4551	49980
B3	173	6970.47	6764.37	809	4132	33128
B4	25	11699.84	9841.83	340	7132	25500

Анализируя таблицу 2, отметим отсутствие монотонного роста средних значений страховых выплат в классах B1–B3, а также близость дисперсий и медиан в этих классах.

Так как в некоторых методиках расчета корректирующих коэффициентов существенно используются средние значения страховых выплат в классах однородности, их анализ представляет самостоятельный интерес.

На рис. 2 представлены 95%-е доверительные интервалы для средних значений выплат в каждом классе однородности.

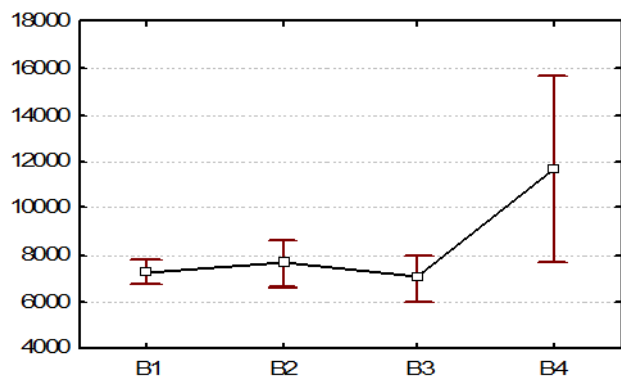


Рис. 2 – 95-процентные доверительные интервалы для средних значений выплат

Сравнение средних значений выплат, их доверительных интервалов и медиан распределения в классах B1–B3 позволяет предположить однородность распределений размеров страховых выплат в этих классах. Формальная проверка предположения проведена с помощью непараметрических статистических методов [4].

Гипотеза о равенстве дисперсий распределений страховых выплат в классах B1–B3 тестировалась с помощью критерия Левена при 5%-ном уровне значимости. Анализ показал, что статистические данные не противоречат гипотезе. Заметим при этом, что гипотезы о попарном равенстве дисперсий в классах B1–B3 дисперсии в классе B4 отвергаются.

Аналогично, с помощью рангового критерия Краскала-Уоллиса тестируется гипотеза о равенстве медиан распределений страховых выплат в классах B1–B3. Анализ показал, что статистические данные не противоречат гипотезе.

Однородность распределений размеров страховых выплат в классах B1–B3 подтверждается двухвыборочным тестом Колмогорова-Смирнова. Он показал, что статистические данные не противоречат гипотезе о равенстве функций распределения страховых выплат в каждой паре классов.

Резюмируя проведенный анализ, можно констатировать, что значимое различие размеров страховых выплат имеет место только между классом B4 и каждым из классов тройки B1–B3.

#### 5. Расчет корректирующих коэффициентов

**5.1. Методика расчета.** В проведенном расчете корректирующих коэффициентов применялись две процедуры – частотный метод и метод теоретической премии.

Частотный метод состоит в сравнении частоты страховых исков в постулируемом тарифном классе (уровне фактора) с частотой исков по портфелю в целом. Таким образом, корректирующий коэффициент  $\lambda_i$  для  $i$ -го уровня рассматриваемого фактора определяется по формуле

$$\lambda_i = \frac{p_i}{p^*}, \quad (2)$$

где  $p^*$  – частота страховых исков по портфелю в целом;

$p_i$  – частота страховых исков в классе однородности, соответствующему  $i$ -му уровню фактора.

Метод теоретической премии (теоретическая премия – произведение частоты страховых исков и среднего значения суммы страховых выплат по одному договору страхования) аналогично предыдущему методу сравнивает теоретическую премию в тарифном классе с теоретической премией по портфелю в целом [5]. Таким образом, корректирующий коэффициент  $v_i$  для

$i$ -го уровня рассматриваемого фактора в этом методе определяется по формуле

$$v_i = \frac{\mu_i p_i}{\mu^* p^*}, \quad (3)$$

где  $\mu^*$  – среднее значение суммы страховых выплат по одному договору страхования, вычисляемое по портфелю в целом;

$\mu_i$  – среднее значение суммы страховых выплат, соответствующее  $i$ -му уровню фактора.

Следует отметить, что рассмотренные методы ориентированы на автономное изучение классов однородности отдельных факторов и не учитывают их связь. Однако размер убытка может определяться взаимодействием факторов [6], таким образом, их совместное рассмотрение дает дополнительную информацию при оценке значений корректирующих коэффициентов.

### 5.2. Результаты расчета корректирующих коэффициентов.

Результаты расчета корректирующих коэффициентов приведены в таблице 3. Наряду с рассчитанными значениями корректирующих коэффициентов, в таблице указаны соответствующие значения директивных корректирующих коэффициентов.

Таблица 3 – Результаты расчета значений корректирующих коэффициентов для классов однородности фактора «Легковые автомобили»

Тип ТС	Частотный метод	Метод теоретической премии	Директивные коэффициенты
B1	0.93	0.91	0,71
B2	1.31	1.34	0,94
B3	1.19	1.12	1,39
B4	1.54	2.43	1,41

Проведенная ранее проверка адекватности введенных Законом [2] уровней однородности обнаружила отсутствие априори предполагавшегося монотонного роста (с увеличением объема двигателя) частот страховых событий для легковых автомобилей. Поведение полученных в результате расчета значений корректирующих коэффициентов отражает эти эффекты.

Отметим также значительное расхождение полученных значений корректирующих коэффициентов с директивными коэффициентами.

**6. Выводы.** Проверка адекватности директивных тарифных классов для легковых автомобилей портфелю рассматриваемой страховой компании показывает, что не все априорные предположения подтверждаются. Классы легковых автомобилей B1–B4 действительно различаются по степени влияния на частоту страховых событий, однако, наблюдаемое нарушение

монотонного роста частот не соответствует монотонному росту директивных корректирующих коэффициентов.

Этот эффект не компенсируется поведением страховых выплат, т.к. анализ показал однородность их распределений в классах B1–B3.

Полученные значения корректирующих коэффициентов в рассмотренном случае значительно отличаются от предусмотренных Законом.

Очевидно, что непосредственная ориентация менеджмента страховой компании на собственный страховой портфель могла бы внести значительные коррективы в тарифную политику компании в этом виде страхования.

**Список литературы:** 1. Закон України № 85/96-ВР від 07.03.1996 «Про страхування» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1996. – № 18. – С. 78. 2. Закон України № 1961-IV від 01.07.2004 «Про обов'язкове страхування цивільно-правової відповідальності власників наземних транспортних засобів» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2005. – № 1. – С. 1. 3. Мац А. Д. О базовом страховом платеже и корректирующих коэффициентах в обязательном страховании ответственности автовладельцев / А. Д. Мац // Финансовые услуги. – 2010. – № 3–4. 4. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Дж. Поллард. – М. : Финансы и статистика, 1982. – 344 с. 5. Лемер Ж. Автомобильное страхование. Актуарные модели / Ж. Лемер. – М. : Янус-К, 2003. – 307 с. 6. Мак Т. Математика рискованного страхования / Т. Мак. – М. : ЗАО Олимп-Бизнес, 2005. – 432 с.

Надійшла до редколегії 16.03.2012

УДК 658.58:621

**А. В. КИЗИМ**, канд. техн. наук, доц. ВолгГТУ, Волгоград, Россия;  
**Е. В. ЧИКОВ**, аспирант ВолгГТУ, Волгоград, Россия;  
**В. А. КАМАЕВ**, д-р. техн. наук, проф., ВолгГТУ, Волгоград, Россия;  
**С. В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

### ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Розглядаються питання підвищення конкурентоспроможності підприємств за рахунок збільшення ефективності проведення робіт з технічного обслуговування і ремонту (ТОiP) устаткування. У статті наведені задачі обробки даних ТОiP устаткування класу Data Mining, обґрунтування критеріїв оцінки ефективності функціонування ремонтної служби, задачі групування обладнання по групах ремонтних робіт, основні стадії ітеративної організації системи ТОiP. Пропонуються алгоритми функціонування служб ТОiP щодо запобігання відмов обладнання.

Рассматриваются вопросы повышения конкурентоспособности предприятий за счет увеличения эффективности проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТОiP) оборудования. В статье приведены задачи обработки данных ТОiP оборудования класса Data Mining, обос-

нование критериев оценки эффективности функционирования ремонтной службы, задачи группировки оборудования по группам ремонтных работ, основные стадии итеративной организации системы ТОиР. Предлагается алгоритм функционирования служб ТОиР для предотвращения отказов оборудования.

The issues of improving the competitiveness of enterprises by increasing the efficiency of maintenance and repair (MRO) equipment. The paper presents the problem of data processing equipment maintenance and repair Class Data Mining, justification of the criteria for evaluating the performance of repair services, grouping tasks into groups of equipment repair work, the main stages of the iterative system maintenance and repair organizations, an algorithm for operation of MRO services for the prevention of equipment failures.

**Введение.** Любое предприятие для повышения прибыли вынуждено находить возможности оптимизировать распределение расходов по направлениям деятельности и производственной мощности. Прибыль предприятия зависит от эффективности работы его оборудования, которая описывается коэффициентом полной эффективности оборудования (КПЭО), являющимся согласно [1] произведением коэффициента готовности оборудования на показатели производительности и качества. Поэтому одним из направлений оптимизации производительности и расходов для промышленных предприятий является совершенствование технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования.

С целью повышения экономической эффективности работ ТОиР взамен традиционного подхода, основанного на планово-предупредительных работах (ППР), компании внедряют более современные методики проведения ТОиР оборудования [2–7]. В процессе поиска подходов к минимизации затрат на ТОиР подход, заключающейся в уменьшении или расширении во времени ППР, показал себя не с лучшей стороны. Выросшее количество аварийных работ либо приводило уровень затрат к прежнему уровню, либо даже повышалось его. Это связано с наличием зависимости между затратами на ТОиР и надежностью оборудования, которая является нелинейной. В процессе совершенствования подходов к проведению ТОиР от реактивного ремонта (аварийные ремонты оборудования по факту его отказов) исторически был осуществлен переход к преимущественно предупредительному обслуживанию (Preventive maintenance), которое можно разделить на следующие основные виды:

- плановое обслуживание (Planned maintenance), примером являются советские отраслевые регламентные методики системы ТОиР;
- обслуживание по состоянию (Condition-based maintenance);
- предупредительное обслуживание на основе прогнозных данных (Predictive maintenance).

Каждый из указанных подходов имеет свои достоинства и недостатки, и должен применяться согласно его условиям применения.

Согласно [5], критерием оценки эффективности функционирования ремонтной службы  $E_M$  можно считать сумму двух финансовых величин:

$$E_M = C_M + L_P, \quad (1)$$

где  $C_M$  – затраты на ремонтные бригады и запасные части, необходимые для выполнения ремонтных воздействий;  $L_P$  – производственные потери.

С одной стороны, низкий уровень ремонтных затрат  $C_M$  приводит к значительным потерям производства и увеличению общей суммы расходов, а с другой – высокие затраты снижают рентабельность производства. В [6] утверждается, что оптимум соответствует случаю, когда сумма потерь прибавочной стоимости и затрат на ремонты имеет минимальное значение.

Использование новых методик ТОиР становится лишь одним из условий эффективного управления производством вообще и организации ТОиР в частности. Необходимо иметь возможность мониторинга и анализа эффективности ТОиР с помощью показателей эффективности работы. Для понимания текущего уровня эффективности работ по ТОиР и направления дальнейшего их развития и совершенствования необходимо применять специальные метрики, например ключевые показатели эффективности, которые объединяются в сбалансированные системы показателей.

Как и в любой области, на эффективность процесса более сильно влияет применение системного подхода, чем применение частных решений. При применении системного подхода достигаются эффективные решения связанных задач, но и синергетический эффект. Путем применения научно обоснованной организации ТОиР возможно достижение следующих основных эффектов: уменьшение числа отказов, простоев и затрат на эксплуатацию оборудования; увеличение срока службы и производительности оборудования.

При использовании системного подхода при организации ТОиР необходимо сформулировать иерархию целей, которые необходимы для достижения глобальных целей – повышение прибыльности, производительности и конкурентоспособности предприятия. На основании иерархии целей необходимо строить систему ключевых показателей эффективности (КПЭ), отражающих текущее положение и уровень достижения сформулированных целей.

Источником данных для построения КПЭ является понимание уровня эффективности работ по ТОиР оборудования на предприятии, что требует проведения анализа оценок эффективности работ. Оценка эффективности (ОЭ) работ выражается как в количественных (например, часов непрерывной работы, или up-time), так и в качественных показателях (например, % выполнения плана). В случае применения компанией практики постоянного совершенствования ТОиР необходимо определять не только ОЭ самих работ ТОиР, но и ОЭ действий по их улучшению, выражаемую в относительных показателях (например, насколько быстрее стали поворачиваться ремонтные работы, насколько увеличилось время up-time).

При использовании системного подхода к задаче увеличения эффективности ТОиР необходимо организовать непрерывный процесс оценки эффективности процесса ТОиР и адаптивное внесение изменений в процесс ТОиР для получения оптимального значения эффективности функционирования ремонтной службы  $E_m$  и КПЭ.

В общем виде можно выделить следующие основные стадии итеративной организации системы ТОиР на основе КПЭ:

1. Разработка или усовершенствование системы КПЭ.
2. Проведение работ ТОиР оборудования.
3. Сбор данных и расчет показателей КПЭ.
4. Проведение оптимизации работ системы ТОиР оборудования.

Разработка системы КПЭ обычно ведется на основе библиотеки отраслевых показателей. Библиотеки КПЭ ТОиР являются ноу-хау компаний, которые принимают меры к их неразглашению. Можно выделить группы КПЭ ТОиР:

- КПЭ оборудования (объекта ТОиР);
- КПЭ субъектов ТОиР;
- КПЭ процесса ТОиР в целом и его элементов.

К первой группе относятся такие КПЭ как производительность оборудования, показатели надежности оборудования (наработка на отказ, параметры потока отказов и др.), *up-time* оборудования и другие.

Ко второй группе относятся такие КПЭ как: среднее время, затрачиваемое ремонтной бригадой на устранение отказа определенного вида и типа оборудования; количество рабочих заданий со срывом сроков окончания и выполненное в срок.

В качестве примеров КПЭ третьей группы можно привести: качество планирования работ по длительности (оценки качества процессов планирования работ ТОиР в части календарных сроков); резерв рабочего времени оборудования (суммарное резервное время, в течение которого оборудование было исправным, но не использовалось по каким-либо причинам); затраты на подрядчиков в плановых рабочих заданиях (суммарные затраты на подрядчиков в плановых рабочих заданиях за отчетный период).

Одним из способов оптимизации затрат является сегментирование оборудования по группам и применение к различным группам разных подходов организации их ТОиР. В результате сформулирована задача группировки оборудования по группам ремонтных воздействий и выработка новых подходов к проведению ТОиР. Выделенная задача имеет решения, применимые при поддержке служб ТОиР, но не все из них обладают требуемой полнотой, что приводит к необходимости их доработки и согласования.

Выделены базовые характеристики КПЭ:

$$КПЭ_i = \{O, P, E, T, G, I\}, \quad (2)$$

где  $O$  – область применения (объект, субъект или процесс ТОиР);

- $P$  – тип показателя (качественный, количественный);
- $E$  – единицы измерения;
- $T$  – тренд (максимизация, минимизация, постоянство);
- $G$  – граничные значения;
- $I$  – способ интерпретации.

Для расчета значений КПЭ требуются данные о происходящих событиях, связанных с характеристиками процесса ТОиР и состояния оборудованного предприятия, что приводит к необходимости организации автоматизированного процесса сбора и накопления таких данных. При этом требуется организация сбора информации на каждом этапе проведения работ по ТОиР, а так же особые формы и содержание данных, собранных в рамках работ ТОиР.

Для обработки и систематизации полученных данных целесообразно использовать ряд методик, входящих в состав задач общего подхода к обработке данных класса Data Mining, таких как:

- обнаружение аномальных данных;
- использование ассоциативных правил;
- анализ последовательностей;
- классификация;
- кластерный анализ;
- факторный анализ;
- регрессионный анализ;
- анализ структурных данных;
- деревья решений.

Общая схема организации системы ТОиР на основе КПЭ может быть выполнена в соответствии с приводимым ниже рисунком.

При возникновении отказа оборудования представляется целесообразным проводить действия по предотвращению подобных ситуаций впредь согласно следующему алгоритму:

1. Идентификация проблем, приводящих к возникновению отказа.
2. Анализ проблемы с целью выявления ее причин, типов отказов, возникающих от отказов эффектов, частоты, серьезности и типа отказов.
3. Поиск подходящих системных решений (выбор и адаптация известных методов решений или разработка новых).
4. Применение новых решений с измерением их эффективности и сопоставлением со старыми методами.

При этом могут применяться такие методы, способствующие предотвращению отказов оборудования, как методы RCA (корневой анализ причин отказов), FMECA (анализ видов, последствий и критичности отказов), анализ рисков [7] и др.

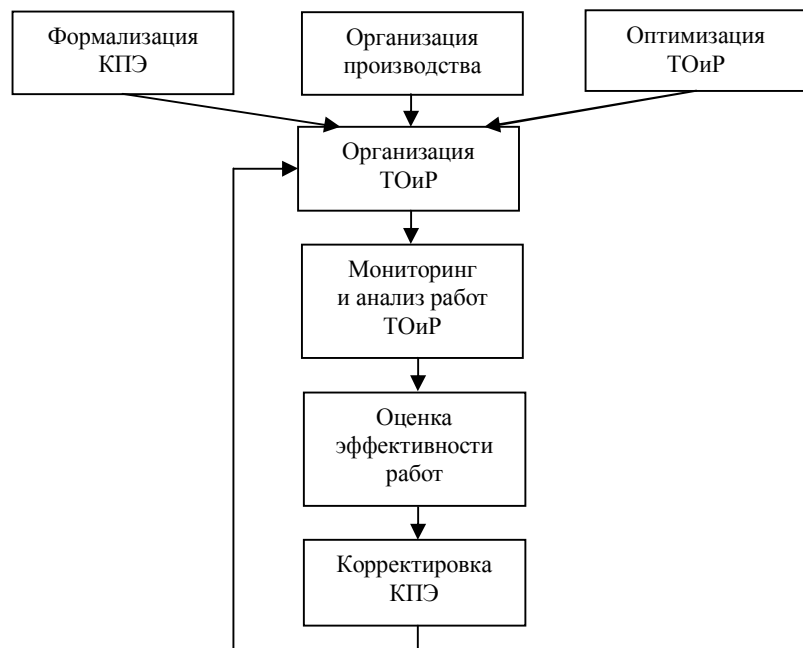


Схема организации системы ТОиР на основе КПЭ

Для более эффективного управления ТОиР необходимо применять разные подходы организации ТОиР к разным группам оборудования. Для сегментирования фонда оборудования по группам в соответствии с применяемым к его ТОиР подходом можно выделить ряд критериев оценки эксплуатационных свойств оборудования, например критичность оборудования (важностью его постоянной работы), стоимость ремонта, сроки ТОиР и др.

Для сегментирования фонда оборудования и определения очередности выбора могут быть использованы ряд методов: RCM2, матрицы и векторы предпочтений; неметрический метод Парето [8].

**Выводы.** На основе системного подхода к задачам ТОиР, элементы которого отражены в данной статье, предложен комплекс методов и инструментов организации ТОиР, применение которого может снизить затраты на организацию и выполнение работ по ТОиР, повысить их эффективность, коэффициент использования оборудования и эффективность функционирования ремонтной службы. Полученные результаты могут быть использованы для широкого спектра предприятий различных отраслей.

**Список литературы:** 1. The Fast Guide to OEE™. Vorne Industries Inc. 2008. – Режим доступа: – [www.oee.com]. 2. Кизим А. В. О методологических аспектах решения задач программно-инфор-

мационной поддержки технического обслуживания и ремонта / А. В. Кизим, С. В. Шевченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск „Системний аналіз, управління та інформаційні технології”. – Харків : НТУ „ХПІ”. – 2011. – № 35. – С. 56–61. 3. Кизим А. В. Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А. В. Кизим // Известия ВолгГТУ. – 2009. Т. 6. – № 6. – С. 118–121. 4. Кизим А. В. Постановка и решение задач автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А. В. Кизим // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2 (декабрь). – С. 131–135. 5. Levitt J. Handbook of Maintenance Management. Industrial Pr. 1997. – 476 p. 6. Ченцов Н. А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы: Учебник / Н. А. Ченцов; под ред. В. Я. Седуша. – Донецк, 2007. – 258 с. 7. National Aeronautical and Space Administration (NASA), Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, 2008. 8. Мельник В.Ю. Поддержка принятия решения при формировании очередей работ с помощью средств автоматизации планирования технического обслуживания и ремонта оборудования / В. Ю. Мельник, А. В. Кизим, В. А. Камаев // Известия ВолгГТУ. Вып. 12, 2011. – № 11. – С. 107–110.

Надійшла до редколегії 16.04.2012

УДК 004.021

А. С. ДРОБОТОВ, асп. ВолгГТУ, Волгоград, Россия

## УПРАВЛЕНИЕ ФИНАНСОВЫМИ РИСКАМИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

У роботі досліджена можливість вживання методу Монте-Карло для оцінки якості інноваційних проектів. Запропоновано спосіб використання імітаційного моделювання для підтримки ухвалення рішення щодо впровадження інноваційних проектів. Програмно реалізованої метод оцінки ризику проекту на основі бізнес-плану.

В работе исследована возможность применения метода Монте-Карло для оценки качества инновационных проектов. Предложен способ использования имитационного моделирования для поддержки принятия решения по внедрению инновационных проектов. Программно реализован метод оценки рисков проекта на основе бизнес-плана.

In this paper we investigate the possibility of using the Monte Carlo method for evaluating the quality of innovative projects. Proposed of using simulation for decision support on the implementation of innovative projects and software for assessment risk project based on the business plan.

**Введение.** На сегодняшний день, необходимым условием стабильного функционирования и развития экономики является эффективная инвестиционная политика. Но, при разработке и анализе эффективности тех или иных инновационных проектов, часто приходится сталкиваться с тем, что рассматриваемые при их оценке потоки денежных средств относятся к будущим периодам и носят прогнозный характер. Неопределенность прогнозируемых результатов приводит к возникновению риска того, что

цели, поставленные в проекте, могут быть не достигнуты полностью или частично.

Таким образом, целью данной работы является повышение эффективности процесса разработки бизнес-планов инновационных проектов за счет количественной оценки рисков на основе метода имитационного моделирования. Объектом исследования работы является процесс создания и исследования бизнес-плана инновационного проекта. В качестве методов исследования в работе используются методы математического анализа и математической статистики, имитационного моделирования, численные методы. Научная новизна работы заключается в разработке метода оценки общего риска инвестиционного проекта и метода идентификации рисков на основе имитационного моделирования с использованием метода Монте–Карло.

**Оценка качества инновационных проектов с использованием имитационного моделирования.** Исходными данными для оценки качества инновационных проектов в работе служит макет бизнес-плана, отвечающий требованиям постановления Правительства РФ от 22 ноября 1997 г. №1470 «Положение об оценке эффективности инвестиционных проектов при размещении на конкурсной основе централизованных инвестиционных ресурсов Бюджета развития Российской Федерации» [1]. Структура бизнес-плана должна быть ориентирована на производство и продажу товаров (услуг).

Оценка качества инновационного проекта на основании предложенной структуры бизнес-плана основывается на модели денежных потоков, включающих в себя потоки по финансовой, производственной и инвестиционной деятельности, представленные в дискретном виде [2]:

$$BP = \{AC_i, IA_i, FA_i\}, \quad (1)$$

где  $AC_i$  – поток денежных средств по операционной деятельности в  $i$ -й квартал;

$IA_i$  – поток денежных средств по инвестиционной деятельности в  $i$ -й квартал;

$FA_i$  – поток денежных средств по финансовой деятельности в  $i$ -й квартал;

Исходными величинами (риск-переменные) для имитационного моделирования выступают объем выпуска, цена, переменные затраты [2].

В качестве закона распределения исходных величин используется закон треугольного вида. Данное решение было связано с тем, что разрабатываемый инновационный проект включает в себя денежные потоки будущего периода, а это значит, что достаточная статистическая, экспертная информации по риск-переменным (также как и по всем остальным) – отсутствует. Таким образом, не существует достоверных данных для корректного статистического анализа и выбора закона распределения. Разрабатывая бизнес-план инвести-

ционного проекта на будущее, разработчик может с большей уверенностью говорить о диапазоне изменения риск-переменных – определять минимальное вероятное и максимальное вероятное значения для переменных, а также наиболее вероятное значение в тот или иной период времени в будущем.

В качестве интегрального показателя для поддержки принятия решения был выбран показатель – чистая современная стоимость проекта [3]:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{[Q_i \cdot (P_i - V_i) - F_i - A_i] \cdot (1 - T_i) + A_i}{(1 + r)^i} - I \quad (2)$$

где  $I$  – начальные инвестиции;

$N$  – срок проекта;

$r$  – норма дисконта;

$Q_i$  – объем выпуска продукции (услуги);

$P_i$  – цена за единицу продукции (услуги);

$V_i$  – переменные затраты на выпуск продукции (услуги);

$F_i$  – постоянные затраты;

$A_i$  – амортизация;

$T_i$  – налог на прибыль.

Если  $NPV > 0$ , то проект – доходный, и его можно продолжать анализировать для принятия решения по использованию.

Для оценки качества инновационных проектов на основе метода Монте–Карло была разработана схема проведения эксперимента.

Первым шагом при проведении имитационного моделирования для оценки качества проекта является установка исходных данных на основании информации из бизнес-плана проекта.

После установки начальных данных, следующим шагом является проведение имитационного моделирования – генерации множества возможных исходов риск-переменных по каждому товару для каждого года реализации, и расчет показателя эффективности для каждого эксперимента – чистой современной стоимости проекта (2).

После проведения имитационного моделирования (генерации возможных сценариев развития проекта по риск-переменным), следующим шагом является оценка эффективности проекта в целом на основе данных эксперимента, на основании индикаторов – вероятности реализации неэффективного проекта и индекса ожидаемых потерь.

После оценки эффективности проекта в целом, следующим шагом является идентификация возможных рисков проекта на основе проведенного имитационного моделирования по каждой риск-переменной.

**Оценка качества инновационного проекта в целом.** После проведения имитационного моделирования (генерации возможных сценариев разви-



тия проекта по риск-переменным), следующим шагом является оценка эффективности проекта в целом на основе данных эксперимента с помощью следующих индикаторов [3]:

- вероятности реализации неэффективного проекта;
- индекса ожидаемых потерь;
- срока окупаемости проекта (среднее значение индикатора);
- чистой приведенной стоимости проекта (среднее значение индикатора);
- индекса доходности инвестиций (среднее значение индикатора).

Оценка вероятности реализации неэффективного проекта может быть выполнена в соответствии со следующим выражением

$$P(\text{porog}) = \frac{m}{n}, \quad (3)$$

где  $m$  – число экспериментов со значением критериального показателя  $NPV$  ниже порогового уровня, задаваемого лицом, оценивающим риск;

$n$  – общее число имитационных экспериментов;

$\text{porog}$  – пороговый уровень критериального показателя  $NPV$ .

Индекс ожидаемых потерь  $ELR$  может быть определен следующей зависимостью

$$ELR = \frac{\left| \sum_{i=1}^{n_2} x_i^- \cdot p_i \right|}{\sum_{i=1}^{n_1} x_i^+ \cdot p_i + \left| \sum_{i=1}^{n_2} x_i^- \cdot p_i \right|}, \quad (4)$$

где  $n_1$  – количество экспериментов, для которых  $x_i$  принимает неотрицательный результат;

$x_i^+$  – неотрицательный результат (величина  $NPV$ ) при  $i$ -м эксперименте;

$n_2$  – количество экспериментов, для которых  $x_i$  принимает отрицательный результат;

$x_i^-$  – отрицательный результат (величина  $NPV$ ) при  $i$ -м эксперименте;

$p_i$  – вероятность получения результата  $x_i$ .

Вероятность реализации неэффективного проекта (3) позволяет определить риск как возможность осуществления неэффективного проекта. Она показывает, сколько раз было нарушено условие эффективности, но не показывает, насколько велики потери.

