

# ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.9

Бісікало О. В.<sup>1</sup>, Висоцька В. А.<sup>2</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

#### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СИНТАКСИЧНОГО АНАЛІЗУ РЕЧЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ СЛІВ УКРАЇНОМОВНОГО ТЕКСТУ

У статті подано застосування породжувальних граматики у лінгвістичному моделюванні. Опис моделювання синтаксису речення застосовують для автоматизації процесів аналізу та синтезу природномовних текстів. У статті показано особливості процесу синтезу речень різних мов із застосуванням породжувальних граматики. В роботі розглянуто вплив норм та правил мови на хід побудови граматики. Застосування породжувальних граматики має широкі можливості у розробленні та створенні автоматизованих систем опрацювання текстового контенту, для лінгвістичного забезпечення комп'ютерних лінгвістичних систем тощо. В природних мовах є ситуації, коли явища, залежні від контексту, описані як незалежні від контексту, тобто в термінах контекстно-вільних граматики. При цьому опис ускладнений через утворення нових категорій і правил. В статті подано особливості процесу введення нових обмежень на класи даних граматики через введення нових правил. При кількості символів в правій частині правил не меншій за ліву отримали нескорочені граматики. Потім при заміні лише одного символу отримали контекстно-залежні граматики. При наявності в лівій частині правила лише одного символу отримали контекстно-вільні граматики. Жодних наступних природних обмежень на лівій частині правил накласти вже не можна. Виходячи із важливості забезпечення автоматичного опрацювання текстового контенту в сучасних інформаційних засобах (наприклад, інформаційно-пошукових системах, системах машинного перекладу, семантичного, статистичного, оптичного та акустичного аналізу і синтезу мови, автоматизованого редагування, екстракції знань з текстового контенту, реферування та анотування текстового контенту, індексування текстового контенту, навчально-дидактичних, менеджменту лінгвістичних корпусів, інструментальні засоби укладання словників різних типів тощо), фахівці інтенсивно шукають нові моделі, способи їх опису та методи автоматичного опрацювання текстового контенту. Одним із таких способів є розроблення загальних принципів побудови лексикографічних систем синтаксичного типу та побудови за цими принципами зазначених систем опрацювання текстового контенту для конкретних мов. Будь-які засоби синтаксичного аналізу складаються з двох частин: бази знань про конкретну природну мову і алгоритму синтаксичного аналізу, тобто набору стандартних операторів опрацювання текстового контенту на основі цих знань. Джерелом граматичних знань є дані з морфологічного аналізу та різні заповнені таблиці понять та лінгвістичних одиниць. Вони є результатом емпіричного опрацювання текстового контенту на природній мові експертами з метою виділення основних закономірностей для синтаксичного аналізу.

**Ключові слова:** текст, україномовний, алгоритм, контент-моніторинг, ключові слова, лінгвістичний аналіз, синтаксичний аналіз, породжувальні граматики, структурна схема речення, інформаційна лінгвістична система.

#### НОМЕНКЛАТУРА

АОПМК – автоматичного опрацювання природномовного контенту;

ІТ – інформаційні технології;

ІС – інформаційна система;

$\tilde{N}$  – іменна група;

$\tilde{R}$  – дієслівна група;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_C}\}$  – множина комерційного контенту  $c_r \in C$  при  $r = \overline{1, n_C}$ ;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_T}\}$  – час  $t_p \in T$  транзакції формування комерційного контенту при  $p = \overline{1, n_T}$ ;

$U_K = \{U_{K1}, U_{K2}, U_{K3}, U_{K4}\}$  – множина критеріїв визначення ключових слів в контенті;

$C_1$  – відфільтрований комерційний контент;

$C_2$  – відформатований комерційний контент;

$C_3$  – комерційний контент з визначеною множиною ключових слів;

$\alpha_0 : (X, U_C, T) \rightarrow C_0$  – оператор створення комерційного контенту;

$\alpha_1 : (X, U_G, T) \rightarrow C_0$  – оператор збирання комерційного контенту;

$\alpha_2 : (C_0, T, U_B) \rightarrow C_1$  – оператор виявлення дублювання комерційного контенту;

$\alpha_3 : (C_1, U_{FR}, T) \rightarrow C_2$  – оператор форматування комерційного контенту;

$\alpha_4 : (C_2, U_K, T) \rightarrow C_3$  – оператор виявлення ключових слів комерційного контенту – відображення комерційного контенту в новий стан, який відрізняється від попереднього стану наявністю множини ключових слів, що загальною описують його зміст;

$Noun \in U_{K1}$  – терми – іменників, словосполучень іменників або прикметника з іменником серед множини слів текстового контенту;

$Unicity$  – унікальності для термів;

$NumbSymb \in U_{K3}$  – кількість знаків без пробілів для  $Noun \in U_{K1}$  при  $Unicity \geq 80$ ;

$UseFrequency \in U_{K2}$  – частота появи ключових слів комерційного контенту. Для термів з  $NumbSymb \leq 2000$  частота  $UseFrequency$  є в межах  $(6;8]\%$ , з  $NumbSymb \geq 3000$  –  $[2;4)\%$ , з  $2000 > NumbSymb < 3000$  –  $[4;6)\%$ ;

$BUseFrequency$  – частота появи ключових слів на початку тексту;

$IUseFrequency$  – частота появи ключових слів в середині тексту;

$EUseFrequency$  – частота появи ключових слів в кінці тексту комерційного контенту;

$KeyWords \in U_{K4}$  – ключові слова.

## ВСТУП

Побудова систем АОПМК та формалізація відповідних процесів лінгвістичного аналізу/синтезу вважається основною проблемою інтелектуалізації ІТ [1–2]. Стрімкий та бурхливий розвиток Інтернет та ІТ різко прискорив створення різноманітних інформаційних лінгвістичних ресурсів і активізував сучасні дослідження, спрямовані на розроблення та впровадження інформаційних лінгвістичних систем, математичних методів та програмного забезпечення АОПМК. Для автоматизації етапів аналізу/синтезу природно-мовних текстів створюють різні моделі процесів АОПМК, обґрунтовують ефективні алгоритми та структури подання природно-мовних масивів даних. Традиційно лінгвістичний аналіз масивів природно-мовних текстів подають як послідовність процесів морфологічного, синтаксичного та семантичного аналізу/синтезу. Для кожного процесу створені відповідні моделі, методи та алгоритми: орієнтовані на конкретні групи мов (морфолексичний аналіз); системні граматики Холідея, граматики Хомські (N. Chomsky) [3–15], дерева підпорядкування та системи складових Гладкого [2], розширенні мережі переходів (синтаксис речення); класичні семантичні мережі та фреймові моделі

Мінського (семантика тексту). Необхідність в автоматизації процесів АОПМК сприяла появі відповідних формальних та математичних лінгвістичних моделей і методів їх аналізу/синтезу. Активним є розвиток мовознавчих дисциплін для потреб галузі комп'ютерних наук та ІТ. Інтеграційні процеси в цій галузі наук сприяють активному залученню науковців в сфері досліджень АОПМК для розроблення та створення автоматизованих ІС опрацювання багатомовної текстової інформації.

Найбільш складні проблеми АОПМК зумовлені явищами полісемії, омонімії, онімії тощо, які характеризують неоднозначність мови і ускладнюють процес виявлення коректного відображення семантично-синтаксичної структури тексту в формальне подання через логічну інтерпретацію. Це вирішують в межах семантичного аналізу. Але застосування ресурсооб'ємних продукційних правил логічно-семантичного аналізу ускладнює та уповільнює програми АОПМК. Під час розуміння тексту не часто застосовують логіку, в основному ж здійснюється асоціативний пошук семантичного концепту, що відповідає шуканому слову та є контексто-наближеним до власного оточення. Тому асоціативний пошук є перспективним методом інтерпретації природно-мовних масивів даних.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для реалізації синтаксичного аналізу текстового контенту з метою знаходження ключових слів та зменшення етапів опрацювання тексту необхідно:

I) Відокремити в аналізованому термінальному ланцюжку (реченні українською мовою) дієслівну групу від іменної групи (ключовим словами можуть бути лише слова з іменної групи) – це відбувається за результатами стемінгу – аналіз закінчень та робота лише з тими словами, флексії яких відповідають прикметникам та іменникам (в українській мові дієслівну групу не входять прикметник та іменник);

II) В іменній групі після знаходження першої множини ключових слів (слів, які вживані в текст із певною частотою, в межах, заданої модератором, але ці слова можуть бути лише прикметник в називному відмінку чоловічого роду, іменник в називному відмінку або аббревіатура) знаходять та аналізують сусідні слова знайдених ключовиків. При цьому шукаємо ключові словосполучення, тобто визначаємо терми  $Noun \in U_{K1}$  як словосполучення іменників або прикметника з іменником серед множини слів текстового контенту, зокрема:

1. Якщо ключовим словом є прикметник (флексія слова *ий* – називний відмінок чоловічого роду). Тоді по тексту знаходяться всі слова, що вживані справа від цього прикметника в будь-якому відмінку (пошук іде за основою цього прикметника) та будується для них частотний словник. Ті словосполучення, що вживанні більше за певний ліміт (але можуть бути вживані менше за самий прикметник) і є новими ключовими словами. Ліміт визначає модератор.

2. Якщо ключовим словом є іменник (флексія слова *не ий*), тоді аналізуються всі слова справа та зліва від нього.

а. Спочатку перевіряються всі слова зліва від нього на наявність флексій *ий*. Будується також частотний слов-

ник. Визначається множина слів, які зустрічаються найчастіше за певний визначений модератором ліміт – це і є нові ключові сова.

б. Потім аналізуються всі слова справа – вони всі мають бути без флексії ий. Аналогічно будується частотний словник, за яким визначається множина ключових слів.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Процес виведення термінального ланцюжка українською [1–2], в якій властивий вільний порядок слів у реченні, що, проте, не заперечує існування сталого порядку розміщення окремих мовних елементів [3–4]. Для простого повного речення з прямим порядком слів структурну схему вважатимемо фіксованою, основними синтаксичними категоріями такого речення будуть іменна та дієслівна групи [5–7]. Необмежена граматики, побудована на тих же засадах, що і у попередніх прикладах, не матиме застосування через свою складність [8–10]. Для утворення контекстно-залежної граматики введемо певні обмеження, перш за все, на структуру речення [11]. Спираючись на правила побудови речень української мови з прямим порядком слів (наприклад, прикметник стоїть у препозиції до іменника, елементи іменникової групи групуються навколо іменника тощо) [11–13], розглянемо іменну групу  $\tilde{N}$  такої структурної схеми  $\tilde{N} = \{AN\}$  або  $\tilde{N} = N^p$ . Прикметник та іменник в іменній групі узгоджуються між собою за відмінком, числом та родом [14–15]. Ці граматичні категорії є також граматичними категоріями займенника. Розглядатимемо дієслівну групу  $\tilde{R}$  такої структурної схеми:  $\tilde{R} = R\tilde{N}$  або  $\tilde{R} = \tilde{N}R$ . З огляду на граматичні характеристики дієслова в українській мові, узгодження між іменною та дієслівною групою відбувається за числом, родом та особою (табл. 1–2).

Розглядатимемо речення з іменною групою в третій особі і дієслівною групою в теперішньому часі. Скороченим позначеннями іменної групи є  $\tilde{N}_{рд,чл,вд,ос}$  а її скла-

дових –  $A_{рд,чл,вд}$ ,  $N_{рд,чл,вд,ос}$ ,  $N_{рд,чл}^{займ}$ . За потреби наголосити на використанні різних значень граматичних категорій використаємо такі позначки: дві іменні групи з різними значеннями категорії, наприклад, роду, позначатимемо так:  $\tilde{N}_{рд,чл,вд,ос}$ ,  $\tilde{N}_{рд,чл,вд,ос}$ . Скороченим позначеннями дієслівної групи є  $\tilde{R}_{рд,чл,чс,ос}$ , дієслова –  $R_{рд,чл,чс,ос}$ . Реалізація норм та правил української мови впливає на подання перетворень. Наприклад, відомо, що найбільш часто іменна група виражається іменником або займенником у називному відмінку, а форми дієслова у теперішньому часі для всіх родів однини співпадають (*він/вона/воно летить*), і врахування таких закономірностей відповідно відображається у позначеннях іменної та дієслівної груп –  $\tilde{N}_{рд,ч,н,ос}$  і  $\tilde{R}_{чл,мн,ос}$ . Спосіб подання контекстно-залежної граматики, що виводить речення введеної структурної схеми (з урахуванням певних закономірностей української мови) приведемо на прикладі речення *У своїй найбільш важливій роботі він показує барвистий світ українського села в його неповторній привабливості*. Розглянемо граматику  $G_3 = (V, T, S, P)$ . Алфавіт (позначення синтаксичних категорій подамо без індексів – для зручності)  $V = (S, \tilde{N}, \tilde{R}, A, N, R, E, N^{займ}, \#, у, свій, найбільш, важливий, робота, він, показувати, барвистий, світ, український, село, в, неповторний, привабливість)$ ,  $T = (\#, у, свій, найбільш, важливий, робота, він, показувати, барвистий, світ, український, село, в, неповторний, привабливість)$ ,  $\#$  – символ межі речення,  $S$  – початковий символ. Кожен крок виведення полягає в розгортанні одного з символів попереднього ланцюжка (так, при переході від ланцюжка 2 до ланцюжка 3 символ  $\tilde{R}_{од,мн,з}$  розгортається в три символи –  $R_{од,мн,з ч,од,з,1}$ ,  $c_{од,о,з}$ ) або в заміні його іншим (наприклад, при переході від ланцюжка 10 до ланцюжка 11 символ  $\tilde{N}_{ч,од,з,1}$  замінюється на  $N_{ч,од,з,1}^{займ}$ ), інші ж символи переписуються без зміни. Проміжний ланцюжок містить рівно один допоміжний символ на останньому місці, тобто речення породжується зліва направо. Регулярна граматики ніби передбачає, що може слідувати за вже виданою словоформою, причому глибина передбачення – один сусідній символ; кожен черговий вибір повністю обумовлюється лише одним попереднім вибором [12]. Із виведення речення в регулярній граматиці неможливо отримати природне подання структури безпосередніх складових цього речення порівняно в контекстно-залежній та контекстно-вільній граматиках. Регулярні граматики дають деяку структуру складових, як і взагалі всі граматики безпосередніх складових, однак, ці складові зазвичай носять формальний характер [14].

