

# ПРОГРЕССИВНИ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES

УДК 004.934

Имамвердиев Я. Н.<sup>1</sup>, Сухостат Л. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, зав. отделом, Институт информационных технологий Национальной Академии Наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Научный сотрудник, Институт информационных технологий Национальной Академии Наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

#### МЕТОД ОЦЕНКИ ПЕРИОДА ОСНОВНОГО ТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Оценка периода основного тона речевого сигнала используется во многих важных областях применения речевых технологий. Однако среди существующих методов только некоторые могут работать для случая нелинейных и нестационарных сигналов. Основная причина состоит в том, что методы обнаружения периода основного тона основаны на предположении, что сам процесс речеобразования линеен, а речевые сигналы являются локально стационарными. Выбор алгоритма для оценки периода основного тона всегда состоит в нахождении компромисса между временем и разрешающей способностью по частоте, робастностью, задержкой и вычислительной сложностью. Целью данной работы является разработка метода оценки периода основного тона на основе эмпирического вейвлет преобразования. Метод построения семейства адаптированных вейвлетов состоит в предположении, что фильтры зависят от расположения информации в спектре анализируемого сигнала. Эмпирические вейвлеты определяются как полосовые фильтры на каждом отрезке речевого сигнала. Для определения периода основного тона в качестве признаков рассматривается мгновенная частота. Оператор разделения энергии Тигера-Кайзера используется для ее выделения. В работе приводится сравнение данного метода с другими алгоритмами оценки периода основного тона.

**Ключевые слова:** период основного тона, эмпирическое вейвлет преобразование, оператор разделения энергии Тигера-Кайзера, внутренняя модовая функция, мгновенная частота.

#### НОМЕНКЛАТУРА

AUTOC – Modified Autocorrelation Method;  
MBSC – Multi-Band Summary Correlogram;  
AMDF – Average magnitude difference function;  
PEFAC – Pitch estimation Filter with Amplitude Compression;  
IMF – Intrinsic Mode Function;  
HHT – Hilbert-Huang Transform;  
EMD – Empirical Mode Decomposition;  
EWT – Empirical Wavelet Transform;  
ТКЕО – Teager-Kaiser Energy Operator;  
GPE – Gross Pitch Error;  
SNR – signal-to-noise ratio;  
MFPE – Mean Fine Pitch Error;  
DESA – Discrete Energy Separation Algorithm;  
DESA-1 – первый дискретный алгоритм разделения энергии;  
DESA-2 – второй дискретный алгоритм разделения энергии;  
AM-FM – Amplitude-Modulation Frequency-Modulation;

IF1 – мгновенная частота из первой IMF;  
 $T_n$  – переходная фаза;  
 $N_{FPE}$  – число вокализованных участков без GPE;  
 $\omega_n$  – границы между сегментами;  
 $f_k$  – функция IMF;  
 $F0_{true}(i)$  – эталонное значение периода основного тона;  
 $F0_{est}(i)$  – полученное значение периода основного тона;  
 $i$  – число фреймов;  
 $N_{VU}$  – число фреймов, в которых полученное значение основного тона и эталонное значение определены как вокализованные;  
 $\alpha_j(t)$  – мгновенная амплитуда;  
 $\theta_j(t)$  – фазовая функция;  
 $H[c_j(t)]$  – преобразование Гильберта;  
 $z_j(t)$  – аналитический сигнал;  
 $X(t)$  – исходный сигнал;  
 $\text{Re}\{\}$  – реальная часть комплексного выражения;

$H(\omega, t)$  – спектр Гильберта;

$\psi(\cdot)$  – оператор ТКЕО;

$x(t)$  – сигнал;

$\dot{x}(t)$  – производные первого порядка;

$\ddot{x}(t)$  – производные второго порядка;

$f(n)$  – мгновенная частота;

$|\alpha(n)|$  – мгновенная амплитуда;

$F_0$  – период основного тона;

$N$  – число сегментов;

$\Lambda_n$  – сегмент сигнала;

$C^k([0,1])$  – пространство  $k$  раз дифференцируемых функций на интервале  $[0,1]$ ;

$\beta(x)$  – функция из  $C^k([0,1])$ ;

$\gamma$  – параметр определяющий размер границ;

$\hat{f}_n(\omega)$  – эмпирическая масштабируемая функция;

$\hat{\psi}_n(\omega)$  – эмпирические вейвлеты;

$W_{f_j}^{\varepsilon}(0, t)$  – детализирующие коэффициенты;

$W_{f_j}^{\varepsilon}(0, t)$  – аппроксимирующие коэффициенты.

## ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1970-х годов было разработано множество алгоритмов для выделения периода основного тона. Среди них можно выделить модифицированный автокорреляционный метод (AUTOC) [1], кепстральный метод, многополосную агрегацию коррелограмм (MBSC) [2], BaNa [3], YIN [4], YAAPT [5], среднее значение разностной функции (AMDF) [1], SWIPE' [6] и метод оценки основного тона на основе амплитудного сжатия (PEFAC) [7].

Методы оценки периода основного тона можно, в общем, разделить на временные, частотные и гибридные. Первая категория, в основном, ищет пики в автокорреляционной функции, вторая – в спектре мощности, тогда как третья группа выполняет частотно-временной анализ выхода банка полосовых фильтров. Во многих случаях алгоритмы выделяют кандидатов периода основного тона для каждого временного фрейма, а затем используют временные ограничения на непрерывность.

Однако только некоторые из них могут работать для случая нелинейных и нестационарных сигналов.

Некоторые хорошие альтернативы – методы на основе оценки параметров мгновенной частоты. Мгновенная частота была представлена в [8, 9], оценка методов предложена в [8–13]. Она необходима для понимания подробных механизмов обработки нелинейных и нестационарных процессов. На практике мгновенная частота обычно вычисляется из внутренней модовой функции (IMF) с помощью преобразования Гильберта-Хунга (ННТ). ННТ для получения IMF применяет эмпирическую модовую декомпозицию (EMD) [13]. В сравнении с методом автокорреляции данный подход более точен и быстрее обнаруживает период основного тона. Алгоритм EMD, применяемый при вычислении IMF, адаптивен, его вычислительная сложность, включая число извлеченных IMF и количество вычислений на этапе их получения, строго зависит от сложности самих речевых сигналов. Но метод EMD автоматически оценивает число мод, что существенно влияет на вычислительную

сложность. В связи с этим в работе предлагается метод эмпирического вейвлет преобразования (EWT) [14].

Далее для получения мгновенной частоты применяется преобразование Гильберта. Однако оператор разделения энергии Тигера-Кайзера (ТКЕО) [15] превосходит его по вычислительной сложности и скорости на реальных сигналах. Преобразование Гильберта и оператор ТКЕО могут быть применены только к монокомпонентным сигналам. В случае мультикомпонентных сигналов необходимо разбиение сигнала на простые компоненты перед применением методов. Для этого удобно использовать узкополосные фильтры [10]. Однако, в случае частотно-модулированных компонентов, это не всегда возможно в силу широкого диапазона частот.

Целью данной работы является разработка нового метода оценки периода основного тона на основе мгновенной частоты с применением EWT и нелинейного оператора ТКЕО. Приводятся результаты практических экспериментов на речевой базе данных Keele [16]. Оценивается робастность предложенного метода к шуму.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть рассматривается метод построения семейства вейвлетов адаптированных к обрабатываемым сигналам. Представлены реальные сигналы, где спектр симметричен относительно частоты  $\omega = 0$ , а также нормализованная ось Фурье, которая имеет периодичность для того, чтобы удовлетворить критерию Шеннона, и ограничивается отрезком  $\omega \in [0, \pi]$ .

Отрезок  $[0, \pi]$  делится на  $N$  смежных сегментов. Каждый сегмент  $\Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$  (где  $\omega_0 = 0$  и  $\omega_N = \pi$ ). Вокруг  $\omega_n$  определяется переходная фаза  $T_n$  шириной  $2\tau_n$ .

Тогда эмпирические вейвлеты [14] определяются как полосовые фильтры на каждом  $\Lambda_n$ . Банки фильтров стро-

ятся согласно условию  $\gamma < \min_n \left( \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n} \right)$ . Далее оп-

ределяются компоненты IMF.

После получения IMF компонент для вычисления мгновенной частоты и мгновенной амплитуды к каждой IMF применяется преобразование Гильберта [17] (дано: реальный сигнал с симметричным спектром относительно  $\omega = 0$ , надо: оценка периода основного тона на основе мгновенной частоты).

## 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вейвлет-анализ в настоящее время является одним из средств исследования данных. Он позволяет решать задачи моделирования, идентификации, аппроксимировать стационарные и нестационарные процессы. Преимущества вейвлетов включают частотно-временную локализацию сигналов.

Нестационарные и нелинейные сигналы требуют адаптивные пути решения. Адаптивность состоит в рассмотрении тех областей сигнала, где содержится полезная информация. Вейвлет преобразования способны собирать основную информацию о сигнале в небольшое число вейвлет коэффициентов. Полезное свойство вейвлет преобразования состоит и в том, что его можно рассматривать как применение банка фильтров.

Известен подход, называемый вейвлетами Малвара-Вильсона [18, 19], который пытается построить адаптивное представление путем сегментации сигнала во временной области, чтобы выделить временные интервалы, содержащие спектральную информацию о сигнале. В то время как данный подход интересен, временная сегментация является трудно реализуемой задачей.

В [20] авторы предлагают метод, называемый «brushlets», который строит адаптивный банк фильтров в области Фурье. Он использует идею вейвлетов Малвара-Вильсона, но сегментирует спектр Фурье вместо самого сигнала. Данная задача является конструктивно довольно сложной.

В недавней работе И. Добеши под названием «synchrosqueezed всплески» [21] предлагается подход, сочетающий в себе классический вейвлет-анализ и метод перераспределения частотно-временной информации. Этот алгоритм позволяет получить более точное частотно-временное представление.

В основу каждого метода положено классическое вейвлет преобразование, но каждый из них имеет свои индивидуальные особенности.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эмпирическая масштабируемая функция и эмпирические вейвлеты определяются следующим образом

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } |\omega| \leq \omega_n - \tau_n; \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right) \right], & \text{если } \omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

и

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } \omega_n + \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} - \tau_{n+1}; \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\tau_{n+1}} (|\omega| - \omega_{n+1} + \tau_{n+1}) \right) \right], & \text{если } \omega_{n+1} - \tau_{n+1} \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} + \tau_{n+1}; \\ \sin \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right) \right], & \text{если } \omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Функция  $\beta(x)$ , произвольная из  $C^k([0,1])$  – функция такая, что

$$\beta(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 0 \text{ и } \beta(x) + \beta(1-x) = 1, \forall x \in [0,1]; \\ 1, & \text{если } x \geq 1, \end{cases}$$

$\tau_n$  выбирается пропорционально  $\omega_n$ :  $\tau_n = \gamma \omega_n$ , где  $0 < \gamma < 1$ . Следовательно, для всех  $n > 0$  уравнения (1) и (2) принимают вид

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_n; \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1-\gamma)\omega_n) \right) \right], & \text{если } (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

и

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } (1+\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_{n+1}; \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}} (|\omega| - (1-\gamma)\omega_{n+1}) \right) \right], & \text{если } (1-\gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_{n+1}; \\ \sin \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1-\gamma)\omega_n) \right) \right], & \text{если } (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Теперь можем определить эмпирическое вейвлет преобразование  $W_f^E(n,t)$  также как и в случае классического вейвлет преобразования:

$$W_f^E(n,t) = \langle f, \psi_n \rangle = \int f(\tau) \overline{\psi_n(\tau-t)} d\tau = \hat{f}(\omega) * \overline{\hat{\psi}_n(\omega)},$$

а аппроксимирующие коэффициенты – скалярных произведений с масштабируемой функцией

$$W_f^E(0,t) = \langle f, \phi_1 \rangle = \int f(\tau) \overline{\phi_1(\tau-t)} d\tau = \hat{f}(\omega) * \overline{\hat{\phi}_1(\omega)},$$

где  $\hat{\psi}_n(\omega)$  и  $\hat{\phi}_1(\omega)$  определяются из уравнений (3) и (4) соответственно. Обратное преобразование принимает вид

$$\begin{aligned} f(t) &= W_f^E(0,t) * \phi_1(t) + \sum_{n=1}^N W_f^E(n,t) * \psi_n(t) = \\ &= \hat{W}_f^E(0,\omega) * \hat{\phi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^N \hat{W}_f^E(n,\omega) * \hat{\psi}_n(\omega). \end{aligned}$$

Функция IMF  $f_k$  определяется следующим образом:

$$f_0(t) = W_f^E(0,t) * \phi_1(t),$$

$$f_k(t) = W_f^E(k,t) * \psi_k(t).$$

Использование преобразования Гильберта позволяет получить для каждого момента времени

$$H[c_j(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_j(\tau)}{t-\tau} d\tau.$$

Теперь можно построить аналитический сигнал  $z_j(t)$  как

$$z_j(t) = c_j(t) + i H[c_j(t)],$$

который может быть представлен в виде

$$z_j(t) = \alpha_j(t) \exp(i\omega_j(t)).$$

Мгновенная амплитуда  $\alpha_j(t)$  и фазовая функция  $\theta_j(t)$  определяются как

$$\alpha_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + H^2[c_j(t)]},$$

$$\theta_j(t) = \arctan \frac{H[c_j(t)]}{c_j(t)}.$$

Кроме того, мгновенная частота  $\omega_j(t)$  может быть вычислена следующим образом:

$$\omega_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt}.$$

Так исходный сигнал может быть представлен в форме (5):

$$X(t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n \alpha_j(t) \exp[i\omega_j(t)dt], \quad (5)$$

где остаток опущен.

Выражение (5) позволяет представить мгновенную амплитуду и частоту в трехмерном пространстве, где амплитуда – это высота в частотно-временной плоскости. Это частотно-временное распределение представлено как спектр Гильберта  $H(\omega, t)$

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n \alpha_j(t) \exp[i\omega_j(t)dt].$$

ННТ удовлетворяет требованию адаптивности для анализа нестационарных сигналов. Таким образом, сигнал может быть локально и точно отображен во временной частотной области путем применения спектра Гильберта.

Оператор разделения энергии Тигера-Кайзера – нелинейный оператор, который успешно применяется во многих инженерных приложениях [15]. Он обнаруживает модуляцию энергии и определяет мгновенную частоту и мгновенную амплитуду от АМ-ФМ сигнала [9]. Оператор ТКЕО  $\Psi(\cdot)$  для сигнала  $x(t)$  определяется как

$$\Psi[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t).$$

Оператор разделения энергии Тигера-Кайзера – нелинейный оператор, который успешно применяется во многих инженерных приложениях [15]. Он обнаруживает модуляцию энергии и определяет мгновенную частоту и мгновенную амплитуду от АМ-ФМ сигнала [9]. Оператор ТКЕО  $\Psi(\cdot)$  для сигнала  $x(t)$  определяется как

$$\Psi[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t).$$

В дискретно-временной области оператор принимает вид

$$\Psi[x(n)] = x^2(n) - x(n+1) \cdot x(n-1).$$

Мгновенная частота  $f(n)$  и мгновенная амплитуда  $|\alpha(n)|$  в любой момент времени для сигнала  $x(n)$  даются как

$$y(n) = x(n) - x(n-1), \quad (6)$$

$$f(n) = \arccos \left( 1 - \frac{\Psi[y(n)] + \Psi[y(n+1)]}{4\Psi[x(n)]} \right), \quad (7)$$

$$|\alpha(n)| = \sqrt{\frac{\Psi[x(n)]}{\sin^2[f(n)]}}, \quad (8)$$

$$f(n) = \frac{1}{2} \arccos \left( 1 - \frac{\Psi[x(n+1)] - \Psi[x(n-1)]}{2\Psi[x(n)]} \right), \quad (9)$$

$$|\alpha(n)| = \frac{2\Psi[x(n)]}{\sqrt{\Psi[x(n+1)] - \Psi[x(n-1)]}}. \quad (10)$$

В общем, метод демодуляции (6)–(8) известен как DESA-1, а метод (9) и (10) – как DESA-2. Алгоритм DESA-2 только требует три значения для вычисления энергии в каждый момент времени и более прост в вычислении. Поэтому в данной работе мы рассматриваем алгоритм DESA-2.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения экспериментов была рассмотрена речевая база данных Keele [16]. Речевые образцы получены от 10 дикторов (5 мужчин и 5 женщин). Также содержатся записи, извлеченные из ларингографа (laryngograph) с помощью алгоритма автокорреляции и сопровождаются измерениями  $F_0$ .

Для тестирования устойчивости к внешним шумам рассматриваемых алгоритмов определения периода основного тона к сигналам добавляется белый шум с различными уровнями SNR. Для генерации зашумленной речи с определенным значением SNR, энергия сигнала вычисляется только на вокализованных участках речевого сигнала, и шум усиливается или ослабевает до определенного уровня, чтобы удовлетворить значению целевого SNR.

Период основного тона был оценен с помощью автокорреляции с окном 26,5 мс и сдвигом в 10 мс.

Для сравнения производительности методов обнаружения периода основного тона, используются следующие метрики ошибок [17]:

а) процент грубых ошибок (GPE) определяет соотношение кадров, рассчитанное на основе вокализованных участков полученного периода основного тона и эталонных значений (ground truth), для которых относительная погрешность оценки выше, чем определенный порог  $\delta$  (обычно 20% [22]):

$$GPE = \frac{N_{F0E}}{N_{VV}} \times 100\%,$$

где  $N_{F0E}$  – число фреймов, для которых выполняется условие

$$\left| \frac{F0_{est}(i)}{F0_{true}(i)} - 1 \right| > \delta\%;$$

б) средний процент мелких ошибок (MFPE) вычисляется на вокализованных участках, где не наблюдаются ошибки GPE [23]:

$$MFPE = \frac{1}{N_{FPE}} \sum_{i=1}^{N_{FPE}} \frac{|F0_{true}(i) - F0_{est}(i)|}{F0_{true}(i)} \times 100\%,$$

где  $N_{FPE}$  – число вокализованных участков без GPE.

EWT разлагает сегменты сигнала на серию IMF функций для дальнейшего извлечения мгновенной частоты (рис. 1). Из всего набора IMF выбираем ту, чей период ближе к исходному сигналу. Из рис. 1 видно, что IMF1 содержит информацию о периоде основного тона и хорошо отображает форму сигнала. Блок-схема процесса на основе EWT-ТКЕО показана на рис. 2 (здесь IF1 обозначает мгновенную частоту получаемую из первой IMF).

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились в среде Matlab 2011b [24]. Сравнение производительности предложенного метода и других популярных алгоритмов обнаружения периода основного тона приводится в таблице 1.

Как показано в таблице 1, GPE для предложенного метода на основе EWT по сравнению с другими методами извлечения периода основного тона значительно меньше, чем у методов ННТ, YIN и SWIPE' при различных уровнях шума. Предложенный метод является более робастным по сравнению с другими методами и лучше работает при высоких SNR.

### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод оценки периода основного тона на основе эмпирического вейвлет преобразования обеспечивает существенную точность выделения высоты. Однако данный подход требует больших временных затрат.

По сравнению с другими алгоритмами оценки высоты, такими как YAAPT, ННТ и SWIPE', предложенный метод более точен. Метод был протестирован на устойчивость к внешним шумам.

Эффективность предложенного подхода может быть повышена при увеличении числа признаков. Однако это значительно влияет на скорость работы алгоритма.



Рисунок 2 – Схема оценки периода основного тона

Таблица 1 – Сравнение производительности методов извлечения периода основного тона

Метод \ SNR (dB)		-5	0	10	15
SWIPE'	GPE	20,82	14,28	11,92	8,43
	MFPE	1,77	1,21	0,90	0,83
YAAPT	GPE	13,90	23,35	9,98	6,26
	MFPE	2,10	1,94	1,51	0,81
ННТ	GPE	19,30	6,02	11,34	5,10
	MFPE	0,56	0,43	0,35	0,33
EWT-ТКЕО	GPE	15,11	5,77	10,56	4,79
	MFPE	0,37	0,30	0,28	0,14

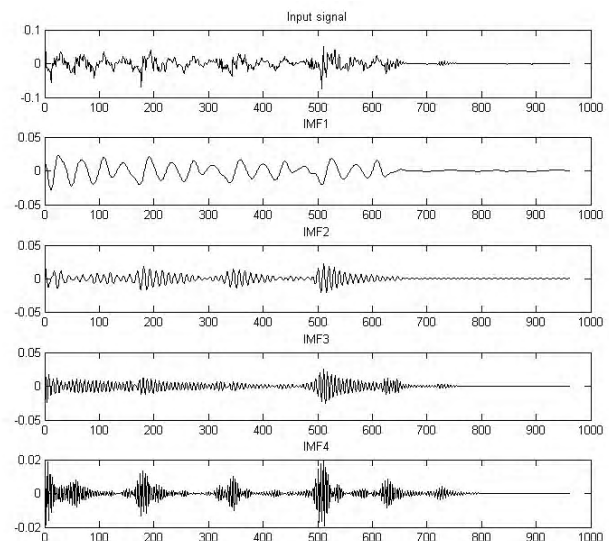
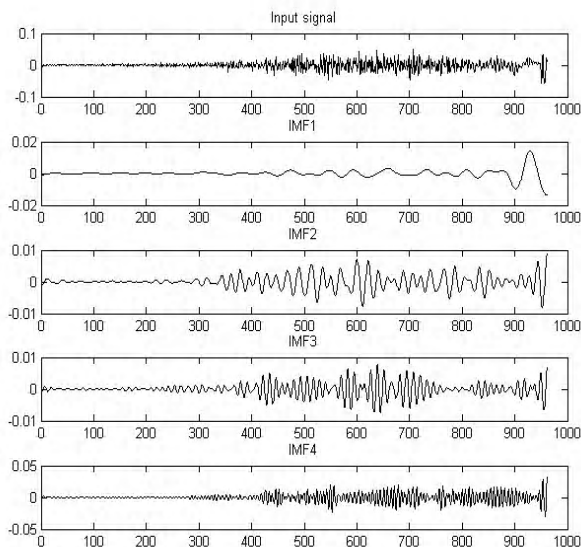


Рисунок 1 – Декомпозиция сигналов с помощью эмпирического вейвлет преобразования

## ВЫВОДЫ

Решена актуальная задача разработки метода выделения периода основного тона речевого сигнала. Идея предлагаемого подхода состоит в том, что мгновенная частота содержит информацию о периоде основного тона. Был рассмотрен метод EWT. Для выделения мгновенной частоты был предложен оператор ТКЕО. Для проведения экспериментов белый шум был добавлен к речевому сигналу перед применением метода извлечения периода основного тона. Алгоритм протестирован при различных уровнях шума. Было показано, что точность алгоритма выше, чем у алгоритмов YAAPT, NHT и SWIPE' в случае быстрых модуляций высоты. Эксперименты показывают достаточную эффективность предлагаемого подхода при аддитивном шуме.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № ЕЭФ-РЭТН-МQM-2/ЭКТ-2-2013-7(13)-29/18/1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A comparative performance study of several pitch detection algorithms / [L. Rabiner, M. J. Cheng, A. E. Rosenberg, C. A. McGonegal] // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – 1976. – № 5. – P. 399–417. DOI: 10.1109/TASSP.1976.1162846
2. Tan L. N. Multi-band summary correlogram-based pitch detection for noisy speech / L. N. Tan, A. Alwan // *Speech Communication*. – 2013. – Vol. 55, № 78. – P. 841–856. DOI: 10.1016/j.specom.2013.03.001
3. BaNa: a hybrid approach for noise resilient pitch detection / [H. Ba, N. Yang, I. Demirkol, W. Heinzelman] // *IEEE Statistical Signal Processing Workshop*. – 2012. – P. 369–372. DOI: 10.1109/SSP.2012.6319706
4. De Cheveigne A. Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music / A. De Cheveigne, H. Kawahara // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2002. – Vol. 111, № 4. – P. 1917–1930. DOI: 10.1121/1.1458024
5. Kasi K. Yet another algorithm for pitch tracking / K. Kasi, S. A. Zahorian // *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 2002. – Vol. 1. – P. 361–364. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.5743729
6. Camacho A. SWIPE: a sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music: thesis ... doctor of philosophy / Camacho A. – Florida: University of Florida, 2007.
7. Gonzalez S. PEFA – A Pitch Estimation Algorithm Robust to High Levels of Noise / S. Gonzalez, M. Brookes // *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*. – 2011. – Vol. 22, № 2. – P. 518–530. DOI: 10.1109/TASLP.2013.2295918
8. Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal / B. Boashash // *Proceedings of the IEEE*. – 1992. – Vol. 80, № 4. – P. 520–538. DOI: 10.1109/5.135376
9. Maragos P. On amplitude and frequency demodulation using energy operators / P. Maragos, J. F. Kaiser, T. F. Quatieri // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1993. – Vol. 41, № 4. – P. 1532–1550. DOI: 10.1109/78.212729
10. Abe T. Harmonics tracking and pitch extraction based on instantaneous frequency / T. Abe, T. Kobayashi, S. Imai // *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1995. – Vol. 1. – P. 756–759. DOI: 10.1109/ICASSP.1995.479804
11. Abe T. Sinusoidal model based on instantaneous frequency attractors / T. Abe, M. Honda // *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*. – 2006. Vol. 14, № 4. – P. 1292–1300. DOI: 10.1109/TSA.2005.858545
12. Azarov E. Estimation of the instantaneous harmonic parameters of speech / E. Azarov, A. Petrovsky, M. Parfieniuk // *Proceedings of the European Signal Processing Conference*. – 2008.
13. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / [N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long and other] // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1998. – Vol. 454, № 1971. – P. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193
14. Gilles J. Empirical Wavelet Transform / J. Gilles // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2013. – Vol. 61, № 16. – P. 3999–4010. DOI: 10.1109/TSP.2013.2265222
15. Vakman D. On the analytic signal, the Teager–Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency / D. Vakman // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1996. – Vol. 44, № 4. – P. 791–797. DOI: 10.1109/78.492532
16. Chu W. Reducing f0 frame error of f0 tracking algorithms under noisy conditions with an unvoiced/voiced classification frontend / W. Chu, A. Alwan // *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 2009. – P. 3969–3972. DOI: 10.1109/icassp.2009.4960497
17. Varga A. Assessment for automatic speech recognition: II. Noisex-92: a database and an experiment to study the effect of additive noise on speech recognition systems / A. Varga, H. J. Steeneken // *Speech Communication*. – 1993. – Vol. 12, № 3. – P. 247–251. DOI: 10.1016/0167-6393(93)90095-3
18. Jaffard S. Wavelets: Tools for Science and Technology / S. Jaffard, Y. Meyer, R. D. Ryan. – Philadelphia: SIAM, 2001. – 256 p. DOI: 10.1063/1.1485591
19. Malvar H. S. Lapped transforms for efficient transform/subband coding / H. S. Malvar // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – 1990. – Vol. 38, № 6. – P. 969–978. DOI: 10.1109/29.56057
20. Meyer F. G. Brushlets: A tool for directional image analysis and image compression / F. G. Meyer, R. R. Coifman // *Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis*. – 1997. – Vol. 4, № 2. – P. 147–187. DOI: 10.1006/acha.1997.0208
21. Daubechies I. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool / I. Daubechies, J. Lu, H.-T. Wu // *Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis*. – 2011. – Vol. 30, № 2. – P. 243–261. DOI: 10.1016/j.acha.2010.08.002
22. Drugman T. Joint robust voicing detection and pitch estimation based on residual harmonics / T. Drugman, A. Alwan // *Proceedings of Interspeech*. – 2011. – P. 1973–1976.
23. Azarov E. Instantaneous pitch estimation based on RAPT framework / E. Azarov, M. Vashkevich, A. Petrovsky // *Proceedings of the European Signal Processing Conference*. – 2012. – P. 2787–2791.
24. Empirical Wavelet Transforms [Electronic resource]. – 2013. – Access mode: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42141-empirical-wavelet-transforms>

Статья поступила в редакцию 22.12.2014.

После доработки 12.01.2015.

Імамвердієв Я. Н.<sup>1</sup>, Сухостат Л. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, зав. відділом, Інститут інформаційних технологій Національної Академії Наук Азербайджану, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Науковий співробітник, Інститут інформаційних технологій Національної Академії Наук Азербайджану, Баку, Азербайджан

## МЕТОД ОЦІНКИ ПЕРІОДУ ОСНОВНОГО ТОНУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕМПІРИЧНОГО ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Оцінка періоду основного тону мовного сигналу використовується в багатьох важливих областях застосування мовних технологій. Однак серед існуючих методів тільки деякі можуть працювати для випадку нелінійних і нестационарних сигналів. Основна причина полягає у тому, що методи виявлення періоду основного тону засновані на припущенні, що сам процес мовоутворення є лінійним, а мовні сигнали є локально стаціонарними. Вибір алгоритму для оцінки періоду основного тону завжди полягає у знаход-

женні компромісу між часом і роздільною здатністю за частотою, робастністю, затримкою й обчислювальною складністю. Метою даної роботи є розробка методу оцінки періоду основного тону на основі емпіричного вейвлет перетворення. Метод побудови сімейства адаптованих вейвлетів полягає у припущенні, що фільтри залежать від розташування інформації в спектрі аналізованого сигналу. Емпіричні вейвлети визначаються як смугові фільтри на кожному відрізьку мовного сигналу. Для визначення періоду основного тону як ознаки розглядається миттєва частота. Оператор поділу енергії Тігера-Кайзера використовується для її виділення. У роботі приводиться порівняння даного методу з іншими алгоритмами оцінки періоду основного тону.

**Ключові слова:** період основного тону, емпіричне вейвлет перетворення, оператор поділу енергії Тігера-Кайзера, внутрішня модова функція, миттєва частота.

Imamverdiyev Y. N.<sup>1</sup>, Sukhostat L. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Head of department, Institute of Information Technology of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup>Research fellow, Institute of Information Technology of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

#### PITCH PERIOD ESTIMATION METHOD USING EMPIRICAL WAVELET TRANSFORM

Pitch period evaluation of speech signal is used in many important applications of speech technology. However, among the existing methods only some can work in case of non-linear and non-stationary signals. The main reason is that the pitch detection methods are based on the assumption that speech production process is linear. Selection of pitch period estimation algorithm is always focuses on finding a compromise between time and frequency resolution, robustness, computational complexity and time delay. The aim of this paper is to develop a new method for estimating the pitch period based on empirical wavelet transformation. Method of constructing a family of adapted wavelets assumes that the filters depend on the information location in speech spectrum of the analyzed signal. Empirical wavelets are defined as bandpass filters for each segment of the speech signal. Instantaneous frequency characteristics are considered as pitch period detection features. Teager-Kaiser energy separation operator is used for its extraction. The comparison of this method with other pitch estimation algorithms is presented.

**Keywords:** pitch period, empirical wavelet transform, operator Teager-Kaiser energy operator, intrinsic mode function, instantaneous frequency.