Индекс ожидаемых потерь  $ELR$  (4) может принимать значения от 0 до 1. Значение  $ELR = 0$  соответствует отсутствию ожидаемого убытка и

неподверженность проекта риску потерь. Значение  $ELR=1$  соответствует отсутствию ожидаемого выигрыша и полная подверженность риску потерь.

На основании полученных числовых значений индикаторов проекта делается вывод об эффективности проекта – решение об инвестировании проекта.

Для учета значений индикаторов (3) и (4) в эффективности проекта, была разработана шкала оценки риска инновационного проекта на основании [5], рис. 1–3.



Рис. 1 – Определение баллов на основании значения вероятности реализации неэффективного проекта



Рис. 2 – Определение баллов на основании значения индекса ожидаемых потерь

**Определение рисков инновационного проекта.** После оценки эффективности проекта в целом, следующим шагом является идентификация

возможных рисков проекта на основе проведенного имитационного моделирования по каждой риск-переменной [4].

Для каждого риска проекта рассчитывается «уровень риска» и определяется план возможных действий, способствующих повышению благоприятных возможностей и снижению угроз для достижения целей проекта.

Уровень риска определяется тремя показателями. Это

- вероятность возникновения риска (5);
- экономический убыток (6);
- вероятностью восстановления развития проекта после наступления данного риска (7).

Оценка вероятности возникновения риска может быть определена по следующей формуле [5]:

$$p\_risk = \frac{N_1}{N_2}, \quad (5)$$

где  $N_1$  – количество удовлетворяющих риску сценариев (число экспериментов);

$N_2$  – общее число сценариев моделирования.

Группы и уровни риска представлены на рис. 3.

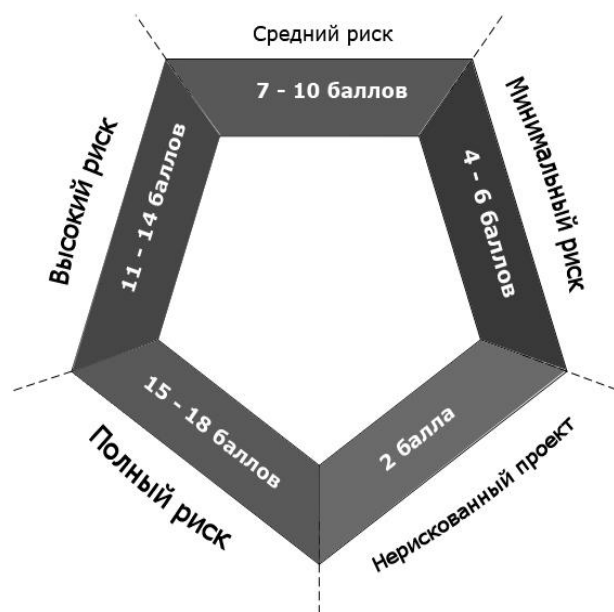


Рис. 3 – Оценка общего риска инвестиционного проекта

Экономический ущерб от возникновения риска может быть оценен по следующей формуле [4]

$$f\_risk = \min(NPV_i), i = 1...N_1 \quad (6)$$

где  $N_1$  – количество удовлетворяющих риску сценариев (число экспериментов);

$\min(NPV_i)$  – наименьшее значение показателя эффективности ( $NPV$ ) проекта из удовлетворяющих риску сценариев.

Вероятность восстановления развития проекта после наступления данного риска можно оценить по следующей формуле [4]:

$$r\_risk = \frac{R_1}{R_2}, \quad (7)$$

где  $R_1$  – количество исходов, удовлетворяющих риску сценария, для которых  $NPV_i > NPV_{POROG}$ ,

$R_2$  – количество исходов, удовлетворяющих риску сценария, для которых  $NPV_i < NPV_{POROG}$ ,

$NPV_{POROG}$  – пороговый уровень для показателя эффективности.

Далее для каждого риска происходит определение возможного сценария выхода из риска – разработка количественных показателей для риск-переменной, показывающие, на сколько нужно увеличить (уменьшить) переменную в следующие года развития, основанные на подсчете ее среднего значения:

$$RP = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} rp\_value_i}{N_1},$$

где  $N_1$  – количество удовлетворяющих риску сценариев (число экспериментов);

$rp\_value_i$  –  $i$ -е значение риск-переменной.

В результате проведения имитационного моделирования определяется эффективность проекта, которая может служить основанием целесообразности принятия решения о вложения инвестиций в проект, а также определяются какие риски могут повлиять на проект и соответствующий план реагирования на риски (например, падение объемов продаж товара на втором году реализации, повышение цен на необходимые товары для производства продукции на четвертом году реализации проекта).

**Выводы.** В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты:

- проведен анализ предметной области, рассмотрены имеющиеся количественные методы для оценки рисков инновационных

проектов. Анализ показал, что относительно метода Монте–Карло имеются только общие положения использования метода, что не позволяет его использовать на практике.

- разработана и исследована модель бизнес-плана инновационного проекта. Структура бизнес-плана ориентирована на производство и продажу товаров (услуг), ориентирована на разработку на период, превышающий срок окупаемости проекта на один год. В качестве модели денежных потоков инвестиционного проекта в работе была рассмотрена модель потоков, включающих в себя потоки по финансовой, производственной и инвестиционной деятельности, представленные в дискретном виде.
- разработана схема оценки качества инновационных проектов на основе имитационного моделирования. В работе предлагается проведение анализа проекта по результатам имитационного моделирования в два этапа – оценка общей эффективности проекта и идентификация рисков с определением, какие риски и как могут повлиять на проект.

В рамках работы была разработана автоматизированная система «Поддержка инновационных проектов «Эксперт» на языке C# (среда Microsoft Visual Studio 2008, СУБД – SQL Server 2008), которая состоит из модуля работы с бизнес-планами проектов, модуля проведения имитационного моделирования и оценки общего риска проекта, модуля идентификации рисков проекта и модуля формирования отчетов.

Система может использоваться в процессе разработки бизнес-плана проекта для анализа рисков и выработки стратегии их снижения, а также для принятия решения по инвестированию проектов.

**Список литературы:** 1. Постановление Правительства РФ от 22 ноября 1997 г. № 1470 "Об утверждении Порядка предоставления государственных гарантий на конкурсной основе за счет средств Бюджета развития Российской Федерации и Положения об оценке эффективности инвестиционных проектов при размещении на конкурсной основе централизованных инвестиционных ресурсов Бюджета развития Российской Федерации". – Режим доступа : <http://base.garant.ru/176300/> 2. Макет бизнес-плана, представляемого претендентом в составе заявки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siora.ru/businessplan/maket/>. 3. Лукаевич И. Я. Анализ финансовых операций. Методы, модели, техника вычислений: Учеб. пособие / И. Я. Лукаевич. – М. : Финансы, ЮНИТИ, 1998. – 400 с. 4. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений: Учебник / О. И. Ларичев. – 2-е изд. – М. : Логос, 2002. – 392 с. 5. A Guide to the Project Management Body of Knowledge / Project Management Institute. – 3 edition. – Project Management Institute, 2004. – 388 p.

*Надійшла до редколегії 12.04.2012*

**А. С. ДОВБИШ**, д-р техн. наук, професор СумДУ, Суми;  
**Ю. С. КОЗЬМІН**, канд. техн. наук, ІСМА, Харків;  
**О. Б. БЕРЕСТ**, аспірант СумДУ, Суми

## **ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ НАВЧАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОЩУВАННЯМ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ МОНОКРИСТАЛІВ**

Розглянуто інформаційно-екстремальний алгоритм навчання інтелектуальної системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів з паралельно-последовною оптимізацією системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Реалізацію запропонованого алгоритму здійснено на прикладі системи керування вирощуванням монокристалів.

Рассмотрен информационно экстремальный алгоритм обучения интеллектуальной системы управления выращиванием сцинтилляционных монокристаллов с паралельно-последовательной оптимизацией системы контрольных допусков на признаки распознавания. Реализация предложенного алгоритма осуществлена на примере системы управления выращиванием монокристаллов.

The information extreme learning algorithm of intellectual control scintillation monocrystal growth system with parallel series optimization of acceptance tolerances system on recognition signs was considered in this article. The implementation of this algorithm was performed on control scintillation monocrystal growth system.

**Вступ.** Сучасні мікропроцесорні системи керування технологічним процесом вирощування монокристалів не забезпечують їх стабільно високі вихідні оптичні характеристики через довільні початкові умови та неконтрольовані фактори, що впливають на керований процес [1,2]. Основним шляхом підвищення функціональної ефективності системи керування вирощуванням монокристалів є надання їй властивості адаптивності на основі машинного навчання і розпізнавання образів [3,4]. Одним із перспективних напрямів аналізу і синтезу адаптивних систем керування, що навчаються, є використання ідей і методів прогресивної інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ – технологія), що ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи керування шляхом введення в процесі її навчання додаткових інформаційних обмежень [5,6]. У праці [7] запропоновано інформаційно-екстремальний алгоритм навчання системи керування вирощуванням монокристалів з паралельною оптимізацією системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання, але авторам не вдалося побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила.

У статті з метою підвищення функціональної ефективності навчання системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка є складовою частиною інтелектуальної системи керування вирощуванням сцинтиляційних

монокристалів, розглядається алгоритм навчання з оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання за паралельно – послідовним алгоритмом.

**Постановка задачі.** Розглянемо здатну навчатися СППР для керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів. Нехай дано у загальному випадку нечіткий алфавіт класів розпізнавання  $\{X_m^o \mid m = \overline{1, M}\}$ . Кожний клас визначає функціональний стан технологічного процесу, який характеризується навчальною матрицею типу «об’єкт – властивість»  $\|y_{m,i}^{(j)}\|$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , де  $N$  – кількість ознак розпізнавання,  $n$  – кількість реалізацій образу, що формуються в моменти зчитування інформації. Для СППР відомий структурований вектор параметрів функціонування  $g = \langle g_1, \dots, g_\xi, \dots, g_\Xi \rangle$  із відповідними обмеженнями.

Тоді в режимі навчання для вектора  $g$  шляхом організації послідовних ітераційних процедур оптимізації параметрів навчання необхідно знайти його екстремальне значення координат в робочій області системи розпізнавання, що забезпечують максимум усередненого за алфавітом критерію функціональної ефективності (КФЕ) навчання СППР:

$$\bar{E}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_m^*, \quad (1)$$

де  $E_m^*$  – максимальне значення КФЕ навчання СППР розпізнавати реалізації класу  $X_m^o$ .

**Алгоритм навчання.** Ідея навчання системи у рамках ІЕІ – технології полягає у цілеспрямованій трансформації апріорного у загальному випадку нечіткого розбиття простору ознак в чітке розбиття класів розпізнавання, яке забезпечує побудову безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил. При цьому на кожному кроці навчання відбувається відновлення побудованих у радіальному базисі простору ознак оптимальних контейнерів, геометричні параметри яких визначають вирішальні правила. Розглянемо інформаційно-екстремальний алгоритм навчання СППР із гіперсферичним класифікатором, в якому відновлення контейнерів відбувається шляхом паралельно – послідовної оптимізації системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання за двохциклічною процедурою

$$\delta_K^* = \arg \langle \{ \max_{G_\delta} \{ \max_{G_E \cap G_d} \bar{E} \} \} \rangle, \quad (2)$$

де  $\delta_K^*$  – оптимальне значення параметра поля контрольних допусків;  
 $G_\delta$  – область допустимих значень параметра  $\delta_K$ ;  
 $G_E$  – область допустимих значень КФЕ навчання системи;

$G_d$  – область допустимих значень геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання.

Узагальнену схему алгоритму навчання показано на рис. 1.

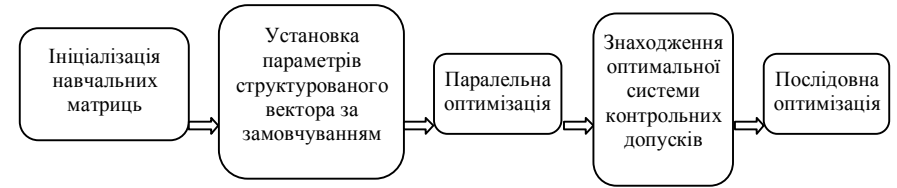


Рис. 1 – Етапи навчання системи при паралельно-послідовній оптимізації

Розглянемо основні етапи реалізації інформаційно-екстремального алгоритму навчання СППР з паралельно-послідовною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання:

1. Установка лічильника кроків зміни параметра поля допусків в нуль.
2. Інкремент лічильника кроків зміни параметра поля допусків.
3. Обчислення нижнього  $A_{KH,i}[l]$  і верхнього  $A_{KB,i}[l]$  контрольних допусків для всіх ознак розпізнавання за формулами

$$A_{KH,i}[l] = y_{1,i} - \delta[l]; \quad A_{KB,i}[l] = y_{1,i} + \delta[l], \quad (3)$$

де  $y_{1,i}$  – середнє значення  $i$ -ї ознаки в навчальній матриці класу  $X_1^o(\tau_r)$ .

4. Формування бінарної навчальної матриці  $\|x_{m,i}^{(j)}(\tau_r)\|$  за правилом

$$x_{m,i}^{(j)}(\tau_r) = \begin{cases} 1, & \text{if } A_{KH,i}(\tau_r) \leq y_{m,i}^{(j)}(\tau_r) \leq A_{KB,i}(\tau_r); \\ 0, & \text{if else.} \end{cases} \quad (4)$$

5. Обчислення двійкового еталонного вектора  $x_m(\tau_r)$  для класу  $X_m^o(\tau_r)$  за правилом

$$x_{m,i}(\tau_r) = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{m,i}^{(j)}(\tau_r) > \rho_m; \\ 0, & \text{if else.} \end{cases} \quad (5)$$

де  $\rho_m$  – рівень селекції координат вектора  $x_m \in X_m^o(\tau_r)$ ,  $\rho_m = 0,5$  за замовчуванням.

6. Формування структурованої множини елементів попарного розбиття  $\{\mathcal{R}_m^{[2]} = \langle x_m, x_c \rangle\}$  за методом найближчих сусідів.

7. Обчислення інформаційного КФЕ навчання СППР. Як інформаційний КФЕ розглянемо модифікацію інформаційної міри Кульбака, яка має вигляд [7]

$$E_m^{(k)} = \log_2 \left( \frac{2 - (\alpha_m^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d))}{\alpha_m^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)} \right) * [1 - (\alpha_m^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d))], \quad (6)$$

де  $\alpha_m^{(k)}(d)$  – помилка першого роду при прийнятті рішень на  $k$ -му кроці навчання;

$\beta_m^{(k)}(d)$  – помилка другого роду;

$d$  – дистанційна міра, що визначає радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання.

8. Обчислення усередненого КФЕ  $\bar{E}^*$  за формулою (1).

9. Визначення оптимального значення параметра  $\delta^*$  за формулою (2).

10. Обчислення за формулами (3) оптимальних нижніх  $\{A_{НК,i}^*\}$  та верхніх  $\{A_{БК,i}^*\}$  контрольних допусків.

11. Визначення оптимальних радіусів контейнерів параметричних класів розпізнавання  $d_m^* = \arg E_m^*$ .

12. Обнулення лічильника ітерацій запуску послідовної оптимізації.

13. Інкремент лічильника ітерацій запуску послідовної оптимізації.

14. Обнулення лічильника зміни  $i$ -ї ознаки.

15. Інкремент лічильника зміни  $i$ -ї ознаки

16. Обнулення лічильника кроків зміни параметра поля допусків для  $i$ -ї ознаки.

17. Інкремент лічильника кроків зміни параметра поля допусків для  $i$ -ї ознаки.

18. Обчислення інформаційного КФЕ навчання СППР за формулою (6).

19. Знаходження оптимального значення параметра навчання

$$\delta_i^* = \arg \bar{E}^* \text{ для } i\text{-ї ознаки.}$$

20. Якщо  $i \leq n$ , то виконується пункт 14, інакше – пункт 21.

21. Якщо  $\bar{E}_{i+1}^* > \bar{E}_i^*$ , то виконується пункт 13, інакше – пункт 22.

22. ЗУПИН.

Таким чином, процес навчання СППР полягає в реалізації процедури пошуку глобального максимуму функції інформаційного критерію в робочій області її визначення та ітераційного наближення цього максимуму до його граничного максимального значення з метою побудови безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил.

**Приклад реалізації алгоритму навчання.** Формування навчальної матриці здійснювалося за ретроспективними даними, одержаними при вирощуванні монокристалів за методом Чохральського на одному й тому самому часовому інтервалі вирощування на установці «РОСТ». При цьому датчики інформації опитувалися з періодом одна хвилина. Алфавіт складався із трьох класів розпізнавання  $X_1^o$ ,  $X_2^o$  і  $X_3^o$ , які відрізнялися один від одного якістю кінцевого продукту. Клас  $X_1^o$  характеризував найкращий технологічний режим, який забезпечує відповідність кінцевого продукту стандарту якості. Інші два класи характеризували різні відхилення показників якості від норми. Навчальна матриця кожного класу складалася із 61 вектора-реалізації, які мали по 45 первинних і вторинних ознак розпізнавання.

З метою аналізу впливу параметрів оптимізації на функціональну ефективність навчання інтелектуальної системи на рис.2 показано графіки залежності КФЕ від радіусів контейнерів класів розпізнавання після реалізації базового алгоритму навчання.

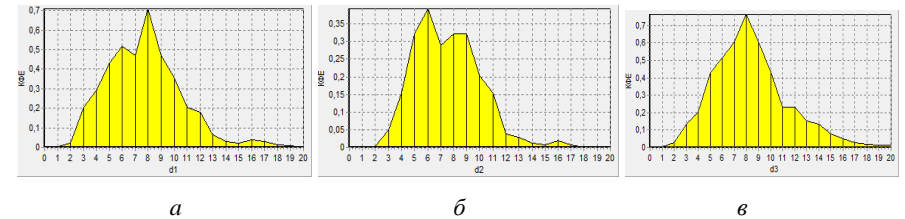


Рис. 2 – Графіки залежності КФЕ від радіусів класів: а – клас  $X_1^o$ ; б – клас  $X_2^o$ ;

в – клас  $X_3^o$

Аналіз рис.2 показує, що реалізація базового алгоритму без оптимізації системи контрольних допусків (СКД) на ознаки розпізнавання характеризується відсутністю робочої (допустимої) області, в якій значення першої та другої достовірностей відповідно більше помилок першого і другого роду. На рис 3. показано динаміку зміни КФЕ при паралельній оптимізації СКД на ознаки розпізнавання. Тут і далі темні ділянки позначають робочі області визначення функції інформаційного критерію.

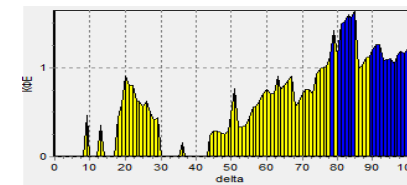


Рис. 3 – Графік залежності КФЕ від параметра поля контрольних допусків  $\delta_K$  (delta)

Аналіз рис. 3 показує, що оптимальні значення параметру поля контрольних допусків дорівнюють  $\delta_K^* = 85$  відносних одиниць при максимальному значенні усередненого КФЕ  $\bar{E}^* = 1,65$ .

На рис.4 показано зміну радіусів гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання при паралельній оптимізації СКД на ознаки розпізнавання.

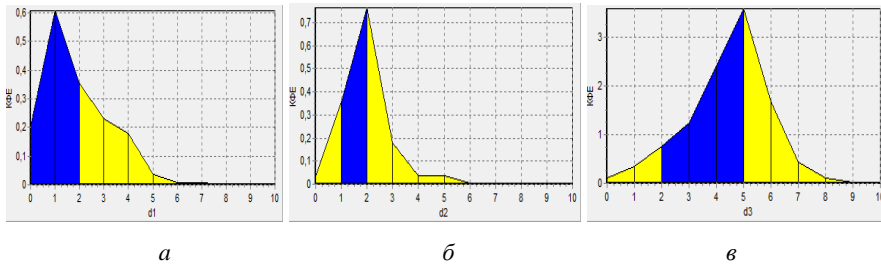


Рис. 4 – Графіки залежності КФЕ від радіусів контейнерів при паралельній оптимізації: а – клас  $X_1^o$ ; б – клас  $X_2^o$ ; в – клас  $X_3^o$

Аналіз рис. 4 показує, що при значенні  $\delta_K^* = 85$  оптимальні радіуси контейнерів дорівнюють у кодових одиницях відповідно  $d_1^* = 1$ ,  $d_2^* = 2$  і  $d_3^* = 5$ .

З метою підвищення функціональної ефективності навчання СППР було реалізовано алгоритм послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання. При цьому як стартові приймалися одержані при паралельній оптимізації квазіоптимальні контрольні допуски.

На рис. 5 зображено графіки залежності КФЕ за Кульбаком (6) від радіусів контейнерів класів розпізнавання при реалізації паралельно послідовної оптимізації.

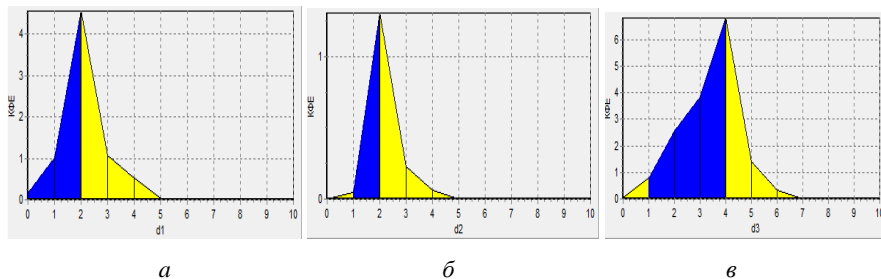


Рис. 5 – Графіки залежності КФЕ від радіусів класів при паралельно послідовній оптимізації: а – клас  $X_1^o$ ; б – клас  $X_2^o$ ; в – клас  $X_3^o$

Аналіз рис. 5 показує, що оптимальні радіуси контейнерів класів розпізнавання дорівнюють у кодових одиницях відповідно  $d_1^* = 2$ ,  $d_2^* = 2$  і  $d_3^* = 4$  при відповідних максимальних значеннях КФЕ  $E_1^* = 4,56$ ,  $E_2^* = 1,31$  і  $E_3^* = 6,81$ . Тобто середнє значення критерію (1) дорівнює  $\bar{E} = 4,22$ . При цьому вже після третього прогону ітераційної процедури значення інформаційного КФЕ навчання СППР не змінювалося, що свідчило про завершення оптимізаційного процесу.

Таким чином, при паралельно-послідовній оптимізації СКД на ознаки розпізнавання усереднене значення КФЕ навчання СППР для керування вирощуванням скінтіляційних монокристалів суттєво перевищує його значення, одержане при паралельній оптимізації СКД ( $\bar{E}^* = 1,65$ ).

**Висновки.** Розроблене інформаційне і програмне забезпечення СППР для керування вирощуванням скінтіляційних монокристалів із розплаву в рамках ІЕІ технології дозволило побудувати високостовірні вирішальні правила для розпізнавання поточного функціонального стану технологічного процесу з метою здійснення, у разі необхідності, його корекції. Для побудови безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил згідно з принципом відкладених рішень доцільно здійснювати оптимізацію інших параметрів функціонування, включаючи параметри словника ознак розпізнавання, які впливають на функціональну ефективність навчання СППР.

**Список літератури.** 1. Суздаль В. С. Скінтіляційні монокристали: автоматизированное выращивание / В. С. Суздаль, П. Е. Стадник, Л. И. Герасимчук, Ю. М. Епифанов. – Х. : ИСМА, 2009. – 260 с. 2. Горилецкий В. И. Рост кристаллов / В. И. Горилецкий, Б. В. Гринёв, Б. Г. Заславский, Н. Н. Смирнов, В. С. Суздаль. – Х. : Акта, 2002. – 536 с. 3. Краснояровський А. С. Інформаційний синтез інтелектуальних систем керування: Підхід, що ґрунтується на методі функціонально-статистичних випробувань / А. С. Краснояровський. – Суми : Видавництво СумДУ, 2004. – 261 с. 4. Рідкокаша А. А. Основи систем штучного інтелекту: навчальний посібник / А. А. Рідкокаша, К. К. Голдер. – Черкаси : Відлуння-Плюс, 2002. – 240 с. 5. Довбиш А. С. Основи проектування інтелектуальних систем: навчальний посібник / А. С. Довбиш. – Суми : Вид-во СумДУ, 2009. – 171 с. 6. Довбиш А. С. Оптимізація контрольних допусків на ознаки розпізнавання в інформаційно-екстремальних методах автоматичної класифікації / А. С. Довбиш, М.В. Козинець, С. М. Котенко. Вісник Сумського державного університету. Серія «Техніка», № 1, 2007. – С. 169–178. 7. Довбиш А. С. Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень для керування вирощуванням монокристалів / А. С. Довбиш, В. С. Суздаль, В. В. Москаленко. Вісник СумДУ. Серія технічні науки. – 2011. – № 2. – С. 39–47.

Надійшла до редколегії 15.03.2012

**В. А. КОЛБАСИН**, канд. техн. наук;  
**Е. В. УЛЬЯНКО**, магистрант НТУ «ХПИ»

## РЕАЛИЗАЦИЯ СЕНСОРНОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЫЧНОГО МОНИТОРА И ВЕБ-КАМЕРЫ

Запропоновано метод реалізації функцій сенсорного екрану за допомогою веб-камери та звичайного монітору. Розглядаються методи пошуку та аналізу об'єктів по серії зображення.

Предложен метод реализации функций сенсорного экрана с помощью веб-камеры и обычного монитора. Рассматриваются методы поиска и анализа объектов по серии изображений.

The method for simulating functions of the touch screen using the web camera and typical monitor. The methods of search and analysis objects in a series of images.

**Введение.** Еще недавно для диалога пользователя с компьютером могли использоваться только манипулятор «мышь» и клавиатура. Однако активное развитие альтернативных технологий человеко-машинного интерфейса привело к появлению и внедрению в повседневную жизнь новых, более удобных способов взаимодействия пользователя с машиной. Одним из них является сенсорный интерфейс пользователя, обычно реализуемый с использованием сенсорных экранов.

Сенсорный экран позволяет пользователю управлять процессами, происходящими в компьютере при помощи прикосновений к экрану. При этом появляется возможность обращаться с виртуальными экранными объектами практически так же, как с объектами реального физического мира. Собственно, эта возможность и сделала сенсорный экран таким популярным. В настоящее время сенсорные экраны успешно используются в таких прикладных устройствах, как мобильные телефоны, планшетные компьютеры, платежные терминалы, информационные киоски, панели управления в промышленности и в медицине. Однако стандартные сенсорные экраны могут быть использованы не везде.

Технически сенсорный экран состоит из двух частей: собственно дисплей, который отображает информацию, и сенсорный элемент – дополнительное устройство, которое обычно устанавливается поверх дисплея и служит для определения координат прикосновения к экрану. В настоящее время используются сенсорные элементы, построенные на основе различных принципов функционирования: резистивные, эмиссионные, проекционно-эмиссионные. Сенсорный элемент должен быть с одной стороны чувствительным к нажатию, а с другой – устойчивым к механическим повреждениям и влиянию окружающей среды. Естественная противо-

речивость этих двух требований усложняет конструкцию и удорожает изготовление сенсорных экранов, особенно в случае экранов большой диагонали [1].

Так как суть функционирования сенсорного экрана сводится к определению позиции прикосновения к экрану, сенсорный интерфейс пользователя можно реализовать при помощи видеокамеры, наблюдающей за дисплеем. В этом случае программное обеспечение системы должно в реальном режиме времени определять изменения в кадре, определять среди них движения указателя, нажатие указателем на экран и генерировать понятные для прикладного программного обеспечения (ПО) сигналы, содержащие координаты нажатия. Данная работа посвящена исследованию возможности созданию программной системы, реализующей сенсорный интерфейс пользователя при помощи стандартного дисплея и простой видеокамеры (веб-камеры). В качестве указателя в данной работе используется цветовой маркер, прикрепленный к пальцу. Это упрощает распознавание позиции указателя, но вводит следующее ограничение – цвет маркера не должен использоваться элементами графического интерфейса пользователя.

**Поиск позиции указателя.** Для определения позиции указателя необходимо найти движущиеся объекты в последовательности кадров с видеокамеры и выбрать среди них объект, соответствующий параметрам указателя. Движущиеся объекты в данной работе определяются на основе анализа разницы кадров.