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виявлення ключових слів тематики контенту з фрагменту тексту забезпечимо за допомогою процесів, поданих на рис. 2.

Текст реалізує структурно подану діяльність, що передбачає суб'єкт і об'єкт, процес, мету, засоби і результати, які відображаються в змістовно-структурних, функціональних, комунікативних показниках. Одиницями внут-

Таблиця 1 – Позначення граматичних категорій іменної групи в українській мові

Тип	Опис
Іменна група/ $\tilde{N}$	прикметник/ <i>A</i> , іменник/ <i>N</i> , займенник/ <i>N^{займ}</i> ;
Число/ <i>ЧЛ</i>	однина/ <i>од</i> , множина/ <i>мн</i> ;
Рід/ <i>РД</i>	чоловічий/ <i>ч</i> , жіночий/ <i>ж</i> , середній/ <i>с</i> ;
Відмінок/ <i>ВД</i>	називний/ <i>н</i> , родовий/ <i>р</i> , давальний/ <i>д</i> , знахідний/ <i>з</i> , орудний/ <i>о</i> , місцевий/ <i>м</i> , кличний/ <i>к</i> ;
Особа/ <i>ОС</i>	1-ша/ <i>1</i> , 2-га/ <i>2</i> , 3-тя/ <i>3</i>

Таблиця 2 – Позначення граматичних категорій дієслівної групи в українській мові

Тип	Опис
Дієслівна група/ $\tilde{R}$	дієслово/ <i>R</i> , в межах іменної групи прикметник/ <i>A</i> , іменник/ <i>N</i> ;
Число/ <i>ЧЛ</i>	однина/ <i>од</i> , множина/ <i>мн</i> ;
Рід/ <i>РД</i>	чоловічий/ <i>ч</i> , жіночий/ <i>ж</i> , середній/ <i>с</i> ;
Особа/ <i>ОС</i>	1-ша/ <i>1</i> , 2-га/ <i>2</i> , 3-тя/ <i>3</i> ;
Час/ <i>ЧС</i>	теперішній/ <i>тп</i> , минулий/ <i>мн</i> , майбутній/ <i>мб</i>

рішньої організації структури тексту є алфавіт, лексика (парадигматика), граматики (синтагматика), парадигми, парадигматичні відношення, синтагматичні відношення, правила ідентифікації, висловлювання, між фразова єдність та фрагменти-блоки. На композиційному рівні виділяють речення, абзаци, параграфи, розділи, глави, підглави, сторінки тощо (речення, побічно пов'язані з внутрішньою структурою, не розглядаються – рис. 3). За допомогою бази даних (бази термінів/морфем і службових частин мови) та визначених правил аналізу тексту виконують пошук терміну (рис. 4а) на інформаційному ресурсі (рис. 4б).

Розглянемо синтаксичні аналізатори, що працюють у два етапи: ідентифікують змістовні лексеми та створюють дерево розбору (алг. 1).

Алгоритм 1. Синтаксичний аналізатор текстового контенту.

Етап 1. Ідентифікація змістовних лексем  $U_{K1} \in U_K$  для комерційного контенту  $C_2$ .

Крок 1. Визначення ланцюжка термів у вигляді речення.

Крок 2. Ідентифікація іменної групи за допомогою словника основ.

Крок 3. Ідентифікація дієслівної групи за допомогою словника основ.

Етап 2. Створення дерева розбору зліва направо. Виведення дерева полягає в розгортанні одного з символів попереднього ланцюжка послідовності лінгвістичних змінних, або в заміні його іншим, інші ж символи переписуються без зміни. При розгортанні, замінені/переписані символи (предки) з'єднують безпосередньо з символами, які виходять в результаті розгортання, заміни або переписування (нащадками), та отримують дерево складових, або синтаксичну структуру для змісту комерційного контенту.

Крок 1. Розгортання іменної групи. Розгортання дієслівної групи.

Крок 2. Реалізація синтаксичних категорій словоформами.

Етап 3. Визначення множини ключових слів  $\alpha_4 : (C_2, U_K, T) \rightarrow C_3$  для контенту  $C_2$ .

Крок 1. Визначення термів  $Noun \in U_{K1}$  – іменників, словосполучень іменників або прикметника з іменником серед множини слів текстового контенту.

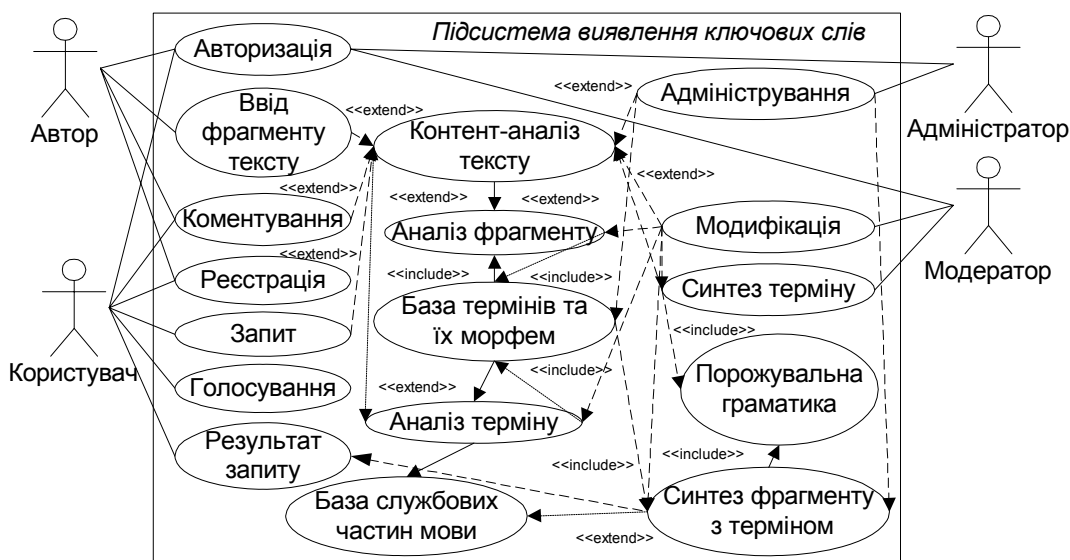


Рисунок 2 – Діаграма варіантів використання для виявлення ключових слів тематики контенту

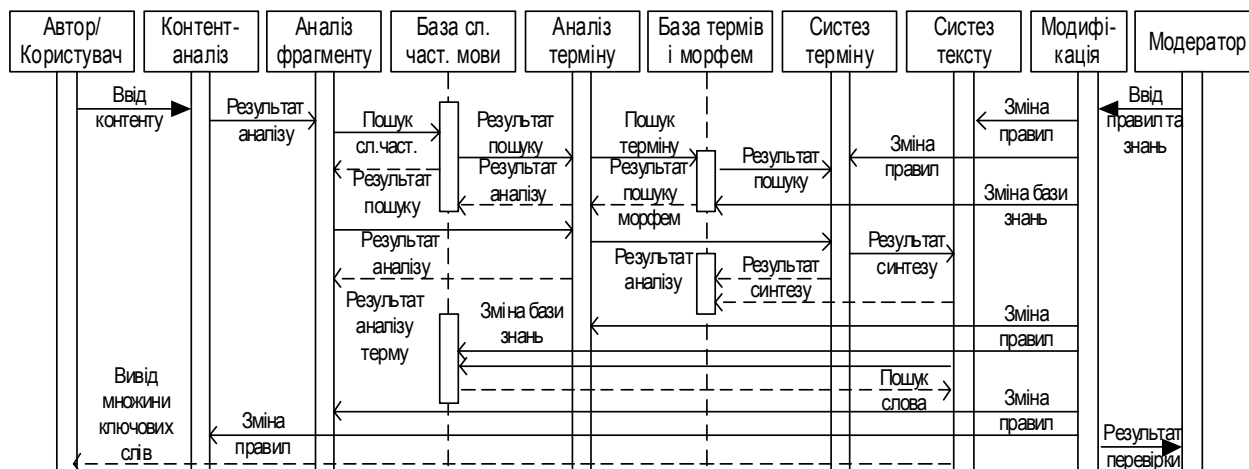


Рисунок 3 – Діаграма послідовності для процесу виявлення ключових слів тематики контенту

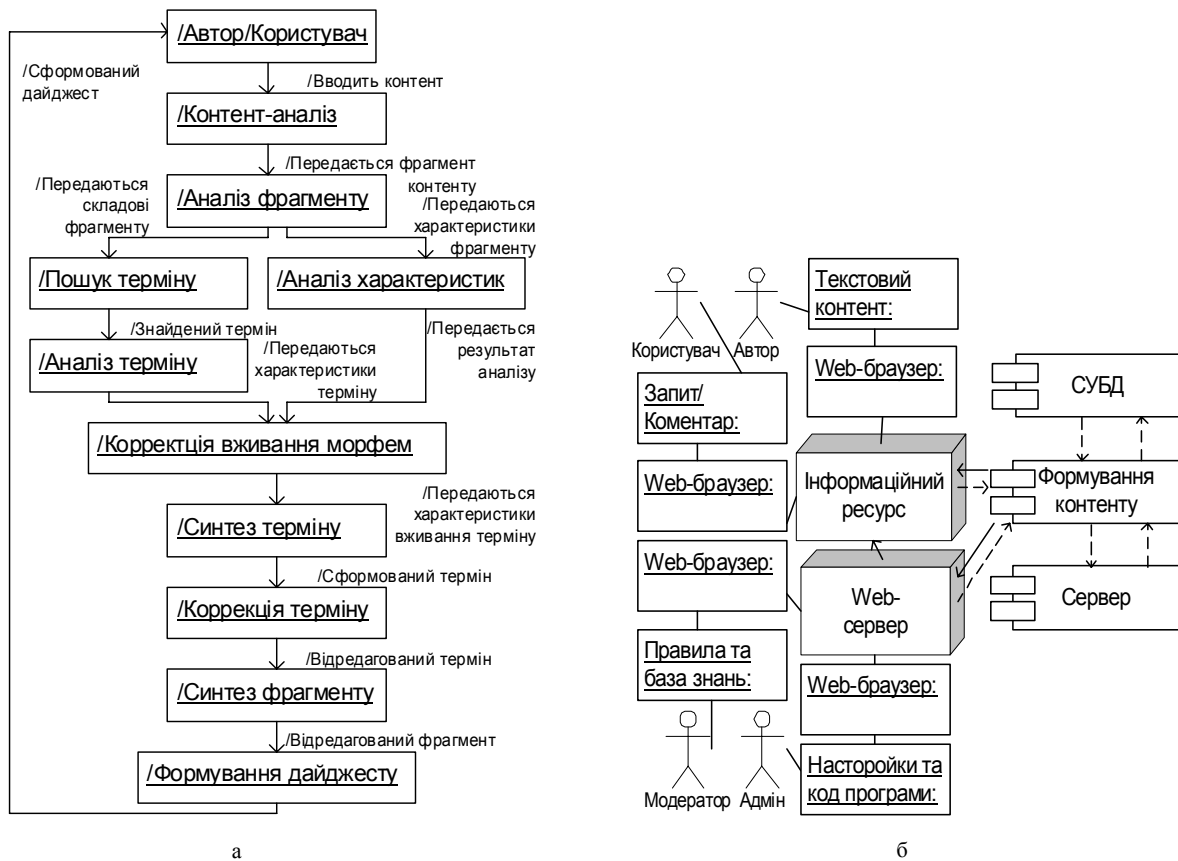


Рисунок 4 – Діаграми: а – кооперації, б – компонентів виявлення ключових слів тематики контенту

Крок 2. Розрахунок унікальності  $Unicity$  для термів  $Noun \in U_{K1}$ .

Крок 3. Розрахунок  $NumbSymb \in U_{K3}$  для  $Noun \in U_{K1}$  при  $Unicity \geq 80$ .

Крок 4. Розрахунок  $UseFrequency \in U_{K2}$  – частоти появи ключових слів контенту. Для термів з  $NumbSymb \leq 2000$  частота  $UseFrequency \in [6;8]\%$ , з  $NumbSymb \geq 3000$  –  $[2;4]\%$ , з  $2000 > NumbSymb < 3000$  –  $[4;6]\%$ .

Крок 5. Розрахунок  $BUseFrequency$  – частота появи ключових слів на початку тексту,  $IUseFrequency$  – частота появи ключових слів в середині тексту,  $EUseFrequency$  – частота появи ключових слів в кінці тексту контенту.

Крок 6. Порівняння значень  $BUseFrequency$ ,  $IUseFrequency$  та  $EUseFrequency$  для розстановки пріоритетів. Ключові слова з більшими значеннями  $BUseFrequency$  мають більший пріоритет, ніж ключові слова з більшим значенням  $EUseFrequency$ .

Крок 7. Сортування ключових слів згідно їх пріоритетів.

Етап 4. Заповнення бази пошукових образів контенту  $C_3$ , тобто атрибутів  $KeyWords \in U_{K4}$  – ключові слова,  $Unicity$  – унікальність ключових слів  $\geq 80$ ,  $Noun$  – терм,

$NumbSymb$  – кількість знаків без пробілів,  $UseFrequency$  – частота вживання ключових слів,  $BUseFrequency$  – частота вживання ключових слів на початку тексту,  $IUseFrequency$  – частота вживання ключових слів в середині тексту,  $EUseFrequency$  – частота вживання ключових слів в кінці тексту. Спираючись на правила породжувальної граматики виконується корекція терміну згідно правил його вживання у контексті (рис. 5).