#### REFERENCES

1. Rabiner L., Cheng M. J., Rosenberg A. E., McGonegal C. A. A comparative performance study of several pitch detection algorithms, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1976, No. 5, pp. 399–417. DOI: 10.1109/TASSP.1976.1162846
2. Tan L. N., Alwan A. Multi-band summary correlogram-based pitch detection for noisy speech, *Speech Communication*, 2013, Vol. 55, No. 78, pp. 841–856. DOI: 10.1016/j.specom.2013.03.001
3. Ba H., Yang N., Demirkol I., Heinzelman W. BaNa: a hybrid approach for noise resilient pitch detection, *IEEE Statistical Signal Processing Workshop*, 2012, pp. 369–372. DOI: 10.1109/SSP.2012.6319706
4. De Cheveigne A., Kawahara H. Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, Vol. 111, No. 4, pp. 1917–1930. DOI: 10.1121/1.1458024
5. Kasi K., Zahorian S. A. Yet another algorithm for pitch tracking, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal*, Vol. 1, 2002, pp. 361–364. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.5743729
6. Camacho A. SWIPE: a sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music: thesis ... doctor of philosophy. Florida, University of Florida, 2007.
7. Gonzalez S., Brookes M. PEFAC – A Pitch Estimation Algorithm Robust to High Levels of Noise, *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 2011, Vol. 22, No. 2, pp. 518–530. DOI: 10.1109/TASLP.2013.2295918
8. Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal, *Proceedings of the IEEE*, 1992, Vol. 80, No. 4, pp. 520–538. DOI: 10.1109/5.135376
9. Maragos P., Kaiser J. F., Quatieri T. F. On amplitude and frequency demodulation using energy operators, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, Vol. 41, No. 4, pp. 1532–1550. DOI: 10.1109/78.212729
10. Abe T., Kobayashi T., Imai S. Harmonics tracking and pitch extraction based on instantaneous frequency, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1995, Vol. 1, pp. 756–759. DOI: 10.1109/ICASSP.1995.479804
11. Abe T., Honda M. /Sinusoidal model based on instantaneous frequency attractors, *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 2006, Vol. 14, No. 4, pp. 1292–1300. DOI: 10.1109/TSA.2005.858545
12. Azarov E., Petrovsky A., Parfieniuk M. Estimation of the instantaneous harmonic parameters of speech, *Proceedings of the European Signal Processing Conference*, 2008.
13. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. L., Shih H. H., Zheng Q., Yen N. C., Tung C. C., Liu H. H. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, Vol. 454, No. 1971, P. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193
14. Gilles J. Empirical Wavelet Transform, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, Vol. 61, No. 16, pp. 3999–4010. DOI: 10.1109/TSP.2013.2265222
15. Vakman D. On the analytic signal, the Teager-Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, Vol. 44, No. 4, pp. 791–797. DOI: 10.1109/78.492532
16. Chu W., Alwan A. Reducing f0 frame error of f0 tracking algorithms under noisy conditions with an unvoiced/voiced classification frontend, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2009, pp. 3969–3972. DOI: 10.1109/icassp.2009.4960497
17. Varga A., Steeneken H. J. Assessment for automatic speech recognition: II. Noisex-92: a database and an experiment to study the effect of additive noise on speech recognition systems, *Speech Communication*, 1993, Vol. 12, No. 3, pp. 247–251. DOI: 10.1016/0167-6393(93)90095-3
18. Jaffard S., Meyer Y., Ryan R. D. Wavelets: Tools for Science and Technology, *Philadelphia: SIAM*, 2001, 256 p. DOI: 10.1063/1.1485591
19. Malvar H. S. Lapped transforms for efficient transform/subband coding, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1990, Vol. 38, No. 6, pp. 969–978. DOI: 10.1109/29.56057
20. Meyer F. G., Coifman R. R. Brushlets: A tool for directional image analysis and image compression, *Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1997, Vol. 4, No. 2, pp. 147–187. DOI: 10.1006/acha.1997.0208
21. Daubechies I., Lu J., Wu H.-T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool, *Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2011, Vol. 30, No. 2, pp. 243–261. DOI: 10.1016/j.acha.2010.08.002
22. Drugman T., Alwan A. Joint robust voicing detection and pitch estimation based on residual harmonics, *Proceedings of Interspeech*, 2011, pp. 1973–1976.
23. Azarov E., Vashkevich M., Petrovsky A. Instantaneous pitch estimation based on RAPT framework, *Proceedings of the European Signal Processing Conference*, 2012, pp. 2787–2791.
24. Empirical Wavelet Transforms [Electronic resource], 2013, Access mode: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42141-empirical-wavelet-transforms>

<sup>1</sup>Аспірант кафедри системного програмування Хмельницького національного університету, Хмельницький, Україна  
<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник, доцент кафедри системного програмування Хмельницького національного університету, Хмельницький, Україна

## МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ УСПІШНОСТІ ПРОГРАМНИХ ПРОЕКТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРОГНОЗОВАНИХ ЗНАЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Вирішено завдання розроблення методологічного забезпечення для прогнозування успішності програмних проектів. Об'єктом дослідження є процес прогнозування успішності програмних проектів на ранніх етапах життєвого циклу. Предметом дослідження є метод прогнозування успішності програмних проектів на основі аналізу прогнозованих значень характеристик програмного забезпечення. Мета роботи – підвищити достовірність вибору програмних проектів та успішність програмних проектів. Запропоновано інтелектуальний метод прогнозування успішності програмних проектів, який дозволяє обчислювати інтегративні показники успішності різних програмних проектів на основі прогнозованих (штучною нейронною мережею) значень характеристик розроблюваного за проектом програмного забезпечення, а також обчислювати ймовірності успішності цих програмних проектів. Метод відрізняється від відомих тим, що дозволяє прогнозувати успішність програмних проектів, порівнювати програмні проекти комплексно за основними характеристиками проекту і розроблюваного програмного забезпечення та прогнозованим значенням ймовірності успішності (а не тільки за вартістю та тривалістю, як відбувається наразі) та виконувати обґрунтований вибір програмного проекту замовником і розробником для подальшої реалізації. Проведені експерименти з дослідження роботоздатності методу. Результати експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, програмний проект, специфікація вимог до програмного забезпечення, інтегративний показник проекту, успішність програмного проекту.

### НОМЕНКЛАТУРА

ПЗ – програмне забезпечення;  
ЖЦ ПЗ – життєвий цикл програмного забезпечення;  
ШНМ – штучна нейронна мережа;  
 $C_p$  – кросплатформність програмного забезпечення;  
 $C_s$  – вартість програмного забезпечення;  
 $C_x$  – складність програмного забезпечення;  
 $D_{sp}$  – тривалість програмного проекту;  
 $E_{cef}$  – економічна ефективність програмного забезпечення;  
 $I_{rip_{Max_{best}}}$  – максимальне значення інтегративного показника успішності програмного проекту за характеристиками ПЗ, які вимагають максимізації;  
 $I_{rip_{Max_{Sp}}}$  – інтегративний показник успішності програмного проекту за характеристиками ПЗ, які вимагають максимізації;  
 $I_{rip_{Min_{bad}}}$  – максимальне значення інтегративного показника успішності програмного проекту за характеристиками ПЗ, які вимагають мінімізації;  
 $I_{rip_{Min_{Sp}}}$  – інтегративний показник успішності програмного проекту за характеристиками ПЗ, які вимагають мінімізації;  
 $P_{Max_{Sp}}$  – ймовірність успішності програмного проекту за інтегративним показником  $I_{rip_{Max_{Sp}}}$  – успішності програмного проекту;  
 $P_{Min_{Sp}}$  – ймовірність успішності програмного проекту за інтегративним показником  $I_{rip_{Min_{Sp}}}$  – успішності програмного проекту;  
 $P_{Sp}$  – ймовірність успішності програмного проекту;  
 $Q_s$  – якість програмного забезпечення;

$R_1$  – множина показників розділу 1 специфікації вимог до ПЗ;  
 $R_2$  – множина показників розділу 2 специфікації вимог до ПЗ;  
 $R_3$  – множина показників розділу 3 специфікації вимог до ПЗ;  
 $R_4$  – множина показників розділу 4 специфікації вимог до ПЗ;  
 $R_s$  – надійність програмного забезпечення;  
 $SCH_{Max_{Sp}}$  – множина характеристик програмного проекту та розроблюваного ПЗ, збільшення значень яких викликають збільшення успішності програмного проекту;  
 $SCH_{Min_{Sp}}$  – множина характеристик програмного проекту та розроблюваного ПЗ, збільшення значень яких викликають зменшення успішності програмного проекту;  
 $SCH_{Sp}$  – множина основних характеристик програмного проекту;  
 $Slcm$  – тип моделі життєвого циклу програмного забезпечення;  
 $Sp$  – програмний проект;  
 $SRS$  – специфікація вимог до ПЗ;  
 $Ub$  – зручність використання програмного забезпечення.

### ВСТУП

Програмний проект – це комплекс взаємозв'язаних заходів, спрямованих на досягнення поставлених задач з чітко визначеними цілями протягом заданого періоду часу та при встановленому бюджеті [1]. Наразі великі програмні проекти часто виконуються з відставанням від графіка або з перевищенням кошторису витрат, розроблений продукт часто не має необхідних функціональних можливостей [2].



Сьогодні, коли кількість високобюджетних програмних проектів стрімко зростає, дуже важливим і актуальним є вміння оцінити можливу успішність програмного проекту на ранніх етапах життєвого циклу, а також допомогти замовнику і розробнику обрати ймовірно успішний програмний проект з множини альтернативних програмних проектів.

Статистика успішності програмних проектів за даними The Standish Group International (Chaos reports) [3] наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Успішність програмних проектів

Категорія проекту	1994	2000	2006	2012
Успішні, %	16	28	35	39
Проблемні, %	53	49	46	43
Провальні, %	31	23	19	18

Аналіз даних табл. 1 дав можливість побачити, що частка проблемних проектів є досить сталою величиною і складає мінімум 43 %. При цьому лише невелика кількість (максимум 39 % за 1994–2012 роки) проектів має необхідні функціональні можливості при існуючих обмеженнях за вартістю та терміном [3].

Програмні проекти часто зазнають невдач через помилки на ранніх етапах життєвого циклу ПЗ, а саме [2]: 1) неадекватне формулювання вимог; 2) невдале проектування або неефективне планування; 3) невірне розуміння або недостатній аналіз специфікації; 4) нереалістичні проектні плани; 5) невірне обрану модель життєвого циклу.

Помилки формулювання вимог та проектування складають 25–55% всіх помилок, причому чим більший обсяг ПЗ, тим більше помилок вноситься саме на ранніх етапах [3]. Слід врахувати й той факт, що вартість виправлення помилки проектування в два-чотири рази вища вартості виправлення помилки конструювання [3].

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай програмний проект задано специфікацією вимог до ПЗ [4] у наступному формалізованому вигляді [5]:  $SRS = \langle R1, R2, R3, R4 \rangle$ , де  $R1$  – множина показників розділу 1 специфікації вимог до ПЗ,  $R2$  – множина показників розділу 2,  $R3$  – множина показників розділу 3,  $R4$  – множина показників розділу 4.

Тоді задача оцінювання успішності програмного проекту полягає у:

1) прогнозуванні (на основі множин показників специфікації  $R1, R2, R3, R4$ ) характеристик програмного проекту та розроблюваного за ним ПЗ – множини значень  $SCH_{Sp} = \{Cs, Dsp, Ecef, Cp, Cx, Ub, Qs, Rs, Slem\}$ ;

2) інтерпретації отриманих відносних значень характеристик проекту та ПЗ-критеріями для такої інтерпретації є інтегративні показники успішності  $Irip_{Min_{Sp}}$  (за характеристиками ПЗ  $SCH_{Min_{Sp}} = \{Cs, Dsp, Cx\}$ ,  $SCH_{Min_{Sp}} \subset SCH_{Sp}$ ) та  $Irip_{Max_{Sp}}$  (за характеристиками ПЗ  $SCH_{Max_{Sp}} = \{Ecef, Ub, Cp, Qs, Rs\}$ ,  $SCH_{Max_{Sp}} \subset SCH_{Sp}$ );

3) оцінюванні ймовірності успішності програмного проекту  $P_{Sp}$ -критеріями є ймовірність успішності  $P_{Min_{Sp}}$  за інтегративним показником  $Irip_{Min_{Sp}}$  та ймовірність успішності  $P_{Max_{Sp}}$  за інтегративним показником  $Irip_{Max_{Sp}}$ .

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз основних характеристик ПЗ [6–8] зробив очевидним факт, що існуючі математичні інструменти та методи визначення основних характеристик ПЗ не придатні для оцінки їх значень на ранніх етапах життєвого циклу (на етапах формулювання вимог та проектування), оскільки вони орієнтовані на готовий програмний код, а не на наявну на етапі проектування специфікацію вимог до програмного забезпечення. Саме аналіз специфікації вимог до ПЗ може надати різнопланову інформацію для подальшого розрахунку тривалості програмного проекту, вартості, кросплатформності, ефективності, складності, якості та надійності розроблюваного за проектом ПЗ, а також для вибору прийнятної моделі життєвого циклу ПЗ.

Аналіз специфікації вимог до ПЗ [6, 9, 10] показав, що вже на етапі проектування, коли розробник надав готову специфікацію, аналіз її вимог дозволяє сформувати множини кількісних та якісних показників, на основі яких замовник і розробник можуть отримати прогнозовані кількісні значення характеристик розроблюваного за програмним проектом ПЗ, які дозволяють отримати прогноз успішності даного програмного проекту.

З проведеного аналізу [6, 11, 12] відомих автоматизованих засобів аналізу специфікацій та оцінювання характеристик програмного забезпечення зрозуміло, що всі вони призначені для роботи з вимогами та специфікаціями, причому деякі з них спрямовані на контроль за реалізацією вимог, але жоден з них не визначає прогнозованих значень характеристик ПЗ за специфікацією. Очевидно тоді, що існуючі засоби не прийнятні для кількісного оцінювання характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій.

## 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

На характеристики тривалості програмного проекту, типу моделі життєвого циклу, вартості, економічної ефективності, складності, зручності використання, кросплатформності, якості та надійності ПЗ впливають певні показники специфікації [5], але невідомі функції (формули, залежності), за якими можна обчислити значення тієї чи іншої характеристики ПЗ на основі множини впливових показників специфікації – всі наявні формули та методики оцінювання характеристик ПЗ орієнтовані на готовий програмний код, а не на специфікацію вимог.

Теорема Хехт-Нільсена [13] доводить можливість розв'язку задачі представлення багатовимірної функції довільного вигляду на ШНМ, тому для реалізації невідомих функцій залежності характеристик ПЗ від показників специфікації використовуватимемо саме ШНМ. Важкоформалізованою задачею прогнозування характеристик ПЗ є визначення ваг та взаємовпливу показників специфікації в межах кожної характеристики ПЗ. Ця задача може бути вирішена за допомогою використання навченої ШНМ.

У [14] розроблено ШНМ, яка опрацьовує показники специфікації, здійснює апроксимацію показників та надає прогнозовані кількісні оцінки характеристик ПЗ, на основі яких можна зробити прогноз успішності програмного проекту та здійснити вибір моделі життєвого циклу. Концепцію прогнозування основних характеристик ПЗ на основі аналізу специфікації вимог із використанням ШНМ представлено на рис. 1.

Отже, за рисунком 1, ШНМ прогнозування характеристик програмного забезпечення на основі аналізу специфікацій видає множину  $SCH_{Sp} = \{Cs, Dsp, Ecef, Cp, Cx, Ub, Qs, Rs, Slcm\}$  значень основних характеристик програмного проекту  $Sp$  та розроблюваного за ним ПЗ. ШНМ прогнозування характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій навчена так, що всі значення характеристик ПЗ (результуючі дані ШНМ) належатимуть інтервалу  $(0;1]$ . На основі отриманих з ШНМ значень основних характеристик ПЗ замовнику складно оцінити успішність проекту, оскільки складно вірно інтерпретувати одержані значення характеристик. Крім цього, успішність програмного проекту та розроблюваного за ним ПЗ слід оцінювати, приймаючи до уваги всі отримані значення характеристик в комплексі та враховуючи які значення характеристик викликають зменшення успішності програмного проекту, а які значення – її збільшення. Така задача є ще більш важкою та незрозумілою для замовника. Тому варто визначити метод, який допомагатиме замовнику оцінити успішність програмного проекту, інтерпретуючи та інтегруючи одержані значення характеристик ПЗ.

Збільшення значень деяких характеристик  $SCH_{Min_{Sp}} = \{Cs, Dsp, Cx\}$  ( $SCH_{Min_{Sp}} \subset SCH_{Sp}$ ) викликають зменшення успішності програмного проекту. Тоді значення характеристик множини  $SCH_{Min_{Sp}}$ , близькі до 0, будуть вказувати на високу успішність програмного

проекту. Збільшення значень інших характеристик  $SCH_{Max_{Sp}} = \{Ecef, Ub, Cp, Qs, Rs\}$  ( $SCH_{Max_{Sp}} \subset SCH_{Sp}$ ) викликають збільшення успішності програмного проекту. Тоді значення характеристик множини  $SCH_{Max_{Sp}}$ , близькі до 1, вказуватимуть на високу успішність програмного проекту.

Визначення 1. Інтегративний показник успішності програмного проекту  $Sp$  – це кількісний показник успішності програмного проекту на основі множини значень прогнозованих характеристик  $SCH_{Sp} = \{Cs, Dsp, Ecef, Cp, Cx, Ub, Qs, Rs, Slcm\}$ .

Оскільки, як показано вище, значення різних характеристик по-різному впливають на успішність програмного проекту, то введемо два інтегративні показники успішності.

Визначення 2. Інтегративний показник успішності  $Irup_{Min_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$  – це кількісний показник успішності програмного проекту на основі множини значень прогнозованих характеристик  $SCH_{Min_{Sp}} = \{Cs, Dsp, Cx\}$ .

Визначення 3. Інтегративний показник успішності  $Irup_{Max_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$  – це кількісний показник успішності програмного проекту на основі множини значень прогнозованих характеристик  $SCH_{Max_{Sp}} = \{Ecef, Ub, Cp, Qs, Rs\}$ .

Для отримання  $Irup_{Min_{Sp}}$  проекту  $Sp$  створимо графік в системі координат, яка має три основних вісі (для трьох характеристик –  $Cs \in (0;1]$ ,  $Dsp \in (0;1]$ ,  $Cx \in (0;1]$ ) – рис. 2. Для отримання  $Irup_{Max_{Sp}}$  проекту  $Sp$  створимо графік в системі координат, яка має п'ять основних осей (для п'яти характеристик –  $Ecef \in (0;1]$ ,  $Ub \in (0;1]$ ,  $Cp \in (0;1]$ ,  $Qs \in (0;1]$ ,  $Rs \in (0;1]$ ) – рис. 3.

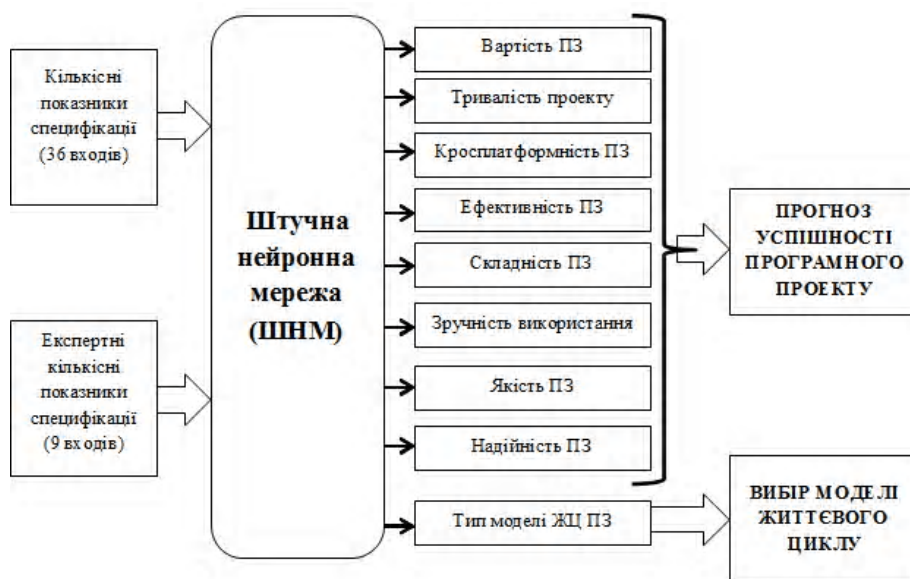


Рисунок 1 – Концепція прогнозування характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій із використанням нейромережних інформаційних технологій

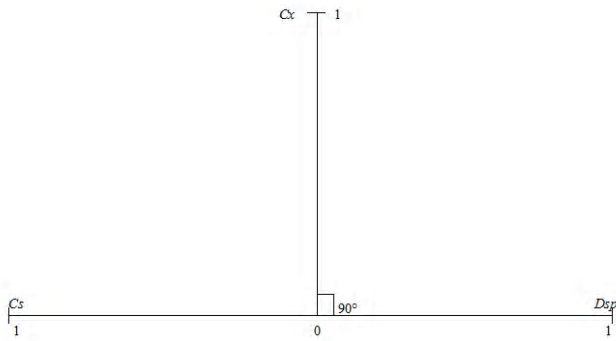


Рисунок 2 – Система координат для  $Irip_{Min_{Sp}}$

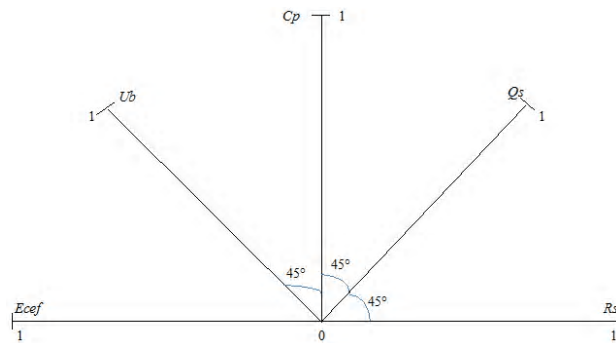


Рисунок 3 – Система координат для  $Irip_{Max_{Sp}}$

Нехай ШНМ прогнозування характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій надає наступні значення характеристик для  $Sp$ :  $Cs_{ANN} \in (0;1]$ ,  $Dsp_{ANN} \in (0;1]$ ,  $Cx_{ANN} \in (0;1]$ ;  $Ecef_{ANN} \in (0;1]$ ,  $Ub_{ANN} \in (0;1]$ ,  $Cp_{ANN} \in (0;1]$ ,  $Qs_{ANN} \in (0;1]$ ,  $Rs_{ANN} \in (0;1]$ . Відкладемо тоді отримані значення у відповідних системах координат і отримаємо наступні графічні представлення  $Irip_{Min_{Sp}}$  (рис. 4) та  $Irip_{Max_{Sp}}$  (рис. 5) проекту  $Sp$ .

Інтегративним показником успішності  $Irip_{Min_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$  є площа виділеного суцільною жирною лінією на рис. 4 трикутника  $Cs_{ANN} Dsp_{ANN} Cx_{ANN}$ , а інтегративним показником успішності  $Irip_{Max_{Sp}}$  проекту  $Sp$  є площа виділеного суцільною жирною лінією на рис. 5 п'ятикутника  $Ecef_{ANN} Ub_{ANN} Cp_{ANN} Qs_{ANN} Rs_{ANN}$ .

Тоді для визначення  $Irip_{Min_{Sp}}$  проекту  $Sp$  (визначення площі трикутника  $Cs_{ANN} Dsp_{ANN} Cx_{ANN}$ ) застосуємо формулу площі трикутника за відомою стороною та висотою:

$$Irip_{Min_{Sp}} = \frac{1}{2} \cdot (Cs_{ANN} + Dsp_{ANN}) \cdot Cx_{ANN} \quad (1)$$

Визначальною характеристикою щодо прогнозування успішності програмного проекту (серед характеристик тривалості проекту, вартості та складності ПЗ) є характеристика складності, оскільки постійне зростання складності функцій ПЗ неминуче призводить до збільшення трудомісткості створення програмних проектів, кількості помилок у програмному коді, а також до зменшення успішності програмних проектів [3]. Тому система координат для  $Irip_{Min_{Sp}}$  (рис. 2) побудована таким чином, що при визначенні  $Irip_{Min_{Sp}}$  як площі трикутни-

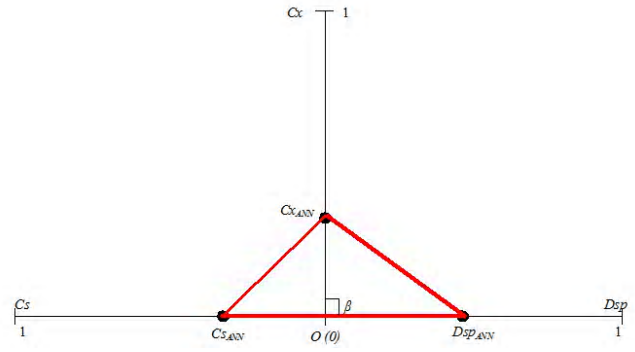


Рисунок 4 – Графічне подання  $Irip_{Min_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$

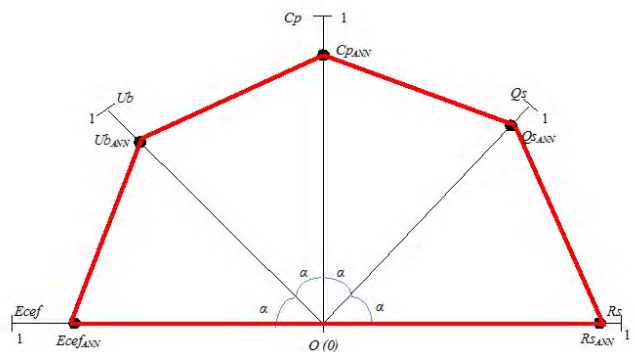


Рисунок 5 – Графічне подання  $Irip_{Max_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$

ка  $Cs_{ANN} Dsp_{ANN} Cx_{ANN}$  саме характеристика складності є визначальною і не підлягає компенсації іншими характеристиками.

Для визначення  $Irip_{Max_{Sp}}$  проекту  $Sp$  (площі п'ятикутника  $Ecef_{ANN} Ub_{ANN} Cp_{ANN} Qs_{ANN} Rs_{ANN}$ ) розіб'ємо п'ятикутник на чотири трикутники –  $Ecef_{ANN} OUb_{ANN}$ ,  $Ub_{ANN} OCp_{ANN}$ ,  $Cp_{ANN} OQs_{ANN}$ ,  $Qs_{ANN} ORs_{ANN}$  і знайдемо площу для кожного з трикутників, застосовуючи формулу площі трикутника за відомими двома сторонами та кутом між ними:

$$\begin{aligned} Irip_{Max_{Sp}} &= S_{Ecef_{ANN} OUb_{ANN}} + S_{Ub_{ANN} OCp_{ANN}} + \\ &+ S_{Cp_{ANN} OQs_{ANN}} + S_{Qs_{ANN} ORs_{ANN}} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot Ecef_{ANN} \cdot Ub_{ANN} \cdot \sin 45^\circ + \frac{1}{2} \cdot Ub_{ANN} \cdot Cp_{ANN} \cdot \sin 45^\circ + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot Cp_{ANN} \cdot Qs_{ANN} \cdot \sin 45^\circ + \frac{1}{2} \cdot Qs_{ANN} \cdot Rs_{ANN} \cdot \sin 45^\circ = \\ &= 0,3536 \cdot (Ecef_{ANN} \cdot Ub_{ANN} + Ub_{ANN} \cdot Cp_{ANN} + \\ &+ Cp_{ANN} \cdot Qs_{ANN} + Qs_{ANN} \cdot Rs_{ANN}). \end{aligned} \quad (2)$$

Інтегративні показники успішності програмного проекту дають змогу визначити ймовірність його успішності.

Для визначення ймовірності успішності програмного проекту за інтегративним показником успішності  $Irip_{Min_{Sp}}$  слід знайти максимальне значення інтегративного показника успішності  $Irip_{Min_{bad}}$  (площу максимально можливого трикутника  $Cs Dsp Cx$ , окресленого пунктирною лінією на рис. 6).

Оскільки ШНМ прогнозування характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій навчена так, що максимальні значення характеристик вартості, тривалості та складності, отримані з неї, становлять 1, то:

$$Irup_{Min_{bad}} = \frac{1}{2} \cdot (Cs + Dsp) \cdot Cx = \frac{1}{2} \cdot (1 + 1) \cdot 1 = 1. \quad (3)$$

Для визначення ймовірності успішності програмного проекту за інтегративним показником успішності  $Irup_{Max_{Sp}}$  слід знайти максимальне значення інтегративного показника успішності  $Irup_{Max_{best}}$  (площу максимально можливого п'ятикутника  $EcefUbCpQsRs$ , окресленого пунктирною лінією на рис. 7).

Оскільки ШНМ прогнозування характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій навчена так, що максимальні значення характеристик економічної ефективності, зручності використання, кросплатформності, якості та надійності, отримані з неї, становлять 1, то:

$$\begin{aligned} Irup_{Max_{best}} &= 0,3536 \cdot (Ecef_{ANN} \cdot Ub_{ANN} + Ub_{ANN} \cdot Cp_{ANN} + \\ &+ Cp_{ANN} \cdot Qs_{ANN} + Qs_{ANN} \cdot Rs_{ANN}) = \\ &= 0,3536 \cdot (1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1) = 1,4144. \end{aligned} \quad (4)$$

Оскільки характеристики вартості, тривалості та складності вимагають мінімізації, то максимальне значення  $Irup_{Min_{Sp}}$ , яке складає  $Irup_{Min_{bad}} = 1$  (згідно формули (3)), – це найгірше значення  $Irup_{Min_{Sp}}$  програмного проекту.

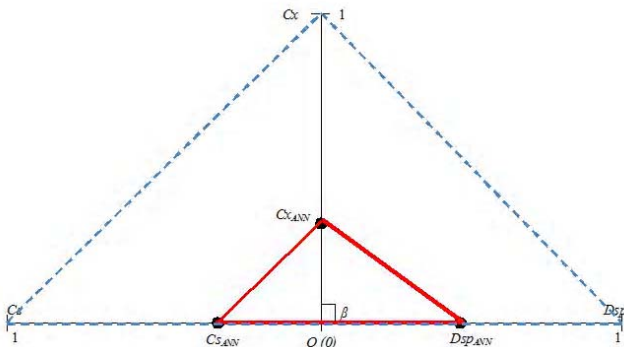


Рисунок 6 – Графічне подання інтегративного показника успішності  $Irup_{Min_{Sp}}$  та максимального значення інтегративного показника успішності  $Irup_{Min_{bad}}$

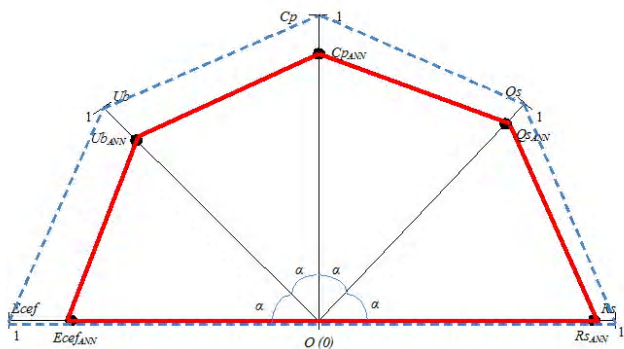


Рисунок 7 – Графічне подання інтегративного показника успішності  $Irup_{Max_{Sp}}$  та максимального значення інтегративного показника успішності  $Irup_{Max_{best}}$

Тоді за  $Irup_{Min_{Sp}}$  ймовірність успішності  $P_{Min_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$  складає:

$$P_{Min_{Sp}} = 1 - \frac{Irup_{Min_{Sp}}}{Irup_{Min_{bad}}} = 1 - \frac{Irup_{Min_{Sp}}}{1} = 1 - Irup_{Min_{Sp}}. \quad (5)$$

Характеристики економічної ефективності, зручності використання, кросплатформності, якості та надійності навпаки вимагають максимізації, тому максимальне значення  $Irup_{Max_{Sp}}$ , яке складає  $Irup_{Max_{best}} = 1,4144$  (згідно формули (4)), – це найкраще значення  $Irup_{Max_{Sp}}$  програмного проекту.