Разница  $P$  двух последовательных кадров  $S1$  и  $S2$  определяется как

$$P_{i,j} = |S1_{i,j} - S2_{i,j}|, \quad i = \overline{1, W}, j = \overline{1, H}, \quad (1)$$

где  $S1$ ,  $S2$  – предыдущий и последующий кадры;

$W$ ,  $H$  – ширина и высота кадра.

Значения элементов матрицы  $P$ , соответствующие неподвижным объектам изображения, будут иметь значения, близкие к нулю. Если же в какой-то области кадра выполняется движение, то пиксели объекта будут замещаться пикселями фона и наоборот. За счет этого значения точек межкадровой разницы на границах движущихся объектов будут существенно отличаться от нуля.

Также значения элементов матрицы межкадровой разницы могут быть отличны от нуля вследствие влияния шума сенсора видеокамеры, изменения освещения и колебаний камеры и экрана. Чтобы уменьшить влияние этих факторов в работе выполняется двухэтапная фильтрация матрицы  $P$ .

На первом этапе выполняется медианная фильтрация матрицы межкадровой разницы фильтром со скользящим окном со стороны 5 пикселей. За счет медианной фильтрации подавляется шум сенсора видеокамеры и шум, получающийся в результате дрожания видеокамеры.

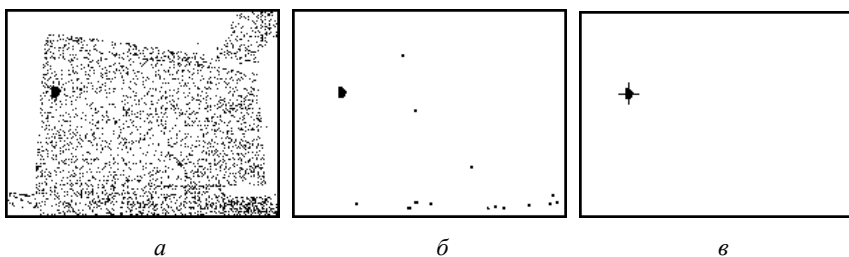
На втором этапе выполняется пороговая бинаризация матрицы межкадровой разницы  $P$  по формуле

$$F_{i,j} = \begin{cases} 0, & |P_{i,j}| \leq \theta, \\ 1, & |P_{i,j}| > \theta, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\theta$  – значение порогового уровня, выбираемое экспериментально в процессе калибровки.

К полученному в результате фильтрации и бинаризации результату применяется метод оценки геометрических характеристик объектов на изображении, предложенный в работе [2]. Применяя данный метод, находят оценки площади, центра тяжести и линейных размеров объектов на бинаризованном изображении. Далее в качестве искомого объекта выбирается объект с наибольшей площадью, расположенный в границах монитора, в цветном изображении которого преобладает выделенный для указателя цвет. В качестве координат объекта используются координаты его центра тяжести.

Процесс получения межкадровой разницы, фильтрации и выделения объекта представлен на приводимом ниже рисунке.



Поэтапная обработка разницы кадров для обнаружения указателя (*a* – межкадровая разница, *б* – результат фильтрации и бинаризации, *в* – выделенный объект)

**Определение экранных координат указателя.** Полученные координаты указателя определяют его позицию в кадре, но для использования данной системы в качестве сенсорного экрана эти координаты необходимо перевести в экранные координаты. Для этого можно выполнить обратное перспективное преобразование [3], но это требует большого объема калибровочных данных (в частности знания точного взаимного расположения камеры и экрана) и значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для определения экранных координат в работе предлагается метод на основе использования калибровочной сетки.

Предлагается в процессе первичной настройки системы (ее калибровки) разделить экран на условные прямоугольники с некоторым заданным шагом. Далее, в каждом из узлов получившейся калибровочной сетки выводить

мигающий указатель, для которого в соответствии с описанным выше алгоритмом будут определяться координаты указателя в кадре. Экранные координаты и кадровые координаты всех узлов в кадре сохраняются в качестве калибровочных данных.

Чтобы преобразовать кадровые координаты указателя ( $x_k, y_k$ ) в экранные ( $x_s, y_s$ ) необходимо найти ближайший узел калибровочной сетки и выполнить билинейную интерполяцию по формулам

$$x_s = \frac{x_k - xk_{i,j}}{xk_{i+1,j} - xk_{i,j}} \cdot \Delta x \cdot i; \quad y_s = \frac{y_k - yk_{i,j}}{yk_{i+1,j} - yk_{i,j}} \cdot \Delta y \cdot j, \quad (3)$$

где  $i, j$  – позиция ближайшего к указателю узла калибровочной сетки;

$xk_{i,j}, yk_{i,j}$  – его координаты.

**Результаты.** Предложенная методика была реализована программно, и был выполнен ряд экспериментов по определению точности определения позиции указателя. Для эксперимента было выбрано два варианта расположения камеры относительно монитора с разным углом наклона к нему и три варианта размеров калибровочной сети. Во всех тестах в наилучшем случае позиция указателя определялась с нулевой ошибкой, средние и максимальные значения ошибки определения позиции указателя представлены в таблице.

Ошибка определения позиции указателя

Угол	150 °			120 °			
	Шаг сетки, пикс.	315×225	265×175	215×165	315×225	265×175	215×165
Ошибка средняя / максимальная, пиксели	x	14 / 41	13 / 38	12 / 34	9 / 24	9 / 22	8 / 19
	y	19 / 36	18 / 31	17 / 30	17 / 28	16 / 29	15 / 26

Таким образом, точность определения позиции указателя является достаточной для многих практических применений. Скорость работы программной реализации позволяет использовать ее для определения позиции указателя в режиме реального времени и данный метод может найти применение при создании сенсорного интерфейса пользователя.

**Список литературы:** 1. Вихрев Л. Легким движением руки: сенсорные панели / Л. Вихрев // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. 2. Соифер В. А. Методы компьютерной обработки изображений / В. А. Соифер. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с. 3. Иванов В. П., Батраков А. С. Трехмерная компьютерная графика / Г. С. Полищук. – М. : Радио и связь, 1995. – 224 с.

Надійшла до редколегії 07.05.2012



**А. С. ДОВБИШ**, д-р техн. наук, професор СумДУ, Суми;  
**В. В. МОСКАЛЕНКО**, аспірант СумДУ, Суми

### ОПТИМІЗАЦІЯ СЛОВНИКА ОЗНАК РОЗПІЗНАВАННЯ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОГО ГІПЕРЕЛІПСОЇДНОГО КЛАСИФІКАТОРА

Розглядається в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології метод послідовно-спадної селекції словника ознак розпізнавання для класифікатора з гіпереліпсоїдними контейнерами класів розпізнавання. Як приклад розглянуто реалізацію алгоритму селекції словника ознак розпізнавання системи підтримки прийняття рішень для керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів з розплаву.

Рассматривается в рамках информационно-экстремальной интеллектуальной технологии метод последовательно-нисходящей селекции словаря признаков распознавания для классификатора с гиперэллипсоидными контейнерами классов распознавания. В качестве примера рассматривается реализация алгоритма селекции словаря признаков распознавания системы поддержки принятия решений для управления технологическим процессом выращивания скинтиляционных монокристаллов из расплава.

This paper considers sequential top-down feature selection method for hyper-ellipsoidal classifier within intellectual information-extreme technology. On the example of implementation the article considers sequential top-down feature selection method for Decision Support System for control of growing scintillate single crystals from the melt.

**Вступ.** Підвищення функціональної ефективності керування слабо формалізованими процесами, що функціонують за умов апіорної невизначеності, здійснюється шляхом впровадження інтелектуальних інформаційних технологій, що базуються на ідеях і методах машинного навчання та розпізнавання образів [1,2]. Більшість відомих методів навчання систем розпізнавання ігнорують перетин класів розпізнавання у просторі ознак розпізнавання (ОР), що має місце у практичних задачах керування. Ця проблеми вирішуються в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технологія) аналізу та синтезу здатних навчатися автоматизованих систем керування (АСК) [3,4]. Проте для здатних навчатися АСК існує проблема багатовимірності, оскільки ефективність функціонування системи залежить від кількості ОР. Тому важливого значення набуває задача селекції ОР, що полягає у формуванні оптимального в інформаційному розумінні словника ознак із початкового надлишкового, що дозволяє зменшити обчислювальну трудомісткість алгоритму і підвищити достовірність розпізнавання. У праці [6] запропонована оптимізація словника ознак розпізнавання для інформаційно-екстремального класифікатора з гіперсферичними контейнерами класів розпізнавання, але у випадку складного витягнутого розподілу реалізацій образу функціо-

нальна ефективність навчання АСК може бути збільшена за умови переходу до побудови гіпереліпсоїдних контейнерів класів розпізнавання [7,8].

У статті розглядається застосування методу послідовно-спадної селекції (ПСС) словника ОР для інформаційно-екстремального гіпереліпсоїдного класифікатора на прикладі реалізації інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для автоматизованого керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів із розплаву [9].

**Постановка задачі.** Розглянемо АСК, складовою частиною якої є здатна навчатися СППР. Нехай сформовано апіорно класифікований алфавіт класів розпізнавання  $\{X_m^o \mid m = \overline{1, M}\}$ , що характеризує відповідні функціональні стани АСК, і відповідну навчальну багатовимірну (векторну) матрицю типу «об'єкт-властивість»  $\|y_{m,i}^j \mid i = \overline{1, N}, j = \overline{1, n}\|$ , де  $N, n$  – кількість ознак розпізнавання і векторів-реалізацій образу відповідно. Базовий клас  $X_1^o$  характеризує максимальну функціональну ефективність здатної навчатися АСК, тобто є найбільш бажаним для особи, що приймає рішення. Відомий структурований вектор параметрів функціонування СППР

$$g = \langle \Sigma, \delta, c_m, x_m, x_{m,1}, x_{m,2}, d_m \rangle, \quad (1)$$

де  $\Sigma$  – словник ОР;  $\delta$  – параметр поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання;  $c_m$  – фокальна відстань гіпереліпсоїдного контейнера;  $x_m$  – двійковий еталонний вектор, що визначає геометричний центр контейнера класу  $X_m^o$  в бінарному просторі ознак  $\Omega_B$ ;  $x_{m,1}, x_{m,2}$  – двійкові вектори, що визначають координати першого та другого фокусів контейнера класу  $X_m^o$ ;  $d_m$  – велика піввісь контейнера класу  $X_m^o$ .

При цьому задано обмеження

$$\begin{cases} c_m < d_m, \\ d(x_{m,1} \oplus x_{c,1}) + d(x_{m,2} \oplus x_{c,1}) > 2 \cdot d_m, \\ d(x_{m,1} \oplus x_{c,2}) + d(x_{m,2} \oplus x_{c,2}) > 2 \cdot d_m, \\ d(x_{m,1} \oplus x_c) + d(x_{m,2} \oplus x_c) > 2 \cdot d_m, \\ \delta \in [0; \delta_H / 2], \end{cases} \quad (2)$$

де  $d(x_{m,1} \oplus x_{c,1}), d(x_{m,2} \oplus x_{c,1})$  – кодова відстань від першого та другого фокусів контейнера класу  $X_m^o$  до першого фокусу контейнера іншого класу  $X_c$ ;  $d(x_{m,1} \oplus x_{c,2}), d(x_{m,2} \oplus x_{c,2})$  – кодова відстань від першого та другого

фокусів контейнера класу  $X_m^o$  до другого фокусу контейнера іншого класу  $X_c$ ;  $d(x_{m,1} \oplus x_c)$ ,  $d(x_{m,2} \oplus x_c)$  – кодова відстань від першого та другого фокусів контейнера класу  $X_m^o$  до еталонного вектора контейнера іншого класу  $X_c$ ;  $\delta_H$  – нормоване поле допусків, що визначає область значень параметра  $\delta$ .

Необхідно в процесі навчання СППР визначити оптимальні значення координат вектора параметрів функціонування (1), що забезпечують максимальне значення усередненого за алфавітом класів розпізнавання критерію функціональної ефективності (КФЕ)

$$\bar{E}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{\{k\}} E_m, \quad (3)$$

де  $E_m$  – інформаційний КФЕ навчання СППР розпізнавати реалізації класу  $X_m^o$ ;  $\{k\}$  – впорядкована множина кроків навчання (відновлення контейнерів класів розпізнавання).

**Математична модель навчання.** Діаграму процесу навчання гіпереліпсоїдної СППР з контуром оптимізації словника ОР в рамках ІЕІ-технології показано на рис.1.

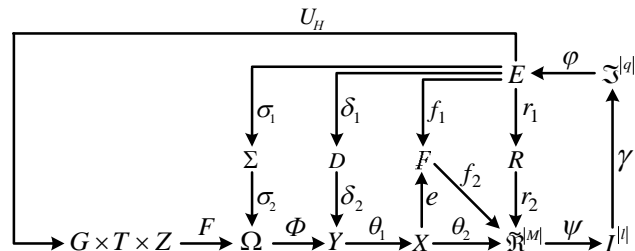


Рис. 1– Категорійна модель навчання гіпереліпсоїдного класифікатора

Категорійна модель (рис.1) містить оператор формування вхідного математичного опису

$$\Phi: G \times T \times Z \times \Omega \rightarrow Y,$$

де  $G$  – простір вхідних сигналів (факторів), які діють на СППР;  $T$  – множина моментів часу зняття інформації;  $Z$  – простір можливих функціональних і технічних станів СППР;  $\Omega$  – простір ОР;  $Y$  – вибірка множина значень рецепторів (вхідна навчальна матриця).

Оператор  $\theta_1: Y \rightarrow X$  формує бінарну вибіркву множину  $X$  – вхідну бінарну навчальну матрицю  $\|x_{m,i}^{(j)}\|$ , а оператор  $\theta_2: X \rightarrow \mathfrak{R}^{|M|}$  відновлює на кожному кроці навчання оптимальне в інформаційному розумінні розбиття простору ознак на  $M$  класів розпізнавання. Оператор класифікації  $\Psi_H: \mathfrak{R}^{|M|} \rightarrow I^{|l|}$  перевіряє основну статистичну гіпотезу  $\gamma_1: y_{m,i}^{(j)} \in X_m^o$ , де  $I^{|l|}$  – множина  $l$  статистичних гіпотез. Оператор  $\gamma$  формує множину точнісних характеристик  $\mathfrak{S}^{|q|}$ , де  $q = l^2$ . Оператор  $\varphi$  обчислює терм-множину  $E$  значень інформаційного КФЕ, який є функціоналом точнісних характеристик. Оператори  $f_1$  та  $f_2$  корегують геометричні параметри розбиття  $\mathfrak{R}^{|M|}$  шляхом формування множини пар фокусів  $F$  для різних фокальних відстаней і вибору серед них оптимальних. Оператори  $r_1$  і  $r_2$  корегують геометричні параметри розбиття  $\mathfrak{R}^{|M|}$  шляхом цілеспрямованого перебору значень великої півосі гіпереліпсоїдних контейнерів, що є елементами терм-множини  $R$ . Оператори  $\delta_1$  і  $\delta_2$  цілеспрямовано змінюють СКД  $D$  на ОР, оцінюючи вплив параметра СКД на КФЕ СППР з метою його максимізації. Оператор  $\sigma = \sigma_1 \circ \sigma_2: E \rightarrow \Omega$  змінює простір ознак  $\Omega$  згідно з алгоритмом оптимізації словника. При цьому  $\sigma_1$  – оператор формування словника ознак  $\Sigma$ ;  $\sigma_2$  – оператор формування нового простору ознак  $\Omega' \subset \Omega$ . Оператор  $U_H: E \rightarrow G \times T \times \Omega \times Z$  регламентує процес навчання СППР.

Таким чином, категорійна модель навчання (рис.1) являє собою композицію контурів оптимізації параметрів функціонування в процесі навчання СППР.

**Алгоритм навчання.** Відповідно категорійної моделі (рис. 1) оптимізація словника ОР здійснюється шляхом багато циклічної ітераційної процедури

$$\Sigma^* = \arg \max_{\Sigma \in \Omega} \{ \max_{G_\delta} \{ \max_{\{k\}} \bar{E}_k \} \}, \quad (4)$$

де  $\bar{E}_k$  – усереднене значення КФЕ навчання СППР, обчислене на  $k$ -му кроці навчання;  $G_\delta$  – область допустимих значень контрольних допусків;  $\{k\}$  – множина кроків навчання.

Вхідними даними для алгоритму навчання являються в загальному випадку дійсний масив векторів-реалізацій класів розпізнавання (навчальна матриця)  $\{y_{m,i}^{(j)} | m=1, \bar{M}; i=1, \bar{N}; j=1, \bar{n}\}$  і система нормованих допусків на

ознаки розпізнавання  $\{\delta_{H,i} | i = \overline{1, N}\}$ , що задає область значень відповідних контрольних допусків.

У процедурі (4) внутрішній цикл реалізує базовий алгоритм навчання, основними задачами якого є пошук глобального максимуму інформаційного КФЕ навчання СППР в робочій (допустимій) області визначення його функції та оптимізація геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання. При цьому специфіка базового алгоритму навчання гіпереліпсоїдної СППР полягає у побудові гіпереліпсоїдних контейнерів класів розпізнавання та в перевірці на непоглинання контейнером одного класу фокусів та еталонних векторів контейнерів інших класів. Розглянемо основні етапи базового алгоритму побудови гіпереліпсоїдних вирішальних правил:

1. Ініціалізація максимальної фокальної відстані  $c_{\max}$ ,  $0 \leq c_{\max} \leq \frac{N}{2}$ .
2. Обчислення нижнього  $A_{KH,i}$  та верхнього  $A_{KB,i}$  контрольних допусків для кожної ознаки розпізнавання за формулами:

$$A_{KH,i} = y_{1,i} - \delta; \quad A_{KB,i} = y_{1,i} + \delta,$$

де  $y_{1,i}$  – вибіркове середнє значення  $i$ -ї ОР у векторах-реалізаціях базового класу  $X_1^o$ , відносно якого будується СКД.

3. Формування бінарної навчальної матриці  $\|x_{m,i}^{(j)}\|$  за правилом

$$x_{m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } A_{KH,i} \leq y_{m,i}^{(j)} \leq A_{KB,i}. \\ 0, & \text{if } \textit{else}. \end{cases}$$

4. Обчислення для класу  $X_m^o$  двійкового еталонного вектора  $x_m$  за правилом

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{m,i}^{(j)} > \rho_m, \\ 0, & \text{if } \textit{else}. \end{cases}$$

де  $\rho_m$  – рівень селекції координат вектора  $x_m$  ( $\rho_m = 0,5$ ).

5. Ініціалізація двійкових координат фокусів контейнера класу  $X_m^o$ :  $x_{m,1} = x_{m,2} = x_m$ .
6. Обнуління лічильника кількості класів:  $m = 0$ .
7.  $m = m + 1$ .

8. Обнуління лічильника кроків зміни фокального радіусу:  $c_m = 0$ .
9. Формування для еталонного вектора  $x_m$  множини  $\{x_{m,v} | v = \overline{1, V}\}$ , що складається з  $V$  оточуючих його двійкових векторів з кодовою відстанню  $d(x_m \oplus x_{m,v}) = c_m$ .
10. Розбиття множини векторів  $\{x_{m,v} | v = \overline{1, V}\}$  на  $P$  пар фокусів  $\{X_{m,p}^{[2]} | p = \overline{1, P}\}$ . При цьому для кожної пари  $X_{m,p}^{[2]} = \langle x_{m,1}^{(p)}, x_{m,2}^{(p)} \rangle$  повинна виконуватись умова  $d(x_{m,1}^{(p)} \oplus x_{m,2}^{(p)}) = 2c_m$ .
11. Обнуління лічильника пар фокусів  $p = \overline{1, P}$ :  $p = 0$ .
12.  $p = p + 1$ .
13. Ініціалізація фокусів координатами пари векторів  $\langle x_{m,1}^{(p)}, x_{m,2}^{(p)} \rangle$ .
14. Обнуління лічильника кроків зміни великої півосі гіпереліпсоїдного контейнера:  $d_m = 0$ .
15.  $d_m = d_m + 1$ .
16. Обчислення інформаційного КФЕ  $E_m$  навчання СППР розпізнавати реалізації класу  $X_m^o$ .
17. Якщо виконуються умови (2), то здійснюється перехід до пункту 15, інакше – до пункту 18.
18. Визначається оптимальне значення великої півосі  $d_m^* = \arg \max_{\{d_m\}} E_m^*$ .
19. Якщо  $p < P$ , то виконується пункт 12, інакше – пункт 20.
20. Визначення оптимальної пари фокусів контейнера класу  $X_m^o$ :  $\langle x_{m,1}, x_{m,2} \rangle^* = \arg \max_{\{p\}} E_m^* (\langle x_{m,1}^{(p)}, x_{m,2}^{(p)} \rangle)$ .
21.  $c_m = c_m + 1$ .
22. Якщо  $c_m \leq c_{\max}$ , то виконується пункт 9, інакше – пункт 23.
23. Визначення оптимального значення фокальної відстані:  $c_m^* = \arg \max_{\{c_m\}} E_m^*$ .
24. Якщо  $m < M$ , то виконується пункт 7, інакше – пункт 25.
25. ЗУПИН.

Оптимізацію контрольних допусків на ОР доцільно здійснювати за паралельно-последовним алгоритмом, що забезпечує прийнятну оперативність та високу точність обчислення КФЕ. При цьому за алгоритмом паралельної оптимізації СКД на ознаки визначаються квазіоптимальні контрольні допуски, які для послідовного алгоритму приймаються як стартові.

Розглянемо основні етапи реалізації алгоритму ПСС словника ознак згідно категорійної моделі, наведеної на рис.1:

1. Для початкового надлишкового словника реалізується процедура паралельної оптимізації СКД на ОР при гіперсферичних контейнерах класів розпізнавання ( $c_{\max} = 0$ ) [4]

$$\delta^* = \arg \max_{G_\delta} \{ \max_{G_E} \bar{E} \}, \quad (5)$$

де  $\bar{E}$  – усереднений за алфавітом класів КФЕ навчання СППР;  $G_\delta$  – область допустимих значень контрольних допусків на ОР;  $G_E$  – область допустимих значень інформаційного КФЕ (1).

2. Одержані за процедурою (5) квазіоптимальні допуски приймаються як стартові для процедури послідовної оптимізації контрольних допусків на ОР.
3. Реалізується ітераційна процедура послідовної оптимізації поля контрольних допусків на ОР при гіперсферичних контейнерах класів розпізнавання ( $c_{\max} = 0$ )

$$\{ \delta_{K,i}^* \} = \arg \{ \max_{G_{\delta_i}} \{ \max_{G_E} \left[ \bigotimes_{s=1}^S \max_{G_d} \bar{E}^{(s)} \right] \} \}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

де  $\bar{E}^{(s)}$  – усереднений за алфавітом класів КФЕ навчання СППР на  $s$ -му прогоні послідовної процедури оптимізації;  $G_{\delta_i}$  – область допустимих значень поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки;  $G_E$  – область допустимих значень критерію оптимізації;  $G_d$  – область допустимих значень радіусів контейнерів;  $\otimes$  – символ операції повторення.

4. При оптимальному полі СКД на ОР  $\{ \delta_{K,i}^* \mid i = \overline{1, N} \}$  здійснюється запуск базового алгоритму з метою гіпереліпсоїдної корекції вирішального правила ( $c_{\max} = \frac{N}{2}$ ).
5. Формується лічильник кількості ОР у поточному словнику,  $i = N$ .
6. Формується множина варіантів словників, потужність яких на 1 менша від поточного,  $\{ \Sigma_{i,h} \mid h = \overline{1, i} \}$ .
7. За алгоритмами паралельно-послідовної оптимізації СКД (5) і (6) та гіпереліпсоїдної корекції вирішальних правил визначаються опти-

мальні параметри навчання та максимальне усереднене значення КФЕ для кожного варіанту словника  $\bar{E}_{\Sigma_{i,h}}$ .

8. Визначаємо оптимальний словник ознак  $\Sigma_i^*$ , для якого  $\bar{E}_{\Sigma_i^*} = \max_h \bar{E}_{\Sigma_{i,h}}$ .
9.  $i = i - 1$ .
10. Якщо  $i > 0$ , виконуємо пункт 6, інакше – пункт 11.
11. Визначаємо  $\Sigma^*$ , для якого  $\bar{E}_{\Sigma^*} = \max_i \bar{E}_{\Sigma_i^*}$ .
12. ЗУПИН.

Як КФЕ навчання використаємо модифіковану інформаційну міру Кульбака, в якій розглядається відношення повної ймовірності правильного прийняття рішень  $P_i$  до повної ймовірності помилкового прийняття рішень  $P_f$ . Для двохальтернативних гіпотез модифікований критерій Кульбака має вигляд

$$E_m^{(k)} = \left[ P_{t,m}^{(k)} - P_{f,m}^{(k)} \right] \cdot \log_2 \frac{P_{t,m}^{(k)}}{P_{f,m}^{(k)}} = \left[ \begin{array}{l} P_{t,m}^{(k)} = p(\mu_1) \cdot D_{1,m} + p(\mu_2) \cdot D_{2,m} \\ P_{f,m}^{(k)} = p(\mu_1) \cdot \alpha_m + p(\mu_2) \cdot \beta_m \\ p(\mu_1) = \frac{n_1}{n_1 + n_2}; p(\mu_2) = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \end{array} \right] =$$

$$= \frac{\left[ (n_1 \cdot D_{1,m}^{(k)} + n_2 \cdot D_{2,m}^{(k)}) - (n_1 \cdot \alpha_m^{(k)} + n_2 \cdot \beta_m^{(k)}) \right]}{n_1 + n_2} \cdot \log_2 \left( \frac{n_1 \cdot D_{1,m}^{(k)} + n_2 \cdot D_{2,m}^{(k)}}{n_1 \cdot \alpha_m^{(k)} + n_2 \cdot \beta_m^{(k)}} \right) =$$

$$= \frac{\left[ n_2 - n_1 + 2 \cdot (n_1 \cdot D_{1,m}^{(k)} - n_2 \cdot \beta_m^{(k)}) \right]}{n_1 + n_2} \cdot \log_2 \left( \frac{n_2 + (n_1 \cdot D_{1,m}^{(k)} - n_2 \cdot \beta_m^{(k)})}{n_1 - (n_1 \cdot D_{1,m}^{(k)} - n_2 \cdot \beta_m^{(k)})} \right), \quad (7)$$

де  $D_{1,m}^{(k)}$  – перша достовірність, обчислена на  $k$ -му кроці навчання для  $m$ -го класу;  $D_{2,m}^{(k)}$  – друга достовірність;  $\alpha_m^{(k)}$  – помилка першого роду;  $\beta_m^{(k)}$  – помилка другого роду;  $n_1, n_2$  – кількість реалізацій, що розмежовуються гіперповерхнею контейнера класу  $X_m^o$ .

Оскільки навчальна вибірка є обмеженою за обсягом, то замість точнісних характеристик на практиці використовуються їх оцінки у вигляді емпіричних частот

$$D_{1,m}^{(k)} = \frac{K_{1,m}^{(k)}}{n_1}; \beta_m^{(k)} = \frac{K_{2,m}^{(k)}}{n_2}, \quad (8)$$

де  $K_{1,m}^{(k)}$  – кількість подій, що характеризують належність реалізацій образу до контейнера класу  $X_m^o$ , якщо вони дійсно є реалізаціями цього класу;  $K_{2,m}^{(k)}$  – кількість подій, що характеризують належність реалізацій до контейнера класу  $X_m^o$ , якщо вони насправді належать іншому класу.

Суми  $K_{1,m}^{(k)}$  і  $K_{2,m}^{(k)}$  обчислюються на  $k$ -му кроці навчання СППР за правилом

$$\begin{aligned} K_{1,m}^{(k)}[0] &= 0; K_{2,m}^{(k)}[0] = 0; \\ \text{if } x_m^{(j)} \in X_m^o \text{ then } K_{1,m}^{(k)}[j] &:= K_{1,m}^{(k)}[j-1] + 1; \\ \text{if } x_c^{(j)} \in X_m^o \text{ then } K_{2,m}^{(k)}[j] &:= K_{2,m}^{(k)}[j-1] + 1, \end{aligned}$$

де  $x_c^{(j)}$  –  $j$ -та реалізація “чужого” класу  $X_c^o$ .