Речення задають межі дії знаків пунктуації, анафоричних і катафоричних посилань. Семантика тексту зумовлена комунікативним завданням передавання інформації. Структура тексту визначається внутрішньою організацією одиниць тексту і закономірностями їх взаємозв'язку. Під час синтаксичного аналізу текст оформляють у структуру даних, наприклад, в дерево, яке відповідає синтаксичній структурі вхідної послідовності, і найкраще підходить для подальшого опрацювання. Після аналізу фрагменту тексту і терміну синтезують новий термін як ключове слово тематики контенту, використовуючи базу термінів та їх морфем (рис. 5).

Далі синтезуємо терміни для формування нового ключового слова, використовуючи базу службових частин мови. Принцип виявлення ключових слів за змістом (термами) базується на законі Зіпфа і зводиться до вибору слів із середньою частотою появи (найбільш вживанні слова ігнорують через «стоп-словники», а рідкісні слова не враховують).

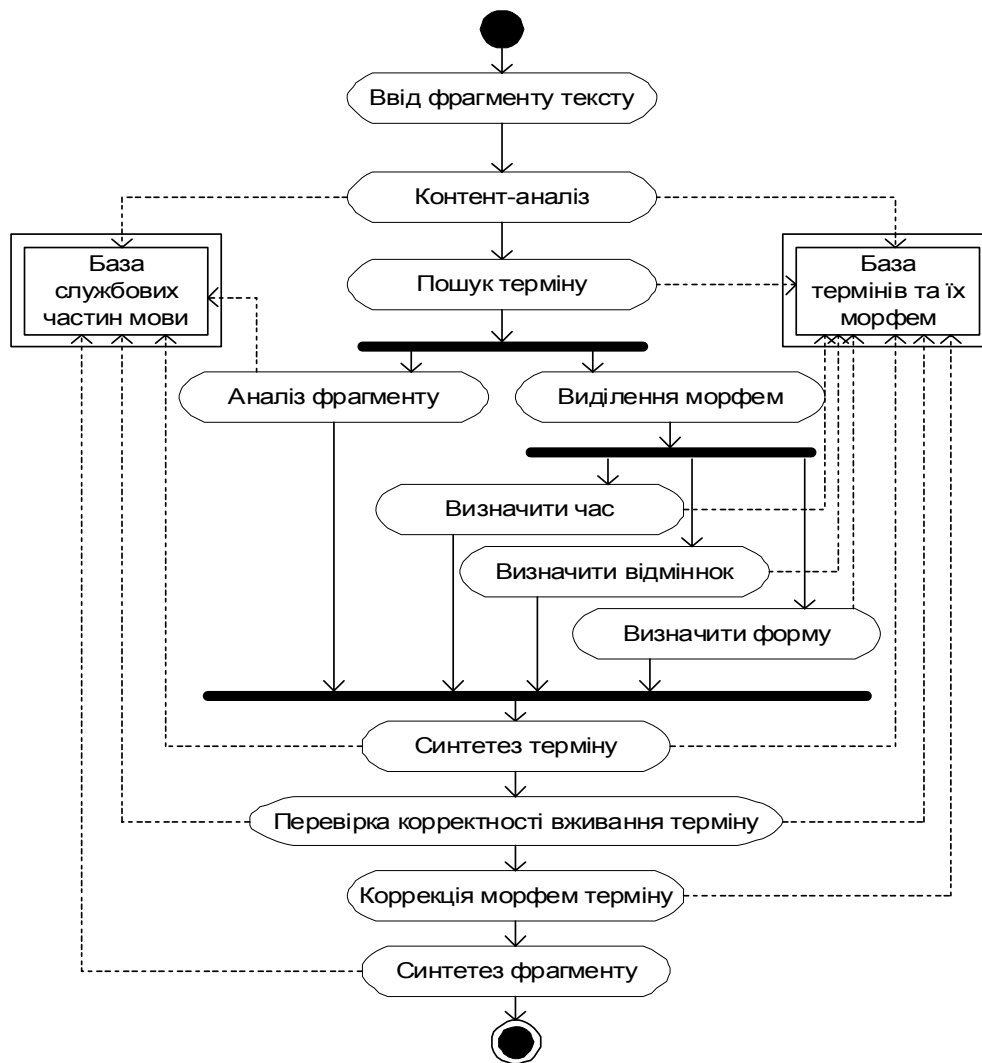


Рисунок 5 – Діаграма діяльності для процесу виявлення ключових слів тематики контенту

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Лінгвістичною базою для експериментального дослідження обрано 100 наукових публікацій Вісника Національного університету «Львівська політехніка» серії «Інформаційні системи та мережі» (<http://science.lp.edu.ua/sisn>), № 783 (<http://science.lp.edu.ua/SISN/SISN-2014>) та № 805 (<http://science.lp.edu.ua/sisn/vol-cur-805-2014-2>). Аналіз статистики функціонування системи виявлення множини ключових слів із 100 наукових статей було проведено у два етапи, зокрема:

1. Проаналізувати всі статті із перевіркою загальних заблокованих слів та тематичного словника.
2. Проаналізувати всі статті із перевіркою уточнених заблокованих слів та уточненого тематичного словника (з більшою кількістю запуску системи формується множина невідомих слів (відсутніх і в тематичному словнику і в множині заблокованих).

Окрім того на кожному етапі перевірка відбувалась в два кроки для кожної статті: аналіз всієї статті (<http://victana.lviv.ua/index.php/kliuchovi-slova>) та аналіз статті без початку (назва, автори, УДК, анотації двома мовами, авторські ключові слова двома мовами, місце роботи

авторів) і без списку літератури для того, щоб визначити похибки точності формування множини ключових слів.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз статистики здійснювався за принципом порівняння множини авторських ключових слів (визначені та прописані в статті самими авторами цих робіт), множини ключових слів визначених за першим та другим етапами з різними вагами слів (але більше, за визначене в опції *\*Мін.вага слова, %* в межах [1,5]) з повними та скороченими текстами робіт (табл. 3) при середньому арифметичному значенні авторських ключових словосполучень / слів біля 5 (4,77), які в середньому утворені з 10 (9,82) слів. Вага слова розраховується як відносна частота появи основи цього слова у всьому тексті. В табл. 4 присутні такі позначення, як *A* (всього ключових слів, визначених системою при заданій вазі слова), *B* (змістовних слів зі списку утворених, тобто без невідомих аббревіатур, дієслів, службових слів тощо), *C* (збіг слів з визначеними автором статті), *D* (точність збігу знайдених ключовиків з авторським ключовими словами), *E* (додаткові ключові слова, визначені системою, але не визначені автором статті).

Таблиця 3 – Статистичні дані досліджених обсягів текстів статей

Назва обсягу статті	Крок 1		Крок 2	
	Всього	Середнє арифметичне	Всього	Середнє арифметичне
Сторінок	956	9,56	828	8,28
Абзаців	16497	164,97	15263	152,63
Рядків	42553	425,53	36965	369,65
Слів	345580	3455,8	291247	2912,47
Знаків	2327209	23272,09	1974773	19747,73
Знаків та пробілів	2674889	26748,89	2265917	22659,17

Таблиця 4 – Статистичні дані досліджених змісту текстів статей

Назва	Вага слова	Етап 1					Етап 2				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Крок 1	≥ 1	5,46	3,92	2,51	2,08	1,74	7,43	7,03	3,27	3	4,18
	≥ 2	1,08	0,88	0,63	0,59	0,26	2,67	2,64	1,65	1,54	1,12
	≥ 3	0,41	0,38	0,22	0,21	0,16	1,21	1,2	0,85	0,79	0,41
	≥ 4	0,15	0,13	0,09	0,09	0,04	0,46	0,45	0,33	0,31	0,15
	≥ 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Крок 2	≥ 1	6,51	5,02	2,68	2,23	2,37	8,35	7,78	3,25	2,91	4,99
	≥ 2	1,34	1,11	0,74	0,72	0,39	3,12	3,07	1,81	1,67	1,43
	≥ 3	0,51	0,45	0,29	0,27	0,17	1,42	1,4	0,93	0,85	0,54
	≥ 4	0,19	0,17	0,12	0,12	0,05	0,73	0,72	0,45	0,42	0,31
	≥ 5	0,11	0,1	0,06	0,06	0,04	0,33	0,32	0,25	0,23	0,1

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

В Інтернет-просторі зазвичай присутні інформаційні SEO-ресурси, які визначають ключові слова в межах [100 ÷ 1000] слів в тексті, наприклад:

- <http://msurf.ru/tools/keygeneratortext/>;
- <http://syn1.ru/tools/keygeneratortext/>;
- <http://webmasta.org/tools/keygeneratorurl/>;
- <http://labs.translated.net/terminology-extraction/>;
- <http://www.keywordtext.therealist.ru/>.

Недолік таких SEO-ресурсів – неточність та некоректність опрацювання україномовних текстів при відсутності грамотно побудованих морфологічних словників, словників основ та заблокованих слів. Також основним недоліком більшості таких SEO-ресурсів обмеженість опрацювання обсягів текстових масивів даних. Для прикладу синтаксично проаналізована рядом SEO-ресурсів ця україномовна стаття, яка має понад 800 слів в тесті Частина перерахованих вище SEO-ресурсів не опрацьовує або некоректно опрацьовує такий великий обсяг інформації (рис. 6–7).

Одним із найкращих SEO-ресурсів є <http://advego.ru/text/seo/>, який найкраще працює з україномовних текстами (рис. 8). Проводить семантичний аналіз тексту онлайн та SEO-аналіз тексту. Результат найбільш наближений до отриманого розробленою системою.

Але є недоліки. Не визначає множини ключових слів, а лише частоту вживання слів, словосполучень та частин слів (які необов'язково є частинами слова як основа). Взагалі не працює з основами слова. Для цього SEO-ресурсу слова ключових та ключові є різними.

Розроблений SEO-ресурс <http://victana.lviv.ua/kliuchovi-slova> працює з основами слова, орієнтований на україномовні, російськомовні, англійськомовні тексти, а також змішаного типу (рис. 9). На прикладі цієї статті SEO-ресурс визначив наступну множини ключових слів {слово, ключових, контент, аналіз, chomsky, система}.

Повторюваність слів, раз: слово – 120; ключових – 49; контент – 46; аналіз – 39; chomsky – 37; система – 37. Автори визначили такі ключові слова: текст, україномовний, алгоритм, контент-моніторинг, ключові слова, лінгвістичний аналіз, синтаксичний аналіз, породжувальні граматики, структурна схема речення, інформаційна лінгвістична система. Автори зазвичай більше визначають ключових слів порівняно з реальною ситуацією згідно закономірностей розподілу частоти слів за законом Зіпфа (George Kingsley Zipf). Автор наукової статті зазвичай обирає за своїм розсудом кількість ключових слів в діапазоні від 2 до 10 слів (найчастіше – 3–5 ключовиків). Система ж визначає різну кількість слів, в залежності від стилю написання конкретного автора (існують такі статті, в яких система не знаходить за законом Зіпфа жодного ключового слова). Збіг списків виявлених ключовиків з авторськими без врахування зайвих слів, визначених авторами (повторюваність > 30 для обсягу тексту понад 4800 слів), складає відповідно для таких SEO-ресурсів:

- <http://syn1.ru/tools/keygeneratortext/> – приблизно 35%;
- <http://labs.translated.net/terminology-extraction/> – приблизно 57%;
- <http://advego.ru/text/seo/> – приблизно 83%;
- <http://victana.lviv.ua/kliuchovi-slova> – приблизно 90%.

На рис. 10 приведено діаграму аналізу статистики формування системою множин всіх потенційних ключових слів порівняно з множиною, визначеною авторами статей.

Перший стовпчик – середньоарифметична кількість ключових слів, визначених автором (4,77), а другий – середньоарифметична кількість слів, які складають ці авторські ключові слова (9,82). Третій стовпчик – середньоарифметична кількість потенційних ключових слів, визначена системно на етапі 1, крок 1(5,46); четвертий – на етапі 1, крок 2 (6,51); п'ятий – на етапі 1, крок 1 (7,43);

**Информация о тексте:**

Всего слов в тексте: 5072

Обработано слов (без повторов): 1073

**Результат**

КЛЮЧОВИХ, контенту, АНАЛ, Chomsky, ться, сть, речення, групи, комерц, етап, Ключов, йного, або, менник, появи, без, досл, Systems

**Слова списком подробнее** [\[ Скрыть \]](#)

Слово ↕	Вхождений ↕	Частота (TF) ↕
КЛЮЧОВИХ	43	0.008
контенту	40	0.008
АНАЛ	40	0.008
Chomsky	37	0.007
ться	22	0.004
сть	18	0.004
речення	17	0.003
групи	15	0.003
КОМЕРЦ	15	0.003
етап	13	0.003
Ключов	12	0.002
йного	12	0.002
або	11	0.002
менник	11	0.002
появи	10	0.002
без	9	0.002
досл	9	0.002
Systems	9	0.002

Рисунок 6 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі <http://syn1.ru/tools/keygeneratortext/>

#	Extracted term	Score
1	<u>текстового контенту</u>	65%
2	<u>ключових слів</u>	65%
3	<u>комерційного контенту</u>	62%
4	<u>обработки текстового контента</u>	62%
5	<u>опрацювання текстового контенту</u>	62%
6	<u>для</u>	61%
7	<u>частота появи ключових слів</u>	60%
8	<u>аналізу</u>	56%
9	<u>слова</u>	56%
10	<u>систем</u>	55%
11	<u>при</u>	55%
12	<u>іменної групи</u>	55%
13	<u>синтаксичного аналізу</u>	55%
14	<u>правил</u>	54%
15	<u>систем опрацювання текстового контенту</u>	53%
16	<u>автоматического обработки текстового контента</u>	53%
17	<u>прикметника з іменником серед</u>	53%
18	<u>іменником серед множини слів</u>	53%
19	<u>лише одного символу отримали</u>	53%
20	<u>або прикметника з іменником</u>	53%