Тоді за  $Irup_{Max_{Sp}}$  ймовірність успішності  $P_{Max_{Sp}}$  програмного проекту  $Sp$  складає:

$$P_{Max_{Sp}} = \frac{Irup_{Max_{Sp}}}{Irup_{Max_{best}}} = \frac{Irup_{Max_{Sp}}}{1,4144} = 0,7070 \cdot Irup_{Max_{Sp}}. \quad (6)$$

Оскільки  $Irup_{Min_{Sp}}$  проекту  $Sp$ , на основі якого обчислюється  $P_{Min_{Sp}}$  проекту, залежить від трьох основних характеристик ПЗ, а  $Irup_{Max_{Sp}}$  проекту  $Sp$ , на основі якого обчислюється  $P_{Max_{Sp}}$  проекту, залежить від п'яти основних характеристик ПЗ, тоді усереднене значення ймовірності успішності  $P_{Sp}$  програмного проекту  $Sp$  на основі двох отриманих значень  $P_{Min_{Sp}}$  та  $P_{Max_{Sp}}$  обчислюється за формулою:

$$P_{Sp} = \frac{3 \cdot P_{Min_{Sp}} + 5 \cdot P_{Max_{Sp}}}{8}. \quad (7)$$

Формалізація даного методу прогнозування успішності програмного забезпечення на етапі проектування матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} SCH_{Sp} = \{SCH_{Min_{Sp}}, SCH_{Max_{Sp}}\} &\Rightarrow \begin{cases} Irup_{Min_{Sp}} = f_1(SCH_{Min_{Sp}}) \\ Irup_{Max_{Sp}} = f_2(SCH_{Max_{Sp}}) \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} P_{Min_{Sp}} = f_3(Irup_{Min_{Sp}}, Irup_{Min_{bad}}) \\ P_{Max_{Sp}} = f_4(Irup_{Max_{Sp}}, Irup_{Max_{best}}) \end{cases} &\Rightarrow P_{Sp} = f_5(P_{Min_{Sp}}, P_{Max_{Sp}}). \end{aligned} \quad (8)$$

де функція  $f_1()$  обчислюється за формулою (1), функція  $f_2()$  – за формулою (2), функція  $f_3()$  – за формулою (5), функція  $f_4()$  – за формулою (6), функція  $f_5()$  – за формулою (7); показники  $Irup_{Min_{bad}}$  та  $Irup_{Max_{best}}$  обчислюються за формулами (3) та (4) відповідно.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо експериментальне дослідження методу прогнозування успішності проектів. Для цього розглянемо чотири альтернативні програмні проекти, розроблені різними софтверними компаніями для вирішення однієї задачі. Нехай для розглянутих чотирьох альтернативних проектів було отримано наступні прогнозовані значення характеристик ПЗ – таблиця 2.

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Згідно методу прогнозування успішності програмних проєктів (формула (8)), обчислимо  $I_{rip_{Min_{Sp}}}$  і  $I_{rip_{Max_{Sp}}}$  для чотирьох альтернативних програмних проєктів, а також  $P_{Min_{Sp}}$ ,  $P_{Max_{Sp}}$ ,  $P_{Sp}$  цих проєктів. Результати обчислень представлені у таблиці 3.

Таблиця 2 – Прогнозовані значення характеристик ПЗ для чотирьох альтернативних програмних проєктів

Характеристика	Проект1	Проект2	Проект3	Проект4
l	2	3	4	5
$C_s$	0,2	0,78	0,61	0,41
$D_{sp}$	0,1	0,81	0,59	0,43
$C_x$	0,15	0,69	0,63	0,38
$E_{cef}$	0,8	0,13	0,52	0,52
$U_b$	0,85	0,15	0,5	0,56
l	2	3	4	5
$C_p$	0,87	0,21	0,47	0,57
$Q_s$	0,89	0,17	0,49	0,61
$R_s$	0,91	0,24	0,41	0,49

Таблиця 3 – Інтегративні показники та ймовірності успішності чотирьох альтернативних програмних проєктів

Величина успішності	Проект1	Проект2	Проект3	Проект4
$I_{rip_{Min_{Sp}}}$	0,0225	0,5486	0,3780	0,1596
$I_{rip_{Max_{Sp}}}$	1,0621	0,0451	0,3275	0,4445
$P_{Min_{Sp}}$	0,9775 (97,75 %)	0,4514 (45,14 %)	0,6220 (62,20 %)	0,8404 (84,04 %)
$P_{Max_{Sp}}$	0,7509 (75,09 %)	0,0319 (3,19 %)	0,2316 (23,16 %)	0,3143 (31,43 %)
$P_{Sp}$	0,8359 (83,59 %)	0,1892 (18,92 %)	0,3780 (37,80 %)	0,5116 (51,16 %)

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Так, за результатами, наведеними у таблиці 3, проєкт1 має найбільшу ймовірність успішності (майже 84%), а проєкт2 – найменшу ймовірність успішності (близько 19 %). Враховуючи отримані результати, замовнику для вирішення поставленої задачі пропонується обрати проєкт1, оскільки саме він має найкращі характеристики та найвищу ймовірну успішність.

Наразі вибір програмного проєкту як замовником, так і розробником здійснюється на основі лише прогнозованих у специфікації характеристик вартості, тривалості та власної інтуїції. Але не завжди розробнику вдається вірно спрогнозувати орієнтовану вартість та тривалість при розробленні специфікації вимог до ПЗ. Як було доведено у [6], вартість і тривалість слід оцінювати комплексно з врахуванням всіх впливових вимог (показників) специфікації.

Прогнозовані в специфікації значення вартості та тривалості чотирьох розглянутих програмних проєктів наведено у таблиці 4.

Таблиця 4 – Прогнозовані в специфікації значення вартості та тривалості для чотирьох альтернативних програмних проєктів

Характеристика	Проект1	Проект2	Проект3	Проект4
Прогнозована вартість, вказана у специфікації	87000 грн.	89000 грн.	85000 грн.	86500 грн.
Прогнозована тривалість, вказана у специфікації	200 роб.днів	210 роб.днів	198 роб.днів	203 роб.днів

Характеристики програмних проєктів з таблиці 4 свідчать, що для всіх чотирьох програмних проєктів у специфікаціях зазначено приблизно однакові прогнозовані вартість та тривалість розроблення, але в таблиці 2 показано, що вони мають суттєво різні відносні оцінки всіх характеристик ПЗ, в тому числі вартості та тривалості, обчислені комплексно, з врахуванням всіх значущих показників специфікації. Так, відносна вартість коливається в межах від 0,2 (для проєкту1) до 0,78 (для проєкту2); відносна тривалість – в межах від 0,1 (для проєкту1) до 0,81 (для проєкту2). Отже, якщо оцінювати вартість та тривалість, враховуючи всі значущі показники специфікації, то очевидно, що їх значення не будуть однаковими для чотирьох розглянутих програмних проєктів. Тому на основі лише прогнозованих у специфікації вартості та часу розроблення як замовник, так і розробник може прийняти хибний висновок щодо вибору програмного проєкту.

Крім цього, успішність програмних проєктів залежить не лише від вартості та тривалості, але й від решти основних характеристик ПЗ – складності, ефективності, зручності використання, кросплатформності, якості та надійності, які в явному кількісному вигляді взагалі не зазначені у специфікації вимог до ПЗ. Тому саме оцінки всіх основних характеристик, надані ШНМ, та опрацьовані згідно запропонованого методу, допоможуть зробити вірний вибір і реалізувати проєкт, який має кращі значення характеристик та найвищу ймовірність успішності (серед розглянутих чотирьох проєктів – це проєкт1).

Отже, результати роботи запропонованого методу дають можливість замовнику обрати програмний проєкт з точки зору його основних характеристик та прогнозованої успішності.

## ВИСНОВКИ

Вперше запропоновано метод прогнозування успішності програмних проєктів на основі аналізу прогнозованих значень характеристик ПЗ, який базується на опрацьованні вихідних функціоналів нейромережної моделі процесу прогнозування характеристик ПЗ, які відповідають кількісним значенням основних характеристик ПЗ і дають можливість оцінити сумарний вплив показників специфікації на характеристики розроблюваного за специфікацією ПЗ. Опрацьовання вихідних функціоналів полягає у обчисленні двох інтегративних показників успішності (за характеристиками ПЗ, які вимагають мінімізації, та за характеристиками ПЗ, які вимагають максимізації) для будь-якого описаного специфікацією програмного проєкту, на основі яких обчислюються значення ймовірностей успішності програмного проєкту за обома інтегративними показниками та усередненої ймовірності успішності програмного проєкту.

Метод відрізняється від відомих тим, що дозволяє прогнозувати успішність програмних проєктів та порівнювати програмні проєкти комплексно – за основними ха-

ракетриками проекту і розроблюваного ПЗ та прогнозованими значеннями ймовірності успішності (а не тільки за вартістю та тривалістю, як відбувається наразі).

Практичне значення розробленого методу полягає у його використанні для виконання обґрунтованого вибору програмного проекту замовником і розробником для подальшої реалізації.

Перспективою для подальших досліджень авторів є підвищення достовірності роботи даного методу за рахунок підвищення достовірності роботи ШНМ прогнозування основних характеристик ПЗ на основі аналізу специфікацій, для чого необхідним є збір великої кількості показників та значень характеристик ПЗ зі специфікацій вже розроблених проектів для побудови навчальної вибірки ШНМ (для достовірної на 100% роботи ШНМ необхідний об'єм навчальної вибірки становить 20250 векторів).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Futrell R. T. Quality software project management / R. T. Futrell, D. F. Shafer, L. I. Shafer. – New York : Prentice Hall PTR, 2003. – 1136 p.
2. Pomorova O. Intelligent assessment and prediction of software characteristics at the design stage / O. Pomorova, T. Hovorushchenko // American journal of software engineering and applications (AJSEA). – 2013. – Vol. 2. – P. 25–31.
3. CHAOS Manifesto: think big, act small, 2013 [Electronic resource] – Access mode: <http://www.versionone.com/assets/img/files/CHAOSManifesto2013.pdf>
4. IEEE 830-1998. Recommended practice for software requirements specifications. – New York : IEEE, 1998 – 31 p.
5. Говорущенко Т. О. Математичне моделювання специфікації вимог та характеристик програмного забезпечення / Т. О. Говорущенко, А. В. Красій // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2014. – № 5. – С. 34–39.
6. Говорущенко Т. О. Визначення характеристик та вибір моделі життєвого циклу програмного забезпечення на основі аналізу специфікацій / Т. О. Говорущенко, А. В. Красій // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2013. – № 6. – С. 201–208.
7. Maedche A. Software for people: fundamentals, trends and best practices (Management for professionals) / A. Maedche, A. Botzenhardt, L. Neer. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 293 p.
8. Jones C. The economics of software quality / C. Jones, O. Bonsignour. – Boston : Pearson Education, 2012. – 588 p.
9. Wiegers K. Software requirements: 3-rd edition / K. Wiegers, J. Beatty. – Washington : MS Press, 2013. – 640 p.
10. Wiegers K. More about software requirements: Thorny issues and practical advice / K. Wiegers. – Washington : MS Press, 2006. – 203 p.
11. Chen A. Visual models for software requirements / A. Chen, J. Beatty. – Washington : MS Press, 2012. – 444 p.
12. Open Source Requirements Management Tool [Electronic resource] – Access mode: <http://sourceforge.net/projects/osrmt/>
13. Callan R. The essence of neural networks / R. Callan. – London : Prentice Hall Europe, 2003. – 288 p.
14. Красій А. В. Моделювання процесу прогнозування характеристик програмного забезпечення на основі аналізу специфікацій / А. В. Красій // *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. – 2014. – № 2. – С. 66–76.

Стаття надійшла до редакції 09.12.2014.

Після доробки 19.12.2014.

Красій А. В.<sup>1</sup>, Говорущенко Т. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірант кафедри системного програмування Хмельницького національного університету, Хмельницький, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник, доцент кафедри системного програмування Хмельницького національного університету, Хмельницький, Україна

### МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ УСПЕШНОСТІ ПРОГРАМНИХ ПРОЕКТІВ НА ОСНОВЕ АНАЛІЗА ПРОГНОЗОВАНИХ ЗНАЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАМНОГО ОБЕСПЕЧЕННЯ

Решена задача розробки методологічного забезпечення для прогнозування успішності програмних проектів. Об'єктом дослідження являється процес прогнозування успішності програмних проектів на ранніх етапах життєвого циклу. Предметом дослідження являється метод прогнозування успішності програмних проектів на основі аналізу прогнозованих значень характеристик програмного забезпечення. Цель роботи – підвищити достовірність вибору програмних проектів та успішність програмних проектів. Представлено інтелектуальний метод прогнозування успішності програмних проектів, який дозволяє вичисляти інтегративні показники успішності різних програмних проектів на основі прогнозованих (штучної нейронної мережі) значень характеристик розроблюваного по проекту програмного забезпечення, а також вичисляти ймовірності успішності цих програмних проектів. Метод відрізняється від відомих тим, що дозволяє прогнозувати успішність програмних проектів, порівнювати програмні проекти комплексно по основним характеристикам проекту та розроблюваного програмного забезпечення і по прогнозованим значенням ймовірності успішності (а не тільки по вартості та тривалості, як відбувається наразі) і виконувати обґрунтований вибір програмного проекту замовником і розробником для подальшої реалізації. Проведено експерименти по дослідженню ефективності методу. Результати експериментів дозволяють використовувати запропонований метод на практиці.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, програмний проект, специфікація вимог до програмного забезпечення, інтегративний показник проекту, успішність програмного проекту.

Krasiy A. V.<sup>1</sup>, Hovorushchenko T. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Post-graduate student of System Programming Department of Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Associate Professor of System Programming Department of Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

### THE METHOD OF PREDICTION OF SOFTWARE PROJECTS SUCCESS BASED ON THE ANALYSIS OF PREDICTED VALUES OF SOFTWARE CHARACTERISTICS

The task of development of methodological support for predicting of the software projects success is solved. The object of research is the process of predicting of software projects success at the early lifecycle stages. The subject of the research is a method of prediction of software projects success based on the analysis of predicted values of software characteristics. The purpose of the work is to increase the accuracy of selection of software projects and to increase the success of software projects. The intelligent method of prediction of software projects success

is proposed. It provides to calculate the integrative indicators of success of various software projects based on the predicted (by artificial neural network) values of the characteristics of the software developed for the project. It also provides to calculate the probability of success of software projects. The method differs from the known methods, that provides to predict the success of software projects, compare software projects on the main characteristics of the project and the software and on the predicted value of the probability of success (and not just on the cost and duration, as is happening now), and perform the grounded choice of software project by customer and by developer for further realization. Experiments on investigations of the method operability were performed. The experimental results provide to recommend the proposed method for use in practice.

**Keywords:** software, software project, software requirements specification, integrative indicator of software project, success of software project.

## REFERENCES

1. Futrell R. T., Shafer D. F., Shafer L. I. Quality software project management. New York, Prentice Hall PTR, 2003, 1136 p.
2. Pomorova O., Hovorushchenko T. Intelligent assessment and prediction of software characteristics at the design stage, *American journal of software engineering and applications (AJSEA)*, 2013, Vol. 2, pp. 25–31.
3. CHAOS Manifesto : think big, act small, 2013 [Electronic resource]. Access mode: <http://www.versionone.com/assets/img/files/CHAOSManifesto2013.pdf>
4. IEEE 830-1998. Recommended practice for software requirements specifications. New York, IEEE, 1998, 31 p.
5. Hovorushchenko T. O., Krasiy A. V. Matematichne modeluvannya spetsifikacii vimog ta kharakteristik programnogo zabezpechennya, *Radioelektronni i komputerni sistemi*, 2014, No. 5, pp. 34–39.
6. Hovorushchenko T. O. Krasiy A. V. Vznachennya kharakteristik ta vibir modeli jitevogo tsiklu programnogo zabezpechennya na osnovi analizu spetsifikatsiy, *Visnik Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu*, 2013, No. 6, pp. 201–208.
7. Maedche A. Botzenhardt A., Neer L. Software for people: fundamentals, trends and best practices (Management for professionals). Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 293 p.
8. Jones C., Bonsignour O. The economics of software quality. Boston, Pearson Education, 2012, 588 p.
9. Wiegers K., Beatty J. Software requirements: 3-rd edition. Washington, MS Press, 2013, 640 p.
10. Wiegers K. More about software requirements: Thorny issues and practical advice. Washington, MS Press, 2006, 203 p.
11. Chen A., Beatty J. Visual models for software requirements. Washington, MS Press, 2012, 444 p.
12. Open Source Requirements Management Tool [Electronic resource]. Access mode: <http://sourceforge.net/projects/osrmt/>
13. Callan R. The essence of neural networks. London, Prentice Hall Europe, 2003, 288 p.
14. Krasiy A. V. Modeluvannya protsesu prognozuvannya kharakteristik programnogo zabezpechennya na osnovi analizu spetsifikaciy, *Komputerno-integrovani tekhnologii: osvita, nauka, virobnictvo*, 2014, No. 2, pp. 66–76.

## АДАПТИВНЫЙ ПОРОГОВЫЙ МЕТОД БИНАРИЗАЦИИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ЧЕРТЕЖЕЙ

В статье предлагается метод адаптивной пороговой бинаризации растровых изображений технических чертежей. Проанализированы специфические особенности изображений технических чертежей и их влияние на результат бинаризации известными универсальными методами. Выявлены артефакты, возникающие на результирующих бинарных изображениях и предложены способы их устранения.

В основу предложенного метода положено соображение о том, что очень маленькие фрагменты изображения чертежа напоминают букву «С», которая в особых случаях вырождается в прямую линию. Дальнейшие рассуждения сводятся к выбору способа определения соответствия объекта на изображении форме «С». Отдельное влияние уделено вопросам настройки порога бинаризации в зависимости от яркости изображения.

В работе представлена математическая модель предложенного метода, его алгоритмическое описание. Проведены эксперименты по исследованию качественных и количественных показателей эффективности. Качественная оценка выполнялась путем сравнения результата бинаризации с эталонным черно-белым изображением. В качестве критериев количественного оценивания рассмотрены такие критерии, как время выполнения алгоритма, полнота и  $f$ -мера. Представлены результаты проведенных экспериментов, показывающие превосходство предложенной в работе методики бинаризации растровых изображений технических чертежей, как количественно, так и качественно.

**Ключевые слова:** растровое изображение, бинаризация, технический чертеж, порог бинаризации, яркость, оттенок серого, полезный сигнал, фон, шум, ошибка

### НОМЕНКЛАТУРА

$B$  – матрица, задающая полученное бинарное изображение;

$b_{xy}$  – элемент матрицы  $B$ , определяющий цвет в точке  $(x, y)$  получаемого в ходе бинаризации черно-белого изображения

$BO$  – число точек, принадлежащих фону на «идеальном» бинарном изображении;

$BT$  – число точек, принадлежащих фону на бинарном изображении;

$F$  –  $F$ -мера результатов бинаризации;

$FO$  – число точек, принадлежащих объекту на «идеальном» бинарном изображении;

$FR$  – число точек, одновременно принадлежащих объекту на «идеальном» бинарном изображении и изображении, полученном в ходе преобразования;

$FT$  – число точек, принадлежащих объекту на бинарном изображении;

$H$  – длина исходного изображения;

$i$  – индекс точки, принадлежащей стороне «окна» вокруг точки  $(x, y)$ ;

$L(P)$  – булева функция, определяющая превышает ли разность среднего значения серого в окрестности и значения серого в некоторой точке, порог  $T$ ;

$m$  – смещение по оси  $x$ ;

$ME$  – ошибка классификации;

$n$  – смещение по оси  $y$ ;

$P$  – матрица, задающая исходное изображение в градациях серого;

$\bar{P}$  – среднее значение серого в окрестности точки;

$p_{xy}$  – элемент матрицы  $P$ , определяющий тон серого в точке  $(x, y)$  исходного изображения;

$P_i$  – точка, принадлежащая окрестности точки  $(x, y)$ ;

$P'_i$  – точка, принадлежащая окрестности точки  $(x, y)$ , расположенная напротив точки  $P_i$ ;

$P_{\max}$  – максимальное значение серого в окрестности точки;

$P_{\min}$  – минимальное значение серого в окрестности точки;

$Q$  – правило преобразования исходного изображения в градациях серого в черно-белый формат;

$SW$  – длина стороны локального окна;

$T$  – локальный порог бинаризации;

$T1$  – глобальный порог бинаризации;

$W$  – ширина исходного изображения;

$x$  – координата точки по оси  $x$ ;

$y$  – координата точки по оси  $y$ ;

$\alpha$  – коэффициент поправки;

$\Delta T$  – корректировка глобального порога бинаризации.

### ВВЕДЕНИЕ

Изображения технических чертежей следует сканировать в цветной палитре или в палитре оттенков серого, так как в этом случае получается изображение более высокого качества, чем при использовании черно-белого варианта. Данное утверждение относится, прежде всего, к документам, выполненным вручную чертежными шрифтами, и к многократным копиям документов. В тоже время распознавание, а также предварительную фильтрацию и скелетизацию проще выполнять для монохромного изображения. Кроме того, обработка монохромных изображений требует меньших затрат времени и ресурсов вычислительной системы. Таким образом, становится актуальной проблема преобразования цветного или полутонного изображения в его монохромный эквивалент. Такая задача называется бинаризацией и по своей сути представляет отделение полезного сигнала от фона.



Объект исследования представляет собой процесс бинаризации цветных или полутоновых изображений технических чертежей. Предметом исследования в работе являются специфические особенности изображений технических чертежей, влияющие на качество результирующего изображения, а также способы устранения недостатков, полученных в ходе обработки изображений стандартными алгоритмами бинаризации.

Цель работы состоит в разработке и реализации эффективного алгоритма бинаризации изображений, адаптированного под специфические особенности технических чертежей. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить специфические особенности изображений технических чертежей, влияющие на результат бинаризации;
- предложить способ устранения недостатков обработки изображений универсальными алгоритмами;
- реализовать алгоритм бинаризации растровых изображений технических чертежей;
- проанализировать полученные результаты.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть некоторое исходное изображение задано в виде прямоугольной матрицы  $P$  размерностью  $W \times H$  (1):

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0,W-1} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1,W-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{H-1,0} & P_{H-1,1} & \dots & P_{H-1,W-1} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Каждый элемент  $p_{xy}$  матрицы  $P$  определяет тон серого в соответствующей точке изображения и может принимать любые целые значения от 0, что соответствует черному цвету в точке  $(x,y)$  исходного изображения, до 255 – белому [1–3]. Необходимо определить правило  $Q$ , такое, что матрица  $B$  (2), полученная как  $P \xrightarrow{Q} B$ , определяет бинарное представление исходного изображения, при этом значение 0 будет соответствовать белому цвету, а значение 1 – черному:

$$B = \begin{pmatrix} b_{00} & b_{01} & \dots & b_{0,W-1} \\ b_{10} & b_{11} & \dots & b_{1,W-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{H-1,0} & b_{H-1,1} & \dots & b_{H-1,W-1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Таким образом, правило  $Q$  представляет собой способ классификации точек исходного изображения на полезный сигнал и фон на основании некоторого критерия, называемого порогом  $T$  [4], метод вычисления которого определяет  $Q$  (3):

$$b_{xy} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{xy} < T : Q; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

В качестве целевого критерия  $Q$  при построении продукционных правил может выступать:

- ошибка классификации [5], которая рассчитывается

ся по формуле:  $ME = 1 - \frac{|BO \cap BT| + |FO \cap FT|}{|BO| + |FO|}$ ;

–  $F$ -мера, представляющая собой гармоническое среднее полноты и точности [5], рассчитывается по формуле:  $F = \frac{2 \times \text{полнота} \times \text{точность}}{\text{полнота} + \text{точность}}$ , где полнота и точность вычисляется соответственно по формулам:

$$\text{Полнота} = \frac{FR}{FO}, \quad \text{Точность} = \frac{FR}{FT}.$$

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На сегодняшний день существует большое число готовых реализаций бинаризации изображений, которые описаны, например в работах [5–11]. Все они сводятся к сравнению яркости каждой точки  $P_{xy}$  с некоторым пороговым значением  $T$  и в зависимости от результата сравнения отнесения ее к «белым» или «черным». Принципиально эти методы отличаются лишь способом вычисления порога яркости и принципом построения пороговой поверхности (методы локальной и глобальной бинаризации) [6, 12–13].

Оба подхода имеют некоторые недостатки. Они обусловлены тем, что методы глобальной бинаризации не учитывают характеристики точек в их окрестности, в то время как локальные не учитывают характеристики всего изображения в целом, что, в конечном счете, влияет на качество бинаризации. Устранение этих недостатков предложено в работе [14], где описывается гибридный метод бинаризации, предполагающий использование нескольких пороговых величин. Этот метод показал хорошие результаты при обработке текстовых документов.

В [14] представлен метод бинаризации изображений с адаптивным порогом на основе анализа гистограмм в локальных регионах и автоматическом определении окрестности с центром в заданной точке (рис. 1). Порог бинаризации для каждого локального фрагмента вычисляется индивидуально.

В процессе бинаризации все точки обрабатываются последовательно, а результат определяется формулой [4]:

$$b_{xy} = \begin{cases} 1, & \text{если } \bigvee_{i=0}^3 [L(P_i) \wedge L(P'_i) \wedge L(P_{i+1}) \wedge L(P'_{i+1})] = \text{истина}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$$P'_i = P_{(i+4) \bmod 8}, \quad \text{при } i = 0, 1, \dots, 3,$$

$$L(P) = \bar{P} - p_{xy} > T,$$

$$\bar{P} = \frac{1}{(2 \cdot SW + 1)^2} \times \sum_{-SW \leq m \leq SW} \sum_{-SW \leq n \leq SW} P_{x+m, y+n}. \quad (4)$$

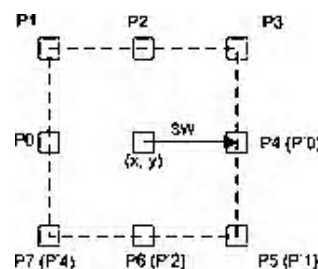


Рисунок 1 – Соседние локальные регионы вокруг точки

Этот способ позволяет получить достаточно хороший результат, но преимущественно он ориентирован на изображения текстовых документов, поэтому при попытке обработки таким методом изображений технических чертежей зачастую возникает проблема нарушения исходной топологии объектов, что в дальнейшем оказывает существенное влияние на результат последующих операций над изображением и, следовательно, быть использован не может.

В работе [15] обнаружено, что изображения технических чертежей обычно состоят из прямых линий и дуг окружности. Благодаря чему сделан вывод: очень маленькие фрагменты изображения имеют форму, близкую к форме буквы «С». Таким образом, несмотря на то, что изолированные точки имеют более низкую шкалу оттенков серого, они не образуют форму фигуры «С» в совокупности со своими соседями и, следовательно, не могут быть бинаризованы как точки объектов.

В качестве примера рассмотрим рисунок 2. Типичная С-форма создается точками P0, P1, P2 или P2, P3, P4 или P4, P5, P6 или P6, P7, P0. Точка p<sub>xy</sub> бинаризуется как точка объекта, если в локальной области с заданными геометрическими размерами образуется по крайней мере одна область в форме буквы «С». Исключительной ситуацией С-формы является ситуация, когда пиксели с низким оттенком серого образуют прямую линию. В этом случае пиксели также принимаются как пиксели объекта.

Для локальных областей, уровень яркости которых отличается от яркости изображения в целом, глобальный порог бинаризации не будет соответствовать значению полученному для всего изображения и приведет к неверному результату [12]. Для корректировки порога бинаризации в таких ситуациях вводится коэффициент поправки α, значение которого определяется исходя из следующего выражения.

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{xy} < 90; \\ 0,33, & \text{если } 90 \leq p_{xy} \leq 170; \\ 0,1, & \text{если } p_{xy} > 170, \end{cases}$$

$$T1 \rightarrow T + \Delta T,$$

где ΔT – небольшое целое число в пределах [-20; 20]. Т. к. 0 < α ≤ 1 и чаще всего α = 0,33, то параметр α мо-

жет быть использован для корректировки порога бинаризации на величину в интервале [-6; 6].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Примеры инженерных чертежей представлены на рисунке 3. а) синька; б) чертеж, выполненный от руки; в) печатный чертеж.

Изображения инженерных чертежей имеют ряд специфических особенностей.

- 1) изображение состоит преимущественно из прямых линий, текстовых блоков и дуг окружности;
- 2) линии на чертеже имеют различные геометрические размеры;
- 3) наличие фонового шума;
- 4) большой диапазон яркости для изображений технических чертежей различных типов.

Из рисунка 3 видно, что различные виды инженерных чертежей имеют различные показатели качества, яркости и контрастности. Наиболее подходящим для обработки такого типа изображений является метод, описанный в [4]. В случае выбора локальной области надлежащего размера (SW=3), а также порога бинаризации в пределах от 20 до 120 данный метод дает весьма неплохие результаты. Исключение составляют линии единичной толщины, а также точки пересечения линий и дуг (рисунок 4). По сути это ситуация, когда рассматривается вырожденная форма «С» в виде прямой линии. Выделенная точка на рисунке 4 принадлежит объекту, однако с точки зрения метода с-форм она будет бинаризована как точка фона, что приведет к нарушению целостности объекта. Уменьшение размера окна до (SW=1) не позволяет существенно улучшить результат, что свидетельствует о целесообразности доработки данного метода.

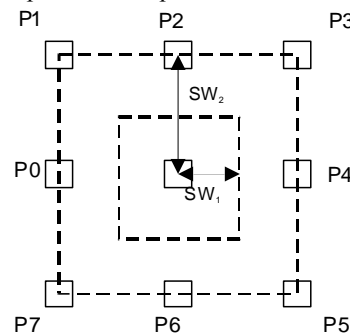
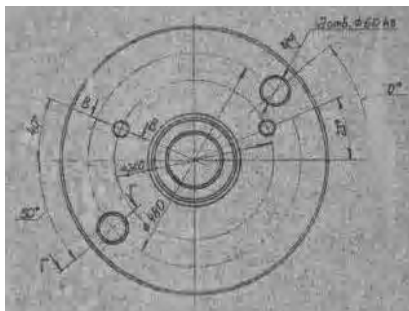
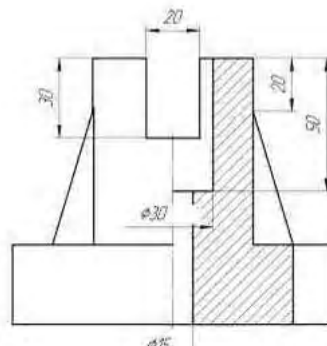


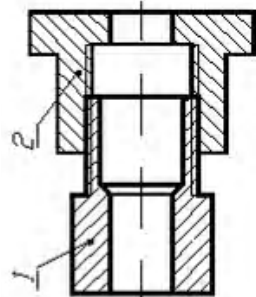
Рисунок 2 – Соседние локальные регионы для окна со сторонами W1 и W2



а



б



в

Рисунок 3 – Изображения инженерных чертежей: а – на синьке, б – ручной чертеж на ватмане в – распечатанный чертеж

Для решения проблемы «потери» тонких линий предлагается:

- 1) производить поиск С-форм для локальных областей различных размеров ( $SW=3$ ) и ( $SW=1$ );
- 2) включить в поиск возможность исключительный ситуации, когда с-форма вырождается в прямую линию;
- 3) рассмотреть ситуацию, когда происходит обработка конечной точки линии или дуги.

Данное утверждение может быть реализовано с помощью шаблонов путем поточечного сравнения исходного изображения с каждым эталонным вариантом, а также с помощью математических уравнений. Наибо-

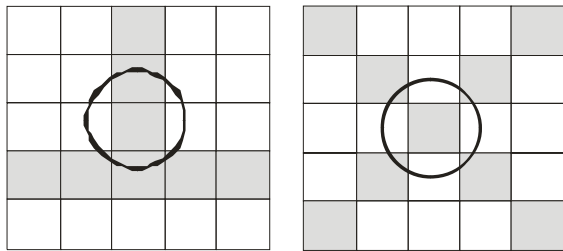


Рисунок 4 – Примеры линий объекта не образующих форму «С»

лее удобным вариантом для дальнейшей реализации является вариант решения задачи математическим путем.