Визначення належності реалізації  $x^{(j)}$ , наприклад, класу  $X_m^o$ , для класифікатора з гіпереліпсоїдними контейнерами здійснюється за правилом

$$\text{if } d(x_{m,1} \oplus x^{(j)}) + d(x_{m,2} \oplus x^{(j)}) \leq 2d_m \text{ then } x^{(j)} \in X_m^o \text{ else } x^{(j)} \notin X_m^o,$$

де  $d(x_{m,1} \oplus x^{(j)})$ ,  $d(x_{m,2} \oplus x^{(j)})$  – кодові відстані між вектором  $x^{(j)}$  і першим та другим фокусами контейнера класу  $X_m^o$  відповідно;  $d_m$  – значення великої півосі контейнера класу  $X_m^o$ ;  $\oplus$  – символ операції складання за модулем два.

Модифікація критерію Кульбака після відповідної підстановки оцінок (8) у вираз (7) набуває вигляду

$$E_m^{(k)} = \frac{[n_2 - n_1 + 2 \cdot (K_1^{(k)} - K_2^{(k)})]}{n_2 + n_1} \cdot \log_2 \left( \frac{n_2 + (K_1^{(k)} - K_2^{(k)}) + 10^{-r}}{n_1 - (K_1^{(k)} - K_2^{(k)}) + 10^{-r}} \right), \quad (9)$$

де  $10^{-r}$  – константа, що введена для виключення нескінченних піків у випадках нульових емпіричних частот при обчисленні критерію.

При обчисленні інформаційного КФЕ для  $m$ -го класу всю багатовимірну навчальну матрицю зручно розбити на дві частини з обсягами  $n_1 = n_{\min}$  та  $n_2 = n_{\min} \cdot (M - 1)$ , де  $n_{\min}$  – мінімальний обсяг репрезентативної навчальної вибірки для кожного класу. Після підстановки значень  $n_1$  та  $n_2$  у вираз (9) робоча формула модифікованого критерію Кульбака набуває вигляду

$$E_m^{(k)} = \frac{[n_{\min} \cdot (M - 2) + 2 \cdot (K_1^{(k)} - K_2^{(k)})]}{n_{\min} \cdot M} \cdot \log_2 \left( \frac{n_{\min} \cdot (M - 1) + (K_1^{(k)} - K_2^{(k)}) + 10^{-r}}{n_{\min} - (K_1^{(k)} - K_2^{(k)}) + 10^{-r}} \right). \quad (10)$$

Нормовану модифікацію критерію (10) представимо у вигляді

$$\bar{E}_m^{(k)} = \frac{E_m^{(k)}}{E_{\max}^{(k)}}, \quad (11)$$

де  $E_{\max}^{(k)}$  – значення критерію при  $K_1^{(k)} = n_1 = n_{\min}$  та  $K_2^{(k)} = 0$ .

При цьому робоча область визначення функції інформаційного КФЕ обмежена як умовами (2), так і нерівностями  $D_1 \geq 0,5$  і  $D_2 \geq 0,5$ .

Таким чином, алгоритм навчання СППР полягає в ітераційній процедурі наближення глобального максимуму інформаційного КФЕ (3) до його граничного значення шляхом оптимізації словника ознак, системи контрольних допусків та геометричних параметрів контейнерів.

**Приклад реалізації алгоритму навчання.** Реалізація запропонованого алгоритму здійснювалася в НТК “Інститут монокристалів” (м. Харків) при вирощуванні монокристалів на установці типу “РОСТ” за методом Кіропулоса [9]. За архівною історією вирощувань та даними кінцевого лабораторного контролю якості оптичних характеристик та діаметру монокристала було сформовано вхідну апріорно класифіковану нечітку навчальну матрицю для трьох класів, що характеризували якість монокристала. При цьому кількість ознак розпізнавання дорівнювала  $N=30$ . Динаміку зміни максимуму усередненого нормованого інформаційного критерію Кульбака (11) при оптимізації СКД за паралельно-послідовним алгоритмом з повним словником ознак при відновленні в радіальному базисі простору ознак гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання показано на рис. 2. Тут і далі штрихована ділянка графіка позначає робочу область визначення інформаційного КФЕ.

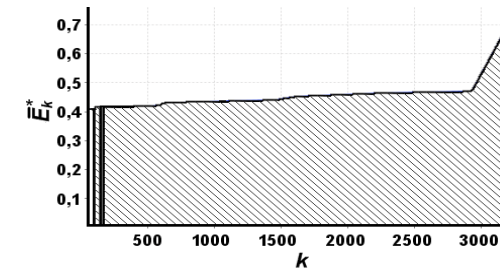


Рис. 2 – Графік зміни максимумів КФЕ при оптимізації СКД при повному словнику ОР для гіперсферичного класифікатора

Аналіз рис. 2 показує, що оптимальний вектор СКД на ОР був одержаний на 3217 кроці навчання, на якому досягнуто глобальний максимум усередненого інформаційного КФЕ  $\bar{E}^* = 0,718$ .

З метою підвищення значення КФЕ запускався алгоритм оптимізації словника ознак. На рис. 3 показана гістограма залежності значення макси-

мального усередненого нормованого КФЕ (11) від варіантів словників сформованих в процесі оптимізації за алгоритмом ПСС при використанні гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання. Затемнені стовпчики відповідають вибору словника на конкретному кроці його оптимізації. Горизонтальна лінія показує значення КФЕ, для початкового словника ознак.

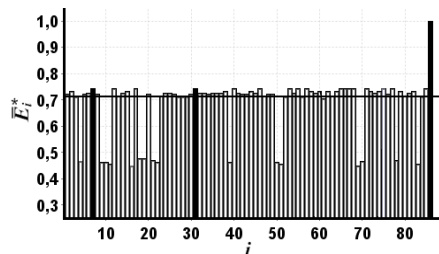


Рис. 3 – Гістограма залежності максимального усередненого значення нормованого КФЕ від варіантів словників ОР при гіперсферичних контейнерах класів розпізнавання

Аналіз рис. 3 показує, що на третьому кроці оптимізації усереднений нормований КФЕ досягає свого максимального значення  $\bar{E}_{\Sigma_{28,26}} = 1,0$ , що свідчить про побудову безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил. При цьому було перебрано 86 словників та видалено з початкового словника 2-гу, 7-му та 28-му ознаки розпізнавання.

З метою підвищення ефективності навчання після паралельно послідовної оптимізації СКД додатково запускається алгоритм гіпереліпсоїдної корекції вирішальних правил. На рис. 4 показана гістограма залежності значення максимального усередненого нормованого КФЕ (11) від варіантів словників, сформованих в процесі оптимізації за алгоритмом ПСС при використанні гіпереліпсоїдних контейнерів класів розпізнавання.

Аналіз рис. 4 показує, що вже на першому кроці оптимізації усереднений нормований КФЕ досягає свого максимального значення  $\bar{E}_{\Sigma_{30,7}} = 1,0$ . При цьому було перебрано 7 словників та видалено з початкового словника одну 7-у ознаку, яка виявилася максимально заважаючою.

Після видалення заважаючої ознаки в процесі гіпереліпсоїдної корекції вирішальних правил були визначені для всіх класів розпізнавання оптимальні значення фокальних відстаней, які відповідно дорівнювали  $c_1^* = 0$ ,  $c_2^* = 4$  і  $c_3^* = 0$  (у кодових одиницях). Це свідчить, що контейнери класів  $X_1^o$  та  $X_3^o$  залишилися гіперсферичними, а контейнер  $X_2^o$  деформувався у гіпереліпсоїд обертання з ексцентриситетом твірного еліпсу  $e_2^* = \frac{c_2^*}{d_2^*}$ , де  $d_2^*$  – оптимальна

довжина великої півосі твірного еліпсу. Графік залежності нормованого інформаційного КФЕ (11) від фокальної відстані контейнера класу  $X_2^o$  показано на рис. 5.

Аналіз рис. 5 показує, що значення фокальної відстані контейнера класу  $X_2^o$  від 2 до 4 кодових одиниць забезпечує граничне значення КФЕ, проте виходячи з умови максимальної компактності реалізацій образу обираємо значення рівне  $c_2^* = 4$ .

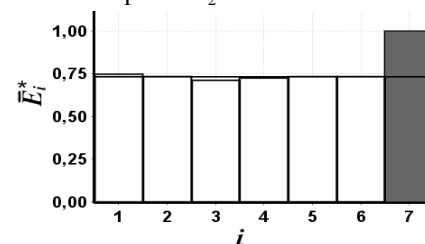


Рис. 4 – Гістограма залежності максимального усередненого значення нормованого КФЕ від варіантів словників ОР при гіпереліпсоїдній корекції вирішальних правил

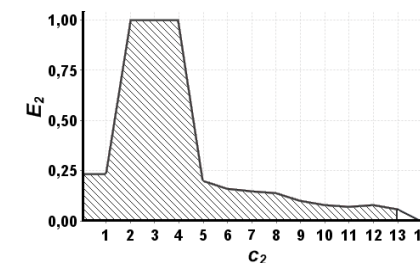


Рис. 5 – Залежність нормованого інформаційного КФЕ для  $X_2^o$  від фокальної відстані його контейнера при оптимальному словнику ОР

На рис. 6 наведено графіки залежності нормованого КФЕ (8) від довжини великої півосі гіпереліпсоїдних контейнерів класів  $X_1^o$ ,  $X_2^o$  та  $X_3^o$ , що відновлюються в бінарному просторі ознак при оптимальному словнику. Для класів  $X_1^o$  та  $X_3^o$  довжина великої півосі є радіусом їхніх гіперсферичних контейнерів.

Аналіз рис. 6 показує, що оптимальні значення великих півосей контейнерів класів розпізнавання відповідно дорівнюють  $d_1^* = 5$ ,  $d_2^* = 14$  і  $d_3^* = 5$ .

Таким чином, порівняльний аналіз рис. 3 і рис. 4 показує, що оптимізація словника ОР за алгоритмом ПСС при застосуванні гіпереліпсоїдних контейнерів класів розпізнавання підвищила оперативність побудови безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил. При цьому заважаючих ознак виявилось менше в порівнянні з гіперсферичним класифікатором.

**Висновки.** У рамках ІЕІ-технології розроблено інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення гіпереліпсоїдного класифікатора з оптимізацією словника ОР для СППР, що є складовою частиною АСК процесу вирощування скінтіляційних монокристалів. Фізичне моделювання за даними архівної історії вирощування скінтіляційних монокристалів показало, що використання гіпереліпсоїдних вирішальних правил при оптимізації слов-

ника ОР за алгоритмом ПСС дозволило підвищити ефективність навчання за рахунок збільшення оперативності оптимізації. Гіпереліпсоїдні вирішальні правила є більш завадозахищеними в порівнянні з гіперсферичними, оскільки вони видаляють меншу кількість заважаючих ознак при побудові безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил. Такий ефект може бути корисним при функціонуванні СППР у режимі факторного кластер-аналізу, де існує непередбачуваність цінності інформації, що міститься в ознаках розпізнавання.

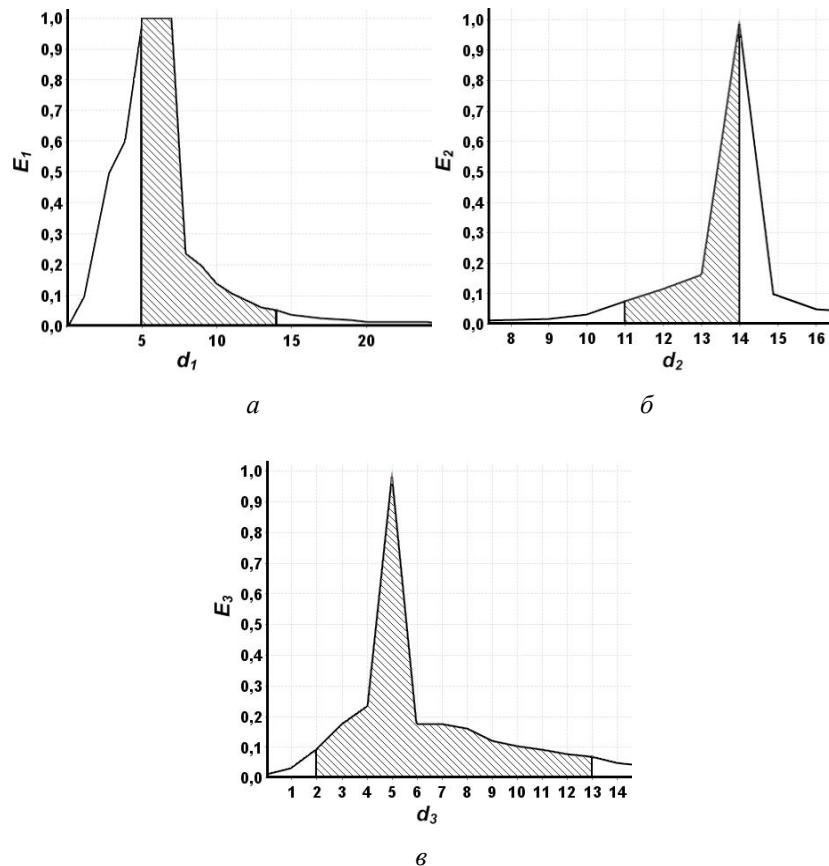


Рис. 6 – Графіки залежності КФЕ від значень великих півосей гіпереліпсоїдних контейнерів при оптимальному словнику ОР:

*a* – клас  $X_1^0$ ; *б* – клас  $X_2^0$ ; *в* – клас  $X_3^0$

**Список литературы:** 1. Евменов В. П. Интеллектуальные системы управления / В. П. Евменов. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2009. – 304 с. 2. Симанков В. С. Адаптивное управление

сложными системами на основе теории распознавания образов / В. С. Симанков, Е. В. Луценко. – Краснодар : Техн. ун-т Кубан. гос. технол. ун-та. – 1999. – 318 с. 3. Довбиш А. С. Основы проектирования интеллектуальных систем: Навчальний посібник / А. С. Довбиш. – Суми : Видавництво Сум ДУ. – 2009. – 171 с. 4. Довбиш А. С. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для керування вирощуванням монокристалів / А. С. Довбиш, В. С. Суздаль, В. В. Москаленко // Вісник СумДУ. Серія технічні науки. – 2011. – № 2. – С. 39–47. 5. Korn F. On the 'Dimensionality Curse' and the 'Self-Similarity Blessing' / F. Korn, B. Pagel, C. Faloutsos. – IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 1, 13, January, 2001. – P. 96–111. 6. Шелехов І. В. Оптимізація словника ознак розпізнавання за методом послідовної спадної селекції / І. В. Шелехов // Современные методы кодирования в электронных системах: междунар. науч. конф., 26-27 окт. 2004 г.: тезисы докл. – 2004. – С. 42–43. 7. Хьюбер Дж. П. Робастность в статистике / Дж. П. Хьюбер. – М. : Мир. – 2007. – 300 с. 8. Василенко Ю. А. Аппроксимация обучающей выборки гиперпараллелепипедами / Ю. А. Василенко, Ф. Г. Вацук, С. И. Коновалов // Науковий вісник УжДПУ. Природничі науки. – Ужгород : Вид-во УжДПЕП, 1998. – № 2. – С. 9–17. 9. Суздаль В. С. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание / В. С. Суздаль, П. Е. Стадник, Л. И. Герасимчук, Ю. М. Епифанов. – Х. : ИСМА, 2009. – 260 с.

Надійшла до редколегії 25.04.2012

УДК 621.311.24

**И. А. БУГРИМЕНКО**, магистр, ООО «Стела Системз», Харьков;  
**С. Е. ГАРДЕР**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**Т. Л. КОРНИЛЬ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

### АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КАБЕЛЯ ПО ДАННЫМ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

У статті розглядається метод, що заснований на спостереганні прямих та непрямих прогнозуючих параметрів технічної системи у ході прискорених випробувань. Він дозволяє зробити прогноз про стан виробів при роботі у нормальних умовах. Розглянута технічна система – електрокабель марки АВВГ 4х10. Знайдено залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи кабелю у конкретний момент експлуатаційного часу.

В статье рассмотрен метод, основанный на наблюдении прямых и косвенных прогнозных параметров технической системы в ходе ускоренных испытаний. Рассмотрена техническая система – электрокабель марки АВВГ 4х10. Определен остаточный ресурс и вероятность безотказной работы в конкретный момент времени эксплуатации.

The method of life remaining and unfailling work probability forecasting is considered in this article. It is based on observation of direct and indirect parameters of technical system during accelerated testing. It makes prediction about system state during the work in the normal conditions possible. As the example such technical system as power cable is taken. As the result, life remaining and unfailling work probability of taken system in some work time moment is presented.

**Введение.** В работе рассматривается методика прогнозирования остаточного ресурса работы кабеля марки АВВГ 4х10 по данным измерения диагно-

стических параметров и предварительных ускоренных испытаний. Ресурсным параметром кабеля, определяющим срок его эксплуатации, является сопротивление изоляции каждой из жил. При проведении ускоренных испытаний проведены ее измерения в моменты времени  $t = 0, 2, 4, 6, 8$  часов. В качестве *диагностических* параметров приняты: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и электрическая емкость. Так как все жилы в кабеле этой марки равноправные, то брались усредненные по жилам значения всех параметров. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Усредненные данные

Время $t$ , ч	$t = 0$	$t = 2$	$t = 4$	$t = 6$	$t = 8$
Сопротивление изоляции, $R$ МОм·км через время $t$ , ч	272,8	159,6	116,1	98,90	79,07
Диэлектрическая проницаемость, $W$	2,24	4,10	4,83	5,315	5,93
Тангенс угла диэлектрических потерь, $T$	0,01	0,01	0,005	0,006	0,01
Электрическая емкость $C$ , нФ/км	5,98	8,51	9,18	10,02	12,72

**Постановка задачи.** Так как непосредственная диагностика по значению ресурсного параметра затруднительна, то необходима косвенная диагностика. В этом случае решение задачи прогнозирования остаточного ресурса сводится к следующему.

Устанавливается связь между предельными значениями ресурсного и диагностических параметров.

Вычисляются коэффициенты вариации ресурсного параметра и диагностических параметров.

Вычисляется прогнозируемый остаточный ресурс, определяемый наработкой, за которую хотя бы один из диагностических параметров достигает своего предельного значения [4].

Определяется закон распределения остаточного ресурса и вероятность безотказной работы за время эксплуатации [2].

Предполагается, что предельное состояние при *ускоренных испытаниях* соответствует предельному состоянию изделия *в условиях эксплуатации*.

**Результаты исследований.** Построение математической модели изменения ресурсного и диагностических параметров от времени проведено методом наименьших квадратов. Сравнение возможных линейной, квадратичной и экспоненциальной зависимостей показало, что адекватной является экспоненциальная зависимость  $f(t) = \theta_0 e^{\theta_1 t}$  (результаты расчетов см. в табл. 2).

Таблица 2 – Экспоненциальная аппроксимация

Параметры	Модель	Сумма квадратов отклонений
Сопротивление изоляции, $R$	$237,73 \cdot e^{-0,148 \cdot t}$	527,531
Диэлектрическая проницаемость, $W$	$2,736 e^{0,11 \cdot t}$	0,166
Тангенс угла диэлектрических потерь, $T$	$0,0032 \cdot e^{0,127 \cdot t}$	0,00001
Электрическая емкость, $C$	$6,455 e^{0,084 \cdot t}$	1,395

Модель каждой переменной используется при построении СЛАУ для вычисления коэффициентов  $a_{ij}$  системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{X} = AX, \quad (1)$$

где  $X = (R \ W \ T \ C)^T$  – матрица ресурсного и диагностического параметров;  $A = (a_{ij})$ ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $j = \overline{1,4}$  – матрица коэффициентов, подлежащих определению.

Для определения коэффициентов системы уравнений (1) строятся четыре системы уравнений, с использованием моделей таблицы 2:

$$\dot{R}(t_i) = a_{11} \cdot R(t_i) + a_{12} \cdot W(t_i) + a_{13} \cdot T(t_i) + a_{14} \cdot C(t_i), \quad (2.1)$$

$$\dot{W}(t_i) = a_{21} \cdot R(t_i) + a_{22} \cdot W(t_i) + a_{23} \cdot T(t_i) + a_{24} \cdot C(t_i), \quad (2.2)$$

$$\dot{T}(t_i) = a_{31} \cdot R(t_i) + a_{32} \cdot W(t_i) + a_{33} \cdot T(t_i) + a_{34} \cdot C(t_i), \quad (2.3)$$

$$\dot{C}(t_i) = a_{41} \cdot R(t_i) + a_{42} \cdot W(t_i) + a_{43} \cdot T(t_i) + a_{44} \cdot C(t_i), \quad (2.4)$$

где  $t_i = \{0, 2, 4, 6, 8\}$  – моменты снятия экспериментальной информации (см. табл. 1).

Коэффициенты  $a_{ij}$  в системах (2.1) – (2.4) определены методом наименьших квадратов. После их нахождения матрица  $A$  системы (1) имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} -0,148 & -1,009 \times 10^{-11} & -1,508 \times 10^{-14} & -1,55 \times 10^{-11} \\ -1,55 \times 10^{-8} & 0,11 & 5,176 \times 10^{-13} & 6,93 \times 10^{-10} \\ 3,593 \times 10^{-6} & -7,23 \times 10^{-8} & 0,127 & -1,637 \times 10^{-7} \\ 6,323 \times 10^{-10} & -3,565 \times 10^{-12} & 3,53 \times 10^{-15} & 0,084 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

На рисунке 1 изменены масштабы: значения  $R$  уменьшены в 40 раз,  $T$  увеличены в 100 раз.



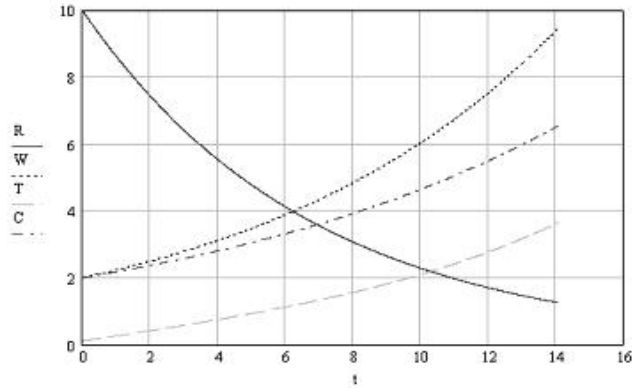


Рис. 1 – График поведения основного и косвенных параметров

С найденными коэффициентами  $a_{ij}$  строится система уравнений вида (2), которая интегрируется численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка до тех пор, пока ресурсный параметр не достигнет заданного предельного значения  $R_{lim} = 50$ . Таким образом, определены предельные значения диагностических параметров:  $W_{lim} = 9,453$ ,  $T_{lim} = 0,036$ ,  $C_{lim} = 6,538$ . В дальнейшем эти значения используются для нахождения остаточного ресурса кабеля.

После того, как установлены предельные значения  $(W_{lim}, T_{lim}, C_{lim})$ , представляется возможным по измерению только диагностических параметров  $(W, T, C)$  определить остаточный ресурс.

Таблица 3 – Рассчитанные значения параметров

Наработка $t$ , час	$t_1 = 1$	$t_2 = 2$	$t_3 = 3$	$t_4 = 4$	$t_5 = 5$
Диэлектрическая проницаемость, $W$	3,5000	4,7000	5,0200	6,0000	6,5900
Тангенс угла диэлектрических потерь, $T$	0,0045	0,0050	0,0061	0,0075	0,0174
Электрическая емкость, $C$	8,5100	11,0100	12,1000	14,3500	15,8500

С использованием данных таблицы 3 и аппроксимаций таблицы 2, найдены предельные значения наработок  $t_{Wlim} = 21,574$ ,  $t_{Tlim} = 26,839$ ,  $t_{Clim} = 16,696$ . Вычисляется значение, принимаемое в качестве оценки среднего значения остаточного ресурса:

$$T_{ocp} = \min \{(t_{Wlim} - t_{uzm}), (t_{Tlim} - t_{uzm}), (t_{Clim} - t_{uzm})\} = 6,669, \quad (4)$$

где  $t_{uzm}$  – наработка, соответствующая последнему измерению диагностических параметров.

Так как  $R$  в процессе эксплуатации монотонно убывает, то для модели теоретического закона распределения ресурса кабеля принимается закон диффузионно-монотонного (DM) распределения [3]:

$$F(\tau) = DM(\tau; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{\tau - \mu}{\nu\sqrt{\mu \cdot \tau}}\right), \quad (5)$$

где  $\Phi(0,1)$  – кумулятивная функция стандартизованного нормального распределения,  $\mu = T_{ocp} / (1 + 0,5 \cdot \nu^2)$  – параметр масштаба,  $\nu$  – коэффициент вариации.

С использованием данных таблицы 1 вычисляются коэффициенты вариации ресурсного и диагностических параметров по формуле:

$$\nu_{ij} = \frac{\sqrt{n}}{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ij}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \Delta x_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{ij} \right)^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta x_{ij} = x_{j+1} - x_{ji}$ ,  $j = 1, 2, 3, 4$  – номер контролируемого параметра  $(R_i, W_i, T_i, C_i)$ , а индекс  $i$  соответствует моменту времени  $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$ .

Оценка коэффициента вариации определяющего параметра в дальнейшем принимается в качестве оценки коэффициента вариации прогнозируемого остаточного ресурса.

Для определения вероятности безотказной работы вычисляются параметры DM-распределения, затем показатели остаточного ресурса. В частности, гамма-процентный остаточный ресурс (для  $\gamma = 0,9$ ):

$$T_{0\gamma} = \left\{ \mu \left( 1 + \frac{\nu^2 \cdot U_\gamma^2}{2} - \nu \cdot U_\gamma \sqrt{1 + \frac{\nu^2 \cdot U_\gamma^2}{4}} \right) \right\} = 18,725. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы, например, за  $\tau_{зад} = 1,032$ :

$$R(\tau_{зад}) = \left\{ \Phi \left( \frac{\mu - \tau_{зад}}{\nu\sqrt{\mu \cdot \tau_{зад}}} \right) \right\} = 0,671. \quad (8)$$

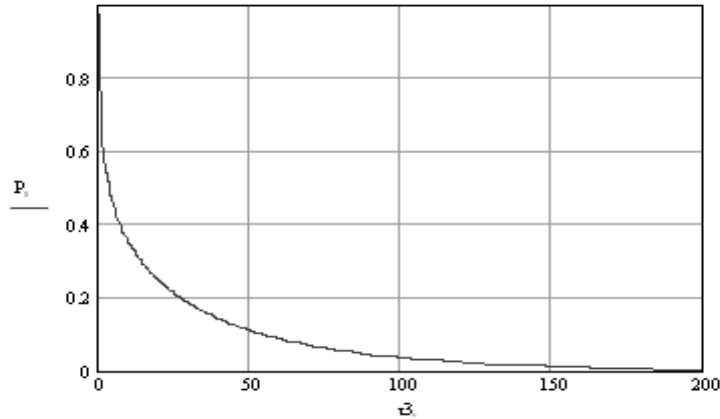


Рис. 2 – График зависимости вероятности  $P$  безотказной работы от времени  $\tau_{зад}$

**Выводы.** При контроле в процессе эксплуатации предельных значений диагностических параметров, соответствующих предельному значению ресурсного параметра, можно прогнозировать остаточный ресурс работы изделия.

**Список литературы:** 1. Гаскаров Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозкалевский – М. : Сов. радио, 1974. – 224с. 2. Стрельников В. П. Оценка остаточного ресурса на основе измерения диагностических параметров / В. П. Стрельников // Сетевой электронный научный журнал «СИСТЕМОТЕХНИКА». – 2003. – № 1. 3. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 45 с. 4. ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета надежности. Общие требования. – Введ. 01.01.96. – 40 с.

Надійшла до редколегії 23.04.2012

УДК 519.681

**О. И. ДУНАЕВСКАЯ**, ассистент НТУ «ХПИ»;  
**Н. И. ЯЩУК**, научный сотрудник НТУ «ХПИ»

### РЕКУРРЕНТНАЯ ОЦЕНКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОЖИДАНИЯ ПРОГРЕССОРА В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ

Розглянуто одне з актуальних питань вдосконалення генетичних алгоритмів. Запропоновано процедуру рекуррентної оцінки тривалості очікування прогрессора – особини, що забезпечує

краще рішення у порівнянні з отриманими раніше. Задача розв'язана стосовно до NP-повних комбінаторних задач.