Рисунок 7 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі <http://labs.translated.net/terminology-extraction/>



## Статистика текста

Наименование показателя	Значение
Количество символов	35927
Количество символов без пробелов	31118
Количество слов	4354
Количество уникальных слов	1589
Количество значимых слов	2873
Количество стоп-слов	1013
Вода	34.0 %
Количество грамматических ошибок	460
Классическая тошнота документа	8.12
Академическая тошнота документа	4.9 %

## Семантическое ядро

Фраза/слово	Количество	Частота, %
слів	66	1.52
контент	54	1.24
ключових	45	1.03
ключових слів	42	0.96 / 1.93
chomsky	37	0.85
текст	36	0.83
система	29	0.67
текстового контенту	24	0.55 / 1.10
текстовой	24	0.55
граматика	22	0.51
аналізу	21	0.48
крок	21	0.48
речення	18	0.41

## Слова

Слово	Количество	Частота, %
слів	66	1.52
контент	54	1.24
ключових	45	1.03
chomsky	37	0.85
текст	36	0.83
система	29	0.67
текстовой	24	0.55
граматика	22	0.51
аналізу	21	0.48
крок	21	0.48
речення	18	0.41
chomsky	16	0.37
частота	16	0.37

## Стоп-слова

Слово	Количество	Частота, %
в	85	1.95
тот	68	1.56
of	60	1.38
п	56	1.29
з	48	1.10
на	45	1.03
слово	40	0.92
the	35	0.80
для	31	0.71
р	29	0.67
і	29	0.67
and	27	0.62
у	26	0.60

Рисунок 8 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі <http://advego.ru/text/seo/>

Рисунок 9 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі <http://victana.lviv.ua/kliuchovi-slova>

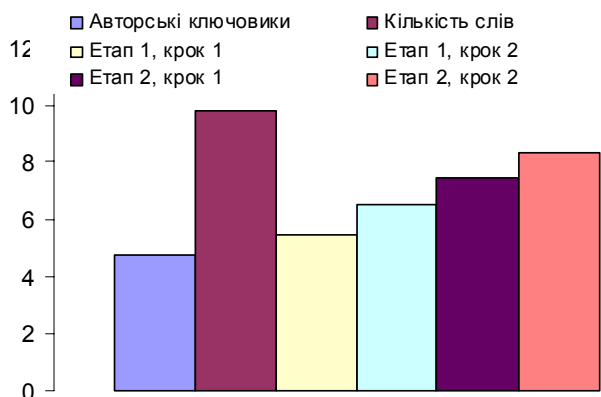


Рисунок 10 – Результати перевірки 100 статей

шостий – на етапі 2, крок 2 (8,35). Отже, автор статті в середньому зазвичай визначає більшу кількість слів (стовпчик 2) та меншу кількість ключових слів (стовпчик 1), ніж вона реально присутня в цій роботі.

### ВИСНОВКИ

У статті розглянуто особливості методу синтаксичного аналізу україномовного текстового контенту, спрямованого на автоматичне виявлення значущих ключових слів вхідних текстів. Визначено роль і формальні ознаки синтаксичного аналізатора в процесі виявлення

ключових слів тематики контенту, проведено декомпозицію процедур запропонованого методу на 4-х етапах. На відміну від відомих синтаксичних аналізаторів, запропонований метод забезпечує самовдосконалення та самонавчання автоматизованої системи визначення ключових слів за рахунок механізму ідентифікації значущих статистичних параметрів у визначених модератором межах. Експериментальне дослідження на матеріалах 100 наукових публікацій з двох номерів (783 та 805) Вісника Національного університету «Львівська політехніка» серії «Інформаційні системи та мережі» (<http://science.lp.edu.ua/sisn>) підтвердило достовірність методу – для різних методик опрацювання первинного тексту середній збіг списків виявлених ключовиків з авторськими змінюється у проміжку 52,6–68,5%. Точність збігу ключових слів із авторськими коливається в проміжку 43,6–62,9%. Середній збіг змістовних ключових слів порівняно зі всіма знайденими системою коливається в проміжку 38,9–75,8% в залежності від етапів аналізу текстів статей. Точність збігу ключових слів порівняно зі всіма знайденими системою коливається в проміжку 34,3–71,9% в залежності від етапів аналізу текстів статей. Потребує подальшого експериментального дослідження визначення ключових слів для інших категорій текстів – наукових гуманітарного профілю, художніх, публіцистичних тощо.

## ПОДЯКИ

У статті розв'язана науково-практична задача автоматичного визначення ключових слів україномовного тексту в Інтернет-джерелах на основі синтаксичного аналізу речень відповідної текстової інформації. Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка» на тему «Розроблення методів та засобів побудови інтелектуальних систем опрацювання інформаційних ресурсів з використанням онтологічного підходу», а також кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки Вінницького національного технічного університету у межах діяльності науково-дослідного центру прикладної та комп'ютерної лінгвістики. Результати досліджень здійснювалися у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт за темами «Розробка методів, алгоритмів і програмних засобів моделювання, проектування та оптимізації інтелектуальних інформаційних систем на основі Web-технологій «ВЕБ» та «Інтелектуальна інформаційна технологія образного аналізу тексту та синтезу інтегрованої бази знань природно-мовного контенту».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Берко, А. Системи електронної контент-комерції / А. Берко, В. Висоцька, В. Пасічник. – Л.: НУЛП, 2009. – 612 с.
2. Математична лінгвістика / [В. Висоцька, В. Пасічник, Ю. Щербина, Т. Шестакевич]. – Л.: Новий Світ-2000, 2012. – 359 с.
3. Chomsky N. Three models for the description of language / N. Chomsky // I.R.E. Transactions on Information Theory. – 1956. – Vol. 2. – P. 113–124.
4. Chomsky N. On certain formal properties of grammars / N. Chomsky // Information and Control. – 1959. – Vol. 2. – P. 137–167.
5. Chomsky N. On the notion «Rule of Grammar» / N. Chomsky // Proceedings of the Twelfth Symposium in Applied Mathematics. – 1961. – P. 6–24.
6. Chomsky N. Context-free grammars and pushdown storage / N. Chomsky // Quarterly Progress Reports, Research Laboratory of Electronics, M.I.T. – 1962. – № 65. – P. 187–194.
7. Chomsky N. Formal properties of grammars / N. Chomsky // Handbook of Mathematical Psychology, New York: Wiley and Sons. – 1963. – Vol. 2. – P. 323–418.
8. Chomsky N. The logical basis for linguistic theory / N. Chomsky // Proc. IX-th Int. Cong. Linguists, 1962. – P. 91–111.
9. Chomsky N. Finite state languages / N. Chomsky, G. A. Miller // Information and Control. – 1958. – Vol. 1. – P. 91–112.
10. Chomsky N. Introduction to the formal analysis of natural languages / N. Chomsky, G. A. Miller // Handbook of Mathematical Psychology 2, Ch. 12, Wiley. – 1963. – Vol. 2. – P. 269–321.
11. Chomsky N. The algebraic theory of context-free languages / N. Chomsky, M. P. Schützenberger // Computer programming and formal systems, North-Holland. – 1963. – P. 118–162.
12. Chomsky N. Syntactic Structures / N. Chomsky. – Mouton, The Hague, 1957. – 117 p.
13. Chomsky N. Explanatory models in linguistics / N. Chomsky // Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress. Stanford University Press, Stanford, CA. – 1962. – P. 528–550.
14. Chomsky N. Aspects of the Theory of Syntax / N. Chomsky. – MIT Press, Cambridge, MA, 1965. – 247 p.
15. Chomsky N. Conditions on transformations / N. Chomsky. – New York: Holt, Rinehart & Winston, 1973. – P. 232–286.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2016.

Після доробки 29.02.2016.

Бисикало О. В.<sup>1</sup>, Высоцкая В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, декан факультета комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Україна

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ УКРАИНОЯЗЫЧНОГО ТЕКСТА

В статье представлены применения порождающих грамматик в лингвистическом моделировании. Описание моделирования синтаксиса предложения применяют для автоматизации процессов анализа и синтеза естественных языковых текстов. В статье показаны особенности процесса синтеза предложений различных языков с применением порождающих грамматик. В работе рассмотрено влияние норм и правил языка на ход построения грамматик. Применение порождающих грамматик имеет широкие возможности в разработке и создании автоматизированных систем обработки текстового контента, для лингвистического обеспечения компьютерных лингвистических систем и тому подобное. В естественных языках есть ситуации, когда явления, зависящие от контекста, описаны как независимые от контекста, то есть в терминах контекстно-свободных грамматик. При этом описание затруднено из-за образования новых категорий и правил. В статье представлены особенности процесса введения новых ограничений на классы данных грамматик из-за введения новых правил. При количестве символов в правой части правил не меньшей левой получили несокращенные грамматики. Затем при замене только одного символа получили контекстно-зависимые грамматики. При наличии в левой части правила лишь одного символа получили контекстно-свободные грамматики. Никаких следующих природных ограничений на левые части правил наложить уже нельзя. Исходя из важности обеспечения автоматического обработки текстового контента в современных информационных средствах (например, информационно-поисковых системах, системах машинного перевода, семантического, статистического, оптического и акустического анализа и синтеза речи, автоматизированного редактирования, экстракции знаний текстового контента, реферирования и аннотирования текстового контента, индексирования текстового контента, учебно-дидактических, менеджмента лингвистических корпусов, инструментальные средства составления словарей различных типов и т.д.), специалисты интенсивно ищут новые модели, способы их описания и методы автоматического обработки текстового контента. Одним из таких способов является разработка общих принципов построения лексикографических систем синтаксического типа и построения по этим принципам указанных систем обработки текстового контента для конкретных языков. Любые средства синтаксического анализа состоят из двух частей: базы знаний о конкретном естественном языке и алгоритма синтаксического анализа, то есть набора стандартных операторов обработки текстового контента на основе этих знаний. Источником грамматических знаний сведения по морфологическому анализу и различные заполнены таблицы понятий и лингвистических единиц. Они являются результатом эмпирического обработки текстового контента на естественном языке экспертами с целью выделения основных закономерностей для синтаксического анализа.

**Ключевые слова:** текст, украиноязычный, алгоритм, контент-мониторинг, ключевые слова, лингвистический анализ, синтаксический анализ, порождающих грамматик, структурная схема предложения, информационная лингвистическая система.

Bisikalo O. V.<sup>1</sup>, Vysotska V. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. Sc., Professor, Dean of Faculty for Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

#### SENTENCE SYNTACTIC ANALYSIS APPLICATION TO KEYWORDS IDENTIFICATION UKRAINIAN TEXTS

This paper presents the generative grammar application in linguistic modelling. Description of syntax sentence modelling is applied to automate the processes of analysis and synthesis of texts in natural language. The article shows the features of the sentences synthesis indifferent languages of using generative grammars. The paper considers norms and rules influence in the language on the grammars constructing course. The use of generative grammars has great potential in the development and creation of automated systems for textual content processing, for linguistic providing linguistic computer systems, etc. The methods and tools development for automatic processing of text of commercial content in modern information technology are important and topical (for example, systems of information retrieval, machine translation, semantic, statistical, optical and acoustic analysis and synthesis of speech, automated editing, knowledge extracting from the text content, text content abstracting and annotation, textual content indexing, training and didactic, linguistic buildings management, instrumental means of dictionaries conclusion of various types, etc.). Specialists actively seeking new models of description and methods for automatic processing of text content. One of these methods is the development of general principles of lexicographic systems of syntactic type. It is important by these principles these systems construction of text content processing for specific languages. Any tools of syntactic analysis consists of two parts: a knowledge base about a particular natural language and algorithm of syntactic analysis (a set of standard operators of text content processing on this knowledge). The source of grammatical knowledge is data from morphological analysis and various filled tables of concepts and linguistic units. They are the result of the empirical processing of textual content in natural language of experts in order to highlight the basic laws for syntactic analysis.

**Keywords:** text, a Ukrainian, algorithm, content monitoring, keywords, linguistic analysis, parsing, generative grammar, structured scheme sentences, information linguistic system.

#### REFERENCES

1. Berko A., Vysotska V., Pasichnyk V. *Systemy elektronnoyi kontent-komertsiyi*. Leningrad, NULP, 2009, 612 p.
2. Vysotska V., Pasichnyk V., Scherbyna J., Shestakevych T. *Matematychna lnhvistyka*. Leningrad, Novyy Svit-2000, 2012, 359 p.
3. Chomsky N. Three models for the description of language, *I.R.E. Transactions on Information Theory*, 1956, Vol. 2, pp. 113–124.
4. Chomsky N. On certain formal properties of grammars, *Information and Control*, 1959, Vol. 2, pp. 137–167.
5. Chomsky N. On the notion «Rule of Grammar», *Proceedings of the Twelfth Symposium in Applied Mathematics*, 1961, pp. 6–24.
6. Chomsky N. Context-free grammars and pushdown storage, *Quarterly Progress Reports, Research Laboratory of Electronics, M.I.T.*, 1962, No. 65, pp. 187–194.
7. Chomsky N. Formal properties of grammars, *Handbook of Mathematical Psychology*, New York: Wiley and Sons, 1963, Vol. 2, pp. 323–418.
8. Chomsky N. The logical basis for linguistic theory, *Proc. IX-th Int. Cong. Linguists*, 1962, pp. 91–111.
9. Chomsky N., Miller G. A. Finite state languages, *Information and Control*, 1958, Vol. 1, pp. 91–112.
10. Chomsky N., Miller G. A. Introduction to the formal analysis of natural languages, *Handbook of Mathematical Psychology 2, Ch. 12, Wiley*, 1963, Vol. 2, pp. 269–321.
11. Chomsky N., Schutzenberger M. P. The algebraic theory of context-free languages, *Computer programming and formal systems, North-Holland*, 1963, pp. 118–162.
12. Chomsky N. *Syntactic Structures*. Mouton, The Hague, 1957, 117 p.
13. Chomsky N. Explanatory models in linguistics, *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*. Stanford University Press, Stanford, CA, 1962, pp. 528–550.
14. Chomsky N. *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press, Cambridge, MA, 1965, 247 p.
15. Chomsky N. *Conditions on transformations*. New York, Holt, Rinehart & Winston, 1973, pp. 232–286.