Так, например, для проверки соответствия вырождается ли форма  $c$  в прямую линию необходимо формулу (1) переписать в следующем виде:

$$b_{xy} = \begin{cases} 1, & \text{если } \bigvee_{i=0}^4 [L(P_i) \wedge L(P_i')] = \text{истина}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

А далее воспользоваться ранее полученной методикой.

Модифицированный таким образом метод, позволит выполнить корректную бинаризацию точек объекта в особых ситуациях, аналогичных приведенным на рис. 4.

Методика, описанная в [4] предполагает расчет пороговых значений на неидеально белой бумаге. В тоже время большинство чертежей выполняются на белом ватмане. Следовательно, фон таких изображений будет иметь высокую яркость (большую 170). Таким образом, для большей части изображения коэффициент  $\alpha$  будет составлять 0,1. Поэтому с целью достижения корректного различения фона и объектов диапазон корректировки необходимо увеличить до 20–120.

Предложенный алгоритм бинаризации реализуется следующей последовательностью шагов (рис. 5).

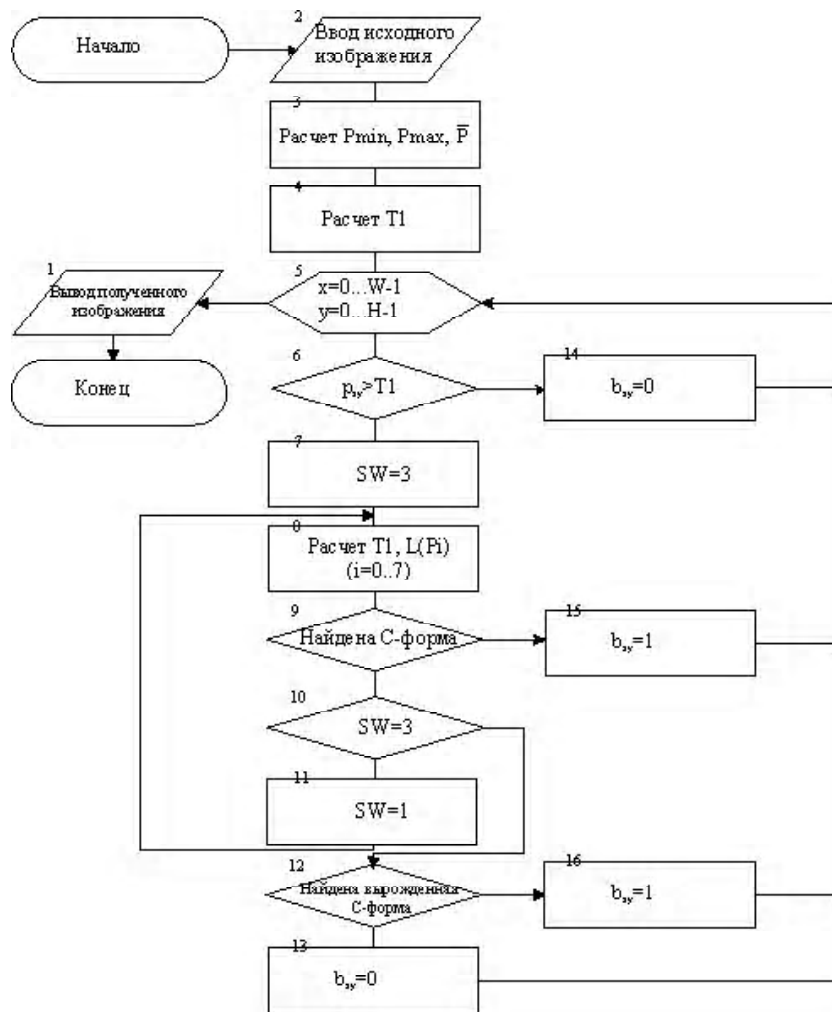


Рисунок 5 – Схема предложенного алгоритма

1. Рассчитываем минимальное, максимальное, среднее значения яркости цвета для всех точек изображения. Полученные результаты позволяют определить класс исходного изображения (ватман, синька).

2. Исходя из полученных результатов, определяем поправочный коэффициент и глобальный порог бинаризации  $T_1$ .

3. Просматриваем все изображение и бинаризуем каждую точку, исходя из того, что объект=1, фон=0.

Если яркость обрабатываемой точки больше глобального порога  $T_1$ , то после бинаризации данная точка однозначно определяется как точка фона  $b_{xy}=0$ .

В противном случае обрабатываемая точка берется как центр квадрата размером  $(2SW+1) \times (2SW+1)$ , рассчитывается среднее значение яркости в данной области и динамический локальный порог  $T = \alpha \times \Delta T$ ,  $\Delta T$  – диапазон поправочный коэффициент порога бинаризации.

Определяем яркость 8 соседних точек. Если для каких-либо 3-х последовательных, либо лежащих на одной прямой точек, выполняется условие  $|\bar{p} - p_{xy}| > T$  обрабатываемая точка бинаризуется как  $b_{xy}=1$ , т.е точка, принадлежащая объекту.

В противном случае обрабатываемая точка бинаризуется как  $b_{xy}=0$ .

4. Если имеются необработанные точки возвращаемся к шагу 2.

5. Выводим результирующее двухградационное изображение.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Предложенный алгоритм реализован в среде C++ Builder XE5. Разработанный программный продукт позволяет выполнить бинаризацию изображения каждым из рассмотренных в работе методом и наглядно оценить результат (рис. 6).

Для выполнения количественной оценки результата предусматривается возможность сравнения результата бинаризации с идеальным черно-белым образцом и расчета основных оценочных критериев, на основании значений которых можно сделать вывод об эффективности каждого метода. Программа снабжена гибкой системой настроек каждого метода.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В тестовой выборке участвовало 20 образцов полутоновых изображений, площадью от 500 до 50000 точек. Сравнение результатов бинаризации каждым методом осуществлялось по критериям качество и время. Наиболее сложно обстоит вопрос с определением качества бинаризации, т.к. задача определения точки как точки фона или точки объекта не является тривиальной и в некоторых случаях ее затруднительно решить даже при ручном разборе изображения.

На международном конкурсе DIBCO [16–18] алгоритмов бинаризации для оценки качества получаемых результатов предлагаются следующие метрики: ошибка классификации (misclassification error, *ME*), полнота (recall), точность (precision) и F-мера (F-measure). Чем выше значение F-меры, тем лучше производительность алгоритма

Значения этих метрик для ряда тестовых образцов, после их обработки логическим пороговым методом, методом с-форм и нашим методом представлены в таблице 1.

Наглядно результаты тестирования методов бинаризации показаны на графиках (рис. 7–9).

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа данных, представленных в табл. 1, показывают, что наилучшее качество результирующего бинарного изображения обеспечивает метод, предложенный в работе. Так, например, этот метод дает самое

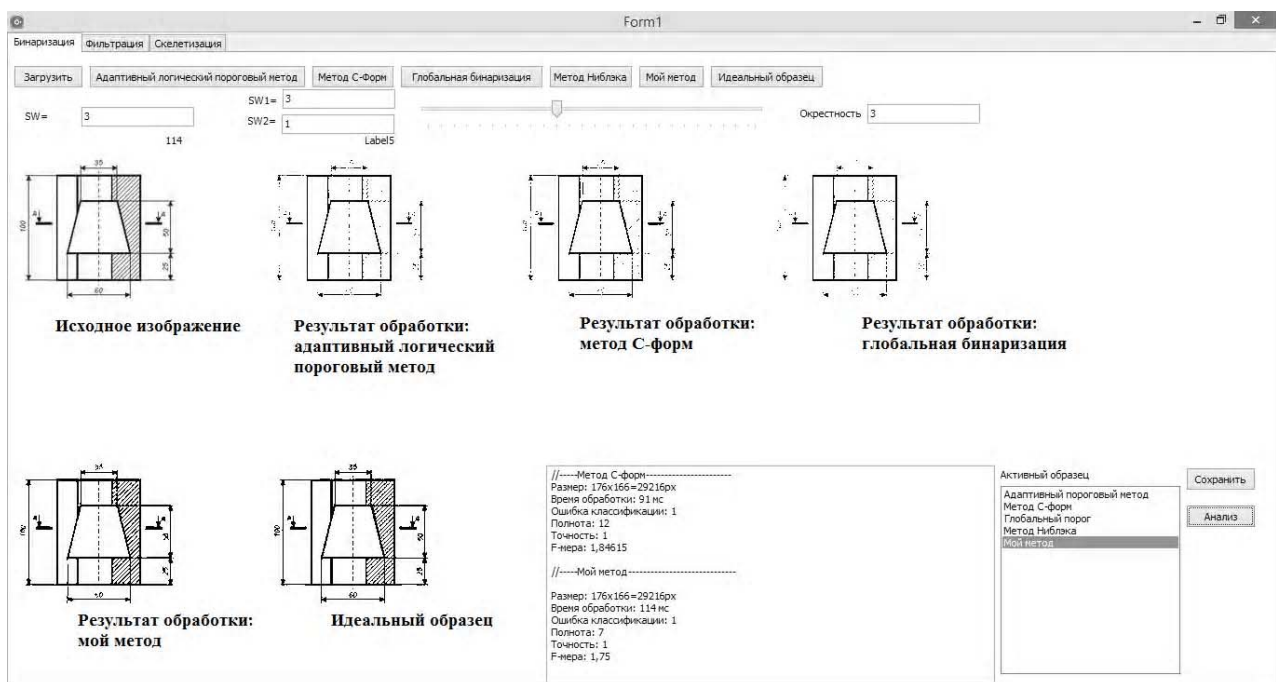


Рисунок 6 – Экранная форма программы, используемой при проведении экспериментов

высокое значение F-меры для всех без исключения тестовых образцов.

Качественный анализ изображений, полученных в ходе обработки рассмотренными в работе методами бинаризации, показал, что в результате обработки изображений логическим пороговым методом образуется шум, особенно вблизи границ объектов, который значительно ухудшает качество изображения, кроме того, име-

ет место потеря некоторых тонких линий. Метод с-форм дает хорошие результаты на изображениях, толщина линий которых приблизительно одинакова, а линии единичной толщины отсутствуют, однако корректно обработать тонкие линии данный метод не способен. Все эти недостатки отсутствуют в изображениях, полученных в результате бинаризации рассмотренным в работе методом.

Таблица 1 – Результаты тестирования методов бинаризации

Номер изображения	Размер	Логический пороговый метод			Метод с-форм			Глобальная бинаризация			Новый метод		
		Время	Полнота	F-мера	Время	Полнота	F-мера	Время	Полнота	F-мера	Время	Полнота	F-мера
1	130×135	34	18	1,89	114	16	1,88	1	22	1,91	126	9	1,8
2	176×166	36	14	1,86	72	12	1,84	1	17	1,89	90	7	1,75
3	147×192	58	14	1,87	166	13	1,86	1	18	1,89	141	8	1,77
4	244×321	137	7	1,75	254	7	1,75	1	9	1,8	303	6	1,71
5	247×321	419	8	1,77	620	7	1,75	1	12	1,84	401	6	1,74
6	170×190	290	12	1,85	148	10	1,82	1	13	1,86	304	8	1,78
7	133×123	30	8	1,78	46	8	1,78	1	12	1,85	70	6	1,71
8	131×190	26	86	1,98	101	73	1,97	1	415	1,99	89	22	1,91
9	267×195	215	37	1,95	456	27	1,93	1	229	1,99	564	20	1,9
10	144×321	64	45	1,96	162	42	1,95	1	83	1,98	187	18	1,89
11	267×226	104	37	1,95	334	33	1,94	1	48	1,96	356	16	1,88
12	267×205	96	11	1,83	143	11	1,83	1	16	1,88	190	9	1,8
13	161×200	75	8	1,78	151	8	1,78	1	18	1,89	187	6	1,71
14	104×113	38	28	1,93	149	23	1,92	1	45	1,96	66	7	1,75
15	267×321	291	38	1,95	705	17	1,88	1	31	1,94	905	7	1,75
16	207×214	46	1655	1,99	123	459	1,99	1	599	1,99	146	19	1,9
17	213×321	92	539	1,99	247	439	1,99	1	1514	1,99	246	3	3
18	267×147	44	8	1,78	100	8	1,78	1	10	1,82	127	5	1,65
19	236×162	43	28	1,93	103	21	1,91	1	71	1,97	30	15	1,89
20	117×96	19	26	1,93	31	22	1,91	1	30	1,94	37	7	1,75

Время, затраченное на бинаризацию изображений

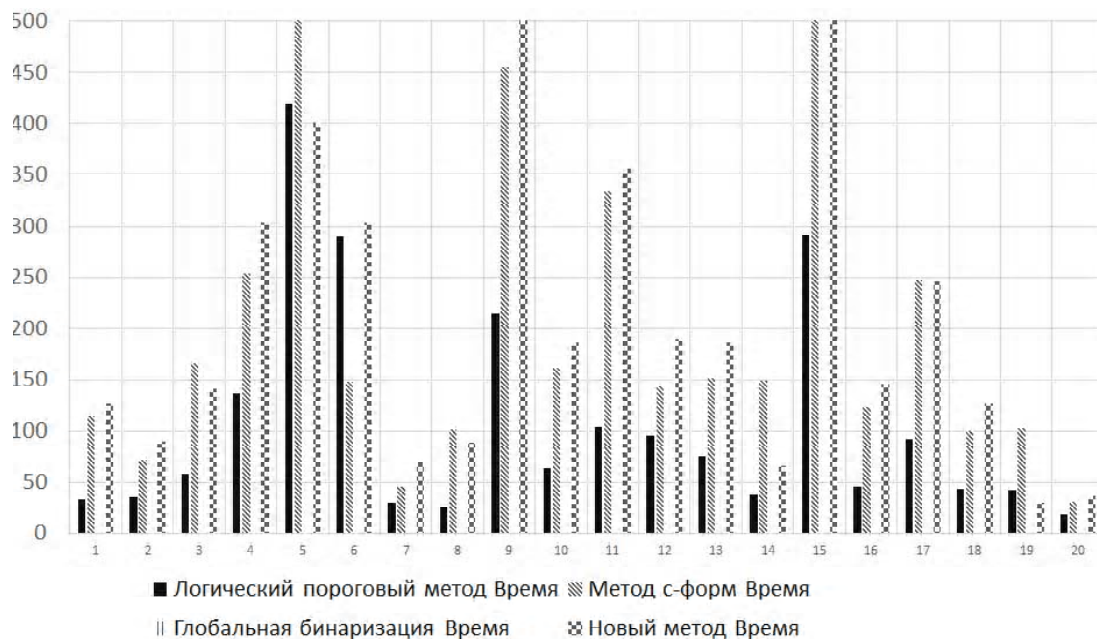


Рисунок 7 – Гистограмма времени, затраченного на бинаризацию

### Полнота бинаризации

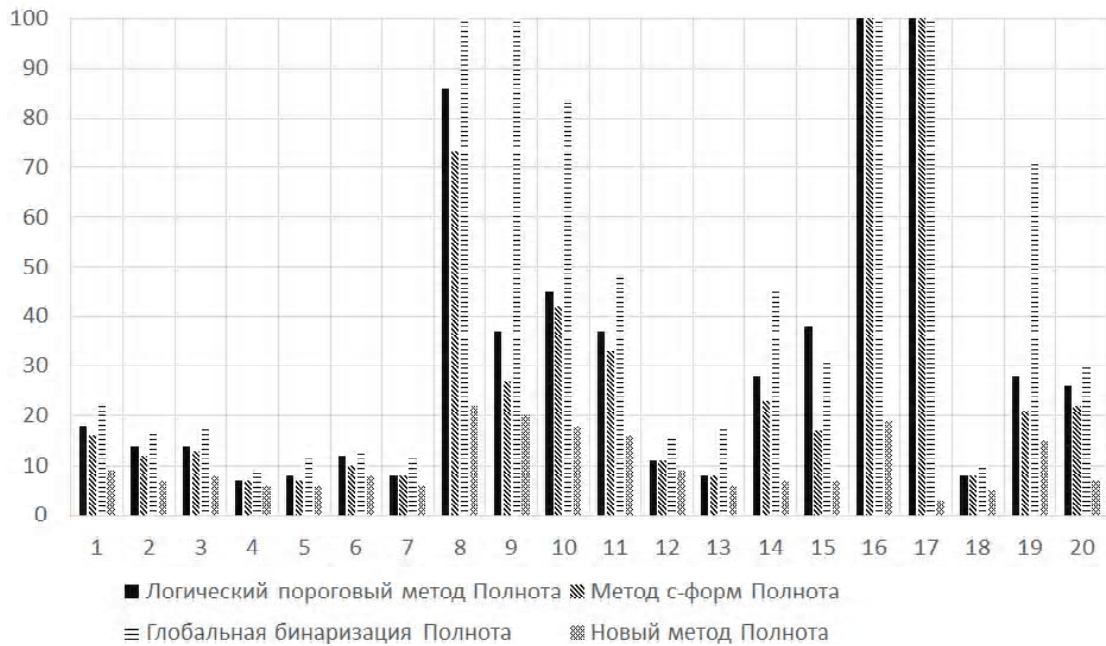


Рисунок 8 – Полнота бинаризации

### F-мера результатов бинаризации

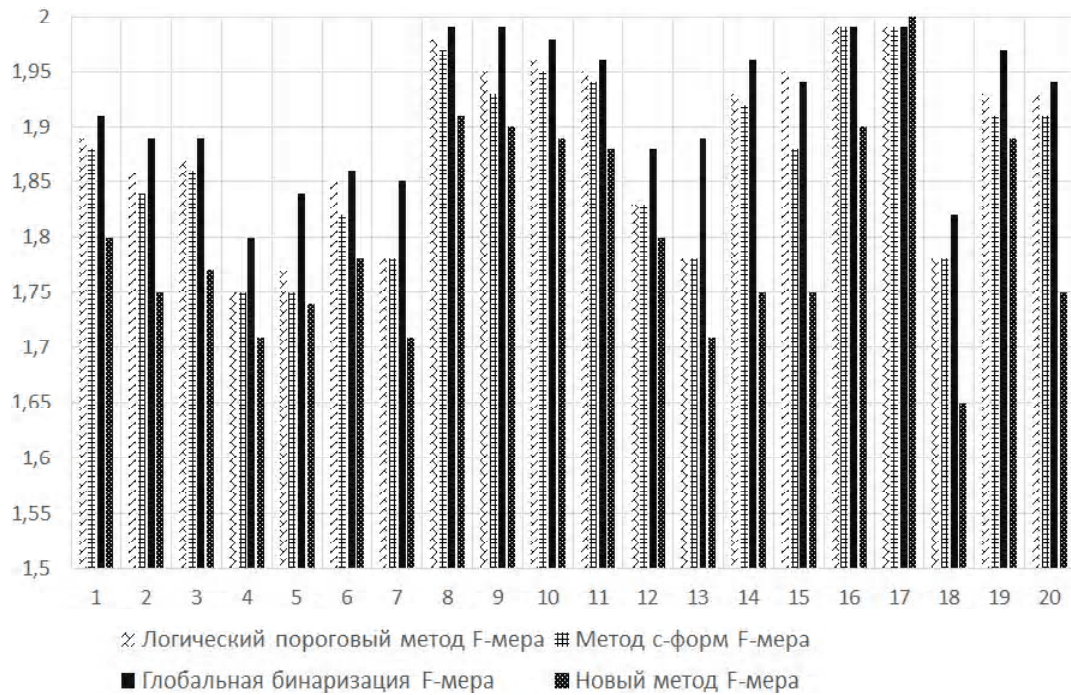


Рисунок 9 – F-мера результатов бинаризации

Вторым критерием оценки качества работы алгоритма является время его выполнения соизмеримо с размерами обрабатываемой области. Характеристики скорости выполнения сравниваемых алгоритмов также представлены в таблице 1.

Анализ времени обработки каждого тестового образца показывает, что наиболее быстрым является метод,

использующий глобальный порог, что объясняется наиболее простым алгоритмом обработки каждой точки изображения, однако результаты, получаемые таким методом, непригодны для дальнейшей обработки. Среди методов, дающих удовлетворительный результат, наиболее быстрым является метод *s-форм*. Необходимость больших временных затрат для выполнения предложен-

ного метода пояснюється виконанням додаткових перевірок на наявність «особливих ситуацій», результат яких надає значуще вплив на формуваний процес бінаризації зображення. Таким чином, для образців, не містять «особливих ситуацій», час виконання обох методів однаково або відрізняється незначально.

### ВИВОДИ

В роботі розв'язана актуальна задача перетворення зображень технічних креслень, представлених в градациях сірого, в чорно-білий формат, зручний для подальшої обробки таких зображень.

Наукова новизна роботи складається в тому, що отримала подальше розвиток ідея застосування методу с-форм для бінаризації зображень технічних креслень. Даний метод дозволяє отримати хороші результати при обробці таких складних ситуацій як тонкі лінії і точки перетинання ліній, в той же час метод «отсеивает» випадкові шуми в зображенні. Другим відмінною особливістю запропонованого методу, є автоматична корекція порога яркості, що дозволяє обробляти, як зображення, представлені на білому аркуші, так і на «синьому».

Запропоновано ряд критеріїв оцінки бінаризації зображень технічних креслень: час виконання, повнота і F-міра. В якості альтернативних методів розглядається логічний пороговий метод, метод с-форм, метод глобальної бінаризації. Показано, що найкращі результати дає запропонований в роботі метод. Виключенням є час виконання методу, який в деяких ситуаціях більше, ніж час виконання інших, розглянутих в якості альтернативних варіантів. Це пояснюється необхідністю виконання додаткових перевірок на наявність специфічних елементів на зображенні і їх коректної обробки.

Практична цінність отриманих результатів складається в тому, що розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє виконати бінаризацію растрових зображень технічних креслень, представлених в градациях сірого.

Перспективи подальших досліджень складаються в розробці способу векторизації зображень технічних креслень і реалізації на його основі повномасштабної системи обробки і розпізнавання растрових зображень технічних креслень і їх подальшого перетворення в формат сучасних САД-систем.

### БЛАГОДАРНОСТІ

Автор виражає вдячність науковому керівнику І. С. Грунському за увагу до роботи і корисні зауваження.

Молчанова В. С.

Ст. викладач кафедри інформатики ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь, Україна

### АДАПТИВНИЙ ПОРОГОВИЙ МЕТОД БІНАРИЗАЦІЇ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТЕХНІЧНИХ КРЕСЛЕНЬ

У статті пропонується метод адаптивної порогової бінаризації растрових зображень технічних креслень. Проаналізовано специфічні особливості зображень технічних креслень та їх вплив на результат бінаризації відомими універсальними методами. Виявлено артефакти, що виникають на результатуючих бінарних зображеннях та запропоновано способи їх усунення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Абламейко С. В. Обработка изображений: технология, методы, применение / С. В. Абламейко, Д. М. Лагуновский. – Минск: Амадея, 2000. – 304 с.
3. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений : учебное пособие / Н. Н. Красильников. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.
4. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Соифера. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с.
5. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учебное пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых и др. – Новосибирск : Издательство НГТУ, 2002. – 352 с.
6. Gonzalez R. Digital image processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – Prentice Hall, 2007. – 976 p.
7. Rogers D. Mathematical elements for computer graphics / David F. Rogers, J. Alan Adams. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 630 p.
8. Otsu N. A threshold selection method from grey level histogram / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, № 1. – P. 62–66.
9. Niblack W. An introduction to digital image processing / Niblack W. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986. – 231 p.
10. Sauvola J. Adaptive Document Binarization / J. Sauvola, M. Pietikainen // Pattern Recognition. – 2000. – № 33. – P. 225–236.
11. Анисимов Б. В. Распознавание и цифровая обработка / Б. В. Анисимов, В. Д. Курганов, В. К. Злобин. – М. : Высшая школа, 1983. – 95 с.
12. Navon E. Color image segmentation based on adaptive local thresholds / E. Navon, O. Miller, A. Averbuch // Image and Vision Computing. – 2012. – № 23. – P. 69–85.
13. O’Gorman L. Binarization and multithresholding of document images using connectivity // CVGIP: Graphical Models and Image Processing. – 2004. – Vol. 5, № 6. – P. 494–506.
14. Yang Y. An adaptive logical method for binarization of degraded document images / Y. Yang, H. Yan // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 33. – P. 787–807.
15. Zhao M. An adaptive thresholding method for binarization of blueprint images / M. Zhao, Y. Yang, and H. Yan // Pattern Recognition Letters. – 2010. – Vol. 21. – P. 927–943.
16. Gatos B. Document image binarization contest / B. Gatos, K. Ntirogiannis, I. Pratikakis // DIBCO 2009: 10th International Conference on Document Analysis and Recognition, Spain, Barcelona, 26–29 July, 2009. – Barcelona : Universitat Autònoma, 2009. – P. 1375–1382.
17. Pratikakis I. Document Image Binarization Contest (DIBCO 2011) / I. Pratikakis, B. Gatos, K. Ntirogiannis // ICDAR 2011: 11th International Conference on Document Analysis and Recognition, China, Beijing, 18–21 September, 2011. – Beijing, 2011. – P. 1506–1510.
18. Pratikakis I. Document Image Binarization Contest (ICDAR 2013) / I. Pratikakis, B. Gatos, K. Ntirogiannis // ICDAR 2013: 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, USA, Washington, 25–28 August, 2013. – Washington, 2013. – P. 1471–1476.

Статья поступила в редакцию 04.11.2014.

После доработки 05.11.2014.

В основу запропонованого методу покладено ідею про те, що дуже маленькі фрагменти зображення креслення нагадують букву «С», яка в особливих випадках вироджується у пряму лінію. Подальші роздуми зводяться до вибору способу визначення відповідності об'єкта на зображенні формі «С». Окремий вплив приділено питанням Налаштування порога бінарзації залежно від яскравості зображення.

В роботі подана математична модель запропонованого методу, його алгоритмічний опис. Проведені експерименти з дослідження якісних і кількісних показників ефективності. Якісна оцінка виконувалася шляхом порівняння результату бінарзації з еталонним чорнобілим зображенням. В якості критеріїв кількісного оцінювання розглянуті такі критерії, як час виконання алгоритму, повнота і  $f$ -міра. Представлені результати проведених експериментів, що показують перевагу запропонованої в роботі методики бінарзації растрових зображень технічних креслень, як кількісно, так і якісно.

**Ключові слова:** растрове зображення, бінаризація, технічне креслення, поріг бінаризація, яскравість, відтінок сірого, корисний сигнал, фон, шум, помилка.

Molchanova V. S.

Senior Lecturer of Department of Informatics of Azov State Technical University, Mariupol, Ukraine

#### THE ADAPTIVE THRESHOLD BINARIZATION METHOD OF RASTER IMAGES OF TECHNICAL DRAWINGS

The paper proposes a method of adaptive threshold binarization of technical drawings raster images. The specific image features of technical drawings and their influence on the result of binarization of known universal methods are analysed. The artifacts that arise on the resulting binary images are identified and ways to address them are suggested.

The proposed method is based on the idea that very small parts of the image of the drawing resembles the letter «C», which in special cases degenerates into a straight line. Further arguments boil down to the choice of method for determining the conformity of the object in the image form «C». Separate effect given to the issues of binarization threshold settings depending on the brightness of the image.

The paper presents a mathematical model of the proposed method, its algorithmic description and experimental qualitative and quantitative evidence of efficacy. The quantitative evaluation was performed by comparing the results with the reference binarization black and white image. As evaluation criteria considered criteria such as time of the algorithm, completeness and  $f$ -measure. The results of the conducted experiments demonstrating the superiority of the proposed methodology in the raster image binarization technical drawings, both quantitatively and qualitatively.

**Keywords:** bitmap, binarization, technical drawings, threshold binarization, brightness, shade of gray, useful signal, background, noise, error.

#### REFERENCES

- Gonzalez R., Vuds R., Jeddins S. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v srede Matlab*. Moscow, Tehnosfera, 2006, 616 p.
- Ablamejko S. V. Lagunovskij D. M. *Obrabotka izobrazhenij: tehnologija, metody, primenenie*. Minsk, Amalfeja, 2000, 304 p.
- Krasil'nikov N. N. *Cifrovaja obrabotka 2D- i 3D-izobrazhenij: uchebnoe posobie*. SPb, BHV-Peterburg, 2011, 608 p.
- Metody komp'yuternoj obrabotki izobrazhenij / pod red. V. A. Sojfera*. Moscow, Fizmatlit, 2003, 784 p.
- Gruzman I. S. Kirichuk V. S., Kosyh V. P. i dr. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah: uchebnoe posobie*. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2002, 352 p.
- Gonzalez R., Woods R. E. *Digital image processing*. Prentice Hall, 2007, 976 p.
- Rogers D., Adams J. A. *Mathematical elements for computer graphics*. New York, McGraw-Hill, 2002, 630 p.
- Otsu N. A threshold selection method from grey level histogram, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, Vol. 9, No. 1, pp. 62–66.
- Niblack W. *An introduction to digital image processing*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986, 231 p.
- Sauvola J., Pietikainen M. Adaptive Document Binarization, *Pattern Recognition*, 2000. No. 33, pp. 225–236.
- Anisimov B. V., Kurganov V. D., Zlobin V. K. *Raspoznavanie i cifrovaja obrabotka izobrazhenij*. Moscow, Vysshaja shkola, 1983, 295 p.
- Navon E., Miller O., Averbuch A. Color image segmentation based on adaptive local thresholds, *Image and Vision Computing*, 2012, No. 23, pp. 69–85.
- O'Gorman L. Binarization and multithresholding of document images using connectivity, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 2004, Vol. 5, No. 6, pp. 494–506.
- Yang Y., Yan H. An adaptive logical method for binarization of degraded document images, *Pattern Recognition*, 2010, Vol. 33, pp. 787–807.
- Zhao M., Yang Y., and Yan H. An adaptive thresholding method for binarization of blueprint images, *Pattern Recognition Letters*, 2010, Vol. 21, pp. 927–943
- Gatos B., Ntirogiannis K., Pratikakis I. Document image binarization contest, *DIBCO 2009: 10th International Conference on Document Analysis and Recognition, Spain, Barcelona, 26–29 July, 2009*. Barcelona, Universitat Autnoma, 2009, pp. 1375–1382.
- Pratikakis I., Gatos B., Ntirogiannis K. Document Image Binarization Contest (DIBCO 2011), *ICDAR 2011: 11th International Conference on Document Analysis and Recognition, China, Beijing, 18–21 September, 2011*. Beijing, 2011, pp. 1506–1510.
- Pratikakis I., Gatos B., Ntirogiannis K. Document Image Binarization Contest (ICDAR 2013), *ICDAR 2013: 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, USA, Washington, 25–28 August, 2013*. Washington, 2013, pp. 1471–1476.



<sup>1</sup>Магістр, аспірант кафедри фізико-технічних засобів захисту інформації, Фізико-технічний інститут, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна  
<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізико-технічних засобів захисту інформації, Фізико-технічний інститут, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

## СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТЕГНОГРАММ

Для підвищення стійкості стеганоалгоритмів к известным методам стегоанализа широко применяются методы скрытия сообщений в области преобразования цифровых изображений. Использование при формировании стеганограмм стандартных методов обработки изображений-контейнеров и стегоданных – двумерных дискретных косинусного и вейвлет преобразований – позволяет минимизировать искажения скрытых сообщений при компрессии изображений.

В работе для выявления факта встраивания стегоданных с применением стандартных преобразований контейнера и стегоданных предложено использовать методы спектрального анализа изображений: анализ спектра сингулярностей и мультифрактальный анализ. Преимуществом данного подхода, по сравнению со статистическими методами стегоанализа, является возможность исследования одновременно нескольких компонент изображения-контейнера, что позволяет локализовать область встраивания.