Рассмотрен один из актуальных вопросов совершенствования генетических алгоритмов. Предложена процедура рекуррентной оценки продолжительности ожидания прогрессора – особи, обеспечивающей лучшее решение по сравнению с полученными ранее. Задача решена применительно к NP-полным комбинаторным задачам.

One of the topical questions of genetic algorithm improvement was considered. There was suggested a recurrent estimation procedure of the waiting period for progressor – the individual, providing a better solution compared with those obtained previously. The problem is solved as applied to the NP-complete combinatorial task.

**Введение.** Хорошо известна высокая эффективность генетических алгоритмов (ГА) при решении многомерных комбинаторных задач [1, 2]. Это связано с конструктивно заложенной в ГА возможностью быстрого формирования большого числа потенциальных решений задачи в разных областях пространства поиска. ГА – адаптивный алгоритм. Как экспериментально показано в [3], рациональные значения основных параметров ГА (число особей в популяции, характер процедуры скрещивания, вероятность мутации и т.д.) существенно зависят от класса решаемой задачи (безусловная или условная оптимизация, одно- или многоэкстремальная задача, непрерывная или дискретная оптимизация). Там же предложена двухуровневая иерархическая алгоритмическая процедура настройки параметров ГА с учетом характера решаемой задачи. Однако, ни в этой работе, ни во многих других, посвященных проблеме эффективного использования ГА, не рассматривался принципиальный вопрос о числе непрогрессирующих поколений до останова. Проблема состоит в том, что априорное задание числа эпох ожидания или уровня приспособленности наилучшей особи, при достижении которых целесообразен останов решения задачи, не могут быть корректно обоснованы из каких-либо общих соображений или рекомендаций, привязанных к типу решаемой задачи. С другой стороны, важность этой проблемы определяется тем, что никак не обоснованная продолжительность ожидания появления прогрессивной особи может привести к ошибке в решении задачи (неконтролируемая погрешность недостижения оптимума).

В связи с этим поставим задачу построения процедуры оценки продолжительности ожидания прогрессора, учитывающей на каждом шаге достигнутый к этому моменту уровень качества решения.

#### Основные результаты.

Введем

$T$  – временной интервал, прошедший от момента начала решения задачи,

$\varphi(R)$  – плотность распределения численного значения критерия на множестве возможных решений задачи,

$R(T)$  – лучшее решение, полученное к моменту  $T$ ,

$P(T) = \int_{R_{\min}}^{R(T)} \varphi(R) dR$  – вероятность того, что решение, соответствующее

произвольно выбранной особи из очередной популяции, будет лучше (то есть обеспечивать меньшее значение критерия), чем  $R(T)$ .

При этом  $P_n = 1 - (1 - P(T))^n$  – вероятность того, что хотя бы одно из  $n$  решений в очередной популяции окажется лучше, чем  $R(T)$ .

Пусть  $N(T)$  – число эпох, в течение которых алгоритм ожидает появления решения, лучшего, чем  $R(T)$ . Тогда  $P(N) = (1 - P(T))^{nN(T)}$  – вероятность того, что в течение  $N(T)$  эпох не будет получено решение лучше, чем  $R(T)$ . Если неполучение лучшего решения в течении  $N(T)$  популяций трактовать как признак того, что лучшего решения не существует, то  $P(N)$  – вероятность ошибки. Рассчитаем число эпох ожидания (значение  $N(T)$ ), обеспечивающее заданную вероятность ошибки.

$$(1 - P(T))^{nN(T)} = P_s,$$

откуда

$$N(T) = \frac{\ln P_s(N(T))}{n \cdot \ln(1 - P(T))}.$$

Пусть  $nN(T)$  – общее число особей, использованных для поиска лучшего решения в течении  $N(T)$  эпох. Легко получить оценку среднего числа проб до получения прогрессивной особи.

Пусть  $p$  – вероятность получения решения, лучшего чем предыдущее в одиночном опыте.

Тогда

$P_1 = p$  – вероятность получения лучшего решения в первом опыте,

$P_2 = qp$  – вероятность получения лучшего решения во втором опыте,  $q = 1 - p$ ,

$P_k = q^{k-1} p$  – вероятность получения лучшего решения в  $k$ -м опыте.

При этом среднее число опытов до получения лучшего решения будет равно

$$\bar{m} = p + 2qp + 3q^2 p + \dots + kq^{k-1} p + \dots = p(1 + 2q + 3q^2 + \dots + kq^{k-1} + \dots) =$$

$$= p \frac{d}{dq} (q + q^2 + q^3 + \dots + q^k + \dots) = p \frac{d}{dq} \left( \frac{q}{1-q} \right) = p \left( \frac{1-q+q}{(1-q)^2} \right) = \frac{p}{p^2} = \frac{1}{p}.$$

Трудности теоретической оценки значения  $P(T)$  преодолеваются с использованием экспериментального исследования. Пусть для конкретной задачи после первой популяции, в которой отсутствует решение, лучше, чем все предыдущие, фиксируется продолжительность ожидания (число эпох, в которых также не оказалось лучшего решения) и при этом получена последовательность –  $M_1, M_2, \dots, M_k, \dots, M_{s+1}$ . Введем рекуррентную зависимость продолжительности ожидания на очередном этапе улучшения решения от значения этой продолжительности на предыдущем этапе

$$M_{k+1} = a_1 M_k + a_2 M_k^2. \quad (1)$$

Найдем неизвестные параметры  $a_1$  и  $a_2$ .

Введем

$$H = \begin{pmatrix} M_1 & M_1^2 \\ M_2 & M_2^2 \\ \dots & \dots \\ M_s & M_s^2 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} M_2 \\ M_3 \\ \dots \\ M_{s+1} \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$A = (H^T H)^{-1} H^T Y. \quad (2)$$

**Пример.** В качестве тестовой выберем задачу коммивояжера для по порядку перенумерованных  $n=120$  пунктов, расположенных на кольцевой дороге, представляющей собой окружность радиуса  $R=1$ . Понятно, что оптимальное решение – маршрут вдоль этой дороги, и его длина равна  $S = 2\pi \approx 2 \cdot 3.1416 = 6.2832$ .

Исследование искомой зависимости было проведено, начиная от момента, когда ситуация ожидания лучшего решения возникла в течение нескольких (например, пятидесяти) циклов работы ГА подряд. При этом была получена следующая последовательность продолжительностей ожидания: 192, 263, 382, 563, 918, 1836, 4964, 24362.

Теперь, используя (2), получим

$$A_n^T = (a_1^n \quad a_2^n) = (1,354 \quad 7,16 \cdot 10^{-4}).$$

Полученные значения  $(a_1, a_2)$  могут быть использованы в (1) для оценки продолжительности ожидания на очередном этапе работы ГА.

Исследуем зависимость значений коэффициентов  $(a_1, a_2)$  в (1) от размерности задачи. С этой целью эта же задача решалась для  $n_1=30$ ,  $n_2=60$ ,  $n_3=90$  пунктов, расположенных на этой же дороге. В результате были получены

$$A_{n_1}^T = (a_1^{n_1}, a_2^{n_1}) = (1,07 \quad 0,92 \cdot 10^{-4});$$

$$A_{n_2}^T = (a_1^{n_2}, a_2^{n_2}) = (1,11 \quad 2,31 \cdot 10^{-4});$$

$$A_{n_3}^T = (a_1^{n_3}, a_2^{n_3}) = (1,18 \quad 3,62 \cdot 10^{-4});$$

Введем параболическую зависимость значений коэффициентов модели (1) от числа пунктов  $n$  :

$$a_k^{(n)} = c_{k0} + c_{k1}n + c_{k2}n^2, \quad k = 0;1. \quad (3)$$

Искомые коэффициенты получим, обрабатывая полученные результаты с использованием МНК.

Введем

$$H = \begin{pmatrix} 1 & n_1 & n_1^2 \\ 1 & n_2 & n_2^2 \\ 1 & n_3 & n_3^2 \\ 1 & n_4 & n_4^2 \end{pmatrix}; \quad C_1 = \begin{pmatrix} c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \end{pmatrix}; \quad C_2 = \begin{pmatrix} c_{20} \\ c_{21} \\ c_{22} \end{pmatrix}; \quad A_1 = \begin{pmatrix} a_1^{(n_1)} \\ a_1^{(n_2)} \\ a_1^{(n_3)} \\ a_1^{(n_4)} \end{pmatrix}; \quad A_2 = \begin{pmatrix} a_2^{(n_1)} \\ a_2^{(n_2)} \\ a_2^{(n_3)} \\ a_2^{(n_4)} \end{pmatrix};$$

$$C_1 = (H^T H)^{-1} H^T A_1, \quad C_2 = (H^T H)^{-1} H^T A_2. \quad (4)$$

В результате расчетов по формулам (4), получим

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1.116 \\ -2.51 \cdot 10^{-3} \\ 3.722 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}, \quad C_2 = \begin{pmatrix} 1.183 \cdot 10^{-4} \\ -2.282 \cdot 10^{-6} \\ 5.972 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix}.$$

При этом соотношение (1) с учетом (3) имеет вид

$$M_{k+1}(n) = \exp\left((c_{10} + c_{11}n + c_{12}n^2) + (c_{20} + c_{21}n + c_{22}n^2)M_k\right)M_k.$$

Полученное соотношение позволяет оценить продолжительность ожидания появления прогрессивной особи в задаче коммивояжера для

заданного числа пунктов  $n$  на каждом этапе улучшения уже достигнутого решения.

**Выводы.** Рассмотрена технология оценки продолжительности ожидания прогрессивной особи при решении задачи коммивояжера с помощью генетического алгоритма. Эта оценка формируется рекуррентно и учитывает результаты работы ГА на предыдущем шаге улучшения решения. Исследована зависимость параметров полученного оценочного соотношения от размерности задачи.

**Список литературы:** 1. Goldberg D. Genetic Algorithms / D. Goldberg. – MA: Addison Wesley, 1989. – 210 p. 2. Лысенко Ю. Г. Нейронные сети и генетические алгоритмы / Ю. Г. Лысенко, Н. Н. Иванов, А. Ю. Минц. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2003. – 265 с. 3. Серая О. В. Многоиндексные модели логистики в условиях неопределенности / О. В. Серая. – X. : ФОП Стеценко И. И., 2010. – 512 с.

Надійшла до редколегії 07.02.2012

УДК 621.396

**В. А. КАМАЕВ**, д-р техн. наук, проф. ВолгДТУ, Волгоград, Россия;  
**С. В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;  
**Р. И. МАНЕВА**, студент НТУ «ХПИ»

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ

В статье рассмотрена задача прогнозирования потребления электроэнергии на основе теории мягких вычислений с использованием нечетких продукционных систем. Данный подход позволяет объединять численную информацию, представленную в форме обучающих данных с лингвистической информацией, имеющей вид базы правил. Получены результаты применения разработанной системы нечеткого вывода Сугено и Мамдани в среде MATLAB.

У статті розглянута задача прогнозування споживання електроенергії на основі теорії м'яких обчислень з використанням нечітких продукційних систем. Даний підхід дозволяє об'єднувати чисельну інформацію, подану у формі навчальних даних з лінгвістичною інформацією, що має вид бази правил. Одержані результати застосування розробленої системи нечіткого висновку Сугено та Мамдані в середовищі MATLAB.

In paper was considered the problem of forecasting electricity consumption based on the theory of soft computing with the use of fuzzy systems. This approach allows to combine the numerical information presented in the form of training data with linguistic information, which is kind of base rules. The obtained the results of applying the developed system of fuzzy conclusion Suheno and Mamdani in the environment MATLAB.

**Введение.** Электроэнергия является наиболее значимым продуктом для экономики и составляет весомую долю в расходах практически всех ее отрас-

лей. Переход к оптовому рынку электроэнергии вызывает проблемы, связанные с точностью прогнозирования потребления электроэнергии, ужесточив требования по скорости сборки и надежности прогнозов. Актуальность прогнозирования потребления электроэнергии в разрезах времени несомненна, поскольку обоснованные прогнозы являются основой перспективного планирования и управления в отрасли. Точное прогнозирование данных величин позволяет оптимизировать распределение нагрузки между электростанциями, способствует осуществлению экономически целесообразных операций по покупке или продаже электроэнергии. Актуальность исследований в этой области проявляется также в применении полученных результатов для оперативного и тактического управления [1].

**Постановка задачи.** Задачей исследования является создание математического обеспечения для прогнозирования потребления электроэнергии и его использование в среде MATLAB

Для решения поставленной задачи может быть использована база нечетких правил, которая строится на основе численных данных ретроспективного периода. Это позволит объединить численную информацию в форме обучающих данных с лингвистической информацией, имеющей вид базы правил. Такие результаты объединения могут быть использованы для формирования прогноза потребления электроэнергии.

**Описание объекта исследования.** В качестве объекта исследования рассматривается предприятие Харьковоблэнерго. Успешная деятельность предприятия обеспечивается многими составляющими, в числе которых можно назвать анализ аспектов функционирования с выявлением и устранением недостатков, создание системы повышения качества конечных результатов деятельности, внедрение информационных технологий и многое другое. Для дальнейших исследований требуется получение качественного описания системы, которое может быть использовано для разработки ее математической модели.

Функционирование Харьковоблэнерго можно представить моделью, использующей в качестве выбранных входных параметров, следующие данные: цена электроэнергии 1-го класса напряжения; цена электроэнергии 2-го класса напряжения; год; время года (месяц); ВВП (валовой внутренний продукт), средняя температура окружающей среды; количество рабочих дней.

Объем потребления электроэнергии будем считать выходным параметром.

Структура модели оценки потребления электроэнергии с выбранными параметрами изображена на рис.1.

**Выбор метода прогнозирования потребления электроэнергии.** Механизм нечеткой логики по сравнению с другими искусственными интеллектуальными системами имеет ряд преимуществ. Во-первых, при одних и тех же объемах входной и выходной информации, блок принятия решений становится компактнее и проще для восприятия пользователем. Во-вторых, реше-

ние сложных и громоздких задач имеет гибкую стратегию адаптивной "настройки" с ограничением требуемой точности расчетов и становится проще. Эти преимущества позволяют сделать выбор подхода для решения задачи прогнозирования в пользу использования аппарата нечеткой логики [3].



Рис. 1 – Структура модели оценки объемов потребления электроэнергии

Задача исследования в данной работе заключается в формировании таких нечетких правил, чтобы сконструированный на их основе программный модуль управления определял корректные результаты прогнозирования, имеющие наименьшую погрешность относительно исходных статистических данных. Для этого используются алгоритмы нечеткого вывода Мамдани и Сугено [4]. Алгоритм Мамдани позволяет избежать чрезмерно большого объема вычислений. Этот алгоритм в настоящее время получил наибольшее практическое применение в задачах нечеткого моделирования. Алгоритм Сугено аналогичен алгоритму Мамдани за исключением выводов правил, которые задаются не нечеткими термами, а линейной функцией от входов. Правила в базе знаний Сугено является своего рода переключателями с одного линейного закона "входы – выход" на другой, тоже линейный [5,6].

**Алгоритм обучения нечеткой базы правил.** Задача обучения нечеткой базы правил для нечеткого продукционного вывода сводится к задаче математического программирования. По содержанию она является задачей минимизации погрешности и имеет следующий вид:

$$L(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^m (\varphi(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}) - Y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

где  $L(\mathbf{z})$  – критерий решения задачи;

$\mathbf{z}$  – вектор параметров оптимизации;

$m$  – количество наборов данных, на которых происходит обучение;

$f_i(\mathbf{z})$  – значение невязки прогнозного значения системы при заданных параметрах  $\mathbf{z}$  ;

$\mathbf{x}_i$  – входные данные  $i$ -го набора;

$\varphi(\mathbf{x}_i, \mathbf{z})$  – функция системы прогнозирования, определяющая искомые значения выходного параметра на основе  $i$ -го набора данных  $\mathbf{x}_i$  и параметров  $\mathbf{z}$ ;

$Y_i$  – действительное значение прогнозируемой величины.

Приведенная задача относится к задачам метода наименьших квадратов, которую можно решать стандартными методами математического программирования, например, с помощью метода Левенберга-Марквардта [7], учитывая особенный вид градиента целевой функции  $\nabla L(\mathbf{z})$  и матрицы Гессе

$H(\mathbf{z})$ :

$$\nabla L(\mathbf{z}) = 2J^T(\mathbf{z})\mathbf{f}(\mathbf{z}), \quad (2)$$

$$H(\mathbf{z}) = J^T(\mathbf{z})J(\mathbf{z}) + Q(\mathbf{z}), \quad (3)$$

$$Q(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{z})H_i(\mathbf{z}), \quad (4)$$

где  $\nabla L(\mathbf{z})$  – градиент целевой функции;

$J^T(\mathbf{z})$  – транспонированная матрица Якоби вектор-функции  $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ ;

$\mathbf{f}(\mathbf{z})$  – вектор-функция, компонентами которой являются значения  $f_i(\mathbf{z})$ ;

$H_i(\mathbf{z})$  – матрица Гессе для компоненты  $f_i(\mathbf{z})$ .

Направление поиска Левенберга-Марквардта  $\mathbf{p}^{(k)}$  определяется из системы уравнений:

$$[J^T(\mathbf{z}^{(k)})J(\mathbf{z}^{(k)}) + \lambda_k I]\mathbf{p}^{(k)} = -J^T(\mathbf{z}^{(k)})\mathbf{f}(\mathbf{z}^{(k)}), \quad (5)$$

Тогда следующее значение  $\mathbf{z}^{(k+1)}$  можно определить таким образом:

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \mathbf{z}^{(k)} + \mathbf{p}^{(k)}. \quad (6)$$

Константа  $\lambda_k$  должна быть достаточной для монотонного спуска по функции невязки  $L(\mathbf{z})$ , т.е. нужно увеличивать данный параметр до тех пор, пока не будет достигнуто условие  $L(\mathbf{z}^{(k+1)}) < L(\mathbf{z}^{(k)})$ . Параметр  $\lambda_k$  можно устанавливать, исходя из отношения между фактическими изменениями функции  $\mathbf{f}(\mathbf{z})$  в результате пробных шагов, и ожидаемыми величинами этих изменений при интерполяции. Тогда направление поиска Левенберга-Марквардта  $\mathbf{p}^{(k)}$  определяется как

$$\mathbf{p}^{(k)} = \arg \min_{\|\mathbf{p}\| \leq \Delta} \|J(\mathbf{z}^{(k)})\mathbf{p} + \bar{f}(\mathbf{z}^{(k)})\|, \quad (7)$$

где  $\Delta$  – параметр, связанный с  $\lambda_k$ .

В данной работе применяется алгоритм Левенберга-Марквардта, который является распространенным алгоритмом оптимизации и превышает по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов в различных задачах [7].

**Численные расчеты.** Для определения прогнозных значений потребления электроэнергии за период с ноября 2010 по май 2011 использовались следующие данные, табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчетов

Год	Месяц	ВВП	Цена 1-го класса напряжения	Цена 2-го класса напряжения	Средняя температура воздуха	Количество рабочих дней	Уровень потребления, МВт год.
2010	11	98429	55,27	68,6	5,9	22	325,435
2010	12	114531	55,27	68,6	-1,6	23	323,457
2011	01	79947	57,47	72,03	-7	19	328,207
2011	02	82842	60,34	75,63	-8,9	20	396,225
2011	03	100612	61,76	77,44	-0,5	22	319,674
2011	04	105693	62,26	79,27	8,5	20	444,542
2011	05	102830	62,71	82,37	17,9	19	469,583

В результате серии расчетов по прогнозированию потребления электроэнергии были построены графики реальных и прогнозных значений для семи месяцев тестовой выборки, представленные на рис. 2.

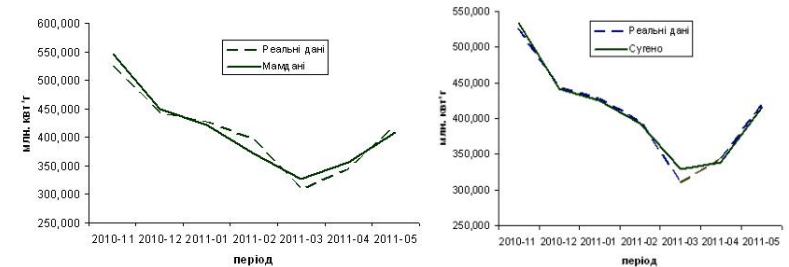


Рис. 2 – График прогнозных и реальных значений за период ноябрь 2010-май 2011

Здесь по оси абсцисс размещены периоды времени, а по оси ординат – объемы потребления электроэнергии. В таблице 2 приведены абсолютные и относительные отклонения прогнозных и реальных значений. На основании данных этой таблицы можно видеть, что наименьшее отклонение наблюдается в результатах, полученных по алгоритму Сугено. В этом смысле

– это лучший алгоритм решения рассматриваемой задачи при прочих равных условиях.

Таблица 2 – Отклонения прогнозных и реальных значений (по модулю)

Период	Метод Мамдани		Метод Сугено	
	Абсолютные	Относительные	Абсолютные	Относительные
2010–11	21,46375	3,93	7,830753	1,47
2010–12	6,74923	1,50	2,55377	0,58
2011–01	5,396325	1,28	2,161325	0,51
2011–02	24,64726	6,63	3,58126	0,91
2011–03	17,67774	5,40	19,78074	6,00
2011–04	12,38915	3,47	5,758848	1,70
2011–05	10,86192	2,66	3,412924	0,82
Среднее	14,19448	3,55	6,939019	1,71

Применение разработанной системы прогнозирования позволяет получить визуальные зависимости выходного параметра – прогнозируемого объема потребления электроэнергии – от выбранных входных параметров, рис.3.

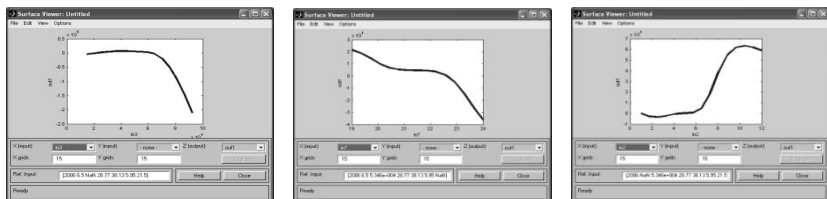


Рис. 3 –Зависимости объемов потребления электроэнергии от значений параметров «Цена 1-го класса напряжения», «Цена 2-го класса напряжения» и «ВВП»

Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде MATLAB был использован пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox. Обучение проводилось в редакторе ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). Это основная процедура настройки систем нечеткого логического вывода типа Сугено и Мамдани, с помощью которой для минимизации расхождения между результатами и экспериментальными данными итерационно определяются параметры системы, в частности параметры функций принадлежности термов из баз знаний,. Кроме того, в нечеткой базе знаний Сугено настраиваются и коэффициенты в заключениях правил.

Модель процесса функционирования Харьковоблэнерго построена на основе данных из Internet-ресурсов, поэтому возможны расхождения результатов нечеткого вывода и существующих данных.

Как показали результаты расчетов, наиболее влиятельными параметрами являются «Цена 1-го класса напряжения», «Цена 2-го класса напряжения» и «ВВП».

Из графиков видно, что параметры «Цена 1-го класса напряжения» и «Цена 2-го класса напряжения» обратно пропорционально влияют на значение выходного параметра. Чем меньше значение этих параметров, тем больше значение выходного параметра – "потребление электроэнергии".

Параметр "ВВП" прямо пропорционально влияет на значение выходного параметра. Чем больше значение этого параметра, тем больше значение выходного параметра.

**Выводы.** На основе предложенного подхода и моделирования в среде MATLAB был проведен анализ модели процесса функционирования Харьковоблэнерго и прогнозирование потребления электроэнергии с использованием алгоритмов нечеткого вывода Мамдани и Сугено. Анализ полученных результатов позволяет определить влияние значений входных параметров модели на объем потребления электроэнергии, что может быть использовано для построения эффективных стратегий управления производством и потреблением электроэнергии в регионе.

**Список литературы:** 1. Малахов В. А. Подходы к прогнозированию спроса на электроэнергию в России / В. А. Малахов // Проблемы прогнозирования. – 2009. – № 2. – С. 57–62. 2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с. 3. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком. – 2007. – 288 с. 4. Самарский А. А. Математическое моделирование. Иден. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с. 5. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; перевод с англ. В.Ю. Лебедева – М. : Мир, 1985. – 509 с.

Надійшла до редколегії 08.11.2011

УДК 681.518:658.51

**М. В. ТКАЧУК**, д-р техн. наук, проф. каф. «АСУ», НТУ «ХПИ»;  
**В. Є. СОКОЛ**, аспірант, каф. «АСУ», НТУ «ХПИ»;  
**О. В. ЧЕРКАШЕНКО**, студент, каф. «АСУ», НТУ «ХПИ»

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРОЮ ОРГАНІЗАЦІЙ

Розглянуті деякі особливості побудови та функціонування систем управління інформаційно-технологічними послугами (УІТП) в організаціях та обґрунтовано актуальність проблеми оцінки ефективності впровадження таких систем. Розроблено комплексну методику, яка передбачає

структурування відповідного інформаційного базису для вирішення цієї задачі, визначення адекватних методів прийняття експертних рішень і пропонує обчислювальний алгоритм для отримання кількісних оцінок ефективності впровадження систем УІТП.

Рассмотрены некоторые особенности построения и функционирования систем управления информационно-технологическими услугами (УИТП) в организациях и обоснована актуальность проблемы оценки эффективности внедрения таких систем. Разработана комплексная методика, которая предусматривает структуризацию соответствующего информационного базиса для решения этой задачи, определение адекватных методов принятия экспертных решений и предлагает вычислительный алгоритм для получения количественных оценок эффективности внедрения систем УИТП.

Some specific features of IT-services management (ITSM) systems building and functioning are considered, and problem's actuality of their effectiveness estimation is defined. The complex procedure is elaborated, which provides the appropriate structured information basis, defines adequate methods for expert's decision, and proposes the calculating algorithm in order to get quantitative values for effectiveness estimation of ITMS-systems.

**1. Вступ. Мета дослідження.** На сьогоднішній час практично у всіх достатньо великих організаціях існує та швидко розвивається відповідна інфраструктура інформаційних технологій (або ІТ-інфраструктура), яка поєднує в собі різноманітні програмно-апаратні засоби, бази даних, канали зв'язку, а також – технічний персонал, що їх обслуговує та різні групи користувачів ІТ-послуг. Для ефективного формування та використання такої ІТ-інфраструктури з'явився новий клас автоматизованих систем управління, а саме: системи управління інформаційно-технологічними послугами (УІТП – системи), використання яких має на меті забезпечити корпоративним користувачам надання певних ІТ-послуг із заданим рівнем якості [1]. При цьому, зважаючи на велику кількість наявних УІТП – систем, а також беручи до уваги значну складність їх архітектури та функціональності, актуальною та нетривіальною науково-технічною проблемою стає визначення підходів та створення відповідних модельно-інструментальних засобів, що дозволяють отримувати оцінки ефективності впровадження таких систем в різних організаціях та на підприємствах. Слід також зазначити, що саме наявність таких засобів є також необхідною передумовою для цілеспрямованого процесу удосконалення вже існуючих УІТП – систем, наприклад, шляхом розробки нових модулів та функцій, як це, наприклад, запропоновано в [2]. Цей інструментарій може бути використано також для отримання відповідних оцінок якості нових програмних рішень для цих систем у процесі їх розробки, який буде відповідати певній ітеративній схемі управління цим процесом із зворотним зв'язком, що відповідає сучасним уявленням щодо так званих гнучких (agile-) методологій створення інформаційних технологій [3].

Тому метою дослідження, результати якого представлено в цій статті, є аналіз основних особливостей побудови сучасних систем УІТП і певних чинників, що впливають на процеси їх впровадження та подальшого функціонування в організаціях, визначення відповідних критеріїв, вибір

певних методів прийняття рішень в умовах багатокритеріальних альтернатив та розробка методики їх застосування для визначення ефективності застосування систем управління ІТ-інфраструктурою організацій.