<sup>1</sup>Студент кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Студент факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета, г. Красноармейск, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

## УВЕЛИЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБКИ ОКРУГЛЕНИЯ

В работе представлен метод повышения качества восстановления расфокусированных изображений за счет уменьшения влияния ошибки округления при дискретизации на восстановленное изображение. С ошибкой округления можно эффективно бороться, зная природу восстанавливаемого изображения и его искажения. Алгоритм восстановления потерянной при округлении части необходимо строить исходя из природы изображения, необходимой точности и допустимой скорости работы этого алгоритма. В работе приводится пример использования линейной интерполяции на этапе предварительной обработки исходного изображения в качестве основы для построения уточненных значений пикселей восстановленного изображения по дискретным значениям пикселей исходного расфокусированного изображения. Предложенный метод не привязан к конкретному алгоритму деконволюции, а его использование в паре с любым из них дает улучшение результата. В работе рассмотрено использование метода совместно с инверсной фильтрацией.

В работе представлен пример практического восстановления изображения на основе линейной интерполяции пикселей исходного изображения. Показано, что предложенный метод дает уменьшение погрешности восстановления в среднем от 3% до 20%, в зависимости от размера и специфики изображения. Показано уменьшение ошибки восстановления с ростом размеров исходного расфокусированного изображения.

**Ключевые слова:** реконструкция изображений, расфокусировка, преобразование Фурье, свертка, оператор искажения, деконволюция.

### НОМЕНКЛАТУРА

$x, y$  – координаты пикселей изображения;

$u, v$  – координаты пикселей Фурье-образа изображения;

$f(x, y)$  – исходное изображение;

$F(u, v)$  – Фурье-образ исходного изображения;

$\hat{F}(u, v)$  – приближение исходного изображения;

$g(x, y)$  – искаженное изображение;

$h(x, y)$  – искажающий оператор PSF (Point Spread Function);

$H(u, v)$  – Фурье-образ искажающего оператора;

$n(x, y)$  – аддитивный шум;

$N(x, y)$  – Фурье-образ шума;

$P(u, v)$  – Фурье-преобразование оператора Лапласа;

$R$  – энергетическим соотношением шум/сигнал;

$S\eta(u, v)$  – спектр шума;

$Sf(u, v)$  – спектр сигнала;

$\gamma$  – параметр регуляризации;

$newValue$  – среднее значение соседних пикселей строки изображения;

$i$  – оператор цикла, перебирающий пиксели строки изображения;

$arr[i]$  – значение цвета пикселя строки изображения.

### ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие фото-видео технологий сделали актуальной разработку качественных алгоритмов обработки изображений, маг. аппарат для которых был уже достаточно хорошо развит еще в семидесятых. Однако, одна из важнейших задач обработки графических данных – восстановление смазанных изображений так и не нашла универсального качественного решения. Помимо бытовых областей применения (телевещание, полиграфия, видеотелефония), восстановление резкости

активно применяется в астрономии, медицине и прочих прикладных науках.

Целью работы являлась разработка модификации метода повышения качества восстановления изображений за счет уменьшения влияния ошибки округления при дискретизации на восстановление изображения, подходящий для работы с любыми применяемыми алгоритмами деконволюции, путем введения дополнительного этапа предварительной обработки исходного изображения.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Искаженное изображение может быть представлено в пространственной области в виде [1]:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y).$$

Свертка функций (конволюция) [2] – операция в функциональном анализе, показывающая «схожесть» одной функции с отраженной и сдвинутой копией другой. По определению, свертка – это математическая операция, примененная к двум функциям  $f$  и  $g$ , порождающая третью функцию, которая иногда может рассматриваться как модифицированная версия одной из первоначальных. В нашем случае это операция вычисления нового значения выбранного пикселя, учитывающая значения окружающих его пикселей. Ядро (функция искажения) – квадратная матрица нечетного размера (3x3, 5x5, 7x7 и т.д.). Путем наложения этой матрицы на исходное изображение, вычисляется значение пикселя нового изображения, по координатам, соответствующим пикселу, исходного изображения, на котором находится средний элемент матрицы. Для получения нового значения выполняется поточечное (поэлементное) умножения матрицы ядра искажения на пиксели, находящиеся под матрицей. То есть, чтобы сохранить яркость изображения, необходимо, чтобы сумма ядра была равна единице.

Можно заметить, что если начинать свертку, «прикладывая» нулевой пиксел ядра к нулевому пикселу изображения, то результирующее изображение будет иметь меньший размер, чем исходное изображение, на значение, равное округленной в меньшую сторону половине размера ядра искажения. Чтобы добиться размера результирующего изображения, равному исходному нужно изначально расширить исходное изображения.

Известно, что свертка (она же конволюция) функций в пространственной области эквивалентна умножению Фурье-образов этих функций в частотной области. Преобразование Фурье – операция, сопоставляющая одной функции вещественной переменной другую функцию, также вещественной переменной. Эта новая функция описывает коэффициенты («амплитуды») при разложении исходной функции на элементарные составляющие – гармонические колебания с разными частотами.

Преобразование Фурье функции  $f$  вещественной переменной является интегральным и задается следующей формулой:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ix\omega} dx.$$

После несложных преобразований операцию интеграла можно свести к сумме. В частотной области модель искажения будет иметь вид:

$$G(u,v)=F(u,v)H(u,v)+N(u,v).$$

Исходя из рассмотренной модели, фундаментальная задача восстановления искаженных изображений состоит в выполнении обратной операции свертки – деконволюции.

Для решения данной задачи существуют множество подходов, базовыми для которых являются три варианта: инверсный фильтр, Винеровская фильтрация и фильтр Тихонова. По ряду причин, ни один способ не сможет восстановить изображение полностью.

Для определения качества восстановления изображения следует использовать несколько критериев [3]:

- 1) среднеквадратичное отклонение цвета;
- 2) среднеквадратичное отклонение резкости переходов;
- 3) визуальная оценка.

Первый критерий популярен, однако совсем не отображает качество восстановления изображений. Более того, чаще всего среднеквадратичное отклонение цвета исходного и восстановленного изображения выше, чем исходного и испорченного.

Второй метод более показателен. Для его реализации сначала создается для каждого изображения маска, в которой каждый элемент равен разнице значений текущего и следующего пикселей, далее рассчитывается их среднеквадратичное отклонение.

Несмотря на всю мощь численных методов, только наглядно можно достоверно оценить качество восстановленного изображения.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Восстановление размытых изображений может быть классифицировано двумя видами: слепая и не слепая деконволюция. Первый метод является более сложным,

так как ядро размытия неизвестно. Всеобъемлющий обзор литературы можно найти в [4]. Как показано в [5], ядро полученное дрожанием фотокамеры является сложным, и выходящим за рамки простых форм (например, линии или гауссового пятна), предполагающихся в прежних подходах [6–9]. В работе [5], изображение реконструируется с использованием алгоритма стандартной неслепой деконволюции. Очень хорошие результаты получаются, когда ядро небольшое (например,  $30 \times 30$  пикселей или меньше). Даже с известным ядром, восстановление с не слепой деконволюцией [10–12] не является полным. Артефакты реконструкции, например, эффект «звона» или цветные точки, неизбежны из-за высоких потерь частоты в размытом изображении. Шум изображения также усиливается в процессе деконволюции. Например, увеличение количества итераций в алгоритме Люси-Ричардсона (RL) [13] приведет к усилению артефакта «звон». Существенное снижение артефактов в не слепой деконволюции было сделано [14].

Пространственная оценка ядра была предложена в [15]. В [16], изображение сегментируется в несколько слоев с различными ядрами искажения. Ядро в каждом слое является однонаправленным, а скорость движения слоя постоянна.

Аппаратные решения, для уменьшения размытия изображения используют стабилизацию линзы и сенсора. Обе методики физически перемещают элементы объектива или датчика, чтобы создать противовес дрожанию камеры. Как правило, захваченное изображение будет резким, как если бы оно было сделано с меньшей выдержкой в 2–3 раза.

Шумоподавление изображения классическая, широко изученная проблема восстановления изображения. Подавление шума является собой компромисс между удалением шума и сохранением краев и текстур объектов. Коммерческие программные продукты, например, «NeatImage» ([www.neatimage.com](http://www.neatimage.com)) и «Imagenomic» ([www.imagenomic.com](http://www.imagenomic.com)), используют вейвлет преобразования [17, 18]. Также в компьютерной графике широко используется метод билатеральной фильтрации [19, 20]. Другие подходы включают анизотропную диффузию [21], PDE методы, основанные на [22], поля экспертов [23], и нелокальные методы [24].

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Значение каждого пиксела изображения обычно занимает 1 байт (число в диапазоне от 0 до 255) для каждого канала, так как такой точности более чем достаточно, чтобы человеческий глаз не заметил ошибки округления. Процесс дискретизации дает небольшую погрешность.

Операция восстановления изображения включает в себя прямое и обратное преобразования Фурье. Для вычисления каждого пиксела спектра Фурье задействуются значения каждого пиксела изображения, и в каждом есть погрешность. Восстановив потерянную при округлении часть, можно достичь существенного уменьшения погрешности при реконструкции изображения любым из способов фильтрации.

Алгоритм стандартной модели восстановления изображения в общем виде показан на рис. 1.

На вход подпрограммы алгоритма деконволюции поступает искаженное изображение, а на выходе получается приближенное к исходному. При увеличении точности значений входного изображения, повысится и точность выходного изображения. Предложенная доработка состоит в модифицированной модели восстановления изображения, которая представлена на рис. 2.

Выбор метода восстановления (уточнения) дробной части может быть любым. Алгоритм стоит подбирать



Рисунок 1 – Блок-схема стандартной модели восстановления изображения



Рисунок 2 – Блок-схема модифицированной модели восстановления изображения

исходя из конкретной задачи, балансируя между необходимым качеством восстановления и скоростью работы алгоритма. Так же стоит учитывать природу изображения и характера его искажения. Алгоритм восстановления также может быть совершенно любым.

Было выдвинуто предположение, что несколько соседних пикселей реальной фотографии с большой вероятностью можно представить полиномиальной функцией. Это основывается на том, что в реальном мире не существует резких перепадов между материалами, цветами и пр. Плавность подобных переходов очень удобно описывать полиномиальной функцией.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для упрощения вычислений, функция зависимости соседних пикселей была задана полиномом первой степени (линейная функция), из-за ее простоты, наглядности и максимальной скорости работы. В бытовых фото расстояние между пикселями в реальном мире (расстояние между точками, которые стали пикселями при их фотографировании) мало, так что погрешность в представлении этих расстояний линейной функцией будет незначительна. Однако, увеличение степени полинома, которым интерполируется изображение, ведет к улучшению качества восстановления исходного сигнала.

В качестве алгоритма деконволюции взята инверсная фильтрация, как самый простой и очевидный.

#### ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Зная принцип работы округления, а также значения соседних пикселей к текущему, выполняется интерполяция их значений, в следствии чего получается новое значение текущего пиксела. Если число входит в диапазон округления ( $\text{arr}[i]+0,5$ ;  $\text{arr}[i]-0,5$ ), то пикселу присваивается его значение. Если же оно выходит за рамки округления – предполагается, что округление произошло из крайней точки диапазона округления и выполняется присваивание соответствующего значения новому пикселу. После чего процесс повторяется для следующего пиксела. Крайние пиксели изображения берутся без изменений.

Алгоритм выглядит следующим образом (рис. 3).

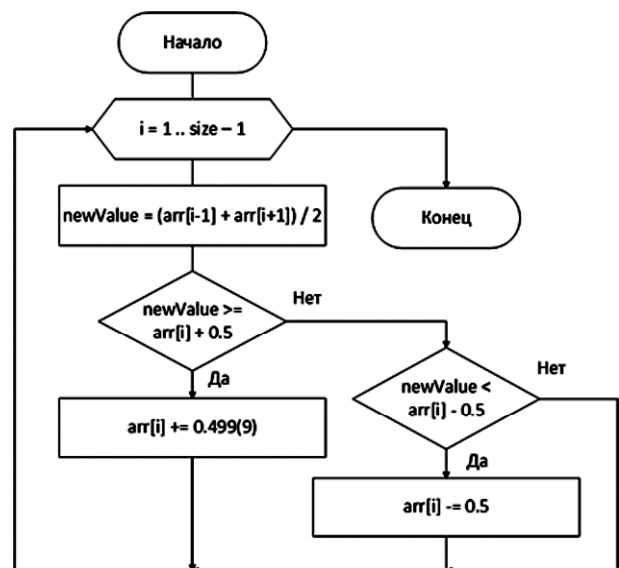


Рисунок 3 – Алгоритм восстановления дробной части сигнала

### ПРИМЕР ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ

Пусть, имеется линейно распределенный массив чисел из десяти значений (табл. 1), каждое из которых равно его порядковому номеру, умноженному на константу, например, 1,481516.

Погрешность ряда с восстановленной дробной частью обычно почти в два раза ниже, погрешности округленного значения. В данном случае в 1,753318 раз. В самом худшем случае, когда коэффициент – целое число, погрешности будут одинаковыми. Для восстановления промежуточных значений по имеющемуся дискретному сигналу можно использовать полином любой степени или любой другой алгоритм. Для матрицы такие вы-

числения производятся отдельно для строк и для столбцов, а после формируется новая матрица, каждый элемент которой равен среднему арифметическому соответствующих элементов этих матриц.