Анализ эффективности применения методов спектрального анализа был проведен для случая использования одноэтапных и двухэтапных методов формирования стеганограмм. Показано, что скрытие данных приводит к изменениям всех компонент сингулярного разложения изображения-контейнера, а также появлению характерных искажений мультифрактальных характеристик стеганограмм – увеличения мощности множества монофрактальных компонент изображений. Выявленные демаскирующие признаки наличия встроенных сообщений являются устойчивыми в широком диапазоне степеней заполнения контейнера стегоданными, что упрощает задачу обнаружения сообщений, скрытых в области преобразования изображений.

**Ключевые слова:** цифровые изображения, пассивный стегоанализ, анализ спектра сингулярностей, мультифрактальный анализ.

### НОМЕНКЛАТУРА

J+SRM – JPEG & Spatial Rich Model;  
PSRM – Projection Spatial Rich Model;  
RGB – аддитивная цветовая модель цифровых изображений (Red/Green/Blue);  
UHD – Ultra High Definition;  
YCbCr – цветоразностная цветовая модель цифрового изображения (Y – компонента яркости; Cb/Cr – синяя/красная цветоразностные компоненты);  
YIQ – цветоразностная цветовая модель цифрового изображения (Y – компонента яркости; I/Q – синфазная/квадратурная цветоразностные компоненты);  
AMBC – адаптивные методы встраивания стегоданных;  
АСС – анализ спектра сингулярностей;  
ДДВП – двумерное дискретное вейвлет-преобразование;  
ДКП – дискретное косинусное преобразование;  
КМ – корреляционная матрица;  
МФА – мультифрактальный анализ;  
МФС – мультифрактальный спектр;  
ПА – преобразование Арнольда;  
СОФР – спектр обобщенных фрактальных размерностей;  
ЦИ – цифровое изображение;  
 $a$  – средняя «шероховатость» текстуры цифрового изображения;  
 $C$  – корреляционная матрица;  
 $D_1$  – информационная размерность мультифрактала;  
 $D_2$  – корреляционная размерность мультифрактала;  
 $D_{+\infty}(D_{-\infty})$  – граничная обобщенная фрактальная размерность мультифрактала;  
 $D_q$  – обобщенная фрактальная размерность мультифрактала;

$D_{x,y}$  – стегоданные (полутоновое цифровое изображение);  
 $D[\cdot]$  – дисперсия значений;  
 $E[\cdot]$  – среднее значение;  
 $f(\alpha)$  – функция мультифрактального спектра;  
 $F_9(\cdot)$  – преобразование цифрового изображения в базисе функций  $\{\vartheta_i\}_{i=1}^{N_9}$ ;  
 $G$  – весовой коэффициент для коэффициентов разложения стегоданных в заданном базисе;  
 $H^{R^{x \times y}}$  – оператор приведения квадратной матрицы к ганкелевому виду (обработка блоками  $x \times y$  (элементов));  
 $I_{x,y}$  – изображение-контейнер;  
 $IQR$  – интерквартильный размах;  
 $J(D_{x,y})$  – преобразование стегоданных  $D_{x,y}$  перед встраиванием в контейнер;  
 $k_{st}$  – стегоключ, используемый при скрытии данных в изображении-контейнере;  
 $K_{steg}$  – коэффициенты преобразования стеганограммы;  
 $M_{BH}$  – блочно-ганкелева матрица  $M$ ;  
 $M_i$  –  $i$ -я тройка сингулярного разложения;  
 $M^T$  – транспонированная матрица  $M$ ;  
 $n_s$  – относительная высота отдельного блока разбиения матрицы (размер блока –  $s \times s$  пикселей);  
 $N_A$  – количество итераций преобразования Арнольда;  
 $N(s)$  – количество блоков разбиения матрицы (размер блока –  $s \times s$  пикселей);

$P$  – количество ненулевых элементов вектора собственных чисел;

$p(n_s)$  – распределение вероятностей значений относительных высот отдельных блоков разбиения матрицы (размер блока –  $s \times s$  пикселей);

$q$  – масштабирующий показатель степени обобщенной статистической суммы  $Z(q, s)$ ;

$Q_1(Q_3)$  – первый (третий) квартили распределения значений;

$R_{x,y}$  – скользящее окно обработки цифрового изображения;

$S_{x,y}$  – стеганограмма;

$T_C^i(T_S^i)$  –  $i$ -я спектральная характеристика контейнера (стеганограммы);

$U$  – ортонормированная система факторных векторов сингулярного разложения матрицы  $M_{BH}M_{BH}^T$ ;

$V$  – ортонормированная система собственных векторов сингулярного разложения матрицы  $M_{BH}M_{BH}^T$ ;

$Z(q, s)$  – обобщенная статистическая сумма;

$\alpha(q)$  – вероятность заполнения ячеек разбиения монофрактального подмножества мультифрактала при фиксированном значении масштабирующего показателя степени  $q$  обобщенной статистической суммы  $Z(q, s)$ ;

$\lambda_i$  –  $i$ -е собственное число матрицы  $M_{BH}M_{BH}^T$ ;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение значений яркости пикселей полутонового цифрового изображения;

$\tau(q)$  – функция распределения масштабирующих показателей степени  $q$  обобщенной статистической суммы  $Z(q, s)$ ;

$\Delta_\alpha$  – ширина мультифрактального спектра;

$\Delta_b$  – шаг выборки блоков цифрового изображения;

$\Delta_f$  – размах мультифрактального спектра;

$\Delta_q$  – шаг выборки значений параметра  $q$ ;

$\Lambda$  – подмножество спектральных характеристик ЦИ, значения которых наиболее изменяются при встраивании стегоданных.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных методах стеганографии ЦИ широко используются АМВС, особенностью которых является локализация области встраивания – скрытие сообщений производится в шумоподобных текстурах изображения-контейнера, что позволяет существенно повысить стойкость получаемых стеганограмм к известным методам пассивного стегоанализа.

Наиболее часто АМВС применяются для встраивания стегоданных в ЦИ, представленные в графических форматах сжатия без потерь. Повышение устойчивости стеганоалгоритмов на основе АМВС, при компрессии или фильтрации изображений-контейнеров, обеспечивается за счет использования при формировании стеганограмм стандартных преобразований, как изображения-контейнера, так и стегоданных – ДКП и ДДВП.

Для обнаружения стеганограмм, сформированных с использованием ДКП, в работе [1] был предложен эффективный метод статистического стегоанализа. На основе данного метода в работе [2] был построен универсальный стегодетектор, позволяющий выявлять стегоданные, встроенные, как в пространственной, так и частотной областях изображений. Существенным ограничением практического применения предложенного стегодетектора является чрезвычайно высокая размерность используемого пространства признаков – 35263 характеристики ЦИ, по совокупности которых, с высокой вероятностью можно определить наличие встроенных в контейнер данных.

Поэтому актуальной является задача поиска новых методов обнаружения стеганограмм, сформированных на основе АМВС, обеспечивающих высокую вероятность распознавания независимо от области скрытия сообщений при использовании пространства признаков сравнительно небольшой размерности.

Одним из подходов к стегоанализу стеганограмм, сформированных на основе АМВС является использование методов структурного и спектрального анализов ЦИ. Необходимо отметить, что локализация области встраивания стегоданных при использовании АМВС существенно ограничивает эффективность применения классических методов спектрального анализа, например, преобразования Фурье. Поэтому, для выявления характерных изменений спектральных компонент стеганограмм, обусловленных встраиванием стегоданных в контейнер, представляет интерес использование комплексных методов спектрального анализа.

Объектом исследований является пассивный стегоанализ стеганограмм, сформированных путем встраивания исходных, либо предварительно обработанных сообщений в области преобразования ЦИ для общего случая применения одно- и многоэтапных АМВС.

Предметом исследований являются структурные и спектральные методы пассивного стегоанализа, включая АСС и МФА цифровых изображений.

Целью работы является исследование возможностей использования методов АСС и МФА для выявления факта скрытия сообщений для общего случая проведения преобразований, как изображения-контейнера, так и стегоданных.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть мы имеем стеганографическую систему скрытой передачи сообщений, основанную на встраивании изображений-стегоданных  $D_{x,y}$  в области преобразования полноцветного изображения-контейнера  $I_{x,y}$ . При формировании стеганограмм проведены преобразования, как изображения-контейнера, так и скрываемого сообщения. Коэффициенты разложения стеганограмм в базисе преобразования  $\{\psi_i\}_{i=1}^{N_\psi}$  определены как сумма соответствующих коэффициентов разложения контейнера  $K_{\text{cont}} = F_\psi(I_{x,y}, k_{st})$  и, взятых с весовым коэффициентом  $G$ , скрываемого сообщения  $K_{\text{data}} = F_\psi(D_{x,y}, k_{st})$ :

$$K_{\text{steg}} = K_{\text{cont}} + G \cdot K_{\text{data}}. \quad (1)$$

Рассматривается наиболее сложный для проведения стегоанализа случай, когда в качестве стегоключа  $k_{st}$  выбраны позиции коэффициентов  $K_{cont}$ , измененных при скрытии сообщений, а также параметры преобразования стегоданных  $J(D_{x,y})$ .

Тогда для выявления стеганограмм необходимо выделить подмножество спектральных характеристик ЦИ, которые наиболее сильно изменяются при встраивании стегоданных в области преобразования изображений-контейнеров согласно АМВС. Данная задача сводится к задаче минимизации целевой функции:

$$\frac{1}{\sum_{i \in \Lambda} |T_C^i - T_S^i|} \rightarrow \min.$$

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Локальный характер изменений параметров ЦИ, в случае применения адаптивных методов скрытия сообщений, существенно усложняет проведение стегоанализа с использованием стандартных методов, основанных на использовании простых статистических моделей ЦИ, например,  $\chi^2$ -теста, RS-анализа.

Для повышения эффективности пассивного стегоанализа стеганограмм в случае применения АМВС был предложен метод, основанный на использовании статистических моделей ЦИ [3], включающих наборы (кластеры) статистических характеристик изображений. При формировании кластеров использовались наиболее общие параметры ЦИ, в частности, гистограммы распределений и матрицы сочетаемости яркости пикселей. Дальнейшее увеличение точности распознавания АМВС было достигнуто путем объединения нескольких кластеров характеристик ЦИ (например, J+SRM-модель [2]), и анализа результатов свертки шумовых компонент ЦИ со случайно выбранными векторами в PSRM-модели [4]. Платой за высокую точность обнаружения стеганограмм являлось существенное возрастание требований к объему тестовой выборки ЦИ и времени настройки стегодетектора.

В работах [5, 6] для исследования изменений параметров ЦИ, обусловленных встраиванием стегоданных с применением ДКП и ДДВП, было предложено использовать специальные методы структурного анализа ЦИ. Было показано, что скрытие сообщений в контейнерах приводит к существенным изменениям мультифрактальных

характеристик шумовых компонент ЦИ [5], вид которых зависит от типа использованных преобразований контейнера и наличия/отсутствия этапа предварительной обработки стегоданных [7]. В ряде случаев практическое использование данных методов ограничивает их высокая вычислительная сложность и возможность анализа только шумовых компонент ЦИ. Поэтому представляет интерес использование методов спектрального анализа, позволяющих проводить комплексное исследование изменений параметров ЦИ, для определения факта встраивания стегоданных с применением ДКП и ДДВП.

В работах [5, 6] для исследования изменений параметров ЦИ, обусловленных встраиванием стегоданных с применением ДКП и ДДВП, было предложено использовать специальные методы структурного анализа ЦИ. Было показано, что скрытие сообщений в контейнерах приводит к существенным изменениям мультифрактальных характеристик шумовых компонент ЦИ [5], вид которых зависит от типа использованных преобразований контейнера и наличия/отсутствия этапа предварительной обработки стегоданных [7]. В ряде случаев практическое использование данных методов ограничивает их высокая вычислительная сложность и возможность анализа только шумовых компонент ЦИ. Поэтому представляет интерес использование методов спектрального анализа, позволяющих проводить комплексное исследование изменений параметров ЦИ, для определения факта встраивания стегоданных с применением ДКП и ДДВП.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследованы одноэтапные и двухэтапные стеганографические методы, использующие преобразования, как контейнеров, так и стегоданных. Этапы обработки контейнеров и стегоданных согласно методам Дея [9], Элайона [8] и Гунджаля [10] представлены в табл. 1.

На предварительном этапе обработки ЦИ, согласно методам Элайона и Гунджаля, производилось изменение системы цвета изображения-контейнера (табл. 1): с RGB на YCbCr/YIQ, что позволило минимизировать искажения цвета изображения-контейнера при встраивании стегоданных.

Формирование стеганограмм согласно методам Дея и Элайона производилось согласно формуле (1) с выборов в качестве базисных функций ДДВП вейвлета Хаара и соответствующей ему скейлинг-функции. Минимальное и максимальное значения параметра  $G$  были опре-

Таблица 1 – Этапы обработки контейнера и стегоданных при формировании стеганограмм согласно рассмотренным стеганографическим методам

Метод	Обработка контейнера			Обработка стегоданных		Весовой коэффициент $G$
	Изменение системы цвета	Первый этап	Второй этап	Первый этап	Второй этап	
Дея	–	ДДВП	–	ДДВП	–	0,02; 0,04; 0,06; 0,08
Элайона	RGB → YCbCr (скрытие в Y-канале)	ДДВП	–	Преобразование Арнольда	ДДВП	1; 4; 8; 12
Гунджаля	RGB → YIQ (скрытие в I-канале)	ДДВП	ДКП	Преобразование Арнольда	ДКП	$G_0 = 3;$ $G_1 \in \{5, 8, 11, 14\}$

делены из условий возможности извлечения стегоданных без искажений и появления видимых изменений изображения-контейнера при встраивании сообщений.

Для дополнительного уменьшения вероятности выявления стеганограмм, при их формировании, к стегоданным, представленным в виде полутонового изображения  $D_{x,y}$  с размерами  $W_x \times W_y$  ( $W_x = W_y$ ) (пикселей), применялись  $N_A$  итераций ПА [11]. Особенностью ПА является периодичность – после конечного количества итераций исходное и полученное изображения совпадают. Для предотвращения такой ситуации в работе количество итераций ПА было выбрано равным  $N_A = 23$ , которое не является делителем размеров встраиваемых стегоданных.

В случае двухэтапного метода Гунджаля, к детализирующим коэффициентам ДДВП, полученным на первом этапе обработки изображения-контейнера, применялось ДКП. Встраивание сообщений, полученных после ПА, производилось аналогично формуле (1) – путем суммирования коэффициентов ДКП контейнера и стегоданных. Отметим, что величина весового параметра  $G$  изменялись в зависимости от значения скрываемого бита (табл. 1) – единицы ( $G = G_1$ ) либо нуля ( $G = G_0$ ).

АСС ЦИ является двумерным расширением известного метода исследований временных рядов Singular Spectrum Analysis [12]. Особенностью данного метода является использование сингулярного разложения для разделения информативных и шумовых компонент рассматриваемого сигнала.

АСС изображений проводился в четыре этапа [12]. На первом этапе, путем обработки заданного полутонового изображения  $I_{x,y}$  ( $N_x \times N_y$  пикселей) с использованием скользящего окна  $R_{x,y}$  ( $L_x \times L_y$  пикселей), была сформирована блочно-ганкелева матрица  $M_{BH}$ :

$$M_{BH} = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & \dots & B_{K_y} \\ B_2 & B_3 & B_4 & \dots & B_{K_y+1} \\ B_3 & B_4 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ B_{L_y} & B_{L_y+1} & \dots & \dots & B_{N_y} \end{pmatrix},$$

$$B_j = \begin{pmatrix} I_{1,j} & I_{2,j} & \dots & I_{K_x,j} \\ I_{2,j} & I_{3,j} & \dots & I_{K_x+1,j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{L_x,j} & I_{L_x+1,j} & \dots & I_{N_x,j} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

где  $K_x = N_x - L_x + 1, K_y = N_y - L_y + 1$ .

На втором этапе было выполнено сингулярное разложение матрицы  $M_{BH}$ :

$$M_{BH} = \sum_{i=1}^P M_i = \sum_{i=1}^P \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T. \quad (3)$$

На третьем этапе анализа производилась группировка троек  $M_i$  (3) в  $L$  групп:

$$M_{BH} = \sum_{i=1}^P M_i = \sum_{j=1}^L \left( \sum_{q=1}^{L_j} M_q \right), \sum L_j = P. \quad (4)$$

На последнем этапе АСС для восстановления исходного ЦИ в пространственной области проводилась нормировка групп собственных троек (4) по норме Фробениуса и проектирование их на множество блочно-ганкелевых матриц вида (2), используя операторы  $H_0^{R^{1 \times 1}}$  и  $H^{R^{L_x \times K_x}}$  [12], усредняющие элементы внутри блоков матрицы  $M$ :

$$\tilde{M} = H^{R^{L_x \times K_x}} \circ H_0^{R^{1 \times 1}} (M) = H_0^{R^{1 \times 1}} \circ H^{R^{L_x \times K_x}} (M).$$

Обычно порядок группировки троек  $M_i$  для чистого изображения-контейнера неизвестен. Поэтому анализ интегральных изменений компонент АСС-разложения ЦИ (групп собственных троек) был проведен на основе исследования параметров КМ (табл. 2), элементы которой рассчитывались согласно формуле:

$$C_{ij} = \frac{E \left[ \left( M_i - E[M_i] \right) \left( M_j - E[M_j] \right) \right]}{\sqrt{D[M_i]} \sqrt{D[M_j]}}, i \leq P, j \leq P.$$

Однородность значений элементов КМ (табл. 2) является мерой близости положения элементов с большими значениями к главной диагонали КМ, а энтропия позволяет оценить степень «хаотичности» значений элементов корреляционной матрицы  $C$ .

Для выявления и исследования фрактальных свойств временных рядов широко используется МФА [13]. Отличие МФА от известных методов оценки показателя Херста, например, R/S-анализа, состоит в представлении исследуемого сигнала в виде суперпозиции набора фракталов с единственным значением фрактальной размерности (монофракталов), что позволяет исследовать мультифрактальные свойства отдельных компонент сигнала.

Таблица 2 – Исследованные параметры корреляционной матрицы компонент АСС-разложения стеганограмм

Параметр корреляционной матрицы	Формула для расчета
Равномерность значений элементов	$R_1 = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P C_{ij}^2$
Однородность значений элементов КМ	$R_2 = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P [C_{ij} / (1 +  i - j )]$
Средние значения элементов КМ	$R_3 = (1/P^2) \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P C_{ij}$
Параметр корреляционной матрицы	Формула для расчета
Энтропия значений элементов КМ	$R_4 = -\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P (p_{ij} \times \log_2 p_{ij}),$ $p_{ij} = C_{ij} / \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P (C_{ij})$

Классические методы МФА позволяют проводить анализ только бинарных ЦИ и дают существенную погрешность при оценке мультифрактальных параметров, обусловленную наличием краевых эффектов [14]. Поэтому в работе был использован усовершенствованный метод оценки мультифрактальных характеристик ЦИ [15], который выдержал следующие этапы:

1. Фрагментирование исходного ЦИ  $I_{x,y}$ , представленного в градациях серого цвета, на перекрывающиеся блоки размером  $s \times s$  пикселей. Область пересечения блоков по горизонтали (вертикали) составляла одну строку (столбец).

2. Вычисление относительной высоты  $n_s$  каждого блока разбиения ЦИ:

$$n_s = \begin{cases} \left[ \frac{(z_{\max} - z_{\min}) \cdot (1 + 2a\sigma)}{(s-1)} \right], & \text{если } z_{\max} \neq z_{\min} \\ 1, & \text{если } z_{\max} = z_{\min} \end{cases}$$

Согласно рекомендациям [15], значение параметра  $a$  было выбрано равным 3, что позволило минимизировать погрешность оценки мультифрактальных параметров ЦИ при анализе шумоподобных текстов.

3. Вычисление распределения вероятностей  $p(n_s) = n_s / \sum_s n_s$  для высот  $n_s$  отдельных блоков разбиения  $I_{x,y}$  и заданного размера блока  $s$ .

4. Вычисление обобщенной статистической суммы  $Z(q, s)$  и спектра обобщенных фрактальных размерностей  $D_q$ :

$$Z(q, s) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N(s)} p_i^q(s), & \text{если } q \in \mathbb{R} \setminus \{0\}; \\ \sum_{i=1}^{N(s)} [-p_i(s) \times \log(p_i(s))], & \text{если } q = 0, \end{cases}$$

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}, \tau(q) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q, r)}{\ln(r)}$$

5. Вычисление мультифрактального спектра:

$$\alpha(q) = \frac{d}{dq} [(q-1) \cdot D_q], f(\alpha) = q \cdot \alpha(q) - \tau(q)$$

Для повышения точности оценки значений обобщенных фрактальных размерностей этапы № 1–3 повторялись не менее трех раз при разных значениях размера блока разбиения  $s$ . При проведении исследований мультифрактальных параметров стеганограмм были использованы следующие характеристики СОФР и МФС [13]: информационная ( $D_1$ ), корреляционная ( $D_2$ ) и граничные обобщенные фрактальные размерности ( $D_{-\infty}, D_{+\infty}$ ); ширина ( $\Delta_\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ ) и размах ( $\Delta_f = f_{\max} - f_{\min}$ ) МФС.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследование было проведено с использованием тестового пакета из ста полноцветных ЦИ с разрешением UHD-4K. В качестве стегоданных были выбраны три полноцветных изображения с различной степенью детализации: портрет, чертеж и карта. Характеристики тестовых изображений и скрываемых сообщений представлены в табл. 3.

Анализ стеганограмм проводился при изменении степени заполнения контейнера стегоданными (отношения измененных коэффициентов разложения ЦИ к общему количеству коэффициентов разложения изображения-контейнера) от 5% до 25%, с шагом 5%, и от 25% до 95%, с шагом 10%.

В работе приведены результаты исследования АСС стеганограмм, сформированных согласно методу Дея при размерах скользящего окна  $R_{x,y}$  равных  $50 \times 50$  (пикселей) и шаге выборки блоков ЦИ по строкам/столбцам  $\Delta_b = 500$  пикселей. Отметим, что АСС характеризуется высокой вычислительной сложностью и для его реализации необходим большой объем памяти. Это связано с тем, что размеры матрицы  $M_{BH}(2)$  нелинейно зависят от размеров анализируемого ЦИ и скользящего окна  $R_{x,y}$ :

$$M_{(L_x L_y) \times (K_x K_y)} = M_{(L_x L_y) \times [(N_x - L_x + 1)(N_y - L_y + 1)]}$$

По результатам предварительных исследований было установлено, что заданная точность определения характеристик МФА ЦИ при минимальном времени расчета достигается при выборе диапазона значений параметра  $q \in [-20; 20]$  и шаге выборки  $\Delta_q = 0,5$ . Зависимости  $D_q$ ,  $\alpha(q)$  и  $f(\alpha)$  получены при использовании сплайн-интерполяции данных.

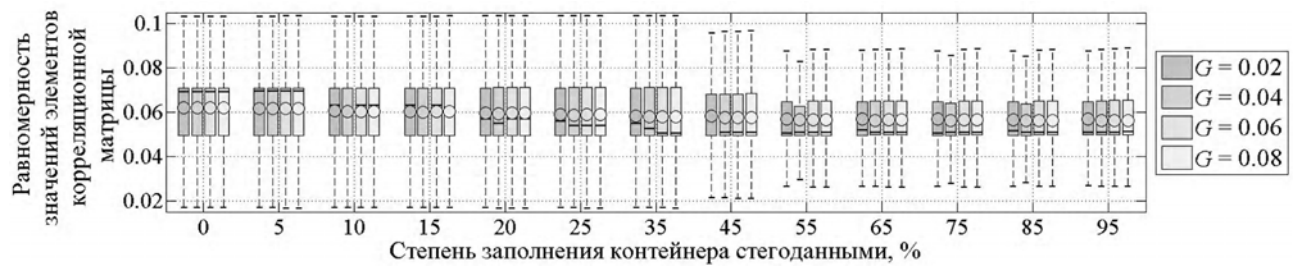
#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты АСС стеганограмм, сформированных согласно методу Дея, представлены на рис. 1–2 в виде графика «ящик с усами». Линией в «ящике» и кружком отображаются, соответственно, медиана и среднее значение параметров КМ; концы «усов» рассчитывались согласно следующим выражениям:  $L_{up} = Q_3 + 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1)$ ,  $L_{down} = Q_1 - 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1)$ , где первый ( $Q_1$ ) и третий ( $Q_3$ ) квартили распределения значений параметров КМ соответствуют нижней /верхней границе «ящика».

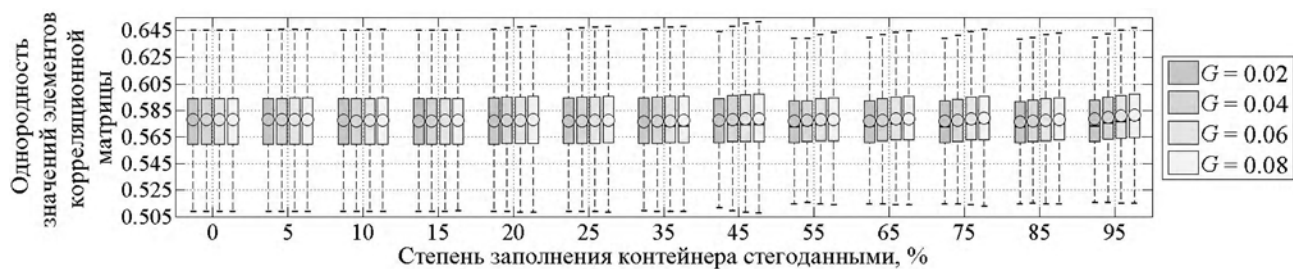
Скрытие стегоданных согласно методу Дея приводит к существенным изменениям медиан значений равномерности (рис. 1а) и энтропии (рис. 2) элементов КМ, что дает возможность распознать наличие скрытых сообщений в ЦИ. Одновременное уменьшение интерквартильного размаха  $IQR = Q_3 - Q_1$  значений анализируемых параметров свидетельствует об устойчивости данного демаскирующего признака.

Таблица 3 – Характеристики тестовых изображений и стегоданных

Параметр	Тестовые изображения	Стегоданные		
		Портрет	Чертеж	Карта
Разрешение, пикселей	3840×2160	565×850	567×463	800×800
Формат представления	JPEG	BMP	BMP	BMP
Система цвета	RGB	RGB	RGB	RGB
Глубина цвета, [бит/(пиксель×канал)]	8	8	8	8



а



б



в

Рисунок 1 – Результаты АСС стеганограмм, сформированных согласно методу Дея: а – равномерность значений элементов КМ; б – однородность значений элементов КМ; в – средние значения элементов КМ

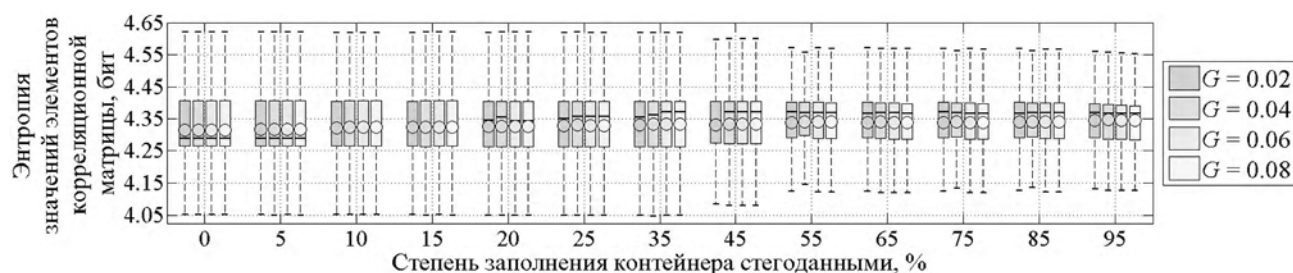


Рисунок 2 – Результаты АСС стеганограмм, сформированных согласно методу Дея – энтропия значений элементов КМ

Для оценки изменений мультифрактальных параметров компонент ЦИ при встраивании стегоданных был проведен МФА стеганограмм. Результаты МФА представлены на рис. 3–4, где минимальные значения параметров получены при  $G = G_{\min}$ , а максимальные – при  $G = G_{\max}$  (табл. 1).

Изменения информационной (рис. 3а), корреляционной (рис. 3б) и граничной обобщенной фрактальной размерности  $D_{+\infty}$  (рис. 4б) для одноэтапных методов встраивания стегоданных близки к нулю. Это свидетель-

ствует о незначительных изменениях энтропии яркости пикселей всего изображения и корреляции значений яркости соседних пикселей при формировании стеганограмм согласно методам Дея и Элайона.

Изменения параметров СОФР и МФС ЦИ (рис. 3–4) в случае применения двухэтапного метода Гунджала существенно больше изменений соответствующих параметров для одноэтапных методов Дея и Элайона, что позволяет распознавать применение одно- и двухэтапных методов скрытия сообщений при проведении стегоанализа ЦИ.

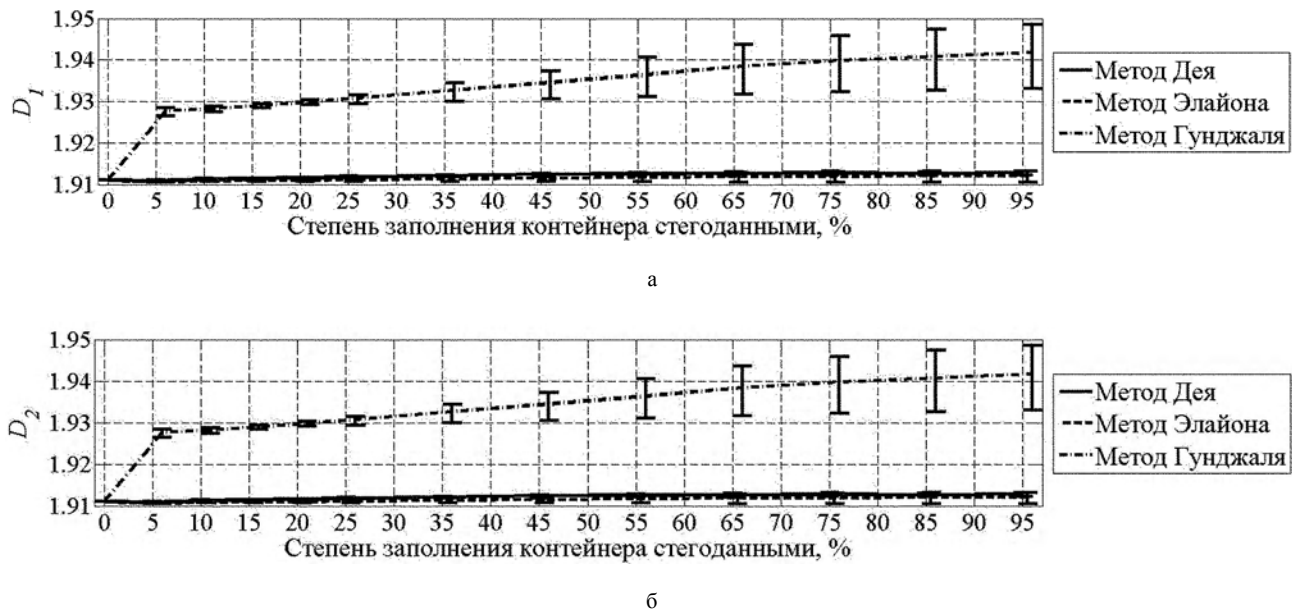


Рисунок 3 – Результаты МФА стеганограмм: а – информационная размерность  $D_1$ ; б – корреляционная размерность  $D_2$ ; в – граничная обобщенная фрактальная размерность  $D_{-\infty}$

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод пассивного стегоанализа, по сравнению с методами, рассмотренными в работах [2–4], при заданной вероятности распознавания стеганограмм, требует существенно меньших затрат времени и ресурсов памяти, даже для случая многоэтапного формирования стеганосистемы.