**2. Функціональність типової системи управління ІТ-інфраструктурою та деякі проблеми її впровадження.** Під типовою функціональністю розуміється набір стандартних ІТ –процесів (модулів), яка система УІТП повинна мати для забезпечення ефективної роботи всіх підрозділів тієї чи іншої організації. Її формалізована схема може також розглядатися як певна концептуальна модель «ідеальної» УІТП-системи, що дозволяє визначити залежності між окремими процесами та інформаційними ресурсами відповідної організації.

На рисунку 1 зображена схема типової функціональності системи УІТП, що була запропонована в статті [2] на основі порівняльного аналізу та узагальнення деяких сучасних розробок таких систем. Ця схема включає 5 основних груп (пакетів) системних функцій, а саме: 1) прив'язка ІТ к бізнес-процесам – ця підсистема має забезпечувати реалізацію ІТ-стратегії організації відповідно до цілей її бізнесу і створювати основу для кількісної оцінки ефективності витрат на ІТ-інфраструктуру; 2) оперативна підтримка – підсистема управління запитами користувачів ІТ-сервісів, відстеження виконання цих запитів персоналом ІТ-підрозділів та визначення рівня якості надання сервісних послуг; 3) гарантії надання послуг – функції цієї групи (управління конфігураціями та управління змінами) займають центральне місце в системі керування ІТ – послугами, тому що вони, по-перше, на інструментальному рівні забезпечують необхідну стабільність існуючого ІТ – середовища, а по-друге, з ними так чи інакше взаємодіють всі інші процеси (модулі) УІТП-системи; 4) управління послугами – це підсистема планування та управління ІТ-сервісами, що формує деталізовану інформацію щодо проектування нових ІТ-сервісів, управління їх доступністю і якістю; 5) розробка та провадження ІТ-послуг – це підсистема створення і тестування нових ІТ-сервісів та відповідних інфраструктурних компонентів, включаючи встановлення додаткового апаратного та програмного забезпечення, розробку нових застосувань, навчання персоналу та ін.

Як можна бачити на рис. 1, кожна з цих 5 підсистем (вони показані у вигляді пакетів в нотації UML) складається із декількох окремих функціональних модулів (вони позначені на рис. 1 як класи). Аналіз даних щодо досвіду впровадження та застосування деяких поширених систем УІТП показує, що найбільш важливими серед цих функціональних модулів (процесів) є наступні:

- М1 = "Управління інцидентами (Incident management)" – це організаційні процедури та інструментальні засоби усунення інцидентів в роботі користувачів ІТ-сервісів в організації, при чому під інцидентами розуміються будь-які події, що вимагають відповідної реакції персоналу ІТ-підрозділів, тобто: помилки в



програмному забезпеченні, апаратні збої, проблеми з каналами зв'язку, запити користувачів на консультації і т.п.;

- M2 = "Управління проблемами (Problem management)" – це процедури та засоби виявлення та усунення будь-яких причин, на підставі яких виникають окремі інциденти;
- M3 = "Управління конфігураціями (Configuration management)" – це процедури та засоби створення та підтримки в актуальному стані інфологічної моделі IT-інфраструктури організації;
- M4 – "Управління змінами (Change management)" – це процедури та засоби відстеження та координування змін, що відбуваються в IT - інфраструктурі організації; .
- M5 = "Управління рівнем сервісу (Service level management)" – це процедури та засоби визначення необхідного складу та рівня якості надання відповідних IT-сервісів користувачам і відстеження процесів їх виконання.

Класична схема є найбільш поширеною та апробованою в практиці використання систем УІТП і передбачає наступну послідовність впровадження вищезазначених модулів M1-M5:

$$S1 = (M1, M3, M4, M2, M5) \quad (1)$$

Це дозволяє швидко вирішити найбільш гострі проблеми взаємодії IT-підрозділу з користувачами на основі процесу управління інцидентами (модуль M1) та забезпечити інструментальну підтримку цього процесу (модулі M3 та M4), а вже потім – впровадження інших модулів для розвитку всієї інфраструктури (M2 та M5 відповідно). Але при цьому у більшості джерел зазначається, що саме така схема вимагає значних інвестицій та організаційних змін вже на початковому етапі впровадження всієї УІТП-системи.

Контрактна схема спрямована, перш за все, на формалізацію взаємовідносин IT-служб організації з її бізнес-підрозділами і послідовність впровадження її модулів має наступний вигляд:

$$S2 = (M5, M3, M1, M4, M2) \quad (2)$$

При цьому зібрані та формалізовані вимоги замовника (модуль M5) і побудована інфологічна модель організації (модулі M3) дозволяють визначити подальшу стратегію розвитку її IT-інфраструктури, а вже потім впроваджувати функціональність оперативного управління інцидентами (модуль M1), управління змінами (модуль M4) та проблемами (модуль M2). Однак слід зазначити, що у цій схемі існують досить великі ризики щодо ефективності всього процесу застосування УІТП-системи, які виникають у разі побудови її початкових некоректних специфікацій у модулі M5.

І, нарешті, інфраструктурна схема пропонує наступний порядок впровадження функціональних модулів:

$$S3 = (M3, M4, M2, M1, M5) \quad (3)$$

тобто, по-перше, вона забезпечує формування чітко визначеної та керованої IT-інфраструктури даної організації (модулі M3 та M4). По-друге, вона впроваджує управління типовими проблемними ситуаціями (модуль M2) і вже на підставі цього забезпечує процедури та інструментальні засоби оперативного усунення поточних інцидентів в роботі користувачів IT-сервісів (модуль M1), а також, у кінцевому рахунку, і можливість автоматизованого визначення необхідного складу та рівня якості надання відповідних IT-сервісів (модуль M5).

Слід окремо зазначити, що попри наявність рекомендацій про доцільність застосування саме цих трьох типових схем (1)-(3) для впровадження функціональних модулів переважної більшості існуючих систем УІТП, у відповідних інформаційних джерелах практично повністю відсутні будь-які дані

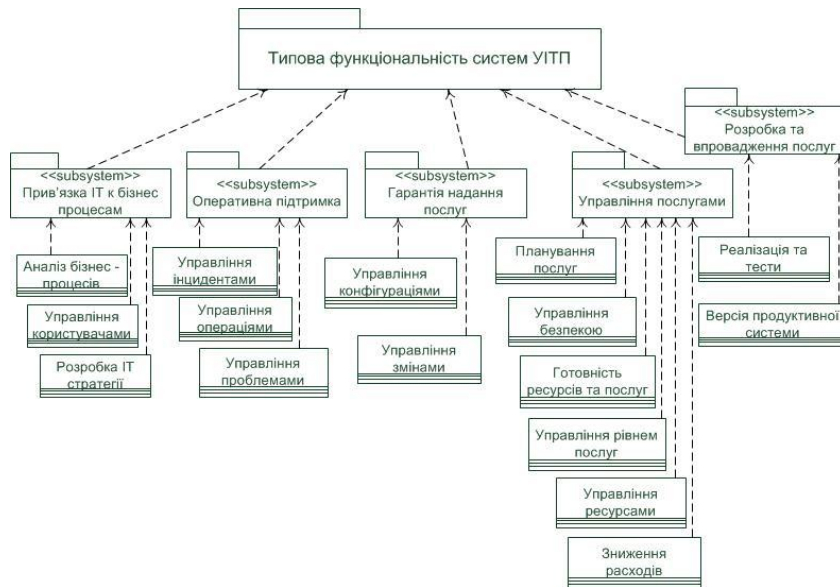


Рис. 1 – Типова функціональність систем УІТП

На сьогоднішній час розрізняють три основні схеми впровадження модулів ІТІЛ [4]:

- класична схема (S1);
- контрактна схема (S2);
- інфраструктурна схема (S3).

щодо кількісних порівняльних оцінок ефективності цих підходів. Розробка саме такої методики представлена у наступному розділі цієї статті.

**3. Розробка методики комплексної оцінки ефективності впровадження.** Для розробки цієї методики пропонується послідовно вирішити наступні задачі:

- структурувати дані, що мають бути використані як інформаційний базис для вирішення поставленої задачі;
- визначити критерії (групи критеріїв), за допомогою яких може бути отримана комплексна оцінка ефективності впровадження системи УІТП;
- мотивовано обрати певні методи пошуку рішень із урахуванням особливостей процесів функціонування УІТП-систем;
- розробити обчислювальний алгоритм, який дозволяє отримувати кількісні оцінки ефективності впровадження та застосування окремих модулів цих систем.

**3.1 Структурування інформаційного базису задачі.** Беручи до уваги велику розмірність та семантичну складність даних, що мають бути накопичені та оброблені у процесах функціонування систем УІТП, а також зважаючи на практично відсутні дані (принаймні, у відкритих джерелах) щодо особливостей побудови їх інформаційного базису, пропонується структурувати його із застосуванням онтологічного підходу [5].

Це дозволяє послідовно, на досить високому рівні абстракції, визначити всі основні інформаційні об'єкти та їх семантичні зв'язки, що описують процеси функціонування УІТП-систем у деякій організації, а потім, на підставі цього, побудувати відповідну логічну структуру бази даних (БД), яка буде задіяна в кінцевому обчислювальному алгоритмі. Виходячи з результатів аналізу функціональності типової УІТП-системи, пропонуються наступні онтологічні специфікації, які представлені в нотації UML на рис. 2 – опис ієрархічної структури основних типів (груп) користувачів системи УІТП, на рис.3 – класифікація інцидентів та проблемних ситуацій, які виникають в процесі надання ІТ-послуг, із визначенням агрегованих груп відповідних даних та на рис.4 – опис логічної структури даних (із урахуванням їх ієрархічних та композиційних зв'язків), що обробляються у процесі розв'язання проблемних ситуацій, пов'язаних із відповідними інцидентами.

На підставі цих онтологічних специфікацій можливо коректно побудувати реляційну модель БД (наприклад, із використанням СКБД MySQL), що в подальшому буде використана для реалізації обчислювальної процедури запропонованої методики.

**3.2 Вибір критеріїв, показників та методів оцінки ефективності впровадження систем УІТП.** Розглянуті вище основні функціональні можливості типових систем УІТП та деякі існуючі на практиці схеми впровадження та застосування їх основних модулів вказують на те, що в

цілому, при постановці та вирішенні задачі оцінки ефективності впровадження таких систем потрібно враховувати наступні чинники, а саме:

- її загальна висока складність (розмірність) та недостатня формалізованість;
- критерії оцінки є нерівнозначними та багатофакторними;
- основним інформаційним джерелом є експертні дані;
- експертні дані можуть мати як кількісний так і якісний характер;
- припустима наявність неоднозначності отриманих рішень.

Враховуючи це, для вирішення поставленою задачі пропонується застосувати саме експертні методи пошуку відповідних рішень щодо вибору найкращих альтернативних варіантів, зокрема, в умовах наявності нечітких даних [6-8]. Як приклад одного з таких підходів розглянемо можливість застосування методу ранжування багатокритеріальних альтернатив [8] для оцінки ефективності впровадження системи управління ІТ-інфраструктурою.

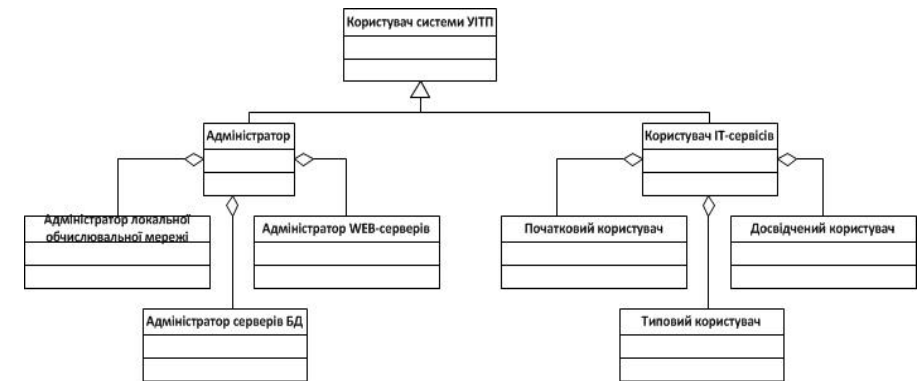


Рис. 2 — Таксономія користувачів систем УІТП

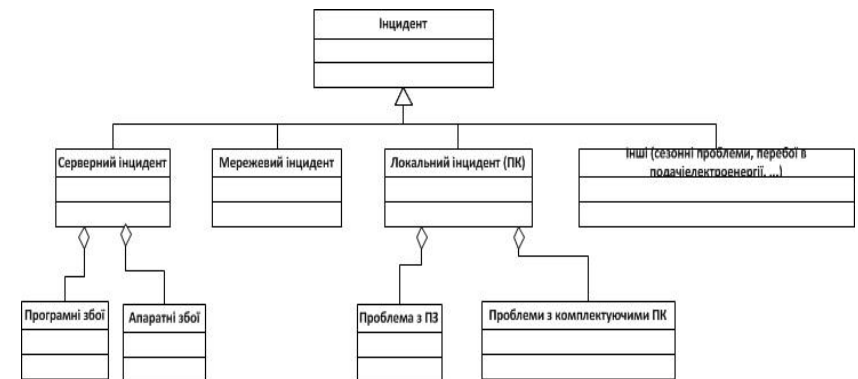


Рис. 3 — Специфікація типів інцидентів та проблемних ситуацій

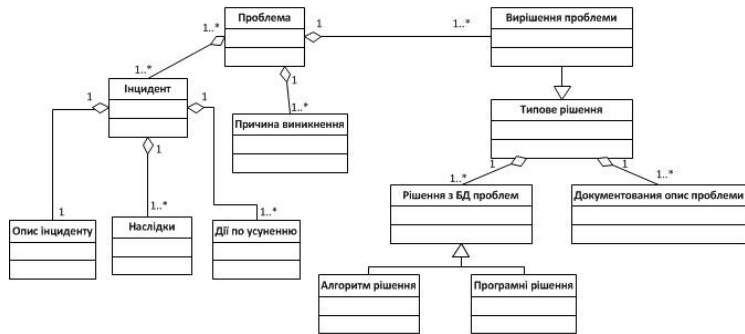


Рис. 4 — Інформаційний ресурс для вирішення проблемної ситуації

На першому етапі визначаємо множину альтернатив:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \{x_i, i = \overline{1, n}\}.$$

Визначаємо множину нерівно значущих критеріїв, що характеризують ці альтернативи:

$$K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\} = \{K_j, j = \overline{1, m}\}.$$

Кожен критерій  $K_j$  характеризується підмножиною локальних критеріїв:

$$K_j = \{k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jq}\} = \{k_{jq}, q = \overline{1, Q}\}.$$

Причому елементи цих підмножин також нерівнозначні. Кількість показників для кожного критерію може бути різною.

На другому етапі встановлюємо функції відповідності альтернатив до локальних критеріїв:

$$\{\varphi_{k_{j1}}(x_i), \varphi_{k_{j2}}(x_i), \dots, \varphi_{k_{jq}}(x_i)\} = \{\varphi_{k_{jq}}(x_i), q = \overline{1, Q}, j = \overline{1, m}\}.$$

Також визначаємо коефіцієнти відносної важливості цих локальних критеріїв:

$$\{w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jq}\} = \{w_{jq}, q = \overline{1, Q}\}.$$

Слід відмітити, що для локальних критеріїв  $k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jq}$ , що характеризують критерій  $K_j$ , відповідає умова:

$$\sum_{q=1}^Q w_{jq} = 1.$$

На третьому етапі визначаємо функції приналежності альтернатив  $x_i = \{i = \overline{1, n}\}$  критеріям  $K_j, \{j = \overline{1, m}\}$ , на основі побудови згортки критеріїв за допомогою співвідношення:

$$\varphi_{k_j}(x_i) = \sum_{q=1}^Q w_{jq} \varphi_{k_{jq}}(x_i).$$

Визначення функції приналежності альтернатив критеріям наведено у таблиці нижче.

Визначення функції приналежності альтернатив

Альтернативи		K						
		K <sub>1</sub>		...	K <sub>M</sub>			
		k <sub>11</sub>	...	k <sub>1Q</sub>	...	k <sub>M1</sub>	...	k <sub>Mm</sub>
X	x <sub>1</sub>	φ <sub>k<sub>11</sub></sub> (x <sub>1</sub> )	...	φ <sub>k<sub>1Q</sub></sub> (x <sub>1</sub> )	...	φ <sub>k<sub>M1</sub></sub> (x <sub>1</sub> )	...	φ <sub>Mm</sub> (x <sub>1</sub> )
	...	...	...	...	...	...	...	...
	x <sub>i</sub>	φ <sub>k<sub>11</sub></sub> (x <sub>i</sub> )	...	φ <sub>k<sub>1Q</sub></sub> (x <sub>i</sub> )	...	φ <sub>k<sub>M1</sub></sub> (x <sub>i</sub> )	...	φ <sub>Mm</sub> (x <sub>i</sub> )
	x <sub>n</sub>	φ <sub>k<sub>11</sub></sub> (x <sub>n</sub> )	...	φ <sub>k<sub>1Q</sub></sub> (x <sub>n</sub> )	...	φ <sub>k<sub>M1</sub></sub> (x <sub>n</sub> )	...	φ <sub>Mm</sub> (x <sub>n</sub> )

На четвертому етапі на основі отриманих  $\{\varphi_{K_j}(x_i), j = \overline{1, m}\}$  для всіх альтернатив  $x_i, \{i = \overline{1, n}\}$  визначається функція належності узагальненому критерію K:

$$\varphi_K(x_i) = \sum_{j=1}^m w_j \varphi_{K_j}(x_i),$$

де  $w_j, j = \overline{1, m}$  – відповідний коефіцієнт відносної важливості критерію  $K_j, j = \overline{1, m}$ .

На останньому кроці вибирається альтернатива, яка має максимальну ступінь приналежності узагальненому критерію K:

$$\varphi(x^*) = \max\{\varphi_K(x_i), i = \overline{1, n}\}.$$

Для оцінки і ранжирування альтернатив на основі запропонованого методу необхідно визначити коефіцієнти відносної важливості критеріїв, що характеризують альтернативи і їх локальні критерії (підкритеріїв або критеріїв

другого рівня) і функцію приналежності альтернатив локальним критеріям, тобто ступінь задоволення альтернатив локальним критеріям.

### 3.3 Обчислювальний алгоритм для кількісної оцінки ефективності.

Враховуючи вищенаведені положення щодо структури інформаційного базису та щодо критеріїв і методів пошуку рішень відносно оцінки ефективності впровадження альтернативних конфігурацій модулів систем УІТП, відповідний обчислювальний алгоритм у загальному вигляді може бути поданий у вигляді схеми, яка наведена на рис. 5.

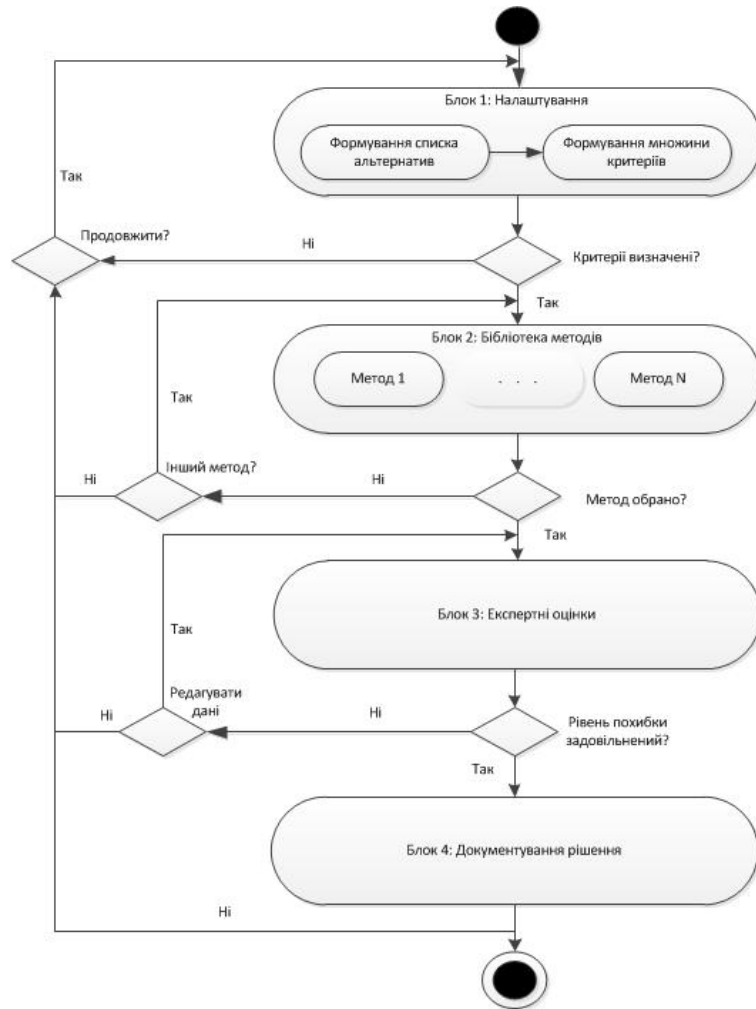


Рис. 5 — Загальна схема обчислювального алгоритму

На початку алгоритму (Блок 1: "Налаштування"), враховуючи специфіку конкретної організації та особливості наявної системи УІТП, визначаються певні альтернативні варіанти впровадження модулів цієї системи та формується множина критеріїв оцінки їх ефективності. Якщо ці дії коректно виконано, переходимо до вибору певного методу оцінки (Блок 2: "Бібліотека методів"), в протилежному випадку – вихід на кінець алгоритму. Після того, як обрано відповідний метод, у наступному блоці (Блок 3: "Експертні оцінки") виконується опрацювання даних щодо експертних оцінок відповідних критеріїв, із застосуванням інформаційного базису системи (див. підрозділ 3.1). Якщо по завершенню всіх експертних процедур згідно обраного методу оцінки (див., підрозділ 3.2) отримано рішення із задовільним рівнем похибки, отримане рішення приймається до подальшої можливої реалізації (Блок 4: "Документування рішення"), або користувачам пропонується можливість відредагувати відповідні дані попереднього етапу (перехід до Блоку 3), а, можливо, також й обрати інший метод оцінки (перехід до Блоку 2).

**Висновки та задачі подальшого дослідження.** У даній статті розглянуто актуальні проблеми розробки та функціонування нового важливого класу АСУ: систем управління ІТ-інфраструктурою організацій та запропоновано методика комплексної оцінки ефективності впровадження таких систем, яка передбачає структурування інформаційного базису для вирішення цієї задачі, визначає відповідні критерії та адекватні методи прийняття експертних рішень, і пропонує обчислювальний алгоритм для отримання кінцевих кількісних оцінок. В подальшому планується апробація цієї методики на прикладі оцінки ефективності реального впровадження відкритої щодо програмного коду системи управління ІТ-сервісами OTRS [9] для управління станом ІТ-інфраструктури НТУ «ХП».

- Список літератури:** 1. An Introductory overview of ITIL // itSMF Ltd, 2007 2. Ткачук М. В. Деякі проблеми управління ІТ-інфраструктурою підприємств: сучасний стан та перспективи розвитку / М. В. Ткачук, В. Є. Сокол // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 6/2 (48). – С. 68–72. 3. Коваль Г. І. Удосконалення процесу розробки сімейств програмних систем елементами гнучких технологій / Г. І. Коваль, А. Л. Колесник, К. М. Лавріщева // Проблеми програмування. – К. : НАН України, 2010. – № 2–3 (спец. випуск). – С. 261–270. 4. Assyst Service Management Software // <http://www.axiossystems.com/en/solutions/itsm/assyst-itsm.php> // 15.03.2012. 5. Гаєрилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаєрилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб : Питер, – 2000. – 384 с. 6. Аббасов А. М. Методы организации баз знаний с нечеткой реляционной структурой / А. М. Аббасов. – Баку : Элм, 1997. – 256 с. 7. Севестьянов П. В. Методика многокритериальной иерархической оценки качества в условиях неопределенности / П. В. Севестьянов // Информационные технологии. – 2001. – № 9. – С. 10–13. 8. Джабраилова З. Г. Метод многокритериального ранжирования для решения задач управления персоналом / З. Г. Джабраилова // «Искусственный интеллект». – 2009. – № 4. – С. 130–137. 9. Офіційна сторінка компанії OTRS // <http://www.otrs.com/en/> // 07.12.2011.

Надійшла до редколегії 05.02.2012

**О. В. ЯНГОЛЕНКО**, асп. НТУ «ХПІ»;  
**І. В. ЛЮТЕНКО**, ст. викл. НТУ «ХПІ»;  
**О. В. ЯКОВЛЕВА**, доц. ХНУРЕ, Харків

## АНАЛІЗ СТАНУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМІ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Розроблена класифікація інформаційних систем вищих навчальних закладів на основі різних критеріїв: функціональності, приналежності розробки, відношення до навчального процесу та технології реалізації. Розглянуті етапи процесу обробки інформації та виділені рівні інформатизації діяльності вищого навчального закладу.

Разработана классификация информационных систем высших учебных заведений на основе разных критериев: функциональности, принадлежности разработки, отношения к учебному процессу и технологии реализации. Рассмотрены этапы процесса обработки информации и уровни информатизации деятельности высшего учебного заведения.

The classification of higher education establishment information systems is elaborated on the basis of different criteria: functionality, appliance of development, connection to the learning process, realization technologies. The stages of information processing are considered and informatization levels of higher education establishment work are defined.

**Вступ.** У сучасних умовах перед системою вищої освіти стоїть багато задач, вирішення яких потребує використання інформаційних технологій (ІТ). Саме шляхом впровадження ІТ можливо досягти ефективного управління та функціонування системи вищої освіти (СВО)

Практика свідчить, що автоматизований збір даних, їхня обробка та зберігання необхідні не тільки для фінансово-господарського управління у СВО. ІТ все частіше є основою для управління навчальним процесом та забезпечують його підтримку. Безперервно збільшується кількість вищих навчальних закладів (ВНЗ), які мають власні сайти у мережі Інтернет. Це дає можливість розміщувати інформацію, яка стосується ВНЗ, та тримати зв'язок зі студентами, викладачами, науковцями, роботодавцями та усіма, хто зацікавлений у діяльності ВНЗ. У багатьох розвинених країнах світу автоматизація торкнулася процесів ліцензування та акредитації. Це забезпечує зручність подання необхідних звітних документів та прозорість прийняття рішень відповідальними органами. Окрім цього, широкого розповсюдження набула дистанційна освіта, яка дозволяє отримувати знання з будь-якої точки світу у зручний час. На цьому ґрунті склалося поняття «віртуального університету».

Проблемам ІТ в області вищої освіти присвячено чимало робіт, які розглядають розробку цілісних інформаційних систем ВНЗ [1, 2, 3, 4] та створення окремих підсистем, що виконують певні функції для забезпечення

навчального процесу та управління в СВО [5, 6]. Проте систематизація накопиченої інформації відсутня.

*Метою дослідження* є аналіз стану, класифікація існуючих інформаційних систем (ІС) та формалізація процесу інформатизації в системі вищої освіти.

**Класифікація інформаційних систем в системі вищої освіти.** Існуючі ІС, які працюють у різних ВНЗ, можна класифікувати за функціональністю, за відношенням до навчального процесу, за приналежністю розробки, за технологією реалізації.

Функціональність, яка підтримується ІС, відповідає певному виду діяльності ВНЗ. За цим принципом можна виділити наступні інформаційні системи:

- системи адміністративного та фінансово-господарського управління;
- системи управління навчальним процесом;
- системи підтримки навчального процесу;
- системи управління науково-дослідною роботою (НДР);
- системи управління інформаційними ресурсами.

ІС адміністративного, фінансово-господарського управління є найбільш розповсюдженими, прикладом чого є системи [4, 7]. ІС управління навчальним процесом підтримують розробку навчальних планів, складання розкладу занять та екзаменів, облік контингенту студентів та їх успішності. Перелічені функції реалізовані, наприклад, в ІС [8]. До функціональних можливостей ІС підтримки навчального процесу належать такі, як: розміщення навчально-методичних матеріалів, проведення тестувань, лабораторних робіт, підтримка дистанційної освіти, робота бібліотечних систем. Наприклад, функції електронної бібліотеки підтримуються програмним рішенням [9]. Інформаційні системи управління НДР зустрічаються не так часто. В якості прикладів можна навести ІС [1, 7]. Системи управління інформаційними ресурсами включають портал, електронну пошту та форум ВНЗ, управління електронним документообігом, єдину реєстрацію користувачів та розподілення їхніх прав. Розробці інформаційних систем управління якістю освіти присвячено чимало робіт [10, 11]. Аналізуючи існуючі програмні рішення для управління у СВО, можна прийти до висновку, що системи управління якістю ВНЗ не є достатньо автоматизованими. Існують певні програмні рішення, які реалізують централізований збір статистичних даних на рівні міністерства [12].