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

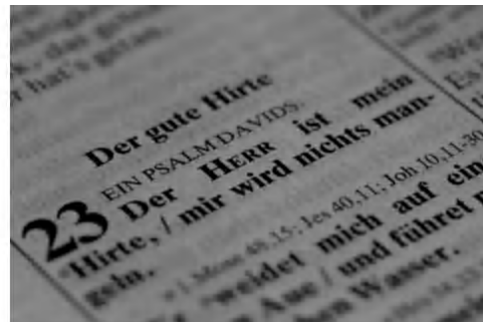
Для восстановления изображения применялся метод инверсной фильтрации, но модификация подразумевает использование любого из методов. Перед использованием фильтрации находилась потерянная при дискретизации недостающая дробная часть по описанному выше методу, адаптированному для матрицы. На рис. 4 приведены результаты работы алгоритма.

Таблица 1 – Линейная интерполяция

Номер замера	Исходный ряд	Округленный ряд	Интерполированный ряд	Погрешность округленного ряда	Погрешность интерполированного ряда
1	0	0	0	0	0
2	1,481516	1	1,5	0,481516	0,018484
3	2,963032	3	2,75	0,036968	0,213032
4	4,444548	4	4,375	0,444548	0,069548
5	5,926064	6	5,6875	0,073936	0,238564
6	7,40758	7	7,34375	0,40758	0,06383
7	8,889096	9	8,671875	0,110904	0,217221
8	10,370612	10	10,3359375	0,370612	0,0346745
9	11,852128	12	11,66796875	0,147872	0,18415925
10	13,333644	13	13	0,333644	0,333644
<b>Сумма:</b>				2,40758	1,37315675



а



б



в



г

Рисунок 4 – Пример восстановления размытого изображения.

а – исходное изображение, б – размытое изображение, в – восстановленное без интерполяции, г – восстановленное с интерполяцией



В случае, когда изображение было восстановлено без интерполяции, среднеквадратическое отклонение цвета составило 0,03211, а среднеквадратическое отклонение переходов 0,03245. В случае, когда изображение было восстановлено с интерполяцией, среднеквадратическое отклонение цвета составило 0,02939 (на 8,48% меньше), а среднеквадратическое отклонение переходов 0,02742 (на 15,52% меньше).

**6 ОБСУЖДЕНИЕ**

Изменение среднеквадратических отклонений в меньшую сторону, которое можно наблюдать в результате приведенных выше экспериментов, подтверждает, что качество восстановленных снимков улучшается. Среднеквадратическое отклонение цвета и отклонение резкости переходов изображения, восстановленного по модифицированному методу всегда ниже на 3–20%, чем у изображения восстановленного стандартной фильтрацией (в примере инверсной), что является хорошим результатом.

На графиках, изображенных на рис. 5 и рис. 6 заметна тенденция уменьшения среднеквадратичных отклонений цвета и резкости переходов в зависимости от размера изображения.

Как показано на рис. 7 с ростом размера изображения наблюдается увеличение улучшения восстановления. С размером 85x115 модифицированная модель в общем работает лучше на 5% процентов, а с 850x1150 на 12%.

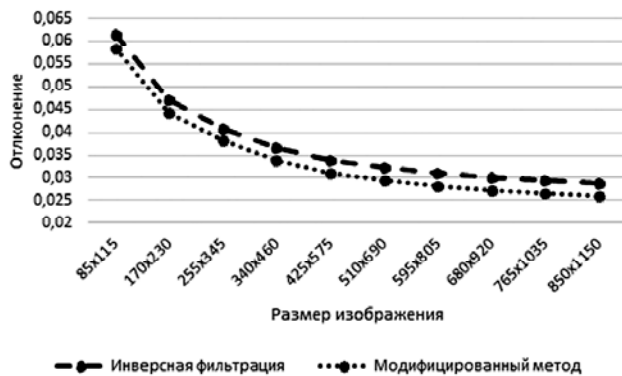


Рисунок 5 – Среднеквадратичное отклонение цвета

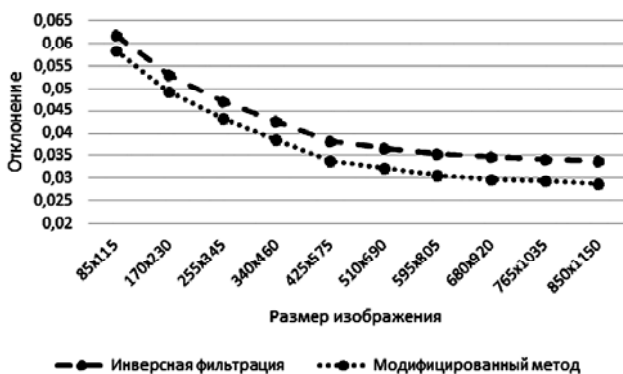


Рисунок 6 – Среднеквадратичное отклонение резкости переходов

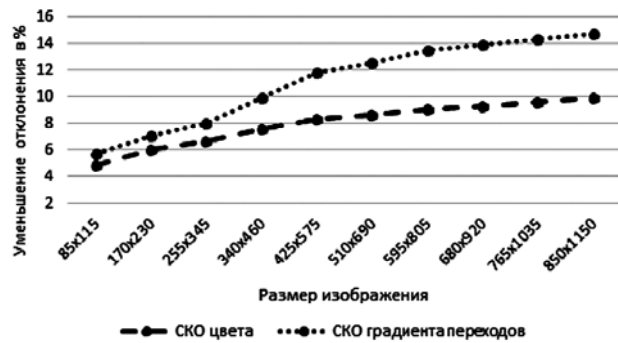


Рисунок 7 – Уменьшение ошибки восстановления в процентах

Таким образом, можно заключить, что чем больше размеры изображения, тем ниже погрешность восстановления и тем сильнее улучшение.

**ВЫВОДЫ**

В работе получило дальнейшее развитие направление восстановления размытых изображений путем применения операции деконволюции. Была разработана модификация, применимая к методам, как к слепой, так и не слепой деконволюции, для которой экспериментально показано, что она приводит к более точному восстановлению значений пикселей исходного изображения. Модификация заключается в предварительном восстановлении данных изображения, потерянных из-за округления с помощью получения уточненных значений пикселей применяя интерполяцию полиномиальной функцией. Модификацию можно использовать в сочетании с любым из алгоритмов восстановления изображения, независимо от других модификаций (например, убираания атрибутов типа «звон»). Предложенный метод дает увеличение качества восстановления, даже на примере восстановления потерянной части с использованием линейной модели интерполяции значений пикселей исходного изображения. Алгоритм восстановления потерянной при округлении части необходимо строить исходя из природы изображения, необходимой точности и допустимой скорости работы этого алгоритма, поэтому в отдельных случаях применимы полиномиальные модели интерполяции более высоких порядков. Среднеквадратическое отклонение цвета и отклонение резкости переходов изображения, восстановленного по модифицированному методу становится ниже на 3–20%, чем у изображения восстановленного стандартной фильтрацией. Скачать программу с исходные коды можно по адресу: <https://github.com/Kovnir/DeblurModification>.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эд-динс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
3. Монич Ю. И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю. И. Монич, В. В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.
4. Kundur D. Blind image deconvolution / D. Kundur, D. Hatzinakos // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – Vol. 13, № 3. – P. 43–64.

5. Removing camera shake from a single photograph / [R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann and other] // In ACM Trans. Graph. – 2006. – Vol. 25. – P. 787–794.
6. Reeves S. J. Blur identification by the method of generalized cross-validation / S. J. Reeves, R. M. Mersereau // IEEE Trans. on Image Processing. – 1992. – Vol. 1, № 3. – P. 301–311.
7. Direct method for restoration of motion blurred images / [Y. Yitzhaky, I. Mor, A. Lantzman, N. S. Kopeika] // Journal of the Optical Society of America. – 1998. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1512–1519.
8. Caron J. N. Noniterative blind data restoration by use of an extracted filter function / J. N. Caron, N. M. Namazi, C. J. Rollins // Applied optics (Appl. opt.). – 2002. – Vol. 41 (32) – P. 68–84.
9. Jalobeanu A. Estimation of blur and noise parameters in remote sensing / A. Jalobeanu, L. Blanc-Feraud, J. Zerubia // In Proceedings of ICASSP. – 2002. – P. 249–256.
10. Geman, D. Constrained restoration and the recovery of discontinuities / D. Geman, G. Reynolds // IEEE Trans. on PAMI. – 1992. – Vol. 14, Issue 3. – P. 367–383.
11. Zarowin C. B. Robust, noniterative, and computationally efficient modification of vab cittert deconvolution optical figuring / C. B. Zarowin // Journal of the Optical Society of America. – 1994. – Vol. 11, Issue 10. – P. 2571–2583.
12. Neelamani R. ForWaRd: Fourier-wavelet regularized deconvolution for illconditioned systems. / R. Neelamani, H. Choi, R. Baraniuk // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2004. – Vol. 52, Issue 2. – P. 418–433.
13. Richardson H. W. Bayesian-based iterative method of image restoration / H. W. Richardson // Journal of the Optical Society of America. – 1972. – Vol. 62, Issue 1. – P. 55–59.
14. Lu Yuan. Image deblurring with blurred/noisy image pairs / Lu Yuan, Jian Sun, Long Quan, Heung-Yeung Shum // ACM Transactions on Graphics (TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007. – 2007. – Vol. 26, Issue 3. – Article 1.
15. Blind iterative restoration of images with spatially-varying blur / [J. Bardsley, S. Jefferies, J. Nagy, R. Plemmons] // In Optics Express. – 2006. – P. 1767–1782.
16. Levin A. Blind motion deblurring using image statistics / A. Levin // In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS). – 2007. – P. 841–848.
17. Simoncelli E. P. Noise removal via bayesian wavelet coring / E. P. Simoncelli, E. H. Adelson // In Proceedings of ICIP. – 1996. – Vol. 1. – P. 379–382.
18. Image denoising using scale mixtures of gaussians in the wavelet domain / [J. Portilla, V. Strela, M. Wainwright, E. P. Simoncelli] // IEEE Trans. on Image Processing. – 2003. – Vol. 12, Issue 11. – P. 1338–1351.
19. Tomasi C. Bilateral filtering for gray and color images / C. Tomasi, R. Manduchi // In Proceedings of ICCV. – 1998. – P. 839–846.
20. Durand F. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images / F. Durand, J. Dorsey // In Proceedings of SIGGRAPH. – 2002. – P. 257–266.
21. Perona P. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. / P. Perona, J. Malik // IEEE Trans. on PAMI. – 1990. – Vol. 12, Issue 7. – P. 629–639.
22. Rudin L. Nonlinear total variation based noise removal algorithms / L. Rudin, S. Osher, E. Fatemi // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1992. – Vol. 60, Issues 1–4. – P. 259–268.
23. Roth S. Fields of experts: A framework for learning image priors / S. Roth, M. J. Black // In Proceedings of CVPR. – 2005. – Vol. II. – P. 860–867.
24. Buades A. A non-local algorithm for image denoising / A. Buades, B. Coll, J. M. Morel // In Proceedings of CVPR. – 2005. – Vol. II. – P. 60–65.

Статья поступила в редакцию 19.01.2016.  
После доработки 21.03.2016.

Ковнір А. Е.<sup>1</sup>, Степаненко К. Е.<sup>2</sup>, Ілляшенко М. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Студент кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Студент кафедри комп'ютерної інженерії Донецького національного технічного університету, м. Красноармійськ, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, Україна

#### **ЗБІЛЬШЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ РОЗФОКУСОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА РАХУНОК ВПРАВЛЕННЯ ПОМИЛОК ОКРУГЛЕННЯ**

У роботі представлений метод підвищення якості відновлення розфокусованих зображень за рахунок зменшення впливу помилки округлення при дискретизації на відновлене зображення. З помилкою округлення можна ефективно боротися, знаючи природу відновлюваного зображення і його спотворення. Алгоритм відновлення втраченої при округленні частини необхідно будувати виходячи з природи зображення, необхідної точності і допустимої швидкості роботи цього алгоритму. У роботі наводиться приклад використання лінійної інтерполяції на етапі попередньої обробки похідного зображення в якості основи для побудови уточнених значень пікселів відновленого зображення по дискретним значенням пікселів вихідного розфокусованого зображення. Запропонований метод не прив'язаний до конкретного алгоритму деконволюції, а його використання в парі з будь-яким з них дає поліпшення результату. У роботі розглянуто його використання разом з інверсною фільтрацією.

У роботі представлений приклад практичного відновлення зображення на основі лінійної інтерполяції пікселів вихідного зображення. Показано, що запропонований метод дає зменшення похибки відновлення в середньому від 3% до 20%, залежно від розміру та специфіки зображення. Показано зменшення помилки відновлення зі зростанням розмірів вихідного расфокусованого зображення.

**Ключові слова:** реконструкція зображень, розфокусування зображення, перетворення Фур'є, згортка, оператор спотворення, деконволюція.

Kovnir A. E.<sup>1</sup>, Stepanenko K. E.<sup>2</sup>, Ilyahsneko M. V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Student of Computer systems and networks department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>2</sup>Student of Computer engineering department, Donetsk National Technical University, Krasnoarmiysk, Ukraine

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of computer systems and networks department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

#### **DEFOCUSED IMAGE RESTORATION CONFIDENCE INCREASING BY IMPROVING ROUNDING ERRORS CORRECTIONS**

This paper presents a method of improving the quality of the restoration of defocused images by reducing the effect of rounding errors when sampling on the reconstructed image. The rounding error can be effectively controlled by knowing the nature of the restored image and its distortions. Algorithm that restore lost during rounding values of pixels need to be built based on knowledge of the nature of the image, the required accuracy and the permissible speed of the algorithm. The work contains an example of linear interpolation usage at the source image preprocessing stage as the basis for the construction of refined pixel values of the reconstructed image from the discrete values of the pixels

of the original defocused image. The proposed method is not tied to a specific deconvolution algorithm and its use in a pair with any of them gives better results. The paper considers the joint use of presented method with the inverse filter.