Формирование стеганограмм согласно методу Дея практически не изменяет усредненных значений элементов КМ (рис. 1в), но приводит к возрастанию энтропии их значений (рис. 2), что соответствует росту дисперсии значений элементов КМ. С другой стороны, однородность значений элементов КМ остается практически неизменной (рис. 1б), что свидетельствует об одинаковом уровне искажений, внесенных в компоненты АСС-разложения ЦИ при скрытии стегоданных.

К недостаткам предложенного метода пассивного стегоанализа можно отнести то, что диапазон изменений характеристик АСС-разложения стеганограмм сравнительно мал (порядка  $10^{-3}$ ). Вследствие этого (существенно) усложняется алгоритм настройки стегодетектора, однако использование интегральных характеристик АСС-разложения стеганограмм позволяет достичь вероятности распознавания стеганограмм сопоставимой со случаем применения J+SRM-модели [2] при существенном сокращении размерности используемого пространства признаков.

Отметим, что при проведении МФА был получен а priori неочевидный результат. Двухэтапный метод Гунджалия встраивания стегоданных, который за счет уменьшения уровня демаскирующих признаков показал высокую робастность к стандартным методам стегоанализа, в случае применения МФА оказался менее

устойчивым, чем одноэтапные методы. Существенное увеличение значений обобщенных фрактальных размерностей  $D_{-\infty}$  ( $D_{+\infty}$ ) для данного метода (рис. 4а–4б), может быть интерпретировано, как соответствующее увеличение фрактальных размерностей шумовых и детерминированных, например, контуров объектов, компонент ЦИ. Возрастание ширины  $\Delta_\alpha$  и уменьшение размаха  $\Delta_f$  МФС (рис. 4в–4г) свидетельствует об увеличении мощности множества монофрактальных компонент ЦИ при сужении диапазона значений фрактальных размерностей данных компонент.

Также было выявлено, что предварительная обработка стегоданных в случае одноэтапных методов (метод Элайона) позволяет минимизировать искажения мультифрактальных параметров ЦИ (рис. 3–4) в широком диапазоне значений степени заполнения контейнера.

## ВЫВОДЫ

В работе решена задача выявления характерных искажений спектральных характеристик стеганограмм, сформированных согласно АМВС, с использованием АСС и МФА для общего случая обработки, как изображения-контейнера, так и скрываемых сообщений.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о возможности использования спектральных методов анализа ЦИ для распознавания факта скрытия сообщений в области преобразования контейнера.

В результате проведенных исследований спектральных характеристик стеганограмм, сформированных согласно одно- и двухэтапным методам встраивания стегоданных, установлено следующее.

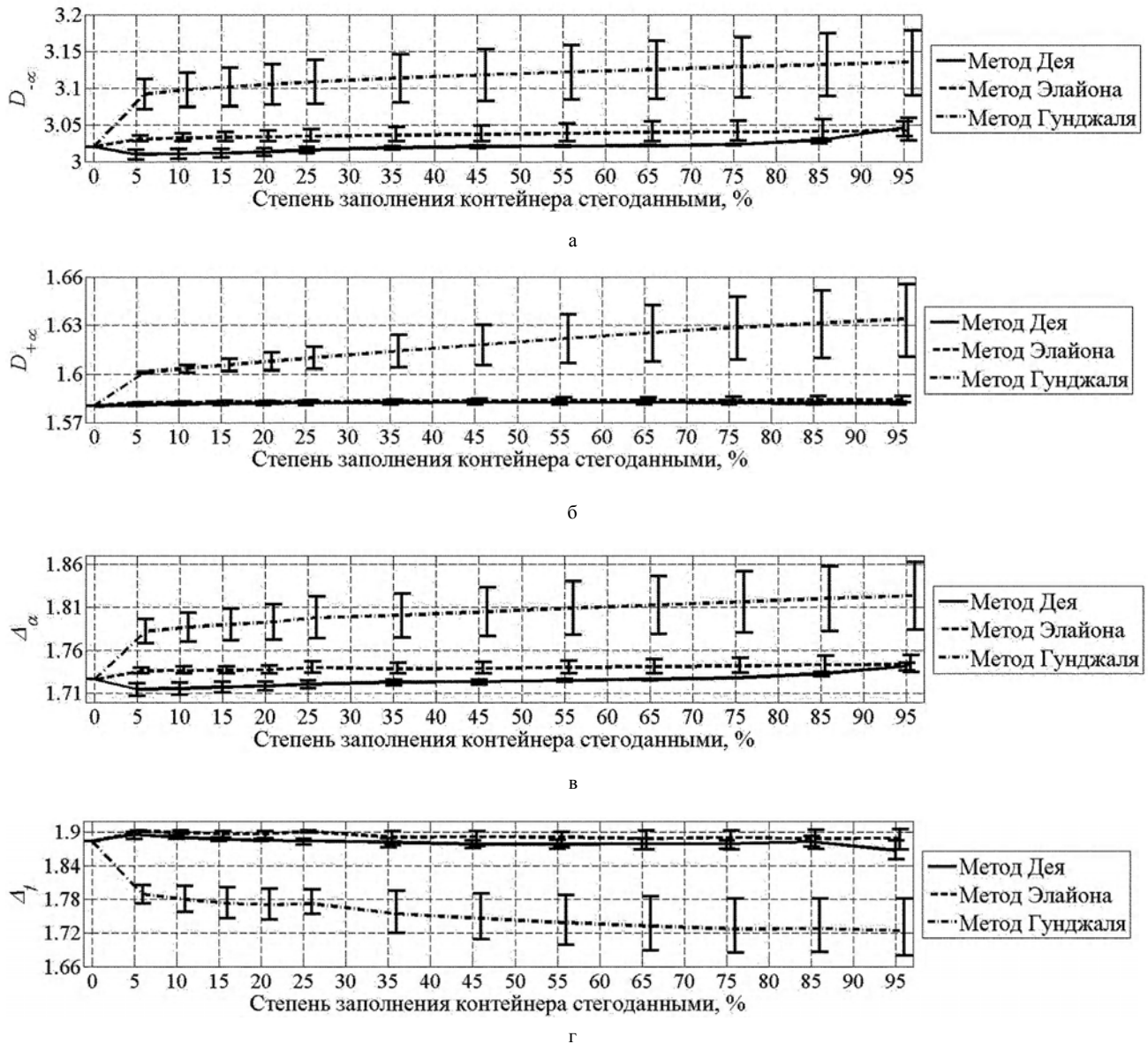


Рисунок 4 – Результаты МФА стегограмм: а – граничная обобщенная фрактальная размерность  $D_{-\infty}$ ; б – граничная обобщенная фрактальная размерность  $D_{+\infty}$ ; в – ширина МФС  $\Delta_{\alpha}$ ; г – размах МФС  $\Delta_f$

1. Встраивание стегоданных в контейнеры с применением одноэтапных методов приводит к значительным изменениям энтропии значений элементов КМ компонент АСС-разложения ЦИ. Данный демаскирующий признак является устойчивым в широком диапазоне значений степени заполнения контейнера стегоданными, что представляет особый интерес в связи с постоянным увеличением объемов контейнеров, например от Full HD к UHD-4K и UHD-8K.

2. Характерные изменения результатов МФА стегограмм, сформированных двухэтапными методами – возрастание мощности множества монофрактальных компонентов ЦИ и уменьшение диапазона изменений фрактальных размерностей данных компонент, позволяет обнаруживать факт использования данных стегографических методов с высокой точностью.

3. Не смотря на то, что при формировании стегограмм на основе одно и двухэтапных методов используются преобразования одного вида, для повышения эффективности пассивного стегоанализа, для каждого метода необходима разработка специализированного стегодетектора.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- разработан программный комплекс, позволяющий проводить пассивный стегоанализ стегограмм, сформированных на основе одно- и многоэтапных АМВС;
- применение выявленных характерных изменений спектральных характеристик ЦИ при скрытии сообщений согласно АМВС позволило существенно уменьшить время и вычислительную сложность процедуры настройки стегодетектора;



Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности современных стегодетекторов и разработки целевых методов активного стегоанализа двухэтапных комплексных методов скрытия сообщений в ЦИ.

Дальнейший интерес представляет исследование возможности применения МФА в случае использования статистических АМВС (например, методов HUGO, S-UNIWARD).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Статья написана по материалам, полученным в рамках выполнения научно-исследовательской темы «Стеганография многомерных сигналов кафедры физико-технических средств защиты информации Физико-технического института Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kodovsky J. Calibration revisited / J. Kodovsky, J. Fridrich // 11<sup>th</sup> Multimedia and Security Workshop, New York, 2009 : proceedings. – New York : ACM Press, 2009. DOI 10.1145/1597817.1597830.
2. Fridrich J. Rich models for steganalysis of digital images / J. Fridrich, J. Kodovsky // Transactions on Information Forensics and Security. – 2012. – Vol. 7, Issue 3. – P. 868–882. DOI 10.1109/tifs.2012.2190402.
3. Liu Q. Steganalysis of DCT-embedding based adaptive steganography and YASS / Q. Liu // 13<sup>th</sup> Multimedia & Security Workshop, New York, 2011 : proceedings. – New York : ACM Press, 2011. – P. 77–86. DOI 10.1145/2037252.2037267.
4. Holub V. Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis / V. Holub, J. Fridrich // Transactions on Information Forensics and Security. – 2013. – Vol. 8, Issue 12. – P. 1996–2006. DOI 10.1109/tifs.2013.2286682.
5. Прогонов Д. О. Виявлення стегонограм з даними, прихованими в області перетворення цифрових зображень / Д. О. Прогонов, С. М. Куш // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2014. – № 57. – С. 128–142.
6. Прогонов Д. Вариограмний аналіз стегонограм / Д. Прогонов, С. Куш // Захист інформації і безпека інформаційних систем: III Міжнародна науково-технічна конференція, Львів, 5–6 червня 2014 р.: матеріали конференції. – Львів : Українська академія друкарства, 2014. – С. 84–85.
7. Прогонов Д. А. Определение типа преобразований, использованных для скрытия данных в цифровых изображениях / Д. А. Прогонов, С. Н. Куш // System analysis and information technologies : 16-я Международная научно-практическая конференция, Киев, 26–30 мая 2014 г. : материалы конференции. – К. : УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2014. – С. 435–436.
8. Elahian A. Improved robust DWT-watermarking in YCbCr color space / A. Elahian, M. Khalili, S. B. Shokouhi // Global journal of computer application and technology. – 2011. – Vol. 1, Issue 3. – P. 300–304.
9. Dey N. A novel approach of color image hiding using RGB color planes and DWT / N. Dey, A. B. Roy, S. Dey // International journal of computer application. – 2011. – Vol. 36, Issue 5. – P. 19–24.
10. Gunjal B. L. Secured color image watermarking technique in DWT-DCT domain / B. L. Gunjal, S. N. Mali // International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology (IJCEIT). – 2011. – Vol. 1, Issue 3. – P. 36–44.
11. Nance J. Periods of discretized Arnold Cat Map and its extension to dimensions [Electronic resource] / J. Nance. – Cornell University Library, e-print archive. – Access mode: <http://arxiv.org/abs/1111.2984>.
12. Golyandina N. E. 2D-extended of singular spectrum analysis: algorithm and elements of theory / N. E. Golyandina, K. D. Usevich // World scientific. – P. 449–473. – DOI 10.1142/9789812836021\_0029.
13. Божокін С.В. Фрактали і мультифрактали: монографія / С. В. Божокін, Д. А. Паршин. – Іжевск : НИЦ. Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 128 с.
14. Lopes R. Fractal and multifractal analysis: A review / R. Lopes, N. Betrouni // Medical Image Analysis. – 2009. – Vol. 13, Issue 4. – P. 634–649. DOI 10.1016/j.media.2009.05.003.
15. Li J. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation / J. Li, Q. Du, C. Sun // Pattern Recognition. – 2009. – Vol. 42, Issue 11. – P. 2460–2469. DOI 10.1016/j.patcog.2009.03.001.

Статья поступила в редакцию 09.12.2014.

После доработки 12.12.2014.

Прогонов Д. О.<sup>1</sup>, Куш С. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Магістр, аспірант кафедри фізико-технічних засобів захисту інформації, Фізико-технічний інститут, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізико-технічних засобів захисту інформації, Фізико-технічний інститут, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

## СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТЕГНОГРАМ

Для підвищення стійкості стегоаналізу широко використовуються методи приховання повідомлень в області перетворення цифрових зображень. Використання при формуванні стегонограм стандартних методів обробки зображень-контейнерів та стегоданих – двовимірних дискретних косинусного та вейвет перетворень – дозволяє мінімізувати спотворення вбудованих повідомлень при стисненні зображень.

В роботі для виявлення факту вбудовування стегоданих з використанням стандартних перетворень контейнеру та стегоданих запропоновано використовувати методи спектрального аналізу зображень: аналіз спектру сингулярностей та мультифрактальний аналіз. Перевагою даного підходу у порівнянні зі статистичними методами стегоаналізу є можливість дослідження одночасно декількох компонент зображення-контейнеру, що дозволяють локалізувати область приховання повідомлень.

Аналіз ефективності застосування методів спектрального аналізу був проведений для випадку використання одноетапних та багатоетапних методів формування стегонограм. Показано, що вбудовування повідомлень призводить до змін усіх компонент сингулярного розкладу зображення-контейнеру, а також появи характерних спотворень мультифрактальних характеристик стегонограм – підвищення потужності множини монофрактальних компонент зображень. Виявлені демаскуючі ознаки наявності прихованих повідомлень є стійкими в широкому діапазоні змін ступеня заповнення контейнеру стегоданими, що спрощує задачу виявлення повідомлень, прихованих в області перетворення зображень.

**Ключові слова:** цифрові зображення, пасивний стегоаналіз, аналіз спектру сингулярностей, мультифрактальний аналіз.

Progonov D. O.<sup>1</sup>, Kushch S. M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., post-graduate student of Faculty of Information Security, The Institute of Physics and Technology, National technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of Faculty of Information Security, The Institute of Physics and Technology, National technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

### SPECTRAL ANALYSIS OF STEGANOGRAMS

The data embedding algorithms in transformation domain of digital images are widely used for increasing the robustness of stegoalgorithms to known steganalysis methods. Applying of standard transformations the digital images by steganograms forming – two-dimensional discrete cosine and wavelet transforms – allows minimizing the garbling the hidden messages by image compression.

We propose to use the spectral analysis methods – singular spectrum analysis and multifractal analysis – for revealing the fact of message embedding with usage of standard transform of cover image and stegodata. The advantage of such approach in comparison with statistical steganalysis methods is possibility to simultaneously investigation of several components the cover image, which allows localizing the domain of data hiding.

Research of effectiveness of the spectral analysis methods was provided for the case of usage the one-stage and multi-stage embedding methods. It is shown that stegodata embedding leads to alteration the all components of singular value decomposition of cover images as well as appearance the peculiar alteration of multifractal features the steganograms – increasing the cardinality of monofractal components the image. Revealed distinctive features of steganograms are stable in wide range of cover image payloads, which is simplifying of task of stegodata revealing, hidden in transformation domain of digital images.

**Keywords:** digital images, passive steganalysis, singular spectrum analysis, multifractal analysis.

### REFERENCES

- Kodovsky J., Fridrich J. Calibration revisited, *11<sup>th</sup> Multimedia and Security Workshop, New York, 2009: proceedings*. New York, ACM Press, 2009. DOI 10.1145/1597817.1597830.
- Fridrich J., Kodovsky J. Rich models for steganalysis of digital images, *Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, Vol. 7, Issue 3, pp. 868–882. DOI 10.1109/tifs.2012.2190402.
- Liu Q., Steganalysis of DCT-embedding based adaptive steganography and YASS, *13<sup>th</sup> Multimedia & Security Workshop, New York, 2011, proceedings*. New York, ACM Press, 2011, p. 77–86. DOI 10.1145/2037252.2037267.
- Holub V., Fridrich J. Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis, *Transactions on Information Forensics and Security*, 2013, Vol. 8, Issue 12, pp. 1996–2006. DOI 10.1109/tifs.2013.2286682.
- Progonov D. O., Kushch S. M. Vyjavlennja steghanogram z danymy, prykhovanymy v oblasti peretvorennja cyfrovych zobrazenj, *Visnyk Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu Ukrainy «Kyjivskij politehniknij instytut»*. Serija – Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja, 2014, Vol. 57, pp.128–142.
- Progonov D., Kushch S. Variogramnyj analiz steganogram, *Zahyst informacii' i bezpeka informacijnyh system: III Mizhnarodna naukovo-tehnicna konferencija*, L'viv, 5–6 chervnja 2014 r.: materialy konferencii'. L'viv, Ukraїns'ka akademija druzkarstva, 2014, pp. 84–85.
- Progonov D. A., Kushch S. N. Opredelenie tipa preobrazovanij, ispol'zovannyh dlja skrytija dannyh v cifrovych izobrazhenijah, *System analysis and information technologies: 16-taja Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija*, Kiev, 26–30 maja 2014 g.: materialy konferencii. Kiev, UNK «IPSA» NTUU «KPI», 2014, pp. 435–436.
- Elahian A., Khalili M., Shokouhi S. B. Improved robust DWT-watermarking in YCbCr color space, *Global journal of computer application and technology*, 2011, Vol. 1, Issue 3, pp. 300–304.
- Dey N., Roy A. B., Dey S. A novel approach of color image hiding using RGB color planes and DWT, *International journal of computer application*, 2011, Vol. 36, Issue 5, pp. 19–24.
- Gunjal B. L., Mali S. N. Secured color image watermarking technique in DWT-DCT domain, *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology (IJCEIT)*, 2011, Vol. 1, Issue 3, pp. 36–44.
- Nance J. Periods of discretized Arnold Cat Map and its extension to dimensions [Jelektronnyj resurs]. Cornell University Library, e-print archive. Rezhim dostupa <http://arxiv.org/abs/1111.2984>. Zagl. s jekrana
- Golyandina N. E., Usevich K. D. 2D-extention of singular spectrum analysis: algorithm and elements of theory, *WORLD SCIENTIFIC*, pp. 449–473. DOI 10.1142/9789812836021\_0029
- Bozhokin S. V., Parshin D. A. Fraktaly i mul'tifraktaly: monografija. Izhevsk, NIC, Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika, 2001, 128 p.
- Lopes R., Betrouni N. Fractal and multifractal analysis: A review, *Medical Image Analysis*, 2009, Vol. 13, Issue 4, pp. 634–649. DOI 10.1016/j.media.2009.05.003.
- Li J., Du Q., Sun C. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation, *Pattern Recognition*, 2009, Vol. 42, Issue 11, pp. 2460–2469. DOI 10.1016/j.patcog.2009.03.001.

УДК 004.932.2:519.652

Савков С. О.<sup>1</sup>, Мороз В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірант кафедри обчислювальної математики Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова, Одеса, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн наук, професор кафедри обчислювальної математики Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова, Одеса, Україна

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ СКЕЛЕТИЗАЦІЇ НЕРЕГУЛЯРНИХ ТЕКСТУР В ЗАДАЧІ ПОШУКУ УНІКАЛЬНИХ ДЕСКРИПТОРІВ ЗОБРАЖЕННЯ

Розглянута задача аналізу, ідентифікації та розпізнавання текстур зображень. Об'єктом дослідження є процес скелетизації напівтонних зображень. Предмет дослідження становлять ітераційні та неітераційні методи скелетизації текстур. Мета роботи полягає у виборі придатного методу скелетизації неоднорідних нерегулярних текстур для пошуку унікальних дескрипторів зображень у задачі перевірки автентичності об'єкта.

Розглянуто типи текстур та класифікацію алгоритмів скелетизації, переваги та недоліки алгоритмів різних типів. Проведено обчислювальний експеримент та зроблено порівняльний аналіз ітераційних алгоритмів Жанг-Сюенга, Го-Хола та неітераційного методу серединного осьового перетворення Блюма, які застосовувались до зразків зображень неоднорідних нерегулярних текстур паперу з мікроволоконками. Вирішено задачу порівняльного аналізу алгоритмів скелетизації для зображень неоднорідних нерегулярних текстур. Розроблено критерій якості, який використовує інформацію про кількість відгалужень скелету текстури, що, у свою чергу, залежить від кількості граничних точок скелету. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує розглянуті методи скелетизації та дозволяє ранжувати їх згідно з обраним критерієм.

Результати експерименту дозволяють рекомендувати алгоритм Жанг-Сюенга до практичного застосування для вирішення задачі скелетизації зображень неоднорідних нерегулярних текстур.

**Ключові слова:** розпізнавання текстур, ідентифікація, скелетизація, витончення, серединне осьове перетворення, алгоритм Жанг-Сюенга, алгоритм Го-Хола.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A(P_1)$  – кількість патернів-переходів 01 у впорядкованій множині  $P_2, P_3, P_4, \dots, P_8, P_9$  восьми сусідів пікселя  $P_1$ ;

$B$  – бінарне зображення текстури;

$B(P_1)$  – кількість ненульових сусідів  $P_1$ ;

$C(P)$  – кількість різних 8-зв'язних компонент які мають значення 1 в околі пікселя;

$G$  – багатокутник;

$G_S$  – напівтонове зображення текстури;

$i$  – координати пікселя по вісі абсцис;

$I(i, j)$  – повнокольорове зображення текстури;

$j$  – координати пікселя по вісі ординат;

$M(G)$  – середина вісь;

$N$  – кількість граничних точок скелету;

$P$  – піксель бінарного зображення;

$R$  – радіус-функція;

$S$  – скелет зображення текстури;

$T$  – матриця пікселів;

$\{q\}$  – множина точок внутрішніх для  $G$ ;

$\beta$  – бінарне перетворення зображення;

$\gamma$  – напівтонове перетворення зображення;

$\sigma$  – перетворення скелетизації бінарного зображення;

$\vee$  – логічне АБО.

### ВСТУП

Ідентифікація текстур відноситься до важливих напрямків розвитку обробки зображень. Вона дозволяє вирішувати задачі у багатьох сферах життєдіяльності людини: сільському господарстві, картографії, безпеці, машинобудуванні.

Однією з ключових задач є перевірка автентичності об'єкта, у якій зацікавлені як виробники, що намагаються гарантувати якість, так і споживачі, які відстоюють своє право на якісне обслуговування.

Ця задача може бути розв'язана за допомогою використання додаткового маркування: водяних знаків, голограм, RFID-міток, паперу зі спеціальними волокнами. Ці методи мають різноманітні недоліки, такі як висока ціна, вразливість до пошкоджень, необхідність використання спеціальних приладів перевірки достовірності. Альтернативою може бути використання текстур матеріалів у якості унікального дескриптора об'єкта.

Метою роботи є огляд, порівняльний аналіз та пошук придатних методів скелетизації бінарних зображень неоднорідних нерегулярних текстур.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай ми маємо  $I(i, j)$ . Отримаємо з нього  $G_S(i, j)$ , використовуючи перетворення  $G_S(i, j) = \gamma(I(i, j))$ . До  $G_S(i, j)$  застосуємо перетворення  $\beta$  та отримаємо  $B(i, j) = \beta(G_S(i, j))$ .

Передній план бінарного зображення може бути поданий у вигляді тонких ліній  $S(i, j)$  за допомогою перетворення  $\sigma(B(i, j))$ . Необхідно зробити порівняльний аналіз методів скелетизації, провести експеримент для зразків нерегулярних текстур та пошук придатних методів обробки текстур заданого класу. Як критерій якості буде використовувати кількість  $N$  отриманого  $S(i, j)$ .

### 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Історія алгоритмів скелетизації починається з робіт Рутовіца [1], який у 1966 році представив паралельний алгоритм видалення пікселів. Цей алгоритм послужив основою для багатьох алгоритмів скелетизації. Блюм розглядав інший підхід до вирішення задачі скелетизації та у 1967 році запропонував неітераційний метод – серединне осьове перетворення [2], якому, на відміну від ітераційного методу Рутовіца, не потрібно було вивчати усі пікселі зображення. Неітераційні методи отримали розвиток у роботі Баруха, який запропонував використання віконного перетворення та ліній слідування.

Розенфельд (1975) повернувся до паралельних алгоритмів та вперше оцінив необхідні та достатні умови для збереження топології при видаленні граничних пікселів. Таким чином він вирішив проблему ерозії при витонченні діагональних ліній [3]. У подальшому у співавторстві з Даєром він представив алгоритм скелетизації напівтонових зображень, заснований на ідеї зв'язності пікселів [4]. Павлідіс у 1982 році запропонував комбінацію паралельного та послідовного алгоритмів, яка зменшувала обчислювальний час, необхідний для отримання скелету [5–6].

Різноманітні методи скелетизації отримали широке застосування у системах оптичного розпізнавання символів [7–8], анімації [9], задачах комп'ютерного зору [10], картографії [11]. Огляд та порівняння методів скелетизації у задачі розпізнавання символів представлені у роботах [12] та [13]. Методи скелетизації також широко використовуються для класифікації текстур [14].

### 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У різних наукових напрямках термін «текстура» має свої специфічні означення. Історично він відноситься до ткацького мистецтва (лат. *textura* – тканина). У сучасних словниках текстура визначається як будова твердої речовини, гірської породи, природний малюнок деревини в розрізі. У якості означення приймемо «особливості будови речовини, зумовлені характером та розташуванням її складових частин».

Текстури можна класифікувати за наявністю відносини порядку між елементами. Якщо текстурні елементи розміщені у якомусь порядку, текстура буде називатися регулярною, в іншому випадку – нерегулярною. Також текстури можна розділити на однорідні, якщо вони містять текстурні елементи тільки одного типу, та неоднорідні, якщо вони складаються з елементів багатьох типів.

Термін «скелет» у загальному розумінні обробки зображень означає подання об'єкту множиною тонких ліній, яка описує його форму. Одним з найпростіших пояснень терміну скелет є наочний приклад «пожежа у степу». Зображення розглядається як степ, рівномірно вкритий сухою травою. Передбачається, що по межі області одночасно спалахує вогонь, який поширюється усередині неї з усіх напрямків та з постійною швидкістю. Точками скелета будуть ті очки області, в яких сходяться два (або більше) вогняні фронти. Вони будуть рівновіддаленими від найближчих точок загоряння на кордоні.

Якщо цей підхід поширити на растрові бінарні зображення, то підмножина чорних пікселів растру буде розглядатися як дискретний образ певної замкнутої області, граничні точки растрової множини – як образ кордону області, а безперервне поширення вогню буде моделюватися дискретним процесом послідовного «спалення» чорних пікселів растру. Також можуть використовуватися терміни «серединна вісь» для позначення геометричного місця точок фігури, рівновіддалених від її границь.

У деяких наукових працях «витончення» та «скелетизація» використовуються як синоніми, а термін «скелет» – для позначення результату, незалежно від форми вихідного малюнка або методу, що використовується [12].

Алгоритми скелетизації можна класифікувати як ітераційні та неітераційні. Неітераційні методи будують скелет зображення за один прохід, без вивчення всіх окре-

мих пікселів. Одним з найперших неітераційних методів є метод серединного осьового перетворення Блома, який розглядає скелетизацію як перетворення для опису форми. Результатом перетворення є множина точок, рівновіддалених від границь фігури [12].

Барух запропонував неітераційний непіксельний однопрохідний алгоритм, який будує скелет по лінії слідування. Лінія проходиться вікнами різного розміру, скелет будується як зв'язані центри послідовних вікон. Цей метод менш чутливий до шуму, ніж звичайні алгоритми проріджування [15].

Ітераційні методи витончення будують скелет, досліджуючи та видаляючи контурні пікселі за допомогою неітераційного процесу, послідовного або паралельного (табл. 1).

Паралельний алгоритм скелетизації Рутовіца розглядає пікселі контуру. Ті з них, які мають не менш двох сусідів кольору об'єкту та мають зв'язність чотири, позначаються для видалення. Недоліками запропонованого методу були надмірна ерозія та розташування скелету не по центру, в зв'язку з асиметричною природою його умов.

Паралельні алгоритми також можуть бути додатково класифіковані відповідно до їх продуктивності на алгоритми з чотирма, двома або одним підциклом [16]. Паралельні алгоритми з одним підциклом отримали більш значну увагу, оскільки вони скорочують час обчислення на кількість ітерацій, тому їх іноді називають однопрохідні або повністю паралельні алгоритми [17].

У послідовних алгоритмах точки контуру для видалення розглядаються у заздалегідь визначеному порядку. Це може бути досягнуто за допомогою растрового сканування або обходу зображення по контурних пікселях. Наприклад, послідовний алгоритм Хілдча (1968) сканує зображення зліва направо та зверху вниз, позначаючи пікселі для видалення [18].

У паралельних алгоритмах пікселі для видалення розглядаються на підставі результатів, отриманих тільки з попередньої ітерації. Тому паралельні алгоритми проріджування підходять для реалізації на обладнанні, що використовує паралельні процесори.

Серединне осьове перетворення, запропоноване Бломом, для багатокутника  $G$  визначається наступним чином:  $M(G)$  будується з множини точок  $\{q\}$  внутрішніх для  $G$ . При цьому є принаймні дві точки на кордоні об'єкта, що рівновіддалені від  $\{q\}$  і є найближчими до  $\{q\}$  (рис. 1). З серединною віссю пов'язана радіус-функція  $R$ , яка визначає відстань до кордону багатокутника для кожної точки осі.

Одним з недоліків серединного осьового перетворення є висока чутливість до шуму.

Метод скелетизації Жанг-Сюенга [19] розглядає зображення як матрицю  $T$ , де усі пікселі  $T(i, j)$  мають значення 1 або 0. Патерн текстури складається з тих точок, які мають значення 1.

Таблиця 1 – Класифікація алгоритмів скелетизації

Методи скелетизації				
Ітераційні		Неітераційні		
Послідовні	Паралельні	Серединне осьове перетворення	Метод ліній слідування	Інші

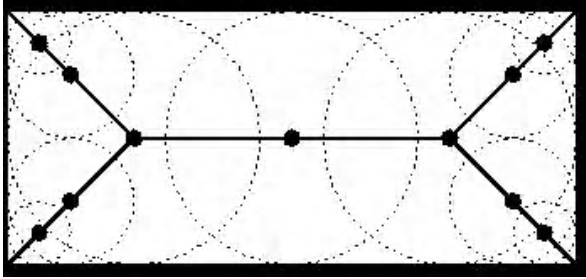


Рисунок 1 – Скелетизація методом серединного осьового перетворення  
 (<http://www.cs.ru.nl/~ths/rt2/col/h9/medialaxisprin.gif>)

Ітераційні перетворення застосовуються до  $T$ , точка за точкою, відповідно до значень невеликого набору сусідніх пікселів:

$$\begin{matrix} p_9(i-1, j-1), & p_2(i-1, j), & p_3(i-1, j+1); \\ p_8(i, j-1), & p_1(i, j), & p_4(i, j+1); \\ p_7(i+1, j-1), & p_6(i+1, j), & p_5(i+1, j+1). \end{matrix}$$

Метод реалізує видалення всіх контурних точок зображення, крім тих точок, що належать до скелету. Для того, щоб зберегти зв'язність скелета, кожна ітерація ділиться на дві під-ітерації.

У першій під-ітерації точка  $p_1$  видаляється, якщо вона задовольняє таким умовам:

$$2 \leq B(P_1) \leq 6, \quad 2 \leq B(P_1) \leq 6, \quad (1)$$

$$A(P_1) = 1, \quad (2)$$

$$P_2 * P_4 * P_6 = 0, \quad (3)$$

$$P_4 * P_6 * P_8 = 0, \quad (4)$$

$$I = (x, y),$$

де  $B(P_1) = P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_8 + P_9$ .

Якщо будь-яка умова не виконується, тоді піксель  $P_1$  не видаляється.