ІС ВНЗ можуть мати відношення до навчального процесу або виконувати автоматизацію певних адміністративних, господарських функцій, що є характерними для різних організацій та підприємств.

Інформаційні системи управління ВНЗ можна класифікувати за принципом приналежності їхньої розробки. ІС можуть розроблятися самими

ВНЗ для задоволення власних потреб. Прикладами ІС власної розробки є системи [1, 8]. Альтернативою слугують комерційні програмні продукти, які розробляються ІТ-компаніями та розповсюджуються на ринку ПЗ. До комерційних продуктів належать системи [7, 9].

ІТ-рішення для управління ВНЗ можуть реалізовуватися на базі єдиної або різних технологій. За цією класифікацією рішення [4] належать до тих, що реалізуються на базі єдиної технології, а програмні рішення [2] базуються на декількох різних технологіях.

**Інформатизація системи вищої освіти.** У будь-якій предметній області, в тому числі в освіті, у технологічному процесі обробки інформації можна виділити три основних етапи [13]. Перший етап починається зі збору документів з різних джерел та їх підготовки до автоматизованої обробки. На цьому етапі проводиться аналіз документів, систематизація інформації, складання та уточнення контрольних відомостей, які в подальшому будуть використовуватися для перевірки коректності введених даних.

Другий етап є основним та включає введення, обробку інформації за заданим алгоритмом, а також виведення документів, що містять результат обробки. На цьому етапі здійснюється введення інформації початкових документів, контроль коректності та повноти результатів введення. Інформація з початкових документів переноситься в інформаційну базу та перетворюється на дані. Далі йде обробка даних на основі алгоритму рішення поставленої задачі, їх перетворення на дані, що складають кінцеві документи.

На третьому етапі проводиться контроль якості та повноти кінцевих документів, їхне тиражування та передача зацікавленим особам по каналах зв'язку.

В інтегрованій автоматизованій системі (ІАС) ВНЗ можна виділити такі групи ІС, як: блок управління, що включає управління фінансами, кадрами, НДР, матеріальний облік, планування та моніторинг, блок забезпечення навчального процесу, блок інформаційних ресурсів та блоки зберігання та обміну даних (рис. 1). В цих блоках реалізується математичне забезпечення. Їхня поетапна реалізація дозволить вирішити управлінські задачі, що стоять перед ВНЗ.

Можна виділити п'ять рівнів інформатизації діяльності ВНЗ (табл.1), яким відповідають різні архітектури програмних додатків, різні технології та БД [14]. На першому рівні інформатизація бізнес-процесів ВНЗ забезпечує незалежну автоматизацію кожного окремого процесу зі своїм об'ємом даних. Кожний додаток працює з локальною БД. Перший рівень є проміжним для усіх ВНЗ на шляху до вищих рівнів.

На другому рівні інформатизації програмні додатки мають двох- або трьохрівневу клієнт-серверну архітектуру або використовують компонентний підхід. Дані інтегруються в єдину систему управління базами даних (СУБД). Розвитком другого рівня є виділення бізнес-логіки в окремий процес (сервер додатків). Для вирішення задач управління обирається певне Enterprise

Resource Planning (ERP)-рішення, яке автоматизує основні задачі та дозволяє розвивати та налаштовувати систему під певний ВНЗ за допомогою власних засобів. Таке рішення передбачає використання єдиної БД та єдиного сервера додатків.



Рис. 1 – ІАС ВНЗ

Третій рівень інформатизації характеризується функціонуванням декількох БД, пов'язаних між собою. Архітектура ПЗ лишається двох- або багаторівневою. Логічно інтегровані дані є відмінною рисою третього рівня (див. таблицю нижче).

Порівняльна характеристика рівнів інтеграції

Рівні інтеграції	Бази даних	Додатки	Технології
Перший	Локальні	Локальні	Різноманітні
Другий	Єдина база даних	2- та 3-рівневі	Єдина
Третій	Різноманітні	2- та 3-рівневі	Різноманітні
Четвертий	Різноманітні	Багаторівневі, компонентні, інтеграція додатків	Різноманітні
П'ятий	Різноманітні	Будь-які, інтеграція функцій, інтеграція бізнес-процесів	Різноманітні

Об'єднання додатків на основі єдиної архітектури є основою четвертого рівня інформатизації. На цьому рівні в інформаційному середовищі ВНЗ функціонують ріні СУБД, технології, архітектури, але всі вони пов'язані за

допомогою певних механізмів та правил. На четвертому рівні відбувається інтеграція додатків, що найчастіше реалізується за допомогою веб-служб у сервіс-орієнтованій архітектурі.

Для п'ятого рівня інформатизації характерним є виділення спільних функціональних можливостей різних систем та їх реалізація гетерогенними засобами. Наприклад, більшість систем мають модулі реєстрації і управління правами користувачів, модулі звітності, реалізація яких може бути об'єднана. Однією з важливих характеристик цього рівня є можливість інтеграції бізнес-процесів.

**Висновки.** У даній роботі було зроблено аналіз стану інформаційних технологій у системі вищої освіти. На основі проведеного дослідження були сформульовані принципи класифікації існуючих інформаційних систем, які забезпечують функціонування та управління у СВО. Задачі, які потребують вирішення, обумовлюють використання різноманітного математичного забезпечення. Перспективою даного дослідження є розробка теоретичних та методологічних основ створення та використання інформаційних технологій у галузі управління вищим навчальним закладом.

**Список літератури:** 1. Васильев В. Н., Печников А. А., Рузанова Н. С. Новые информационные технологии у управлении вузом // <http://www.ict.edu.ru/ft/002081/st5.pdf>, 22.09.2011. 2. Крюков В. В. Информационные технологии в управлении вузом / В. В. Крюков, К. И. Шахгельдян // Университетское управление: практика и анализ. – 2005. – №2. – С. 85–94. 3. Крупинов А.В. Комплексная информационная система как средство принятия решений по управлению процессами и ресурсами университета // <http://www.ito.su/1999/IV/IV41.html>, 09.11.2011. 4. Ларионов В. Н. Уральский государственный университет: на пути к тотальному информационно-технологическому управлению / В. Н. Ларионов, В. Е. Третьяков // Университетское управление: практика и анализ. – 2006. – №1. – С. 90–96. 5. Njegus A. Researching the Concept and Development of Virtual University Architecture // <http://www.megatrendreview.com/files/articles/001/13eAngelina.pdf>, 27.09.2011. 6. Virtual University Reference Model: A Guide to Delivering Education and Support Services to the Distance Learner // <http://www.etc.edu.cn/articledigest6/virtual-U-Reference-Model.htm>, 23.10.2011. 7. Система «Университет» // <http://redlab.ru/university>, 15.10.2011. 8. Тимченко А. А., Триус Ю. В. Загальні підходи до створення підсистеми підтримки прийняття рішень в ІАС контролю і оцінювання навчальної діяльності студентів ВНЗ // <http://sait.kpi.ua/eproc/2010/2/2129.pdf>, 21.07.2011. 9. Проекты АйТи // <http://www.it.ru/projects>, 10.10.2011. 10. Салахов М. Х., Михайлов В. Ю., Гостев В. М. Организация системы оценки качества образования на основе единой корпоративной информационной системы управления вузом // [http://www.ksu.ru/capr/bin\\_files/iaisksu\\_article\\_0314.rtf](http://www.ksu.ru/capr/bin_files/iaisksu_article_0314.rtf), 02.10.2011. 11. Копыленко Ю. В., Круглов Г. А., Круглов М. Г., Червяков Л. М. Концепция МГТУ СТАНКИН в области обеспечения качества высшего инженерного образования // <http://tqm.stankin.ru>, 25.10.2011. 12. Инструкция по использованию модуля клиентского приложения. – <http://www.quality.edu.ru/downloads>, 12.12.2010. 13. Румянцева Е. Л. Информационные технологии / Е. Л. Румянцева, В. В. Слюсарь. – М.: ИД «ФОРУМ» - ИИФА-М, 2007. – 256 с. 14. Крюков В. В. Корпоративная информационная среда ВУЗа: Методология, модели, решения: Монография / В. В. Крюков, К. И. Шахгельдян – Владивосток : Дальнаука, 2007. – 308 с.

Надійшла до редколегії 05.05.2012

**О. В. КОСТЮК**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**В. А. КНЫШ**, ст. преподаватель НТУ «ХПИ»

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАСКАДА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

У статті розглядається задача математичного моделювання гідроенергетичної системи в умовах нестационарного річкового стоку. Отримана математична модель каскаду гідроелектростанцій для аналізу динамічних процесів основних водноенергетичних показників ГЕС. Проведено імітаційне моделювання на прикладі каскаду двох ГЕС.

В статье рассматривается задача математического моделирования гидроэнергетической системы в условиях нестационарного речного стока. Получена математическая модель каскада гидроэлектростанций для анализа динамических процессов основных водноэнергетических показателей ГЭС. Проведено имитационное моделирование на примере каскада двух ГЭС.

This paper presents a mathematical design problem for hydraulic power system in the non-stationary river flow conditions. The coordinated hydroelectric system mathematical model for the dynamic processes analysis of basic water-power HPP indexes is received. A simulation on the example of two HPP cascade is conducted.

**Введение.** Усложнение задач эксплуатации ГЭС вследствие непрерывного повышения требований, которые vyplываюут из условий напряженности водного и топливно-энергетического балансов, а также обеспечения надежности гидроэнергетических систем требует применения новых подходов к решению проблемы. Именно поэтому возникает необходимость в разработке и применении методов математического моделирования основных процессов сложных гидроэнергетических систем как основы для решения различных задач планирования и управления их работой [1]. Методики математического моделирования систем «водохранилище-плотина-река» были предложены в [2, 3]. Различные подходы к решению задач математического моделирования и оптимального планирования работы гидроэнергетических систем с каскадами водохранилищ рассматривались в работах [4–6]. Цель статьи состоит в разработке математической модели каскада гидроэлектростанций для анализа динамики основных водноэнергетических показателей, а также для решения последующих задач оптимального расхода воды через гидросистему с учетом гидрологических ограничений.

**Построение математической модели ГЭС в структуре каскада.** Динамика изменения уровня воды в водохранилище каскада определяются балансом притока и расхода воды, в том числе неуправляемого стока и утечек и управляемого водосброса и расхода через гидротурбины:

$$\lambda_i \dot{x}_i(t) = q_{i-1}(t) + f_i(t) - q_i(t), \quad (1)$$

где  $x_i(t)$  – текущее значение объёма воды в гидросистеме ( $i$ ) ( $\text{м}^3$ );

$\lambda_i$  – коэффициент, связывающий скорость изменения объёма воды с изменением расхода воды в нижнем бьефе;

$q_{i-1}(t)$  – регулируемый приток к створу ГЭС (регулируемый расход водохранилища ( $i-1$ )) ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$q_i(t)$  – управляемый расход воды в нижнем бьефе;

$f_i(t)$  – неуправляемые притоки и расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

С другой стороны, остальные водноэнергетические показатели ГЭС – уровень верхнего бьефа и напор – связаны с объёмом воды в гидросистеме функциональной зависимостью, которую при некоторых допущениях можно рассматривать в виде линейной. Тогда справедливо соотношение:

$$\alpha_i \dot{h}_i(t) = q_{i-1}(t) + f_i(t) - q_i(t), \quad (2)$$

где  $h_i(t)$  – текущее значение напора воды ГЭС ( $i$ ) (м);

$\alpha_i$  – коэффициент, связывающий скорость изменения напора воды с изменением расхода воды в нижнем бьефе.

Относительные напор и расход в гидросистеме связаны между собой уравнением:

$$\tilde{q}_i(t) = \mu_i(t) f[\tilde{h}_i(t)] \approx \mu_i(t) \sqrt{1 + \tilde{h}_i(t)}, \quad (3)$$

где  $\tilde{q}_i(t) = \frac{q_i(t)}{q_n}$  – относительное значение расхода через турбину;

$$\tilde{h}_i(t) = \frac{h_i(t) - h_n}{h_n} \text{ – относительное изменение напора;}$$

$q_n, h_n$  – расчётные значения расхода и напора соответственно;

$\mu_i(t)$  – относительное положение затвора (регулирующего воздействия – направляющего аппарата турбины).

Производство электроэнергии гидроэлектростанцией ( $i$ ) описывается выражением:

$$Ph_i(t) = \rho_i \cdot q_i(t) h_i(t), \quad (4)$$

где  $\rho_i$  – коэффициент пропорциональности производимой электроэнергии произведению расхода и напора.

**Модель каскада Нурекской и Байпазинской ГЭС.** На основе данных основных водноэнергетических показателей Нурекской и Байпазинской ГЭС

и модели (2–4) представим модель каскада Нурекской и Байпазинской ГЭС, структурная схема которого представлена на рис. 1.

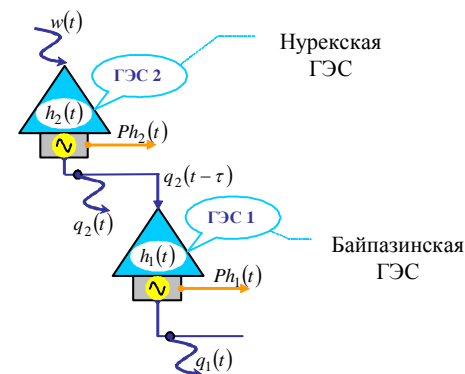


Рис. 1 – Структурная схема каскада ГЭС

Учитывая режимы работы каждой ГЭС, уравнения напоров каждой ГЭС модели каскада имеют вид:

$$\alpha_1 \dot{h}_1(t) = q_2(t - \tau) - q_1(t), \quad \alpha_2 \dot{h}_2(t) = w(t) - q_2(t), \quad (5)$$

где  $h_i(t)$  – текущее значение напора воды ГЭС ( $i$ ) (м);

$\alpha_i$  – коэффициент, связывающий скорость изменения напора воды с изменением расхода воды в нижнем бьефе;

$q_i(t)$  – расход воды  $i$ -го водохранилища;

$\tau$  – запаздывание, определяемое по расстоянию между водохранилищами каскада при известной средней скорости течения реки;

$w(t)$  – неуправляемый приток к створу Нурекской ГЭС;

$i = 1, 2$  – количество водохранилищ в каскаде.

Относительные напоры и расходы каждой ГЭС каскада связаны между собой следующим образом:

$$\tilde{q}_1(t) = \mu_1(t) \sqrt{1 + \tilde{h}_1(t)}, \quad \tilde{q}_2(t) = \mu_2(t) \sqrt{1 + \tilde{h}_2(t)}, \quad (6)$$

где  $\tilde{q}_i(t) = \frac{q_i(t)}{q_{ni}}$  – относительное значение расхода ГЭС ( $i$ ) через турбину;

$$\tilde{h}_i(t) = \frac{h_i(t) - h_{ni}}{h_{ni}} \text{ – относительное изменение напора ГЭС } (i);$$

$q_{ni}, h_{ni}$  – расчётные значения расхода и напора соответственно;



$\mu_i(t)$  – относительное положение затвора.

Производство электроэнергии каждой ГЭС в каскаде описывается уравнениями:

$$Ph_1(t) = \rho_1 \cdot q_1(t)h_1(t), \quad Ph_2(t) = \rho_2 \cdot q_2(t)h_2(t), \quad (7)$$

где  $\rho_i$  – коэффициент пропорциональности производимой электроэнергии произведению расхода и напора ГЭС ( $i$ ).

Таким образом, модель каскада (рис. 1) описывается уравнениями (5-7).

Для восстановления параметров модели динамики напоров (5), содержащей дифференциальные уравнения первого порядка, на основании имеющихся исходных данных водноэнергетических показателей применяется частотный метод [6].

**Описание результатов имитационного моделирования.** Целью моделирования являлось проведение исследования переходных процессов основных водноэнергетических показателей в модели каскада Нурекской и Байпазинской ГЭС при регулировании расхода в условиях воздействия возмущения речного притока к створу Нурекской ГЭС.

Получим модельные значения основных водноэнергетических показателей Нурекской и Байпазинской ГЭС с учётом режимов их работы в течение 2008 года (работа Нурекской ГЭС в режиме сработки-наполнения водохранилища; работа Байпазинской ГЭС в режиме баланса притоков и расходов воды), то есть с регулированием расходов при воздействии возмущения речного притока к створу Нурекской ГЭС.

Динамика возмущающего воздействия притока и полученные динамические процессы расходов водохранилищ представлены на рис. 2.

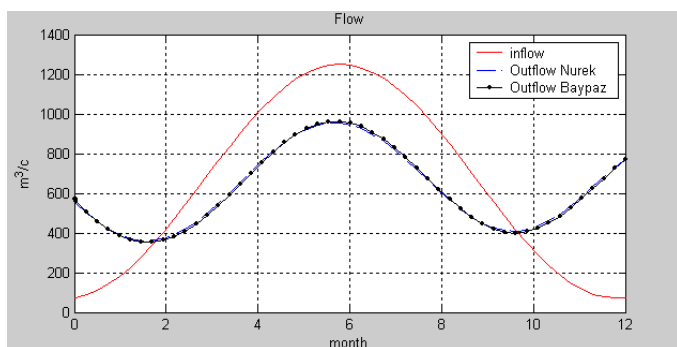


Рис. 2 – Переходные процессы расходов водохранилищ каскада ГЭС

Динамика производства электроэнергии (месячная выработка) представлена на рис. 3.

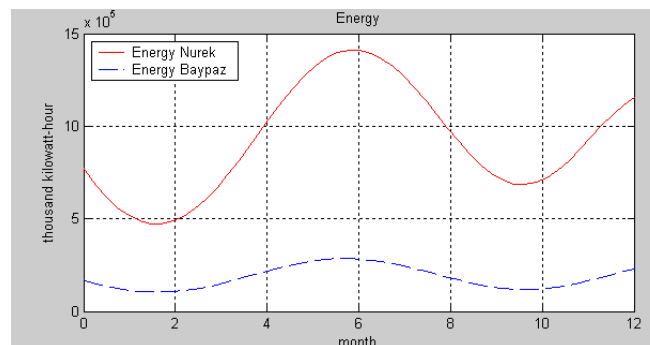


Рис. 3 – Переходные процессы выработки электроэнергии

Результаты моделирования демонстрируют характерные режимы работы каскада Нурекской и Байпазинской ГЭС

**Выводы.** В работе обоснована возможность применения методов математического моделирования для построения модели каскада гидроэлектростанций с целью анализа динамических процессов основных водноэнергетических показателей ГЭС. Результаты имитационного моделирования подтверждают работоспособность полученной модели на примере каскада Нурекской и Байпазинской ГЭС. Полученная математическая модель может быть использована для решения последующих задач оптимального расхода воды через гидросистему с учетом гидрологических ограничений и внешних воздействий, а также в качестве структурного элемента для моделирования каскада водохранилищ в едином водохозяйственном комплексе и выработки плановых решений в задачах оперативного планирования работы сложной гидроэнергетической системы.

**Список литературы:** 1. Гидроэнергетика / А. Ю. Александровский, М. И. Кнеллер, Д. Н. Коробова и др.; под ред. В. И. Обрезкова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 608 с. 2. Litrico X. Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system / X. Litrico, D. Georges // Applied Mathematical Modelling – 1999. – N 23. – P. 809–827. 3. Tuszynski K. Hydro Plant – a Modelica Library for Dynamic Simulation of Hydro Power Plants / K. Tuszynski, J. Tuszynski, K. Słåtörp // The Modelica Association – Modelica 2006, September 4th – 5th. – P. 251 – 257. 4. Naresh R. Two-phase neural network based solution technique for short term hydrothermal scheduling / R. Naresh and J. Sharma // IEE Proc.–Gener. Transm. Distrib., Vol. 146. – No. 6, November. – 1999. – P. 657–663. 5. Glattfelder A. Hydropower reservoir level control: a case study / A. Glattfelder, L. Huser // Automatica – 1993. – Vol. 29. – P. 1203–1214. 6. Любчик Л. М. Разработка математической модели управляемого каскада водохранилищ / Л. М. Любчик, О. В. Костюк, Д. Н. Нурмахматов // Вісник НТУ "ХПІ". – 2007. – № 39. – С. 97–100.

Надійшла до редколегії 08.05.2012

**В. П. СЕВЕРИН**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**К. Б. ГОДЛЕВСКАЯ**, аспирантка НТУ «ХПИ»

**НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
 УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ К-1000-60/1500**

Побудована нелінійна математична модель парової турбіни К-1000-60/1500 енергоблоку АЕС. Розроблені нелінійні моделі систем автоматичного керування частотою обертання ротора турбіни в просторі станів з різними регуляторами.

Построена нелинейная математическая модель паровой турбины К-1000-60/1500 энергоблока АЭС. Разработаны нелинейные модели систем автоматического управления частотой вращения ротора турбины в пространстве состояний с различными регуляторами.

The nonlinear mathematical model for steam turbine K-1000-60/1500 of atomic power plant is obtained. The nonlinear models of automatic control systems for turbine rotor rotation frequency are developed in state space with the different standard and fuzzy regulators.

**Введение.** На энергоблоках атомных электрических станций Украины эксплуатируется паровая турбина К-1000-60/1500 [1]. Для линейных моделей систем автоматического управления этой турбины решены задачи параметрического синтеза систем [2]. Повышение точности проектирования систем управления турбинами возможно при использовании их нелинейных моделей, полнее учитывающих особенности протекания реальных процессов управления.

Цель статьи заключается в представлении нелинейной математической модели турбины К-1000-60/1500 и ее систем управления для решения задач параметрического синтеза систем.

**Нелинейная модель турбины.** Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500 представлена на рис. 1 и включает клапан регулирования турбины (КРТ), объем перед цилиндром высокого давления (ЦВД), цилиндр высокого давления (ЦВД), объем в сепараторе-перегревателе (СП), клапан сепаратора-перегревателя (КСП), объем за КСП, цилиндр среднего давления (ЦСД), цилиндр низкого давления (ЦНД), объем перед ЦНД, конденсатор (К).

Запишем дифференциальные уравнения материального баланса для основных объемов турбины:

$$\frac{V_k}{v_k p_{k0}} \frac{dp_k}{dt} = G'_k - G''_k, \quad k = \overline{1, 4}, \quad (1)$$

где  $V_k$ ,  $v_k$ ,  $p_{k0}$  – объем, удельный объем и давление пара в емкости с номером  $k$  в номинальном режиме,  $p_k$  – давление пара в емкости,  $G'_k$  и  $G''_k$  – расход пара на входе и выходе емкости (см. рис. 1).

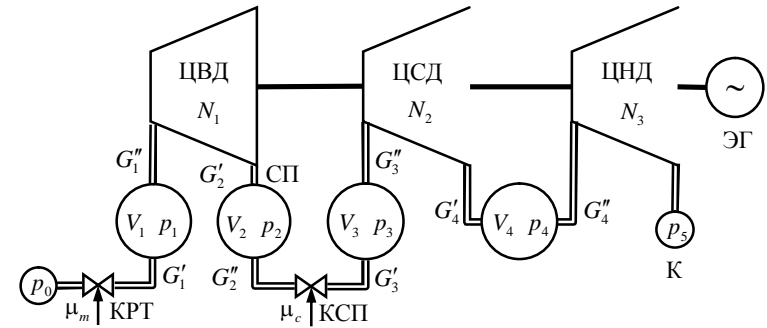


Рис. 1 – Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500

На основании формул Стодолы и Бендемана для расходов пара представим систему дифференциальных уравнений (1) в реальных переменных состояния:

$$\begin{cases} \frac{V_1}{v_1 p_{10}} \cdot \frac{dp_1}{dt} = G_{10} \frac{p_0}{p_{10}} (\mu_m + 1) - G_{10} \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2}}, \\ \frac{V_2}{v_2 p_{20}} \cdot \frac{dp_2}{dt} = G_{20} \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2}} - G_{20} \frac{p_2 \mu_c \beta(r)}{p_{20} \beta(r_0)}, \\ \frac{V_3}{v_3 p_{30}} \cdot \frac{dp_3}{dt} = G_{30} \frac{p_2}{p_{20}} \mu_c \frac{\beta(r)}{\beta(r_0)} - G_{30} \sqrt{\frac{p_3^2 - p_4^2}{p_{30}^2 - p_{40}^2}}, \\ \frac{V_4}{v_4 p_{40}} \cdot \frac{dp_4}{dt} = G_{40} \sqrt{\frac{p_3^2 - p_4^2}{p_{30}^2 - p_{40}^2}} - G_{40} \sqrt{\frac{p_4^2 - p_5^2}{p_{40}^2 - p_5^2}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $G_{10}$ ,  $G_{20}$ ,  $G_{30}$ ,  $G_{40}$  – расходы пара через выделенные емкости в номинальном режиме;  $p_0$  – давление пара перед клапаном регулирования турбины;  $\mu_m$  и  $\mu_c$  – относительные переменные положения клапана регулирования турбины и клапана сепаратора-перегревателя;  $p_5$  – давление пара в конденсаторе;  $r = p_3/p_2$ ,  $r_0 = p_{30}/p_{20}$ ;  $\beta(r) = \sqrt{1 - (r - \Pi)^2 / (1 - \Pi)^2}$ ;  $\Pi$  – число Бендемана.

По теореме о главном моменте количества движения имеем дифференциальное уравнение движения ротора паровой турбины

$$J d\omega/dt = M_T - M_G, \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции ротора турбины;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $M_T$  – действующий со стороны турбины крутящий момент;  $M_G$  –

момент сил сопротивления со стороны электрического генератора. Умножим уравнение (3) на  $\omega$ :

$$J\omega d\omega/dt = N - N_s, \quad (4)$$

где  $N = M_T\omega$  – механическая мощность турбины;  $N_s = M_G\omega$  – мощность электрического генератора.

Мощность турбины определим по формуле

$$N = N_{10}\sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2}} + N_{20}\sqrt{\frac{p_3^2 - p_4^2}{p_{30}^2 - p_{40}^2}} + N_{30}\sqrt{\frac{p_4^2 - p_5^2}{p_{40}^2 - p_{50}^2}} - N_{40}\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - N_{50}\frac{\omega^3}{\omega_0^3}, \quad (5)$$

где  $N_{10}$ ,  $N_{20}$ ,  $N_{30}$  – номинальные значения мощности цилиндров турбины;  $N_{40}$  – потери мощности в подшипниках и генераторе в номинальном режиме;  $N_{50}$  – потери мощности на трение и вентиляцию в номинальном режиме;  $\omega_0 = 2\pi n_0$  – круговая частота в номинальном режиме,  $n_0$  – частота вращения ротора турбины;  $N_0 = N_{10} + N_{20} + N_{30} - N_{40} - N_{50}$  – мощность турбины в номинальном режиме.