This paper presents a practical example of image reconstruction based on a linear interpolation of the pixels of the original image. It is shown that the proposed method affects a reduction of error recovery from about 3% to 20%, depending on the size and specific images. It showed a decrease in the error recovery with increasing the size of the original image defocused.

**Keywords:** image reconstruction, defocusing, Fourier transform, distortion operator, deconvolution.

## REFERENCES

- Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Moscow, Tehnosfera, 2005, 1072 p.
- Gonsales R., Vuds R., Eddins S. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v MATLAB. Moscow, Tehnosfera, 2006, 616 p.
- Monich Yu. I., Starovoytov V. V. Otsenki kachestva dlya analiza tsifrovyyih izobrazheniy, *Iskusstvennyy intellekt*, 2008, No. 4, pp. 376–386.
- Kundur D., Hatzinakos D. Blind image deconvolution, *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, Vol. 13, No. 3, pp. 43–64.
- Fergus R., Singh B., Hertzmann A., Roweis S. T., Freeman W. T. Removing camera shake from a single photograph, *In ACM Trans. Graph.*, 2006, Vol. 25, pp. 787–794.
- Reeves S. J., Mersereau R. M. Blur identification by the method of generalized cross-validation, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, Vol. 1, No. 3, pp. 301–311.
- Yitzhaky Y., Mor I., Lantzman A., Kopeika N. S. Direct method for restoration of motion blurred images, *Journal of the Optical Society of America*, 1998, Vol. 15, Issue 6, pp. 1512–1519.
- Caron J. N., Namazi N. M., Rollins C. J. Noniterative blind data restoration by use of an extracted filter function, *Applied optics (Appl. opt.)*, 2002, Vol. 41(32), pp. 68–84.
- Jalobeanu A., Blanc-Feraud L., Zerubia J. Estimation of blur and noise parameters in remote sensing, *In Proceedings of ICASSP*, 2002, pp. 249–256.
- Geman D., Reynolds G. Constrained restoration and the recovery of discontinuities, *IEEE Trans. on PAMI*, 1992, Vol. 14, Issue 3, pp. 367–383.
- Zarowin C. B. Robust, noniterative, and computationally efficient modification of vab cittert deconvolution optical figuring, *Journal of the Optical Society of America*, 1994, Vol. 11, Issue 10, pp. 2571–2583.
- Neelamani R., Choi H., Baraniuk R. ForWaRd: Fourier-wavelet regularized deconvolution for illconditioned systems, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, Vol. 52, Issue 2, pp. 418–433.
- Richardson H. W. Bayesian-based iterative method of image restoration, *Journal of the Optical Society of America*, 1972, Vol. 62, Issue 1, pp. 55–59.
- Lu Yuan, Jian Sun, Long Quan, Heung-Yeung Shum Image deblurring with blurred/noisy image pairs, *ACM Transactions on Graphics (TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007*, 2007, Vol. 26, Issue 3, Article 1.
- Bardsley J., Jefferies S., Nagy J., Plemmons R. Blind iterative restoration of images with spatially-varying blur, *In Optics Express*, 2006, pp. 1767–1782.
- Levin A. Blind motion deblurring using image statistics, *In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2007, pp. 841–848
- Simoncelli E. P., Adelson E. H. Noise removal via bayesian wavelet coring, *In Proceedings of ICIP*, 1996, Vol. 1, pp. 379–382.
- Portilla J., Strela V., Wainwright M., Simoncelli E. P. Image denoising using scale mixtures of gaussians in the wavelet domain, *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, Vol. 12, Issue 11, pp. 1338–1351.
- Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images, *In Proceedings of ICCV*, 1998, pp. 839–846.
- Durand F., Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images, *In Proceedings of SIGGRAPH*, 2002, pp. 257–266.
- Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Trans. on PAMI*, 1990. Vol. 12, Issue 7, pp. 629–639.
- Rudin L., Osher S., Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, Vol. 60, Issues 1–4, pp. 259–268.
- Roth S., Black M. J. Fields of experts: A framework for learning image priors, *In Proceedings of CVPR*, 2005, Vol. II, pp. 860–867.
- Buades A., Coll B., Morel J. M. A non-local algorithm for image denoising, *In Proceedings of CVPR*, 2005, Vol. II, pp. 60–65.

УДК 004.89

Литвин В. В.<sup>1</sup>, Демчук А. Б.<sup>2</sup>, Оборська О. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, асистент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

<sup>3</sup>Аспірант кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

## МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОДАННЯ ВІДЕОКОНТЕНТУ ДЛЯ ОСІБ З ВАДАМИ ЗОРУ

У статті досліджено проблему доступу до відеоконтенту людей з повною, або частковою втратою зору, розглянуто тифлокоментування, як метод адаптації відеоконтенту для незрячих. При дослідженні проблеми доступу людей з вадами зору до відеоконтенту, слід розуміти, що більшість інформації надається глядачеві за допомогою зображення, так, незрячі чують всі слова акторів, звуки навколишнього середовища, процесів на екрані, але їм важко ідентифікувати кому які слова належать, що саме у цей конкретний момент відбувається з героями, що зображено у даній сцені, яка реакція акторів, їхні емоції, які найчастіше виражаються за допомогою рухів чи міміки. Тифлокоментарі до фільмів для незрячих людей – ось один з реальних кроків вирішення обмеженості доступу до такого виду контенту. Розроблено математичне забезпечення подання відеоконтенту для осіб з вадами зору на основі використання теорії координат, спектрального аналізу. Також побудовано архітектуру програмно-алгоритмічного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору. Реалізовано метод пошуку вільних від діалогів та інших важливих звуків місць у відеоконтенті, які слугують для вставки тифлокоментарів. На основі логіки 1-го порядку та асоціативних правил розроблено правила тифлокоментування для тифлокоментаторів, сценаристів та звукорежисерів. Розв'язано актуальну науково-прикладну задачу подання відеоконтенту у форматі, доступному для сприйняття особам з вадами зору. Експериментально доведено доцільність застосування методу тифлокоментування для опису сюжетів відеоконтенту, що дало змогу до 30% підвищити сприйняття відеоконтенту особам з вадами зору.

**Ключові слова:** програмно-алгоритмічний комплекс, тифлокоментування, тифлокоментар, аудіодескрипція, подання відеоконтенту для осіб з вадами зору, відеоконтент, вада зору, адаптований відеоконтент.

### НОМЕНКЛАТУРА

ПАК – програмно-алгоритмічний комплекс;

НЧ – низькочастотні фільтри;

ВЧ – високочастотні фільтри;

$S_i$  –  $i$ -й сюжет;

$Sem(S_i)$  – семантика  $i$ -го сюжету;

$t(S_i)$  – тривалість  $i$ -го сюжету;

$G_m$  – середнє геометричне спектру відповідної ділянки;

$A_m$  – середнє арифметичне спектру відповідної ділянки;

$n$  – кількість частотних смуг;

$x_i$  – значення енергії відповідної частотної смуги;

$x$  – значення кожної частотної смуги відповідно для спектрів ділянки та еталону;

$y$  – значення кожної частотної смуги відповідно для спектрів ділянки та еталону.

### ВСТУП

Одним із здобутків людства, який майже незрозумілий для осіб з вадами зору – це відеоконтент (фільми, мультиплікація, науково-популярні, навчальні та пізнавальні програми). У час, коли кіноіндустрія володіє технічними можливостями, яких достатньо для втілення будь-якого художнього задуму – перед людьми відкривається величезний світ можливостей сучасного кіномистецтва. Однак всі ці можливості недоступні для осіб з вадами зору. Тому виникає проблема адаптації відеоконтенту для такого контингенту людей. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є використання тифлокоментарів.

На даний момент масові кінотеатри та телебачення майже недоступні особам з обмеженим зором. Поруч такої особи завжди мусів би бути домашній «коментатор», який б «озвучував» те, що відбувається на екрані.

Тобто особи з вадами зору не мають достатніх можливостей для забезпечення себе інформаційними ресурсами, зокрема, поданих у відеоформаті.

Відомо, що близько 80% інформації надається глядачеві за допомогою зображення. Тотально незряча особа може отримати лише близько 16% інформації, яка надходить через слуховий орган. Так, незрячі чують всі слова акторів, звуки навколишнього середовища, процесів на екрані, але їм важко ідентифікувати кому які слова належать, що відбувається на екрані, яка реакція акторів, яку часто виражають за допомогою рухів чи міміки.

Тифлокоментар до відеоконтенту для незрячих людей – ось один з реальних кроків вирішення обмеженості доступу до такого виду мистецтва. Він відкриває великий простір для адаптації до соціуму не лише дорослих незрячих людей, а в першу чергу дітей, які мають проблеми із зором, і які могли б переглядати мультфільми, вчитися лічити, вивчати абетку за допомогою відеоконтенту з тифлокоментарем. Тифлокоментар – це закадровий опис відеоряду, складений сценаристом і начитаний тифлокоментатором. Тифлокоментування – це коментар візуальних елементів (жестів, зовнішнього вигляду акторів, предметів, костюмів, декорацій). Таким чином, за допомогою тифлокоментування, особи з вадами зору можуть уявити собі весь спектр візуальних прийомів, які використовував режисер та сценарист відеоконтенту. Виникає задача в розробленні математичного та програмного забезпечення адаптації відеоконтенту до потреб осіб з вадами зору на основі тифлокоментування [2].

Об'єктом дослідження є процес подання відеоконтенту для осіб з вадами зору.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови, редагування та адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору.

Метою роботи є розроблення математичного та програмного забезпечення адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задача дослідження полягає в розробленні ПАК адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору. Для її досягнення необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) розробити математичне забезпечення подання відеоконтенту для осіб з вадами зору на основі процесу тифлокоментування;
- 2) розробити правила тифлокоментування;
- 3) побудувати архітектуру програмно-алгоритмічного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору;
- 4) здійснити апробацію функціонування розробленого програмно-алгоритмічного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору на практиці.

### 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження відомих іноземних вчених на початку ХХІ ст. показали важливість процесу навчання та адаптації в суспільство дітей з вадами зору [1, 3]. У відомих дослідженнях, пошук місць для вставки тифлокоментарів завжди виконувався за допомогою людини. Тому необхідно розробити методи та програмні засоби адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору, які б здійснювали пошук вільних від діалогів та важливих шумів місць у звуковому ряді відеоконтенту. Також у роботах [2, 6–8] – досліджено проблему доступу осіб з вадами зору до відеоконтенту, визначено метод тифлокоментування як оптимальний для вирішення цієї задачі. У працях [4, 5] розглянуто внесок у розвиток освіти осіб з вадами зору Луї Брайля, тактильним шрифтом яким користуються й досі. В основу шрифту покладено комбінацію зі шести крапок. Брайль використав порядок букв латинського алфавіту. Для позначення перших букв алфавіту використовують верхні й середні крапки шести крапок. Для позначення наступних букв додається нижня крапка ліворуч, потім ліворуч і праворуч, потім праворуч. Такими самими знаками позначаються і букви українського алфавіту з додаванням спеціальних знаків. Різні комбінації шести крапок дають можливість позначати також цифри, розділові знаки, математичні, хімічні й нотні знаки.

Російський вчений Сергій Ваньшин [3] вперше на теренах колишнього Радянського Союзу описав проблему осіб з вадами зору у доступі до культурних надбань людства засобами відеоконтенту, який адаптований для такого контингенту осіб, систематизував вимоги до майбутніх тифлокоментаторів, критерії відбору людей до таких професій. Він також описав перші результати навчання мистецтву тифлокоментування осіб з вадами опорно-рухового апарату. Його ранні праці були тісно пов'язані з бібліотечним обслуговуванням осіб з вадами зору, пошуком можливостей для якіснішого і повнішого обслуговування цієї категорії читачів.

Крогіус А. А., Щербина А. М. та інші автори [9] розвивали ідеалістичну концепцію переважного розвитку

психіки в разі сліпоти, стверджуючи, що нестача функції зору сприяє розвитку і багатству «внутрішнього» життя. Будучи відгородженим від зовнішнього світу, сліпий, на їхню думку, створює за допомогою мислення та уяви свій «внутрішній світ», а це сприяє розвитку «вищих» психічних процесів. Уяву осіб з вадами зору зазначені автори характеризують як більш живу, ніж у зрячих, їм приписують високий розвиток творчо-музичної та математичної уяви тощо.

Сьогодні питанням навчання осіб з вадами зору (дошкільнят, школярів, студентів, осіб, що бажають підвищити кваліфікацію) займаються багато вчених, дослідників, фахівців з медицини у провідних країнах світу, а держава забезпечує їх матеріальною підтримкою. В Україні ці питання залишаються проблематичними і наболілими. Частково ці питання розглянули кілька українських дослідників. Вирішення проблеми доступності інформації та підготовки навчально-методичного контенту допоможе самореалізуватися людям з частковою та повною втраченою зору.

На основі проведеного аналізу встановлено, що для створення відеоконтенту з тифлокоментарем в Україні не існує жодних програмних засобів, які б поєднували всі етапи побудови такого роду інформаційного контенту. Тому робота з дроблення ПАК для вирішення таких проблем є актуальною.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Очевидно, що тифлокоментар у відеоконтент можна вставити у місця вільні від діалогів або іншої шумної інформації. Для пошуку у відеоконтенті ділянок вільних від діалогів використано спектральний аналіз. Процес пошуку таких ділянок використовує 6 параметрів:

Поріг енергії сигналу,  $K$ , % – це поріг енергії сигналу, при перевищенні сигналом якого розпочинає свою роботу алгоритм пошуку. Цей параметр необхідний для того, щоб не пропускати шуми, зайві звуки, які тихіше за поріг, а також для прискорення роботи алгоритму, так як для ділянок які нижче порогу не виконується спектральний аналіз. Цей параметр бажано виставляти на рівні 15–40%. Рівень щільності спектру, % – це поріг щільності спектру, перевищуючи який програма переходить до наступного аналізу. Як виявив практичний аналіз, цей показник залежить від типу звукового сигналу. Для широко смугових сигналів, з рівномірним спектром (як наприклад для шуму, чи насиченого музичного фрагменту) цей показник низький, для голосового сигналу де розподілення частотних смуг нерівномірне – цей параметр вищий. Тобто цей параметр показує наявність явно виражених певних частотних смуг у спектрі по відношенню до інших. На практиці цей параметр бажано виставляти на рівні 40–60%. При встановленні на 0% програма пропускає цей аналіз, тобто вважає що весь звуковий сигнал задовольняє вимоги.