На другій під-ітерації умови (3) та (4) змінюються на наступні умови:

$$P_2 * P_4 * P_8 = 0, \quad (3')$$

$$P_2 * P_6 * P_8 = 0. \quad (4')$$

Алгоритм Го та Хола (1989) відноситься до методів паралельного витончення [20]. Він використовує окіл  $3 \times 3$  для визначення сусідів оброблюваного пікселя  $P$ . Вертикальні та горизонтальні сусіди позначаються парними індексами, діагональні – непарними:

$$\begin{matrix} p_1(i-1, j-1), & p_2(i-1, j+1), & p_3(i-1, j+1); \\ p_8(i, j-1), & P, & p_4(i, j+1); \\ p_7(i+1, j-1), & p_6(i+1, j), & p_5(i+1, j+1). \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Тоді } N(p) &= \text{MIN} [N_1(p), N_2(p)], \\ \text{де } N_1(p) &= (p_1 \vee p_2) + (p_3 \vee p_4) + (p_5 \vee p_6) + (p_7 \vee p_8), \\ N_2(p) &= (p_2 \vee p_3) + (p_4 \vee p_5) + (p_6 \vee p_7) + (p_8 \vee p_1). \end{aligned}$$

$$C(p) = 1;$$

$$2 \leq N(p) \leq 3,$$

$$\begin{cases} (p_2 \vee p_3 \vee p_5) \vee p_4 = 0, & \text{для непарних ітерацій,} \\ (p_6 \vee p_7 \vee p_1) \vee p_8 = 0, & \text{для парних ітерацій.} \end{cases}$$

Процес витончення зупиняється, якщо більше неможливо видалити жодного пікселя.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

У даній роботі методи скелетизації серединне осьове перетворення, Жанг-Сюенга та Го-Хола були протестовані на двох зразках зображень текстури паперу з волокнами, розміром  $255 \times 255$  пікселів (рис. 2). Текстура зразків має нерівномірний фон та мікрволокна розміщені у випадковому порядку. Таким чином, зразки можуть бути класифіковані як нерегулярні неоднорідні текстури. Обробка текстур ускладнюється присутнім на зображеннях цифровим шумом. У якості методу бінарізації використовується метод Саувола з наступними параметрами: розмір вікна  $25 \times 25$  пікселів, доповнення – симетричне, порогове значення –  $0,15$ . Експеримент проводився у програмному середовищі Matlab 7.12.0 та OpenCV 2.4.9.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати застосування перетворення скелетизації до тестових зразків текстур приведені на рис. 3 та рис. 4.



Рисунок 2 – Фрагменти текстур паперу з мікрволокнами:  
 а – зразок 1; б – зразок 2

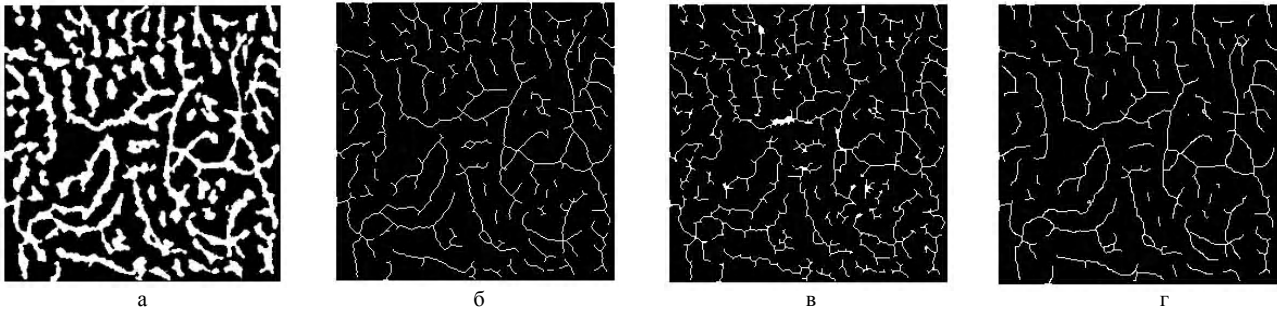


Рисунок 3 – Результати експерименту для зразку 1:  
а – бінарзоване зображення; б – метод Го-Хола; в – метод середньої вісі; г – метод Жанг-Сюенга

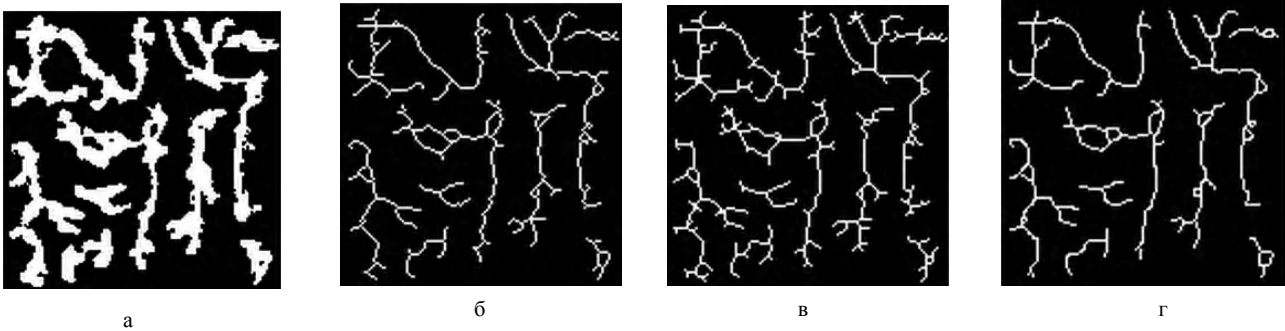


Рисунок 4 – Результати експерименту для зразку 2:  
а – бінарзоване зображення; б – метод Го-Хола; в – метод середньої вісі; г – метод Жанг-Сюенга

**6 ОБГОВОРЕННЯ**

З отриманих результатів видно, що скелет, отриманий за допомогою методу середньої вісі, має розриви та багато відгалужень; алгоритм Го-Хола більш чутливий до форми патерну текстури та дає більш гіллястий скелет; метод Жанг-Сюенга дає найменшу кількість відгалужень та дає більш гладкий скелет.

Через те, що надлишкова кількість відгалужень може заважати розпізнаванню текстури, як критерій якості будемо використовувати число  $N$ , які містяться у  $S(i, j)$  (рис. 5а,б). Точка  $p$  буде граничною, якщо число  $B(p)$  ненульових сусідніх пікселів дорівнює 1. Алгоритм з мінімальним  $N$  буде вважатися найкращим. Кількість граничних точок скелетів тестових зображень наведена у таблиці 2.

Найменшу кількість граничних точок дає алгоритм Жанг-Сюенга, що співпадає з візуальною оцінкою результатів скелетизації.

Результати порівняльного аналізу показали, що менша кількість граничних точок (більш гладкий скелет та відсутність шумових відгалужень) дають можливість зробити висновок про більшу придатність алгоритму Жанг-Сюенга для обробки нерегулярних неоднорідних текстур.

Таблиця 2 – Кількість граничних точок тестових зразків

Алгоритм скелетизації	Кількість граничних точок	
	Зразок 1	Зразок 2
Метод Го-Хола	244	65
Метод середньої вісі	690	113
Метод Жанг-Сюенга	183	44

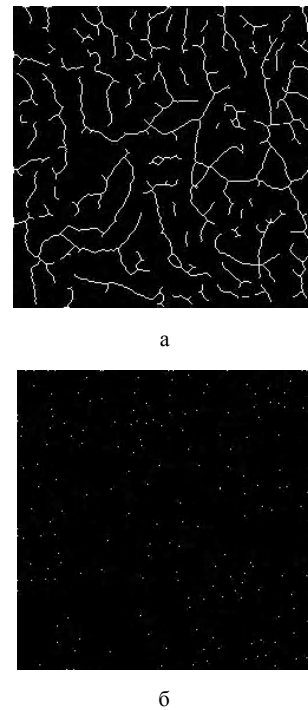


Рисунок 5 – Обчислення граничних точок скелету:  
а – скелетизація зображення за методом Го-Хола; б – граничні точки скелету

**ВИСНОВКИ**

У роботі вирішено актуальну задачу скелетизації бінарзованих зображень нерегулярних неоднорідних текстур, яка є одним з етапів задачі пошуку унікальних дескрипторів зображення.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що вперше було зроблено порівняльний аналіз ітераційних та неітераційних алгоритмів скелетизації зображень нерегулярних неоднорідних текстур.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що обраний метод скелетизації використовується у якості одного з етапів пошуку унікальних дескрипторів зображення текстури у задачі ідентифікації об'єктів.

Перспективи подальших досліджень полягають оптимізації методу скелетизації для багатопроцесорних та мобільних систем та у використанні алгоритму скелетизації Жанг Сюенга для пошуку унікальних дескрипторів зображення текстури.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи №229 «Дослідження деяких класів крайових задач диференційних рівнянь, їх апроксимації та методів обробки зображень» кафедри обчислювальної математики Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rutovitz D. Pattern recognition / D. Rutovitz // Journal of Royal Statistical Society. – 1966. – Vol. 129, no. 4. – P. 504–530.
2. Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape / H. Blum // Models for the Perception of Speech and Visual Form. – Cambridge : MIT Press, 1967. – P. 362–380.
3. Rosenfeld A. A characterization of parallel thinning algorithms / A. Rosenfeld // Information and Control. – 1975. – Volume 29. – Issue 3. – P. 286–291.
4. Dyer C. A. Thinning algorithms for gray-scale pictures / C. Dyer, A. Rosenfeld // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1979. – № 1. – P. 88–89.
5. Pavlidis T. Algorithms for Graphics and Image Processing / T. Pavlidis. – Berlin-NY. : Computer Science Press, Springer-Verlag, 1982. – 447 p.
6. Pavlidis T. An asynchronous thinning algorithm / T. Pavlidis // Computer Graphics Image Processing. – 1982. – № 20. – P. 133–157.
7. Ning L. An Implementation of OCR System Based on Skeleton Matching / L. Ning. – Canterbury : University of Kent, 1993. – 66 p.
8. Mohamed A. An efficient thinning algorithm for arabic OCR systems / A. Mohamed // Signal & Image Processing : An International Journal. – June 2012. – Vol. 3, Issue 3. – P. 31.

Савков С. А.<sup>1</sup>, Мороз В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант кафедри вычислительной математики Одесского национального университета им. И. И. Мечникова

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, профессор кафедры вычислительной математики Одесского национального университета им. И. И. Мечникова, Одесса, Украина

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ СКЕЛЕТИЗАЦИИ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ТЕКСТУР В ЗАДАЧЕ ПОИСКА УНИКАЛЬНЫХ ДЕСКРИПТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрена задача анализа, идентификации и распознавания текстур изображений. Объектом исследования является процесс скелетизации полутоновых изображений. Предмет исследования составляют итерационные и неитерационные методы скелетизации текстур.

Цель работы заключается в выборе подходящего метода скелетизации неоднородных нерегулярных текстур для поиска уникальных дескрипторов изображений в задаче проверки подлинности объекта. Рассмотрены типы текстур и классификация алгоритмов скелетизации, преимущества и недостатки алгоритмов различных типов. Проведен вычислительный эксперимент и сделан сравнительный анализ итерационных алгоритмов Жанг-Сюенга, Го-Холла и неитерационного метода срединного осевого преобразования Блюма, применявшихся к образцам изображений неоднородных нерегулярных текстур бумаги с микроволокнами. Решена задача сравнительного анализа алгоритмов скелетизации для изображений неоднородных нерегулярных текстур. Разработан критерий качества, который использует информацию о количестве ответвлений скелета текстуры, что, в свою очередь, зависит от количества граничных точек скелета. Разработано программное обеспечение, которое реализует рассмотренные методы скелетизации и позволяет ранжировать их согласно выбранному критерию.

Результаты эксперимента позволяют рекомендовать алгоритм Жанг-Сюенга к практическому применению для решения задачи скелетизации изображений неоднородных нерегулярных текстур.

**Ключевые слова:** распознавание текстур, идентификация, скелетизация, уточнение, срединное осевое преобразование, алгоритм Жанг-Сюенга, алгоритм Го-Холла.

9. Porawat V. The Skeleton Pruning-Smoothing Algorithm for Realistic Character Animation / V. Porawat, K. Prachumrak // JMIMT : Journal of Man, Machine and Technology. – 2013. – Vol. 2, no. 1. – P. 21–34.
10. Nicu D. Curve-Skeleton Properties, Applications and Algorithms / D. Nicu, C. Silver, D. Silver // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2007. – Vol. 13, Issue 3. – P. 530–548.
11. Gold C. Map generalization by skeleton retraction / C. Gold and D. Thibault // Proceedings of the 20th International Cartographic Conference Beijing, China, August 6–10, 2001 (ICC 2001). – 2003. – P. 2072–2081.
12. Lam L. Thinning Methodologies – A Comprehensive Survey / L. Lam, S.-W. Lee, C. Y. Suen // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 14, 9 (September 1992). – P. 869–885.
13. Couprie M. Note on fifteen 2D parallel thinning algorithms : Internal Report / M. Couprie. – Université de Marne-la Vallée, 2006. – 21 p.
14. Kumar V. Skeleton Primitive Extraction Method on Textures with Different Nonlinear Wavelets, Texture Classification Based on Extraction of Skeleton Primitives Using Wavelets / V. Kumar, U.S.N. Raju, P. Premchand, A. Suresh // Journal of Computer Science. – 2008. – Vol. 4, Issue 7. – P. 591.
15. Baruch O. Line thinning by line following / O. Baruch // Pattern Recognition Letters. – 1988. – Vol. 8, no. 4. – P. 271–276.
16. Daya B. Parallelization of Two-Dimensional Skeletonization Algorithms / B. Daya // Journal of Undergraduate Research. – University of Florida. – 2008. – Vol. 9, Issue 4. – P. 1–23.
17. Saeed K. K3M a Universal algorithm for image skeletonization and a review of thinning techniques / K. Saeed, M. Tabkdzki, M. Rybnik, M. Adamski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – July 2010. – Vol. 20, Issue 2. – P. 317–335.
18. Hilditch J. An application of graph theory in pattern recognition / J. Hilditch // Machine Intelligence. – Edinburgh. – 1968. – Vol. 3. – P. 325–347.
19. Zhang T. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T. Y. Zhang, C. Y. Suen // Communications of the ACM. – March 1984. – Vol. 27, Issue 3. – P. 236–239.
20. Guo Z. Parallel thinning with two-subiteration algorithms / Z. Guo, R. W. Hall // Communications of the ACM. – March 1989. – Vol. 32, Issue 3. – P. 359–373.

Стаття надійшла до редакції 06.10.2014.

Після доробки 10.11.2014.

Savkov S. O.<sup>1</sup>, Moroz V. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Post-graduate student of Computational Mathematics Department of I. I. Mechnikov Odessa National University

<sup>2</sup>PhD, Professor of Computational Mathematics Department of I. I. Mechnikov Odessa National University

#### ANALYSIS OF SKELETONIZATION METHODS FOR IRREGULAR TEXTURE IN UNIQUE IMAGE DESCRIPTORS SEARCHING

##### PROBLEM

The problem of texture analysis, identification and recognition was investigated. The object of study is the process of grayscale image skeletonization. The subject of research is the iterative and non-iterative texture skeletonization methods for searching unique image descriptors in the problem of authentication object.

The purpose of the work is to select the appropriate method for inhomogeneous irregular texture skeletonization. A review of texture types and skeletonization algorithms classification, advantages and disadvantages of various types of algorithms was given. Computational experiments and comparison of iterative Zhang-Suen and Guo-Hall algorithms and non-iterative method of the Blum's median axis transformation that's applied to the sample images inhomogeneous irregular paper textures with microfibers were made. The problem of the comparative analysis of texture skeletonization algorithms for images of inhomogeneous irregular textures was solved. Was developed quality criterion which uses information about the number of skeleton texture branches, which depends on the number of boundary points of the skeleton. Software that implements the discussed skeletonization algorithms and allows to rank them according to selected criteria was developed.

The experimental results allow us to recommend the algorithm of Zhang-Suen for practical use to solve the problem of image skeletonization of inhomogeneous irregular textures.

**Keywords:** texture recognition, identification, skeletonization, medial axis transformation, Zhang-Suen method, Guo-Hall method.

##### REFERENCES

1. Rutovitz D. Pattern recognition, *Journal of Royal Statistical Society*, 1966, Vol. 129, no. 4, pp. 504–530.
2. Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape, *Models for the Perception of Speech and Visual Form*. Cambridge, MIT Press, 1967, pp. 362–380.
3. Rosenfeld A. A characterization of parallel thinning algorithms, *Information and Control*, 1975, Volume 29, Issue 3, pp. 286–291.
4. Dyer C., Rosenfeld A. Thinning algorithms for gray-scale pictures, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No. 1 (1–1979), pp. 88–89.
5. Pavlidis T. Algorithms for Graphics and Image Processing. Berlin-NY, Computer Science Press, Springer-Verlag, 1982, 447 p.
6. Pavlidis T. An asynchronous thinning algorithm, *Computer Graphics Image Processing*, 1982, No. 20, pp. 133–157.
7. Ning L. An Implementation of OCR System Based on Skeleton Matching. Canterbury, University of Kent, 1993, 66 p.
8. Mohamed A. An efficient thinning algorithm for arabic OCR systems, *Signal & Image Processing : An International Journal*, June 2012, Vol. 3, Issue 3, P. 31.
9. Porawat V., Prachumrak K. The Skeleton Pruning-Smoothing Algorithm for Realistic Character Animation, *JMMT : Journal of Man, Machine and Technology*, 2013, Vol. 2, no. 1, pp. 21–34.
10. Nicu D., Silver C., Silver D. Curve-Skeleton Properties, Applications and Algorithms, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, Vol. 13, Issue 3, pp. 530–548.
11. Gold C., Thibault D. Map generalization by skeleton retraction, *Proceedings of the 20th International Cartographic Conference BeiJing*. China, August 6–10, 2001 (ICC 2001), 2003, pp. 2072–2081.
12. Lam L., Lee S.-W., Suen C. Y. Thinning Methodologies – A Comprehensive Survey, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14, 9 (September 1992), pp. 869–885.
13. Couprie M. Note on fifteen 2D parallel thinning algorithms : Internal Report. Université de Marne-la Vallée, 2006, 21 p.
14. Kumar V., Raju U.S.N., Premchand P., Suresh A. Skeleton Primitive Extraction Method on Textures with Different Nonlinear Wavelets, Texture Classification Based on Extraction of Skeleton Primitives Using Wavelets, *Journal of Computer Science*, 2008, Vol. 4, Issue 7, pp. 591.
15. Baruch O. Line thinning by line following, *Pattern Recognition Letters*, 1988, Vol. 8, no. 4, pp. 271–276.
16. Daya B. Parallelization of Two-Dimensional Skeletonization Algorithms, *Journal of Undergraduate Research*. University of Florida, 2008, Vol. 9, Issue 4, pp. 1–23.
17. Saeed K., Tabkdzki M., Rybnik M., Adamski M. K3M a Universal algorithm for image skeletonization and a review of thinning techniques, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, July 2010, Vol. 20, Issue 2, pp. 317–335.
18. Hilditch J. An application of graph theory in pattern recognition, *Machine Intelligence*. Edinburgh. 1968, Vol. 3, pp. 325–347.
19. Zhang T. Y., Suen C. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, *Communications of the ACM*, March 1984, Vol. 27, Issue 3, pp. 236–239.
20. Guo Z., Hall R. W. Parallel thinning with two-subiteration algorithms, *Communications of the ACM*, March 1989, Vol. 32, Issue 3, pp. 359–373.



# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 519.248 : 621.311.238

Шитикова Е. В.<sup>1</sup>, Табунцик Г. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

#### МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ

Рассмотрены вопросы надежности и функциональной безопасности газотурбинных установок наземного применения. Проведена формализация ранее разработанных моделей рисков газотурбинных установок наземного применения и их процессов. Предложен метод управления неопределенностью сложных технических систем и их процессов в условиях ограниченных ресурсов, основанный на методе оценки рисков и методе выбора контрмер, что позволяет сформировать область критичных рисков для исследуемой сложной технической системы. Усовершенствован метод выбора контрмер из альтернативных вариантов, основанный на методе анализа иерархий и методе приемлемого риска ALARP, поскольку применение контрмер осуществляется за счет реально имеющихся (ограниченных) ресурсов. Проведена классификация контрмер по времени применения и по объекту воздействия. Выделенные типы послужили критерием сравнения при выборе контрмер из альтернативных вариантов. Создана сводная таблица соотношения контрмер различных типов. Метод выбора контрмер из альтернативных вариантов позволяет сделать вывод в условиях ограниченных ресурсов и дать экономически обоснованную оценку при принятии решения об уровне приемлемого риска. Полученные методы апробированы для оценки рисков процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения.

**Ключевые слова:** газотурбинные установки наземного применения, модель рисков, метод управления неопределенностью, метод выбора контрмер.

#### НОМЕНКЛАТУРА

ALARP – «as low as reasonably practicable» – принцип приемлемого риска;

ГТУ НП – газотурбинная установка наземного применения;

СТС – сложная техническая система;

$A$  – множество атрибутов гиперкуба;

$A_{d_i}$  – множество атрибутов измерения  $d_i$ ;

$A_{d_i \text{ macro}}$  – множество атрибутов измерения  $d_i$  на макроуровне;

$A_{d_i \text{ micro}}$  – множество атрибутов измерения  $d_i$  на микроуровне;

$A'_{d_i \text{ macro}}$  – множество атрибутов измерения  $d_i$  для среза  $M'_{R \text{ macro}}$ ;

$A'_{d_i \text{ micro}}$  – множество атрибутов измерения  $d_i$  для среза  $M'_{R \text{ micro}}$ ;

$A'_{d3 \text{ alt}}$  – множество, содержащее только группы альтернативных контрмер из множеств  $A'_{d3 \text{ macro}}$  и  $A'_{d3 \text{ micro}}$ ;

$A'_{d3 \text{ mod}}$  – модифицированное множество  $A'_{d3 \text{ alt}}$ , содержащее перечень контрмер, рекомендованных к применению;

$a_g^i$  –  $g$ -й элемент множества атрибутов измерения  $d_i$ ;

$Asset$  – множество активов, представляющих ценность для СТС;

$D$  – множество измерений гиперкуба;

$d_i$  –  $i$ -е измерение гиперкуба;

$H(D, A)$  – гиперкуб данных;

$H_{\text{macro}}(D_{\text{macro}}, A_{\text{macro}})$  – гиперкуб данных макроуровня;

$H_{\text{micro}}(D_{\text{micro}}, A_{\text{micro}})$  – гиперкуб данных микроуровня;

$h$  – булева переменная для атрибута  $a_g^3$ , равная 0, если контрмера не имеет альтернативных вариантов, и равная 1, если имеет;

$k$  – относительные веса каждой из контрмер множества  $A'_{d3 \text{ alt}}$ ;

$k_g$  – относительные веса  $g$ -й контрмеры для атрибута  $a_g^3$ ;

$k'$  – степень компенсации риска от применения контрмеры;

$k'_g$  – степень компенсации риска от применения  $g$ -й контрмеры для атрибута  $a_g^3$ ;

$L(a_g^2)$  – возможный ущерб от наступления  $g$ -го риска для атрибута  $a_g^2$ ;

$L(a_g^3)$  – затраты на реализацию  $g$ -й контрмеры для атрибута  $a_g^3$ ;

$M_R$  – модель рисков СТС;

$M_{Rang}$  – матрица рисков;

$M_{R\ macro}$  – макромодель рисков;

$M'_{R\ macro}$  – срез макромодели рисков;

$M_{R\ micro}$  – микромодель рисков;

$M'_{R\ micro}$  – срез микромодели рисков;

$na_g^2$  – наименование  $g$ -го риска для атрибута  $a_g^2$ ;

$na_g^3$  – наименование  $g$ -й контрмеры для атрибута  $a_g^3$ ;

$nO$  – наименование СТС, для которой проводится оценка риска;

$O$  – множество, характеризующее исследуемую СТС;

$O'$  – множество, характеризующее исследуемую СТС с учетом управления неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов;

$R$  – интегрированная модель рисков;

$R_{crit}$  – интегрированная модель критичных рисков;

$type_g$  – тип  $g$ -й контрмеры для атрибута  $a_g^3$ ;

$\gamma$  – множество рангов риска;

$\gamma_g$  – ранг  $g$ -го риска для атрибута  $a_g^2$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высокого качества, надежности и безопасности функционирования СТС является одной из важнейших научно-технических проблем. В современных условиях, характеризующихся напряженной экономической ситуацией, стратегической линией решения этой проблемы является дальнейшее развитие научных принципов комплексного повышения качества и надежности новой техники, внедрение перспективных технологий автоматизированного проектирования процесса производства с максимальным использованием их потенциальных возможностей и рационального использования всех видов ресурсов.

Готовность организаций и предприятий, разрабатывающих и эксплуатирующих различные СТС, выполнять анализ их надежности и безопасности является обязательным условием государственной и международной сертификации. Главная цель такого анализа – своевременное получение достоверной информации о свойствах надежности и безопасности СТС, необходимой для выработки, обоснования и реализации эффективных проектных и эксплуатационных решений. В настоящее время общепризнано, что надежность и безопасность СТС является одним из важнейших факторов их конкурентоспособности.

При обеспечении надежности СТС и их процессов немаловажное место занимает риск-ориентированная методология. При этом риск представляет собой комплекс неопределенностей, т.е. разного рода непредвиденных событий, нарушающих нормальную работу системы, связанных с состоянием техники, климатическими

условиями, настроением и здоровьем людей – теми факторами, на которые мы не всегда в силах повлиять. Повышение надежности за счет снижения риска имеет большое значение в производственной практике [1–4].

Процесс управления риском охватывает различные аспекты работы с риском, от идентификации и анализа риска до оценки его допустимости и определения потенциальных возможностей снижения риска посредством выбора, реализации и контроля соответствующих управляющих действий.

Объектом исследования данной работы является система надежности СТС, а предметом исследования – модели рисков ГТУ НП.

На сегодняшний день отсутствуют стандарты или другие нормативные документы, которые бы регламентировали оценку и управление рисками для таких СТС как ГТУ НП с учетом их специфики. Ранее авторами были разработаны модели рисков для ГТУ НП и для процесса испытаний данных установок [5, 6], однако формализованы данные модели не были. Поэтому актуальной является задача формализации моделей рисков ГТУ НП для дальнейшего их использования в процессе управления испытаниями ГТУ НП.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть модель рисков СТС будет представлена в виде гиперкуба данных, где измерения гиперкуба – это компоненты моделей рисков. Под гиперкубом данных будем понимать множество ячеек, которым соответствуют множество измерений  $D$  и множество атрибутов  $A$ :

$$M_R = H(D, A), \quad (1)$$

где  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_i\}$  – например, для ГТУ НП измерений три, по числу компонентов в каждой из моделей рисков:  $d_1$  – «Опасности»,  $d_2$  – «Риски»,  $d_3$  – «Контрмеры» [2, 3]:

$$A = A_{d1} \cup A_{d2} \cup \dots \cup A_{di};$$

$$A_{di} = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_g^i\}, \text{ где } i = 1, 2, \dots, i. \quad (2)$$

Для ГТУ НП каждой ячейке гиперкуба данных соответствует единственно возможный набор атрибутов измерений, содержащий данные об опасностях, рисках и контрмерах.

Интегрированная модель рисков [2, 3], опираясь на формулу (1), может быть представлена в виде следующего отношения:

$$R = M_{R\ macro} \cup M_{R\ micro},$$

где  $M_{R\ macro} = H_{macro}(D_{macro}, A_{macro})$ ;  $M_{R\ micro} = H_{micro}(D_{micro}, A_{micro})$ .

Пусть задаче исследования соответствует некое множество  $O$ , характеризующее СТС, которое можно представить в виде:

$$O = \{nO, Asset, R\}. \quad (3)$$

При этом под активами  $Asset$  будем понимать все доступные ресурсы, т.е. не только материальные ценности, но и временные ресурсы, а также нематериальные ресурсы, к которым можно отнести персонал и окружающую среду.

Однако не все риски несут одинаковую угрозу нанесения ущерба. Поэтому в условиях реально имеющихся (ограниченных) ресурсов возникает задача выделить такое отношение  $R_{crit}$ , содержащее только те ячейки гиперкубов, которым соответствуют критические риски:

$$R_{crit} = M'_{R macro} \cup M'_{R micro}$$

Срезы  $M'_{R macro}$  и  $M'_{R micro}$  формируются в результате фиксации ячеек соответствующих гиперкубов, содержащих наборы атрибутов измерений, в состав которых входят критические риски.

Тогда, модифицировав множество (3), получим множество  $O'$ , характеризующее СТС с учетом управления неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов:

$$O' = \{nO, Asset, R_{crit}\} \quad (4)$$

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Начальный импульс к созданию численных методов оценки надежности был дан авиационной промышленностью. После первой мировой войны в связи с увеличением интенсивности полетов и авиационных катастроф были выработаны критерии надежности для самолетов и требования к уровню безопасности [7, 8]. В дальнейшем методы надежности и оценки рисков разрабатывались по инициативе различных организаций и структур. Пионерами в данной области можно назвать работы по исследованию ракетных комплексов в Германии во время Второй мировой войны. Также велось развитие методов надежности для военной техники со стороны Министерства обороны США, в Великобритании разрабатывались анализ опасности (Trevor Kletz – ICI Ltd) и методы надежности (Green и Bourne – the UKAEA) [7]. Интенсивная работа по оценке риска, связанного с эксплуатацией атомных электростанций, была организована Комиссией по атомной энергии США и завершилась в 1977 г. выпуском отчета «WASH-1400. Анализ безопасности реактора» [7, 8]. Эти работы и многие другие сыграли свою роль и достойны внимания. Они способствовали повышению уровня информированности широкой общественности о потенциальных опасностях и подчеркнули необходимость в совершенствовании методов обеспечения надежности СТС и повышению их безопасности.

Задачи надежности и безопасности сложных технических систем рассматриваются в работах И. А. Рябининой [9], А. С. Можаяева [10], В. С. Викторовой [11], К. Кошовской [1] и многих других. Значительный вклад в области анализа, оценки и управления рисками сложных технических систем сделали Е. Д. Соложенцев [12], И. А. Рябинин [9], А. С. Можаяев [10], Е. I. Henly и Н. Kumamoto [8], J. D. Andrews и T. R. Moss [7] и другие.

На сегодняшний день принципы надежности, безопасности и анализа рисков технических систем регламентированы в многочисленных нормативных документах. Однако анализ стандартов в области надежности [5] показал отсутствие нормативной документации в системе стандартов Украины по управлению рисками для ГТУ НП. В связи с этим авторами были разработаны модели рисков для ГТУ НП и для их процесса испытаний [5–6].

Согласно стандарту [13] общий процесс оценки риска (risk assessment) состоит из анализа риска (risk analysis) и оценивания риска (risk evaluation). При этом управление риском (risk control) включает в себя оценку риска и снижение/контроль риска. Данная последовательность действий в той или иной формулировке присутствует во многих нормативных документах [14, 15], поэтому будет принята за основу разработанного метода.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для формирования множества (4) необходимо разработать метод управления неопределенностью.

На первом этапе идентифицируем исследуемую СТС  $nO$  и активы  $Asset$ , представляющие ценность для данной системы.

На втором этапе, используя разработанные модели рисков [5, 6], определим опасности и риски, представляющие угрозу для СТС и для ее активов как на макро- так и микроуровне. Для этого идентифицируем атрибуты множеств  $A_{d1 macro}$ ,  $A_{d1 micro}$ ,  $A_{d2 macro}$  и  $A_{d2 micro}$ , занеся в них наименования опасностей и рисков.

Далее необходимо определить критичность каждого из выделенных рисков измерения  $d_2$  для определения целесообразности применения контрмер в условиях реально имеющихся (ограниченных) ресурсов.

Для этого на этапе три производится качественное ранжирование выделенных рисков множеств  $A_{d2 macro}$  и  $A_{d2 micro}$ . В виду недостатка статистических данных об отказах ГТУ НП и их процессов оценивание рисков целесообразно провести с применением экспертных методов оценивания. Были определены и описаны категории рисков – ранги  $\gamma = \{I, II, III, IV\}$ , которые находятся в диапазоне от неприемлемого риска до пренебрежимо малого риска [16].