Основные конструктивные и технологические параметры турбины К-1000-60/1500 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные параметры турбины К-1000-60/1500

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$V_1, \text{ м}^3$	18	$G_{30}, \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$	1137	$N_{30}, \text{ МВт}$	472,1
$V_2, \text{ м}^3$	650	$G_{40}, \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$	1020	$N_{40}, \text{ МВт}$	4,8
$V_3, \text{ м}^3$	160	$p_0, \text{ МПа}$	6	$N_{50}, \text{ МВт}$	12,3
$V_4, \text{ м}^3$	230	$p_{10}, \text{ МПа}$	5,46	$N_0, \text{ МВт}$	1030
$v_1, \text{ м}^3\text{кг}^{-1}$	0,0363	$p_{20}, \text{ МПа}$	1,105	$n_0, \text{ Гц}$	25
$v_2, \text{ м}^3\text{кг}^{-1}$	0,215	$p_{30}, \text{ МПа}$	1,083	$\omega_0, \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$	157
$v_3, \text{ м}^3\text{кг}^{-1}$	0,219	$p_{40}, \text{ МПа}$	0,331	$J, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	601120
$v_4, \text{ м}^3\text{кг}^{-1}$	0,561	$p_5, \text{ МПа}$	0,0038	$\Pi$	0,546
$G_{10}, \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$	1615	$N_{10}, \text{ МВт}$	340	$\mu_c$	1
$G_{20}, \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$	1137	$N_{20}, \text{ МВт}$	235	$r_0$	0,98

Введем относительные переменные  $\pi_k = p_k/p_0$ ,  $k = \overline{1, 4}$ ,  $\varphi = (\omega - \omega_0)/\omega_0$  и положим  $\pi_0 = 1$ ,  $v = (N - N_0)/N_0$ ,  $v_s = (N_s - N_0)/N_0$ . Отсюда получим:  $p_k = p_0\pi_k$ ,  $k = \overline{1, 4}$ ;  $\omega = \omega_0(1 + \varphi)$ ;  $N = N_0(1 + v)$ ;

$N_s = N_0(1 + v_s)$ . Подставляя эти выражения в уравнения (2), (4), (5) и вводя обозначения

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{V_1}{v_1 p_{10}}, \quad K_2 = \frac{V_2}{v_2 p_{20}}, \quad K_3 = \frac{V_3}{v_3 p_{30}}, \quad K_4 = \frac{V_4}{v_4 p_{40}}, \quad K_\beta = \frac{1}{(1 - \Pi)^2}, \\ K_{1\mu} &= \frac{G_{10}}{K_1 p_0}, \quad K_{1\pi} = \frac{G_{10}}{K_1 \sqrt{p_{10}^2 - p_{20}^2}}, \quad K_{2\pi} = \frac{G_{20}}{K_2 \sqrt{p_{10}^2 - p_{20}^2}}, \quad K_{2\mu} = \frac{G_{20}}{K_2 p_{20} \beta(r_0)}, \\ K_{3\mu} &= \frac{G_{30}}{K_3 p_{20} \beta(r_0)}, \quad K_{3\pi} = \frac{G_{30}}{K_3 \sqrt{p_{30}^2 - p_{40}^2}}, \quad K_{4\pi} = \frac{G_{40}}{K_4 \sqrt{p_{30}^2 - p_{40}^2}}, \\ K_{5\pi} &= \frac{G_{40}}{K_4 \sqrt{p_{40}^2 - p_5^2}}, \quad T_a = \frac{J\omega_0^2}{N_0}, \quad b_a = \frac{1}{T_a}, \quad v_4 = \frac{N_{40}}{N_0}, \quad v_5 = \frac{N_{50}}{N_0}, \\ K_{1v} &= \frac{N_{10} p_0}{N_0 \sqrt{p_{10}^2 - p_{20}^2}}, \quad K_{2v} = \frac{N_{20} p_0}{N_0 \sqrt{p_{30}^2 - p_{40}^2}}, \quad K_{3v} = \frac{N_{30} p_0}{N_0 \sqrt{p_{40}^2 - p_5^2}}, \end{aligned}$$

получим нелинейную модель паровой турбины:

$$v = K_{1v}\sqrt{\pi_1^2 - \pi_2^2} + K_{2v}\sqrt{\pi_3^2 - \pi_4^2} + K_{3v}\sqrt{\pi_4^2 - \pi_5^2} - v_4(1 + \varphi)^2 + v_5(1 + \varphi)^3 - 1, \quad (6)$$

$$\begin{cases} d\pi_1/dt = K_{1\mu}\pi_0(1 + \mu_m) - K_{1\pi}\sqrt{\pi_1^2 - \pi_2^2}, \\ d\pi_2/dt = K_{2\pi}\sqrt{\pi_1^2 - \pi_2^2} - K_{2\mu}\mu_c\sqrt{\pi_2^2 - K_\beta(\pi_3 - \Pi\pi_2)^2}, \\ d\pi_3/dt = K_{3\mu}\mu_c\sqrt{\pi_2^2 - K_\beta(\pi_3 - \Pi\pi_2)^2} - K_{3\pi}\sqrt{\pi_3^2 - \pi_4^2}, \\ d\pi_4/dt = K_{4\pi}\sqrt{\pi_3^2 - \pi_4^2} - K_{5\pi}\sqrt{\pi_4^2 - \pi_5^2}, \\ d\varphi/dt = b_a(v - v_s)/(1 + \varphi). \end{cases} \quad (7)$$

Значения постоянных параметров уравнений (6) и (7) представлены в табл. 2.

Модель турбины (6), (7) представим в векторном виде:

$$dX_t/dt = f_t(X_t, \mu_m, v_s), \quad X_t(0) = X_{t0}, \quad \varphi = C_t X_t, \quad C_t = (0, 0, 0, 0, 1), \quad v = f_v(X_t), \quad (8)$$

где  $X_t = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \varphi)^T$  – вектор состояния турбины;  $f_t$  – векторная функция из правых частей системы дифференциальных уравнений (7);  $X_{t0} = (\pi_{10}, \pi_{20}, \pi_{30}, \pi_{40}, \varphi_0)^T$  – вектор начальных условий, значения проекций которого приведены в табл. 2,  $\varphi_0 = 0$ ;  $f_v$  – нелинейная функция переменной мощности (6).

Система дифференциальных уравнений следящего привода для перемещения клапана регулирования турбины имеет вид [2]:

$$dX_D/dt = A_D X_D + B_D u, \quad \mu_m = C_D X_D, \quad (9)$$

где  $X_D$  – вектор состояния привода;  $A_D$ ,  $B_D$ ,  $C_D$  – матрицы с постоянными элементами;  $u$  – управляющий сигнал регулятора частоты.

Нелинейную модель турбины как объекта управления при сбросе нагрузки получим на основе объединения моделей (8) и (9):

$$dX_T/dt = f_T(X_T, u, v_s), \quad v = f_v(X_T), \quad \varphi = C_T X_T, \\ X_T = \begin{pmatrix} X_D \\ X_I \end{pmatrix}, \quad f_T(X_T, u, v_s) = \begin{pmatrix} A_D X_D + B_D u \\ f_i(X_T, C_D X_D, v_s) \end{pmatrix}, \quad C_T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Таблица 2 – Параметры модели турбины К-1000-60/1500

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$K_{1\mu}$	3,2569	$K_{5\pi}$	2,4881	$K_{3v}$	8,3090
$K_{1\pi}$	3,3257	$K_{\beta}$	4,8516	$v_4$	0,0047
$K_{2\pi}$	0,0777	$\Pi$	0,5460	$v_5$	0,0119
$K_{2\mu}$	1,2841	$T_a, c$	14,400	$\pi_{10}$	0,9100
$K_{3\mu}$	5,2077	$b_a, c^{-1}$	0,0694	$\pi_{20}$	0,1842
$K_{3\pi}$	1,6345	$K_{1v}$	0,3704	$\pi_{30}$	0,1805
$K_{4\pi}$	0,7986	$K_{2v}$	1,3275	$\pi_{40}$	0,0552

**Модели систем управления.** Построены нелинейные модели системы автоматического управления частотой с различными регуляторами частоты. Так модель системы управления с ПИД регулятором имеет вид:

$$dX/dt = f(X, v_s), \quad \varphi = CX, \quad C = \begin{pmatrix} C_T & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \\ v_D \end{pmatrix}, \quad f(X, v_s) = \begin{pmatrix} f_T(X_T, (K_p + K_D)\varepsilon + u_I + v_D, v_s) \\ \lambda_I \varepsilon \\ -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon) \end{pmatrix},$$

где  $K_p$  и  $\lambda_I$  – параметры пропорциональной и интегральной частей регулятора,  $K_D$  и  $\lambda_D$  – параметры дифференциальной части,  $\varepsilon = \varphi_s - \varphi$  – сигнал ошибки,  $\varphi_s$  – сигнал задатчика частоты,  $u_I$  и  $v_D$  – переменные состояния интегральной и дифференциальной частей регулятора. Анализ процессов в линейных и нелинейных моделях системы автоматического управления частотой показал, что для нелинейных моделей характер

процессов такой же, как и для линейных моделей. Лучший процесс по прямым показателям качества соответствует ПИД регулятору. Процессы изменения частоты в процентах  $y = 100\varphi$  для линейной L и нелинейной N моделей систем управления частотой с ПИД регулятором показаны на рис. 2 при возмущающем действии  $v_s = -0,2$  и значениях параметров ПИД регулятора  $K_p = 100$ ,  $\lambda_I = 31,5 c^{-1}$ ,  $\lambda_D = 1,10 c^{-1}$ , оптимальных для линейной модели [2]. Для нелинейной модели максимальное отклонение частоты больше, чем в линейной модели, но размах колебаний в нелинейной модели меньше. На рис. 3 представлено изменение переменных состояния нелинейной модели системы автоматического управления частотой с ПИД регулятором при  $v_s = -0,2$ .

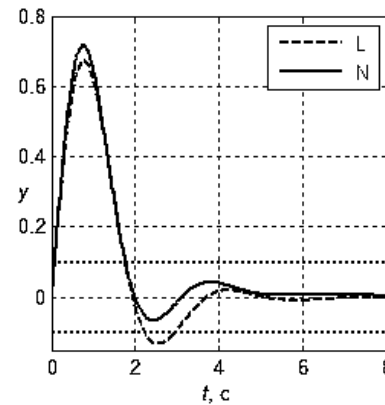


Рис. 2 – Изменение частоты

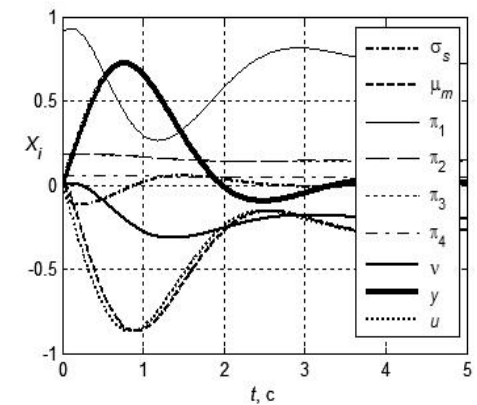


Рис. 3 – Изменение переменных состояния

**Выводы.** Представлена нелинейная модель турбины К-1000-60/1500, вычислены значения ее постоянных параметров. Разработаны нелинейные модели для систем управления паровой турбиной в пространстве состояний с различными регуляторами частоты. Проведено сравнение переходных процессов, построенных по линейной и нелинейной моделях систем.

**Список литературы:** 1. Артюх С. Ф. Основы автоматизированных систем управления энергогенерирующими установками электростанций / С. Ф. Артюх, М. А. Дуэль, И. Г. Шеленов. – Харьков : ООО «Знание LTD», 1998. – 332 с. 2. Федянина К. Б. Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов / К. Б. Федянина, Е. А. Кучер, В. П. Северин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – Ч. 5. – С. 86–91.

Надійшла до редколегії 08.05.2012

**В. А. КОЛБАСИН**, канд. тех. наук, доц., НТУ «ХПИ»;  
**И. А. ХРИСТЕНКО**, магистрант, НТУ «ХПИ»;  
**Д. А. ХРИСТЕНКО**, магистрант, НТУ «ХПИ»

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ СИМВОЛОВ НА ПЛАТФОРМЕ CUDA

У статті розглядаються питання організації паралельних обчислень на платформі CUDA для задачі оптичного розпізнавання рукописних символів з використанням штучних нейронних мереж (ШНМ). У роботі використовується ШНМ прямого поширення з двома прихованими шарами. Розглянуто два способи організації паралельних обчислень: один потоковий процесор обробляє дані одного символу, і все потокові процесори карти обробляють дані одного символу. Показано, що перший підхід до розпаралелювання є більш ефективним.

В статье рассматриваются вопросы организации параллельных вычислений на платформе CUDA для задачи оптического распознавания рукописных символов с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). В работе используется ИНС прямого распространения с двумя скрытыми слоями. Рассмотрено два способа организации параллельных вычислений: один потоковый процессор обрабатывает данные одного символа, и все потоковые процессоры карты обрабатывают данные одного символа. Показано, что первый подход к распараллеливанию является более эффективным.

The article focuses on organization of parallel computing using CUDA platform for optical character recognition problem of handwritten characters using artificial neural networks (ANN). The backpropagation ANN with two hidden layers was used. Two ways of organizing parallel computing were considered: a stream processor handles data of one character, and all the stream processors handles the data of one character. It is shown that the first approach to parallelization is more efficient.

**Введение.** В настоящее время системы оптического распознавания символов (OCR) являются незаменимым инструментом офисных работников, имеющих дело с большим объемом документов. Они широко используются для автоматизированного приведения бумажных документов в форму, пригодную к компьютерной обработке содержащегося в них текста.

Системы OCR обеспечивают многократное увеличение скорости ввода документов по сравнению с перепечаткой документа вручную. Но, такое ускорение обеспечивается только при вводе печатного текста, так как распознавание рукописных символов большинством коммерческих систем OCR не поддерживается.

Одной из причин такого положения дел является то, что изменчивость начертания букв рукописного текста вынуждает использовать для его распознавания намного более сложные и ресурсоемкие методы. Соответственно увеличивается время обработки документа и снижается практическая ценность OCR-системы, т.к. время подготовки текстового представления оказывается сравнимым со временем перепечатывания текста вручную. Поэтому

уменьшение времени обработки исходного графического документа системой OCR является важной практической задачей.

Искусственные нейронные сети (ИНС) широко применяются для решения задач распознавания образов и в частности, для распознавания рукописных символов [1, 2]. Применение ИНС позволяет добиться приемлемого качества распознавания, но требует значительных затрат вычислительных ресурсов. Одним из способов решения данной проблемы является использование технологий параллельных и распределенных вычислений, таких как кластерные системы, аппаратные нейропроцессоры, использование процессоров видеокарт для неграфических вычислений и т.д.

Так как основная сфера применения систем OCR – это офис, где применение дорогостоящих и специализированных решений неприемлемо по экономическим соображениям, наибольший практический интерес представляет использование процессоров видеокарт для выполнения распознавания. Наиболее документированной и удобной для разработчика является технология массовых параллельных вычислений на процессорах видеокарт CUDA [3]. С ее помощью удается достичь высокой производительности системы при относительно малой стоимости решения для задач, которые могут быть представлены в модели SIMD (одна инструкция выполняется над многими данными).

На данный момент существует достаточно большое число исследований, посвященных созданию параллельных реализаций методов распознавания одного рукописного символа для разных вычислительных архитектур, но мало исследований, посвященных проблеме организации параллельных вычислений для распознавания всего набора символов документа. Так как последовательное применение параллельных алгоритмов распознавания для каждого символа документа не является наилучшим способом организации вычислений, решение данной задачи представляет существенный практический интерес. Поэтому данная работа посвящена разработке параллельной реализации алгоритма распознавания набора рукописных символов ИНС для платформы CUDA и исследованию влияния подхода к организации параллельных вычислений на скорость обработки данных. В качестве тестового набора рукописных символов используется общепринятая библиотека изображений рукописных цифр MNIST [4].

**Распознавание изображений с помощью искусственной нейронной сети.** Для распознавания символов в данной работе используется многослойный перцептрон, структура которого представлена на рисунке 1. Входной слой содержит 784 нейрона для представления данных изображения размером 28×28 пикселей, два скрытых слоя содержат 1000 и 500 нейронов соответственно. Число нейронов выходного слоя соответствует числу распознаваемых символов и равняется 10.

На вход сети подается нормированное изображение рукописного символа размером 28×28 пикселей.

Значение на выходе каждого нейрона скрытых и выходных слоев вычисляется по формуле [2]:

$$y_i^{(l)} = f\left(\sum_{j=0}^{N-1} x_j^{(l)} \cdot w_{i,j}^{(l)}\right), \quad (1)$$

где  $l$  – номер слоя;

$x_j^{(l)}$  – значение на  $j$ -м входе  $i$ -го нейрона слоя  $l$ ;

$w_{i,j}^{(l)}$  – весовой коэффициент;

$y_i^{(l)}$  – значение на выходе  $i$ -го нейрона;

$f(z) = 1/(1 + e^{-x})$  – функция активации.

Данный перцептрон был обучен с помощью стандартного метода обратного распространения ошибки [1]. После обучения перцептрона сеть стала распознавать 97.9% символов из тестовой выборки.

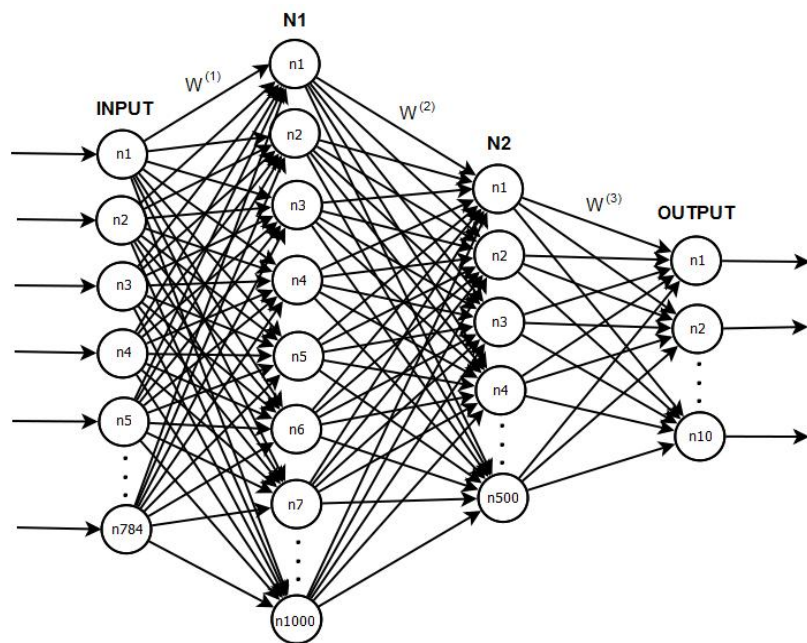


Рис. 1 – Структура используемого перцептрона

**Оптимизация вычислений с использованием CUDA.** В данной работе рассматривается только обработка данных ИНС в процессе их распознавания. Ускорение процесса обучения сети здесь не рассматривается, так как обучение выполняется только один раз, при настройке сети на набор рукописных символов, а обработка выполняется каждый раз при распознавании нового документа.

Процессоры видеокарт, поддерживающих NVidia CUDA, содержат большое число параллельных узлов – потоковых мультипроцессоров (SMP), каждый из которых работает как SIMD-вычислитель. Программно работа с вычислителем CUDA представлена блочно-сеточной моделью организации параллельных вычислений, при которой все нити, выполняющие единую функцию-ядро (Kernel), объединяются в блоки (Block), а блоки, в свою очередь, объединяются в сетку (Grid). Потоки, объединенные в один блок, выполняются на одном SMP, поэтому для увеличения производительности желательно использовать сетку с числом блоков, кратным количеству SMP в устройстве. Если для выполнения блока требуется малое количество регистров и разделяемой памяти, то на одном SMP могут выполняться несколько блоков. Память платформы CUDA разделена на несколько частей: глобальная память компьютера, память платформы (видеокарты), кэш доступа к памяти и так называемая разделяемая память (shared memory). Виды памяти перечислены в порядке уменьшения времени доступа к ней. При осуществлении доступа к областям памяти, в которых хранятся константы и текстуры осуществляется кэширование. Объем кэша зависит от версии платформы CUDA, но не превышает 8Кб на один SMP. Разделяемая память размещается на SMP и обеспечивает минимальное время доступа, но имеет объем всего в 16 Кб и разделена на банки. Наибольшая производительность при работе с разделяемой памятью достигается, когда каждый поток обращается к своему банку памяти.

В данной работе было использовано два подхода к распараллеливанию распознавания символов ИНС.

Первый подход предполагает организацию вычислений по схеме «одно изображение – один потоковый процессор». Для этого обработка данных одного изображения осуществляется в одном блоке потоков. Каждый поток вычисляет значения на выходе одного или нескольких нейронов. Число блоков в ядре определяется исходя из требований к скорости реакции системы и типового объема обрабатываемых данных. Использование большего числа блоков, чем количество установленных на аппаратуре потоковых мультипроцессорах (SMP), позволяет уменьшить затраты на запуск потоков и, если достаточно ресурсов, запустить несколько блоков выполняться на одном SMP. Для эффективного использования ресурсов карты число потоков должно равняться  $k \cdot N$ , где  $k$  – целое число, а  $N$  – число SMP в используемой видеокарте.

При вычислении значения выходов нейронов по формуле (1) весовые коэффициенты входов нейронов будут участвовать в обработке одного окна данных только один раз. Значения, подаваемые на вход слоя ИНС, напротив, будут использоваться много раз всеми нейронами этого слоя, поэтому для их хранения имеет смысл использовать быструю разделяемую память. Таким образом, в разделяемой памяти размещаются значения входов и выходов каждого слоя нейронов. Весовые коэффициенты входов нейронов располагаются в глобальной памяти, а доступ к ним осуществляется через кеш механизма чтения текстур.

Объем разделяемой памяти позволяет разместить в ней незначительную часть синаптических весов нейронов – 2200 значений. Для проверки того, как повлияет такое решение на быстродействие реализации, была создана дополнительная реализация первого подхода к распараллеливанию.

Второй подход предполагает организацию вычислений по схеме «одно изображение – вся карта CUDA». При такой организации вычислений потоки каждого SMP будут обрабатывать свою часть данных. В этом случае как входные, так и промежуточные данные должны храниться в глобальной памяти устройства. Также здесь возникает проблема синхронизации потоковых процессоров между собой. Дело в том, что встроенные средства CUDA позволяют синхронизировать только выполнение потоков внутри одного блока потоков (все потоки которого выполняются на одном SMP). Для синхронизации потоков, принадлежащим разным блокам встроенных средств нет. А при обработке данных ИНС требуется синхронизировать вычисление значений на выходах каждого слоя сети: вычисление значений нейронов следующего слоя должно начаться только после того, как закончится вычисление значений нейронов предыдущего слоя. Для решения этой проблемы в работе используется не самый быстрый, но самый простой способ: вычисление значений нейронов каждого слоя выполняется отдельным ядром (kernel).

При использовании второго подхода разделяемая память используется для хранения входных значений слоя и для хранения части весовых коэффициентов.

**Результаты.** Скорость работы предложенных алгоритмов исследовалась с использованием поддерживающей технологию CUDA видеокарты GeForce 9600GT, которая содержит 8 потоковых мультипроцессоров (SMP).

Для определения скорости работы предложенных методов измерялось время обработки наборов тестовых изображений. Так как карта имеет 8 SMP, число изображений в наборе также было кратным 8. Для алгоритмов первого и второго типа сравнивалось время распознавания набора одинаковых изображений. Результаты сравнения приведены на графиках на рисунке 2.

Как видно из приведенных графиков, за счет больших затрат ресурсов на запуск ядер и менее эффективного управления памятью алгоритмы второго типа практически в два раза медленнее алгоритмов первого типа. Однако обе

CUDA реализации обрабатывают данные почти в восемь раз быстрее, чем реализация на центральном процессоре Intel Celeron G530 2.4 GHz.

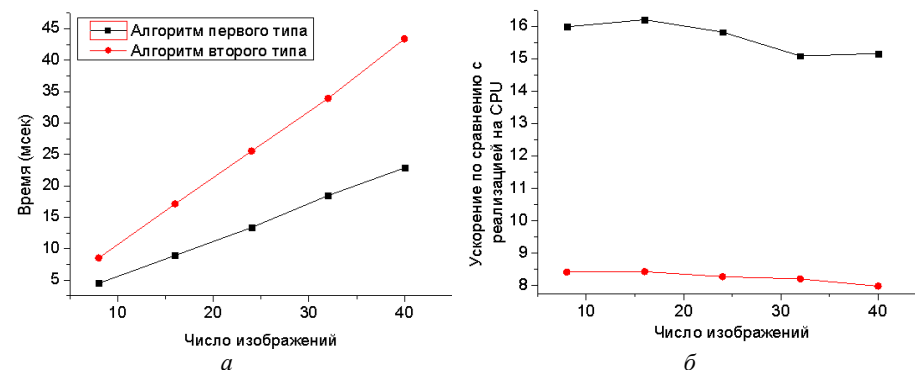


Рис. 2 – Зависимость времени обработки набора изображений от типа алгоритма (а); и ускорение по сравнению с реализацией на CPU (б)

В целом, предложенная параллельная реализация алгоритма распознавания рукописных символов при помощи многослойной ИНС прямого распространения позволяет выполнить распознавание символов намного быстрее, чем реализация на центральном процессоре, и может быть использована при разработке систем оптического распознавания символов.

**Список литературы:** 1. Бодянский Е. В. Искусственные нейронные сети / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Х. : Компания СМИТ, 2005. – 408 с. 2. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 344 с. 3. Боресков А. В. Основы работы с технологией CUDA / А. В. Боресков, А. А. Харламов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 232 с. 4. LeCun Y. The MNIST database of handwritten digits [Электронный ресурс] // Y. LeCun, C. Cortes. – 2009. – Режим доступа: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/index.html>.

Надійшла до редколегії 08.05.2012

## ЗМІСТ

<i>Куценко А. С., Колбасин В. А., Калинин Д. В.</i> Сжатие данных кардиограмм в режиме реального времени .....	3
<i>Куценко А. С., Марченко И. И.</i> Математическое моделирование изменения толщины оксидного пленки при низкоэнергетическом ионном азотировании .....	7
<i>Марченко Н. А., Рингель Н. Ю.</i> Розробка розподіленої системи для моделювання транспортних потоків у місті .....	11
<i>Гомозов Е. П., Ахизер И. А.</i> Прогнозирование курса акций на основе МГУА ...	15
<i>Филипенко А. И., Анпилогов Е. М., Анпилогова И. Е.</i> Моделирование процесса обработки торцов наконечников волоконно-оптических линий связи на финишных операциях.....	20
<i>Єфімов О. В., Меньшикова О. Д., Каверцев В. Л.</i> Комп'ютерне моделювання котлів-утилизаторів паро- і газотурбінних установок.....	25
<i>Кулик А. А.</i> О расчете премий при обязательном страховании автогражданской ответственности .....	33
<i>Кизим А. В., Чиков Е. В., Камаев В. А., Шевченко С. В.</i> Повышение производительности эксплуатации оборудования с использованием системного подхода.....	40
<i>Дроботов А. С.</i> Управление финансовыми рисками инновационных проектов ...	46
<i>Довбиш А. С., Козьмін Ю. С., Берест О. Б.</i> Інформаційно-екстремальний алгоритм навчання системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів .....	54
<i>Колбасин В. А., Ульянов Е. В.</i> Реализация сенсорного интерфейса пользователя с использованием обычного монитора и веб-камеры .....	61
<i>Довбиш А. С., Москаленко В. В.</i> Оптимізація словника ознак розпізнавання для інформаційно-екстремального гіпереліпсоїдного класифікатора .....	65
<i>Бугрименко И. А., Гардер С. Е., Корниль Т. Л.</i> Анализ работоспособности кабеля по данным ускоренных испытаний.....	78
<i>Дунаевская О. И., Яцук Н. И.</i> Рекуррентная оценка продолжительности ожидания прогрессора в генетическом алгоритме .....	83
<i>Камаев В. А., Шевченко С. В., Манева Р. И.</i> Прогнозирование потребления электроэнергии на основе нечетких продукционных правил.....	88
<i>Ткачук М. В., Сокол В. Є., Черкашенко О. В.</i> Розробка методики комплексної оцінки ефективності впровадження систем управління IT-інфраструктурою організацій .....	94
<i>Янголенко О. В., Лютенко І. В., Яковлева О. В.</i> Аналіз стану інформаційних технологій в системі вищої освіти .....	105
<i>Костюк О. В., Кныш В. А.</i> Разработка математической модели каскада гидроэлектростанций .....	110
<i>Северин В. П., Годлевская К. Б.</i> Нелинейные модели систем автоматического управления паровой турбиной К-1000-60/1500 .....	115
<i>Колбасин В. А., Христенко И. А., Христенко Д. А.</i> Параллельная реализация алгоритма оптического распознавания рукописных символов на платформе CUDA.....	121

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

## ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Тематичний випуск  
«Системний аналіз, управління  
та інформаційні технології»

№ 30

Наукові редактори М. Д. Годлевський, О. С. Куценко  
Технічний редактор М. І. Безменов

Відповідальний за випуск І. Б. Обухова

Обл.-вид. № 91–12.

Підп. до друку 22.06.2012 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.  
Наклад 300 прим. Перший завод 1–100. Зам. № 24. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

ФОП Стеценко І. І., 61019, Харків, пр. Ілліча, 103а, кв. 21,  
тел. 758-17-35