На основе выделенных рангов рисков  $\gamma$  была построена матрица рисков  $M_{Rang}$ , где значение каждой из ячеек матрицы соответствует рангу, присвоенному исходя из частоты опасных событий и последствий опасных событий [16]. Используя матрицу рисков  $M_{Rang}$ , каждому из выделенных рисков присваивается соответствующий ранг.

На четвертом этапе по результатам качественного ранжирования риски с рангами I и II признаются наиболее критичными и формируется отношение  $R_{crit}$  путем фиксации срезов  $M'_{R macro}$  и  $M'_{R micro}$ .

Принимая во внимание вышеизложенное, прослеживается необходимость сохранения сопутствующих данных о рисках. Поэтому каждый из элементов множества атрибутов  $A_{d2}$ , описанного формулой (2), представим в виде кортежа:

$$a_g^2 = \langle na_g^2; \gamma_g; L(a_g^2) \rangle, \text{ где } g = 1, 2, \dots, g. \quad (5)$$

На пятом этапе для всех критичных рисков отношения  $R_{crit}$  определяются контрмеры для их компенсации или предотвращения, путем идентификации множеств атрибутов  $A'_{d3 macro}$  и  $A'_{d3 micro}$ .

На сегодняшний день общепризнано, что концепция «абсолютной» безопасности неадекватна внутренним законам природы, которые имеют вероятностный характер. Поскольку даже использование самых эффективных систем безопасности, самых современных методов контроля над технологическими процессами не обеспечивает – и в принципе не может обеспечить – абсолютную надежность работы, исключая

щую аварийные ситуации [12]. Поэтому при определении мер по снижению риска (контрмер) мы руководствовались принципом приемлемого риска ALARP. Данный принцип подразумевает, что реализация контрмер не должна требовать неоправданно высоких затрат или неоправданно больших усилий, т.е. применение контрмер осуществляется за счет реально имеющихся (ограниченных) ресурсов и целесообразно только в случае, если затраты на реализацию контрмер меньше размера ущерба от наступления рисковогото события.

Если предположить, что для одного и того же риска могут быть выделены несколько альтернативных контрмер, то с учетом принципа ALARP возникает задача выбора наиболее целесообразного варианта.

На шестом этапе необходимо выбрать контрмеры из имеющихся альтернативных вариантов. Для этого необходимо разработать подметод выбора контрмер.

Важным аспектом метода выбора контрмер является определение критериев сравнения. Одним из таких критериев может служить тип контрмеры.

В ходе работы были выделены следующие типы контрмер.

1. По времени применения контрмеры могут разделяться на упреждающие и контрмеры реакции на риск. Упреждающие контрмеры, как видно из названия, способны полностью предупредить наступление возможного риска, при этом их применение осуществляется до наступления рисковогото события. А контрмеры реакции на риск предназначены для компенсации, как правило, частичной, риска и применяются после наступления нежелательных событий.

При этом затраты по реализации упреждающих контрмер будут взыматься вне зависимости от того наступило или нет событие неуспеха в отличие от контрмер реакции на риск, затраты на реализацию которых требуются только в случае наступления риска. С другой стороны, применение последних не всегда полностью может компенсировать риск, что, в конечном счете, может привести к увеличению суммарного риска осуществления данного события.

2. По объекту воздействия контрмеры могут подразделяться на следующие типы:

- сокращение или исключение первичных угроз, дефектов и ошибок в системе исследования, обусловленных недостатками их проектирования, разработки, модификации или планирования, отражающихся на рисках функциональной пригодности или характеристиках системы;

- сокращение уязвимости компонентов системы при воздействии на них угроз, дефектов и ошибок, путем введения средств защиты для блокирования их возможного негативного воздействия на риски функционирования;

- непосредственное изменение и сокращение последствий проявления рисков путем их оперативного обнаружения и ликвидации ущерба.

Необходимо отметить, что исключение первичных угроз и сокращение уязвимостей ведет в конечном итоге к улучшению самой системы, тогда как сокращение последствий рисков происходит, как правило, при сохранении вызывающих их первичных источников и причин.

Исходя из вышеизложенных характеристик, была создана сводная таблица 1, в которой приведено соотношение контрмер различных типов. В ячейках данной таблицы приведены ранги критических рисков, для которых применение контрмеры данного типа предпочтительнее.

Выделенные типы контрмер будут использованы как критерии сравнения при выборе контрмер из альтернативных вариантов, исходя из рекомендаций таблицы 1.

Рассмотрим метод выбора контрмер. Как было сказано выше, для одного и того же риска могут быть выделены несколько альтернативных контрмер. Выбор наиболее эффективного варианта и есть цель метода выбора контрмер.

Входными данными для данного метода будут служить сформированные ранее множества атрибутов  $A'_{d3\ macro}$  и  $A'_{d3\ micro}$ , содержащие контрмеры для интегрированной модели критичных рисков  $R_{crit}$ .

Шаг 1. Определим некое множество  $A'_{d3\ alt}$ , которое содержало бы только группы альтернативных контрмер из множеств  $A'_{d3\ macro}$  и  $A'_{d3\ micro}$ .

Шаг 2. Для каждой из групп альтернативных контрмер множества  $A'_{d3\ alt}$  определим следующие критерии сравнения: затраты на реализацию контрмер;  $k'$  – степень компенсации события неуспеха от применения контрмеры; тип контрмер – как по времени применения, так и по объекту воздействия.

Шаг 3. Оценим относительные веса  $k$  каждой из контрмер множества  $A'_{d3\ alt}$  по отношению к альтернативным вариантам с использованием метода анализа иерархий [6]. Данный метод позволяет найти такой вариант, который наилучшим образом согласуется с пониманием сути проблемы и требованиями к ее решению, а также сравнить и выполнить количественную оценку вариантов.

Метод анализа иерархий состоит в декомпозиции проблемы на более простые составляющие части и дальнейшей обработке последовательности суждений лица, принимающего решение, с помощью матриц парных сравнений. В результате работы с матрицами рассчитываются относительные веса элементов в иерархии, и выбирается наилучшая с точки зрения цели альтернатива.

Шаг 4. На основании относительных весов  $k$  каждой из контрмер, модифицируя множество  $A'_{d3\ alt}$ , определим множество  $A'_{d3\ mod}$ , содержащее перечень контрмер, рекомендованных к применению.

Шаг 5. Согласно множеству  $A'_{d3\ mod}$  уточним исходные множества  $A'_{d3\ macro}$  и  $A'_{d3\ micro}$ , исключив контрмеры, применение которых не целесообразно:  $A'_{d3\ macro} / A'_{d3\ mod}$ ;  $A'_{d3\ micro} / A'_{d3\ mod}$ .

Для хранения описанных данных определим элементы множества  $A_{d3}$ , описанного формулой (2), как

$$a_g^3 = \left( na_g^3; L(a_g^3); type_g; k'_g; k_g; h \right), \quad (6)$$

где  $g = pl$ , где  $p = 1, 2, \dots; p$  – номер кортежа в множестве атрибутов  $A_{d2}$ , содержащего информацию о риске, для которого была выделена рассматриваемая контрмера;

Таблица 1 – Соотношение контрмер различных типов

По времени применения	По объекту воздействия		
	Исключение первичных угроз	Сокращение уязвимости	Сокращение последствий
Упреждающие контрмеры	I	I	–
Контрмеры реакции на риск	–	II	II

$l = 0$  в случае если для данного риска была выделена одна контрмера,  $l = 1, 2, \dots, n$ , если для данного риска было выделено  $n$  контрмер, в том числе альтернативных;

Схема метода выбора контрмер из альтернативных вариантов показана на рисунке 1.

На седьмом заключительном этапе метода управления неопределенностью производится формирование итогового множества  $O'$  (4). Данное множество содержит информацию об области критичных рисков и контрмерах, применение которых ведет к снижению общего уровня риска для исследуемой СТС.

Если оценка рисков СТС используется для обеспечения непрерывного процесса управления риском, то ее необходимо выполнять таким образом, чтобы она могла корректироваться на протяжении всего жизненного цикла СТС. Оценка должна обновляться по мере поступления новой информации и в соответствии с потребностями процесса управления.

Схема метода управления неопределенностью показана на рисунке 2.



Рисунок 1 – Схема метода выбора контрмер из альтернативных вариантов

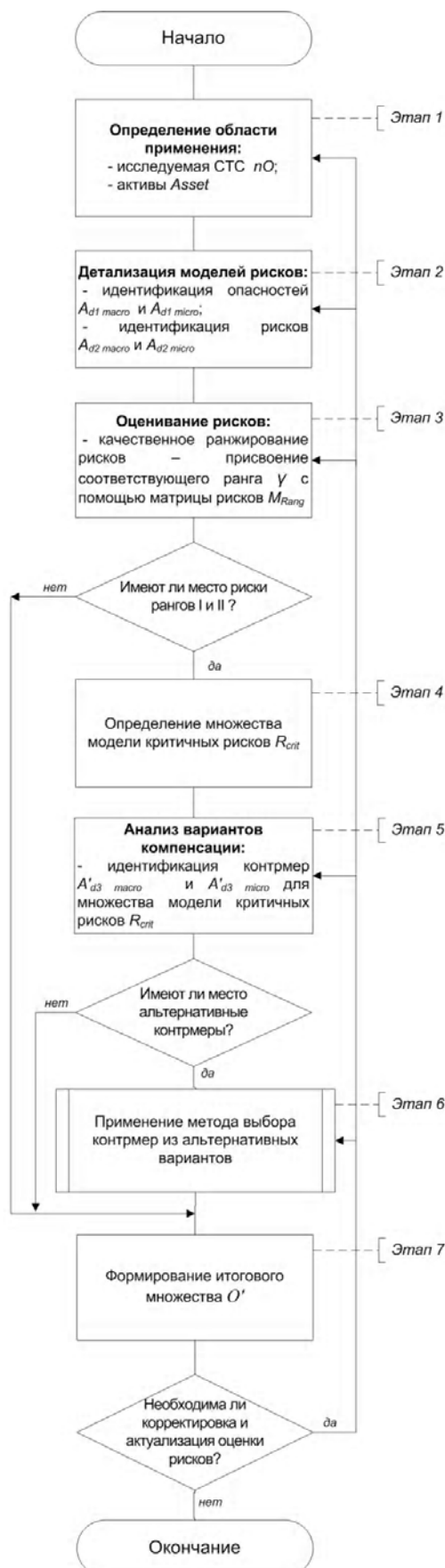


Рисунок 2 – Схема метода управления неопределенностью

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Одной из центральных проблем для ГТУ НП является обеспечение высокой надежности, безопасности и большого ресурса работы. Подтверждение данных параметров осуществляется на испытаниях различных видов, проводимых практически на всех стадиях жизненного цикла ГТУ НП: разработки, производства, эксплуатации. Поэтому апробацию разрабатываемого метода управления неопределенностью проведем для процесса испытаний ГТУ НП, общая модель основных этапов которого представлена на рисунке 3 [17].

Для наглядности представления разработанного метода более подробно остановимся на этапе «Планирование» процесса испытаний ГТУ НП [17], поскольку ему необходимо уделить особое внимание, т.к. эффективное управление всем процессом испытаний ГТУ НП в первую очередь зависит от рационального планирования всех работ и оптимального распределения ресурсов.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Активими для всего процесса испытаний являются материальные и нематериальные ресурсы ГТУ НП:

- материальная база, обеспечивающая проведение процесса испытаний;
- газотурбинная установка, включая все входящие функциональные системы и оборудование;
- участники испытаний и окружающая среда;
- результаты испытаний (информация о работе установки, данные результатов испытаний, отчеты и техническая документация).

Следует отметить, что для этапа «Планирование» не характерны опасности связанные с материальными ресурсами, обеспечивающими проведение испытаний и относящимися к самой ГТУ НП, а также опасности, связанные с причинением вреда окружающей среде. Также для данного этапа в виду его специфики отсутствует микромодель рисков, отражающая риски, влияющие на выполнение функций безопасности, что также упрощает описание данного примера и способствует его наглядности. Поэтому в названиях переменных будут опущены индексы *masgo* и *misgo*.

В таблице 2 представлены выделенные для данного этапа опасности, риски и результаты ранжирования. Как

видно, не было выделено ни одного риска ранга I, поэтому  $R_{crit}$  будет включать только риски ранга II.

Далее для каждого риска, входящего в  $R_{crit}$ , были определены контрмеры  $A'_{d3}$ , как видно из таблицы 3 некоторые из них содержали альтернативные варианты. Все альтернативные пары были выделены во множество  $A'_{d3 alt}$ .

Для определения целесообразности применения каждой из альтернативных контрмер были рассчитаны относительные веса  $k$ .

Пример выбора относительных весов  $k$  для этапа «Планирование» процесса испытаний ГТУ НП приведен в таблице 4.

Как видно из таблиц 3 и 4, согласно относительным весам  $k$  каждой из альтернативных контрмер, риски  $na_1'^2$  и  $na_3'^2$  целесообразно компенсировать упреждающими контрмерами, которые предназначены для устранения первичных угроз, тогда как риск  $na_5'^2$  – контрмерой реакции на риск, предназначенной для сокращения последствий. Поэтому множество  $A'_{d3 mod}$  примет вид  $A'_{d3 mod} = \{na_{11 alt}^3; na_{31 alt}^3; na_{52 alt}^3\}$ , согласно которого будет уточнено множество  $A'_{d3}$  и сформировано итоговое множество  $O'$ .

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Применение метода управления неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов для процесса испытаний ГТУ НП позволило сократить время на проведение оценки рисков для данного процесса за счет снижения количества обрабатываемых данных. Анализ количества обрабатываемых элементов модели рисков приведен в таблице 5.

Также полученный метод позволяет выбрать те контрмеры, которые наиболее эффективно снижают общий уровень риска для данного процесса, что в конечном счете позволяет снизить затраты на ликвидацию последствий от возможного риска. Полученная формализованная модель рисков ГТУ НП и их процессов может быть использована при автоматизации процесса управления неопределенностью ГТУ НП в условиях ограниченных ресурсов.

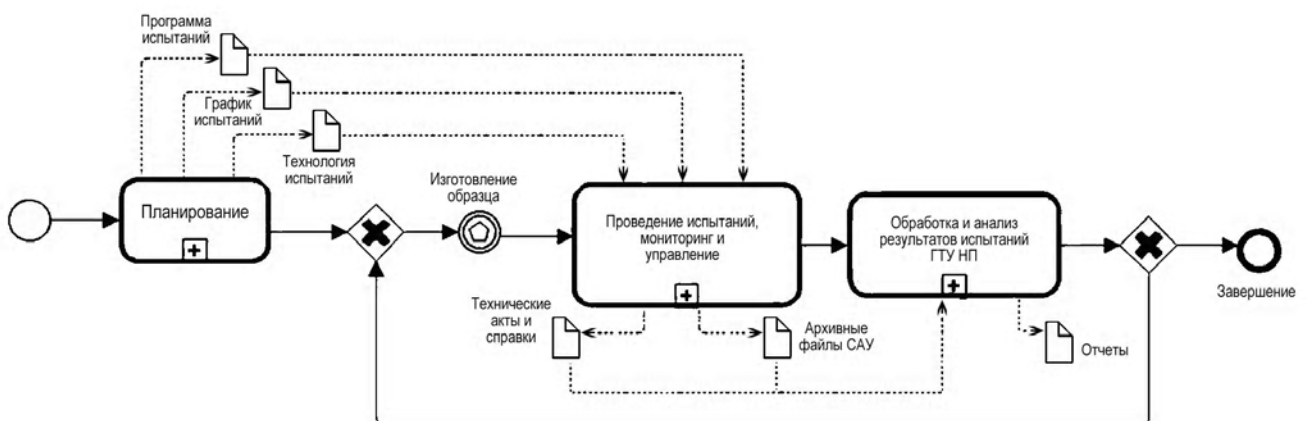


Рисунок 3 – Общая модель основных этапов процесса испытаний ГТУ НП

Таблица 2 – Оценка риска этапа «Планирование» процесса испытаний ГТУ НП

$g$	Опасности множества $A_{d1}$	Наименования рисков множества $A_{d2}, na_g^2$	Ранг, $\gamma_g$
1	$a_1^1$ – Ошибки при создании программы испытаний (ПИ) по причине человеческого фактора или недостатка достоверной исходной информации	$na_1^2$ – Риск создания некорректной ПИ	II
2		$na_2^2$ – Риск нарушения сроков создания ПИ	III
3	$a_2^1$ – Ошибки при создании технологии испытаний (ТИ) по причине человеческого фактора или недостатка достоверной исходной информации	$na_3^2$ – Риск создания некорректной ТИ	II
4		$na_4^2$ – Риск нарушения сроков создания ТИ	III
5	$a_3^1$ – Ошибки при создании графика испытаний (ГИ) по причине человеческого фактора или недостатка достоверной исходной информации	$na_5^2$ – Риск нарушения сроков создания ГИ	II
6		$na_6^2$ – Риск создания некорректного ГИ	III
7	$a_4^1$ – Опасности связанные с персоналом	$na_7^2$ – Риски, связанные с угрозами для персонала	IV

Таблица 3 – Компоненты отношения  $R_{crit}$  для этапа «Планирование» процесса испытаний ГТУ НП

Наименования рисков множества $A'_{d2}, na_g'^2$	Наименование контрмеры множества $A'_{d3}, na_x'^3$
$na_1'^2$ – Риск создания некорректной программы испытаний (ПИ)	$na_{11}^3$ – Содержание квалифицированного персонала на постоянной основе
	$na_{12}^3$ – Временное привлечение квалифицированных кадров
	$na_{13}^3$ – Корректная организация работ
$na_3'^2$ – Риск создания некорректной технологии испытаний (ТИ)	$na_{31}^3$ – Содержание квалифицированного персонала на постоянной основе
	$na_{32}^3$ – Временное привлечение квалифицированных кадров
	$na_{33}^3$ – Корректная организация работ
$na_5'^2$ – Риск нарушения сроков создания графика испытаний (ГИ)	$na_{51}^3$ – Обеспечение изготовления образца ГТУ НП
	$na_{52}^3$ – Предусмотреть резерв материальных и нематериальных ресурсов для компенсации неуспеха постфактум

Таблица 4 – Компоненты множества  $A'_{d3 alt}$  для этапа «Планирование» процесса испытаний ГТУ НП

Наименование контрмеры множества $A'_{d3 alt}, na_g'^3 alt$	Относительные веса, $k_g$	Степень компенсации события неуспеха, $k'_g$
$na_{11}^3 alt$ – Содержание квалифицированного персонала на постоянной основе	0,67	0,17
$na_{12}^3 alt$ – Временное привлечение квалифицированных кадров	0,33	0,83
$na_{31}^3 alt$ – Содержание квалифицированного персонала на постоянной основе	0,67	0,17
$na_{32}^3 alt$ – Временное привлечение квалифицированных кадров	0,33	0,83
$na_{51}^3 alt$ – Обеспечение изготовления образца ГТУ НП	0,43	0,14
$na_{52}^3 alt$ – Предусмотреть резерв материальных и нематериальных ресурсов для компенсации неуспеха постфактум	0,57	0,86

Таблица 5 – Анализ количества элементов модели рисков для этапа «Планирование» процесса испытаний ГТУ НП

Наименование измерений гиперкуба	Количество элементов (атрибутов) модели риска	
	до применения метода управления неопределенностью	после применения метода управления неопределенностью
Опасности	4	4
Риски	7	3
Контрмеры	12	5
Итого:	23	12

## ВЫВОДЫ

В работе решена задача формализации модели рисков ГТУ НП и их процессов. Что позволило разработать метод управления неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов, основанный на методе оценки рисков и усовершенствованный методом выбора контрмер и позволяющий сформировать область критичных рисков для исследуемой СТС.

Усовершенствован метод выбора контрмер из альтернативных вариантов, основанный на методе приемлемого риска ALARP и методе анализа иерархий. Данный метод позволяет дать экономически обоснованную оценку уровня приемлемого риска.

Согласно разработанному методу управления неопределенностью выбор контрмер производится только для наиболее критичных рисков, что исключает необходимость проводить анализ вариантов компенсации для всех возможных рисков. Данное преимущество позволяет в значительной степени экономить время для проведения оценки рисков и средства для их компенсации.

Практическая ценность данной работы заключается в проведенной апробации разработанного метода управления неопределенностью в условиях ограниченных ресурсов для процесса испытаний ГТУ НП, в частности, для этапа «Планирование». Данная апробация показала, что решение задачи определения области критичных рисков позволило снизить количество обрабатываемых элементов модели рисков на 48%.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что риск с большей долей вероятности и приносящий больший ущерб целесообразно компенсировать до наступления этого события путем исключения первичных угроз или сокращения уязвимости компонентов исследуемой СТС. Тогда как риск с большей долей неопределенности необходимо компенсировать постфактум за счет сокращения последствий проявления рисков путем их оперативного обнаружения и ликвидации ущерба с помощью резервных фондов материальных и нематериальных ресурсов, формирование которых и должно происходить, исходя из приведенного анализа.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за оказанную помощь и содействие руководству Управления энергетических установок и газоперекачивающих агрегатов АО «Мотор Сич» в лице Главного конструктора – начальника управления В. И. Морозова, Заместителя главного конструктора – начальника управления В. П. Митина, Главного конструктора ГПА В.Н. Разношинского.

Данная работа выполнена на кафедре программных средств Запорожского национального технического университета в рамках темы № ДР0112U005351 «Разработка методов и информационных технологий для автоматизации процессов управления сложными объектами и системами» при поддержке международного проекта Темпус 530278-TEMPUS-1-2012-1-DE-TEMPUS-JPHES «Промышленное сотрудничество и креативное инженерное образование на основе удаленного дистанционного инженерного и виртуального инструментария» («Industrial Cooperation and Creative Engineering Education based on Remote Engineering and Virtual Instrumentation» [ICo-op]). Также работа выполнена в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве № 8940/10-Д (УЭУиГПА) от 26.11.2010 (продлен дополнительным соглашением № 1 от 13.12.12) между Запорожским национальным техническим университетом и АО «Мотор Сич» «Разработка и программная реализация планирования испытаний газотурбинных установок наземного применения» (Исполнители от ЗНТУ: Табунщик Г. В., Шитикова Е. В.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolowrocki K. Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling-Identification-Prediction-Optimization / K. Kolowrocki, J. Soszycka-Budny. – London : Springer, 2011. – 405 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-694-8.
2. Kuo W. An annotated overview of system-reliability optimization / W. Kuo, V. R. Prasad // IEEE Transactions on Reliability. – 2000. – Vol. 49(2). – P. 176–187.
3. Kuo W. Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications / W. Kuo, M. J. Zuo. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. – 559 p.
4. Vercellis S. Business Intelligence: Data Mining and optimization for decision making / S. Vercellis. – Hoboken : John Wiley & Sons. 2009. – 417 p. DOI: 10.1002/9780470753866.
5. Шитикова Е. В. Анализ рисков газотурбинных установок наземного применения / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик // Вісник двигунобудування. – 2012. – №1. – С. 54–59.
6. Шитикова Е. В. Моделирование рисков процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Проблеми моделювання та автоматизації проектування». – 2012. – № 1(10)–2(11). – С. 79–89.
7. Andrews J. D. Reliability and Risk Assessment. Second edition / J. D. Andrews, T. R. Moss. – London and Bury St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2002. – 540 p.
8. Henley E. I. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / E. I. Henley, H. Kumamoto. – New York : Wiley-IEEE Press, 1996. – 620 p.
9. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб. : Политехника, 2000. – 248 с.
10. Можаяев А. С. Применение автоматизированного структурно-логического моделирования для проектного расчета надежности АСУ / А. С. Можаяев, М. С. Скворцов, А. В. Струков // Нефть. Газ. Новации. – 2010. – № 9. – С. 72–78.
11. Викторова В. С. Комплекс программ для анализа надежности, безопасности и эффективности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степанянц // Приборы и системы управления. – 1998. – № 6. – С. 11–17.
12. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. Изд. 2-е. / Е. Д. Соложенцев. – СПб. : Издательский дом : Бизнес-пресса, 2006. – 530 с.
13. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем : ГОСТ Р 51901.1-2002. – [Дата введения 2003-09-01]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 28 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
14. Безпечність машин. Принципи оцінювання ризику (EN 1050:1996, IDT) : ДСТУ EN 1050:2003. – [Чинний від 2004-10-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 22 с. – (Національний стандарт України).
15. Безопасность машин и оборудования. Оценка риска : ГОСТ Р 54124-2010. – [Дата введения 2012-06-01]. – М. : Стандартинформ, 2013. – 102 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
16. Ранжирование рисков газотурбинных установок наземного применения / [Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик, В. П. Митин, В. И. Морозов] // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах : Международная научная школа МАБР-2011, Санкт-Петербург, 28 июня – 02 июля 2011 г. : труды школы. – СПб. : ГУАП, 2011. – С. 277–279.
17. Шитикова Е. В. Информационная модель процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2012. – № 1(28). – С. 101–108.

Статья поступила в редакцию 24.11.2014.

После доработки 10.12.2014.



Шитікова О. В.<sup>1</sup>, Табунщик Г. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірант кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

#### МЕТОД УПРАВЛІННЯ НЕВИЗНАЧЕНІСТЮ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

Розглянуті питання надійності та функціональної безпеки газотурбінних установок наземного використання. Проведена формалізація раніше розроблених моделей ризиків газотурбінних установок наземного використання та їх процесів. Запропоновано метод управління невизначеністю складних технічних систем і їх процесів в умовах обмежених ресурсів, заснований на методі оцінки ризиків і методі вибору контрзаходів, що дозволяє сформувавши область критичних ризиків для досліджуваної складної технічної системи. Удосконалено метод вибору контрзаходів з альтернативних варіантів, заснований на методі аналізу ієрархій і методі прийнятності ризику ALARP, оскільки застосування контрзаходів здійснюється за рахунок фактично наявних (обмежених) ресурсів. Проведено класифікацію контрзаходів за часом застосування та за об'єктом впливу. Виділені типи були використані як один з критеріїв порівняння при виборі контрзаходів із альтернативних варіантів. Створена зведена таблиця співвідношення контрзаходів різних типів. Метод вибору контрзаходів з альтернативних варіантів дозволяє зробити висновок в умовах обмежених ресурсів і дати економічно обґрунтовану оцінку при ухваленні рішення щодо рівня прийнятності ризику. Отримані методи апробовані для оцінки ризиків процесу випробувань газотурбінних установок наземного використання.

**Ключові слова:** газотурбінні установки наземного використання, модель ризиків, метод управління невизначеністю, метод вибору контрзаходів.

Shitikova Yel.<sup>1</sup>, Tabunshchik G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate student of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate professor, Associate professor of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

#### METHOD OF MANAGING UNCERTAINTY IN RESOURCE-LIMITED SETTINGS

The article deals with the questions of reliability and functional safety of the gas turbine units for terrestrial usage. Previously developed risk models of the gas turbine units for terrestrial usage and processes are formalized. Authors propose the method of managing uncertainty of complex technical systems and their processes in resource-limited settings. It is based on the method of risk assessment and the method for choice of alternative countermeasures. It allows to form the risk critical area for the complex technical systems. The method for choice of alternative countermeasures improved. It is based on the Analytic Hierarchy Process and the method of acceptable risk ALARP, since the application of countermeasures realize at the expense actually available (limited) resources. Countermeasures were classified by time of application and impact object. Dedicated types served as a compare criterion of the method for choice of alternative countermeasures. A summary table was created for ratio of different types of countermeasures. The method for choice of alternative countermeasures allows to make a conclusion in resource-limited settings and provides economically reasonable estimate of the decision about the level of acceptable risk. The derived methods are tested for the GTU tests process risk assessment.

**Keywords:** gas turbine unit for terrestrial usage, risk model, method of managing uncertainty, method for choice of countermeasures.

#### REFERENCES

1. Kołowrocki K., Soszycka-Budny J. Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling-Identification-Prediction-Optimization. London, Springer, 2011, 405 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-694-8.
2. Kuo W., Prasad V. R. An annotated overview of system-reliability optimization, *IEEE Transactions on Reliability*, 2000, Vol. 49(2), pp. 176–187.
3. Kuo W., Zuo M. J. Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications. Hoboken, John Wiley & Sons, 2003, 559 p.
4. Vercellis S. Business Intelligence: Data Mining and optimization for decision making. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009, 417 p. DOI: 10.1002/9780470753866.
5. Shitikova E. V., Tabunshchik G. V. Analiz riskov gazoturbinnih ustanovok nazemnogo primenenija, *Visnyk dvygunobuduvannja*, 2012, No. 1, pp. 54–59.
6. Shitikova E. V., Tabunshchik G. V. Modelirovanie riskov processa ispytanij gazoturbinnih ustanovok nazemnogo primenenija, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu, serija: «Problemy modeljuvannja ta avtomatyzacii' proektuvannja»*, 2012, No. 1(10)–2(11), pp. 79–89.
7. Andrews J. D., Moss T. R. Reliability and Risk Assessment. Second edition. London and Bury St Edmunds, Professional Engineering Publishing, 2002, 540 p.
8. Henley E. I., Kumamoto H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. New York, Wiley-IEEE Press, 1996, 620 p.
9. Rjabinin I. A. Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnyh sistem. SPb, Politehnika, 2000, 248 p.
10. Mozhaev A. S., Skvorcov M. S., Strukov A. V. Primenenie avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovanija dlja proektnogo rascheta nadezhnosti ASU, *Neft'. Gaz. Novacii*, 2010, No. 9, pp. 72–78.
11. Viktorova V. S., Stepanjanc A. S. Kompleks programm dlja analiza nadezhnosti, bezopasnosti i jeffektivnosti tehničeskikh sistem, *Pribory i sistemy upravlenija*, 1998, No. 6, pp. 11–17.
12. Solozhencev E. D. Scenarnoe logiko-verojatnostnoe upravlenie riskom v biznese i tehnike. Izd. 2-e. SPb, Izdatel'skij dom, Biznespress, 2006, 530 p.
13. Menedzhment riska. Analiz riska tehnologicheskikh sistem : GOST R 51901.1-2002. – [Data vvedenija 2003-09-01], Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2002, 28 p. – (Gosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii).
14. Bezpečnost' mashyn. Prynypy ocinjuvannja ryzyku (EN 1050:1996, IDT) : DSTU EN 1050:2003. – [Chynnyj vid 2004-10-01]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2005, 22 p. – (Nacional'nyj standart Ukrainy).
15. Bezopasnost' mashin i oborudovanija. Ocenka riska : GOST R 54124-2010. – [Data vvedenija 2012-06-01]. Moscow, Standartinform, 2013, 102 p. – (Gosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii).
16. Shitikova E. V., Tabunshchik G. V., Mitin V. P., Morozov V. I. Ranzhirovanie riskov gazoturbinnih ustanovok nazemnogo primenenija, Modelirovanie i Analiz Bezopasnosti i Riska v Slozhnyh Sistemah, Mezhdunarodnaja nauchnaja shkola MABR-2011, Sankt-Peterburg, 28 ijunja– 02 ijulja 2011 g. : trudy shkoly. SPb, GUAP, 2011, pp. 277–279.
17. Shitikova E. V., Tabunshchik G. V. Informacionnaja model' processa ispytanij gazoturbinnih ustanovok nazemnogo primenenija, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnja*, 2012, No. 1(28), pp. 101–108.

*Наукове видання*

**Радіоелектроніка,  
інформатика,  
управління**

№ 2/2015

Науковий журнал

Головний редактор – д-р фіз.-мат. наук В. В. Погосов

Заст. головного редактора – д-р техн. наук С. О. Субботін

Комп'ютерне моделювання та верстання  
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб  
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 15.06.2015. Формат 60×84/8.  
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 11,16.  
Тираж 300 прим. Зам. № 633.*

*69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 2394 від 27.12.2005.