Коефіцієнт кореляції спектру, % – це поріг кореляції спектру у кожній ділянці звукового сигналу до заданого еталонного спектру. При перевищенні кореляції порогу програма вважає сигнал таким, що відповідає голосовому. На практиці бажано виставляти на рівні 40–70%.

Фінальний поріг пошуку, % – це поріг на результатуючому графіку роботи алгоритму. Коли сигнал нижче цьо-

го порогу, програма вважає відповідну ділянку тишею та заносить її до списку. Значення за замовчуванням – 50%.

Мінімальна довжина тиші, мс – це такий час, з яким порівнюється довжина знайденої ділянки тиші. Якщо тривалість ділянки тиші менша за цей параметр, то вона видаляється зі списку ділянок тиші.

Мінімальна довжина корисного сигналу, мс – це такий час, з яким порівнюється інтервал між сусідніми ділянками тиші. Якщо цей інтервал менший за вказане значення, то ці дві ділянки тиші об'єднуються в одну, таким чином інтервал між ними також стає в складі ділянки тиші. Це необхідно для того, щоб виключити раптові короткі скачки сигналу. Цей параметр бажано встановлювати на рівні 50–200 мс. Якщо програма вважає тишею дуже короткі слова, то потрібно цей параметр зменшити. Якщо є багато дуже коротких ділянок «корисного» сигналу між ділянками тиші, які насправді не мають корисної інформації, а лише якісь клацання, чи хлопки, то потрібно цей параметр трохи збільшити.

Архітектура ПАК адаптації відеоконтенту до осіб з вадами зору складається з трьох рівнів – відображення, компонентів та керування даними (рис. 1). Рівень відображення відповідає за взаємодію тифлокоментатора з ПАК. Рівень компонентів складається із модулів, які призначені для розв'язання задач введення, виведення та опрацювання даних. ПАК у сукупності з базами даних відеоконтентів належать до рівня керування даними.

Розроблено алгоритм пошуку у аудіоряді ділянок, які можуть бути використані для накладання тифлокоментарів. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 2.

Звукова доріжка попередньо розбивається на відрізки довжиною 10 мс. В оперативній пам'яті комп'ютера створюється масив відповідного розміру до кількості відрізків по 10 мс. Для кожної ділянки довжиною 10 мс розраховується спектр завдяки перетворенню WaveLet. Для аналізу ПАК бере 1024 семпли звукових даних та рекурсивним методом WaveLet розподіляє на 10 частин довжинами 1,2,4,8,16,32,64,128,256 та 512 семплів. Кожна частина відповідає своїй смузі частот. Після чого для кожної частини розраховується енергія. Таким чином отримуємо 10 значень рівня відповідно до частотних смуг для кожної ділянки звуку.

Далі сканується кожна ділянка звукової доріжки за наступними чотирма етапами:

**Етап 1.** Фільтрація ділянки звуку за допомогою НЧ та ВЧ фільтрів, пропускаючи діапазон частот від 50 до 300 Гц. Розрахунок енергії отриманого сигналу та порівняння її рівня з прохідним порогом. Таким чином виконується відсіювання явно зайвої інформації, шумів, тощо. Якщо ділянка пройшла перевірку, і значення енергії вище за поріг, то відповідному елементу масиву присвоюється значення 255, якщо ні – то присвоюється значення 0.

**Етап 2.** Для кожної ділянки звукової доріжки, якщо відповідний їй елемент масиву дорівнює 255, виконується перевірка на щільність спектру. Щільність спектру розраховується за формулою  $SMFdb = -\log_{10}(Gm / Am)$ .

Середнє арифметичне розраховується за формулою

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ а середнє геометричне за формулою:}$$

$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} = \left( \prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n}.$$

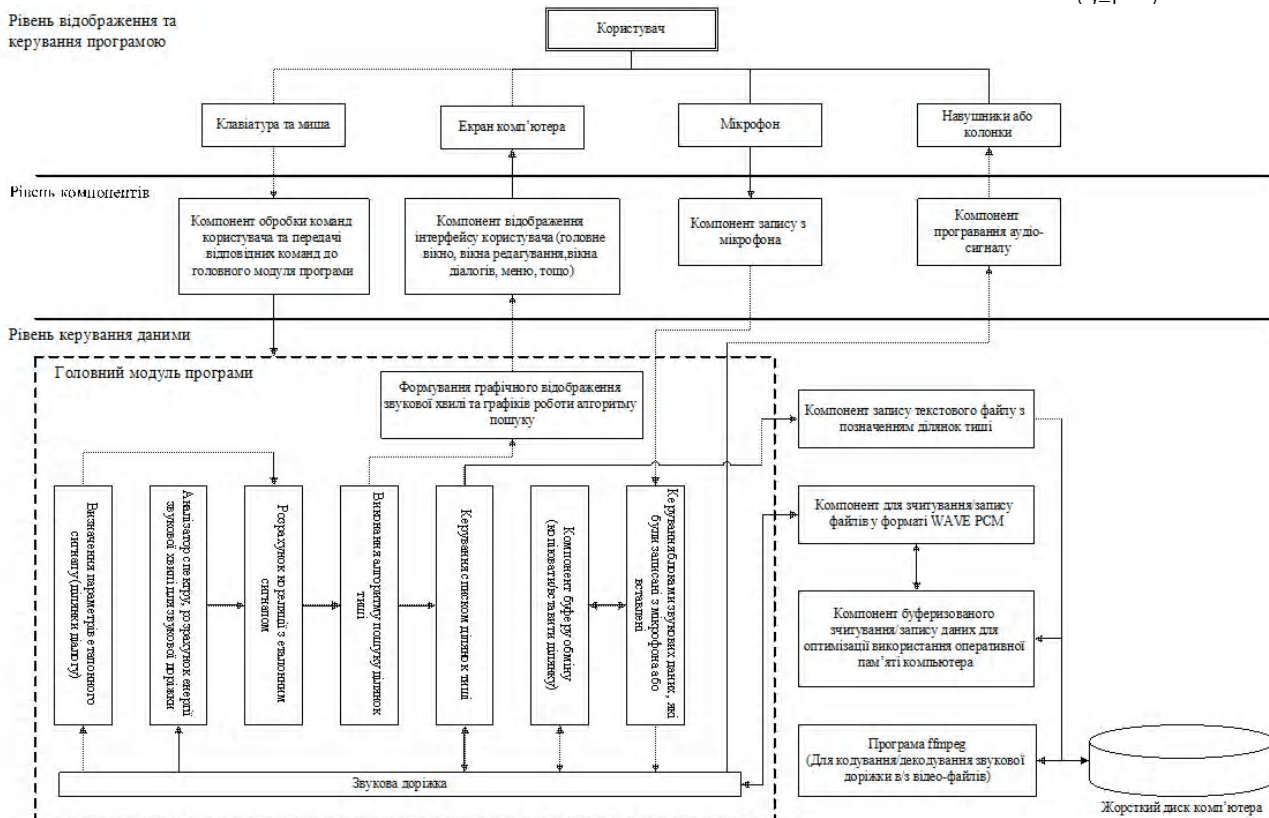


Рисунок 1 – Архітектура програмного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору

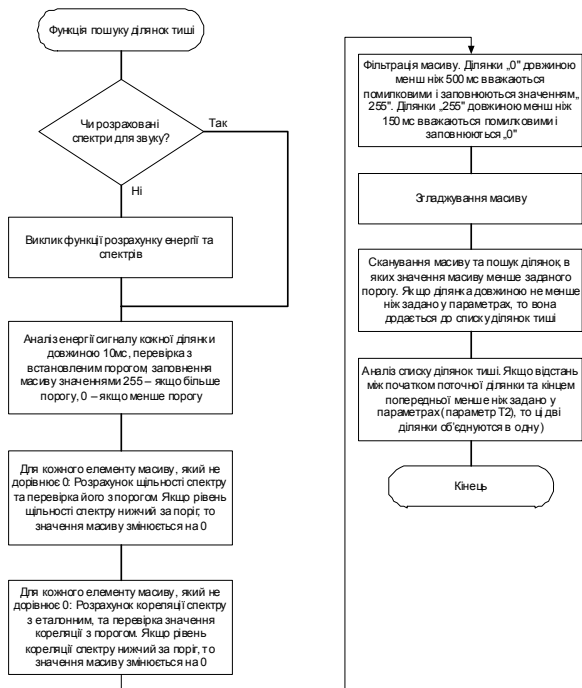


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму пошуку ділянок доступних для накладання тифлокоментарів

Якщо для конкретної ділянки значення щільності спектру вище за встановлений поріг, то в масиві відповідний елемент залишається рівним 255, а якщо щільність спектру не задовільняє вимогу, то значення масиву для цієї ділянки прирівнюється до 0.

**Етап 3.** Для кожної ділянки звукової доріжки, якщо відповідний їй елемент масиву дорівнює 255, виконується перевірка на кореляцію її спектру з еталонним спектром (заданим по замовченню в ПАК, або знятим користувачем з обраної ділянки звукової доріжки). Розрахунок кореляції виконується за наступною формулою:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}$$

Порівнюється розрахований коефіцієнт кореляції з встановленим порогом. Якщо перевірка відповідає встановленому значенню, то в масиві залишається значення 255, якщо ні – то відповідне значення масиву стає рівним 0.

Таким чином в результаті проходження трьох етапів маємо масив, в якому кожний елемент дорівнює 0 або 255. 0 – якщо не пройшла хоча б одна перевірка, 255 – якщо дана ділянка відповідає всім трьом вимогам. На цьому можна було б завершити перевірку та розпочати пошук ділянок в масиві (елементи масиву, які дорівнюють 0). Але в результаті проходження трьох етапів можуть пройти перевірку короткі сигнали, які мали спектр схожий до заданого, або навпаки, коротка пауза між словами актора може не пройти перевірку. Наприклад, за енергією сигналу і в масиві для цієї ділянки буде значення 0. Тому, щоб вирішити цю проблему був доданий четвертий етап перевірки.

**Етап 4.** Для видалення раптових значень 0 або 255 виконується згладжування масиву. Спочатку виконується по-

шук ділянок масиву з значеннями «0», довжина яких не перевищує 500 мс. Такі ділянки вважаються помилковими, значення масиву в них змінюється на 255. Потім виконується пошук ділянок масиву з значеннями «255», довжина яких не перевищує 150 мс. Такі ділянки вважаються помилковими, та значення масиву в них змінюється на 0. Виконується згладжування у прямому напрямку, потім виконується згладжування у зворотному напрямку. Таким чином при згладжуванні короткий сигнал (значення 255) дає значно менше значення для цього елемента масиву, але створює залишковий шум завдяки фільтру низької частоти. При зворотному напрямку значення елемента масиву для цієї ділянки також значно нижче за 255, і також присутній залишковий шум, але він має протилежний напрямок. Таким чином при розрахунку кореляції між цими двома згладженими масивами, отримується наступний ефект: короткі сигнали практично видаляються завдяки тому, що їхні залишкові шуми після НЧ-фільтрів не перекривались, а для корисного сигналу навпаки – згладжені в прямому і протилежному напрямку значення перекриваються і тому залишаються в масиві (навіть якщо за рівнем енергії корисний сигнал був менший за короткий паразитивний сигнал). І на закінчення, кореляція між згладженими масивами порівнюється з порогом прийняття рішення, і якщо він не відповідає встановленому параметру, то цей елемент масиву дорівнює 0.

Нами розроблено правила тифлокоментування. З цією метою було проведено опитування 100 осіб усіх вікових груп з вадами зору. Після перегляду адаптованого фільму з тифлокоментарями, їм було задано 10 питань.

1. Чи запам'ятали Ви назву відеоконтенту?
2. Чи пригадаєте назву студії яка зняла даний відеоконтент?
3. Чи запам'ятали ви головних героїв відеоконтенту?
4. Чи зрозуміли ви сам сюжет, його розвиток протягом відеоконтенту, розв'язку?
5. Чи не було моментів у відеоконтенті коли Ви втратили зрозумілість того що відбувається на екрані(незрозумілі звуки які не були описані тифлокоментарем)?
6. Чи не було моментів коли слова тифлокоментатора накладались на слова акторів, важливі звуки, і тим самим заважали сприйняттю відеоконтенту?
7. Чи зрозуміли ви побут(місцевість, предмети) героїв, які були важливі для сприйняття відеоконтенту?
8. Чи не був тифлокоментар заплутаний, незрозумілий? Чи були терміни які ви не зрозуміли?
9. Чи не був тифлокоментар надмірним/недостатнім?
10. Чи задоволені ви переглядом даного відеоконтенту з тифлокоментарями?

Для опрацювання результатів проведеного опитування, використано теорію асоціативних правил. Наприклад, було обчислено достовірність правила {ЯКЩО Ви зрозуміли сюжет, ТО чи Ви задоволені переглядом відеоконтенту з тифлокоментарем?}. Достовірність такого правила складає 95%:

$$\text{conf} = \frac{95\%}{100\%} \cdot 100\% = 95\%$$

Метою пошуку асоціативних правил є встановлення таких залежностей: якщо зустрівся деякий набір елементів P, то на підставі цього можна зробити висновок про те, що інший набір елементів Q також повинен зустрітися з певною достовірні-



стю  $\forall xP(x) \rightarrow Q(x)$ ). На основі отриманих даних розроблено правила тифлокоментування.

Розроблений програмно-алгоритмічний комплекс дав змогу реалізувати всі етапи побудови адаптованого відеоконтенту для осіб з вадами зору.

#### 4 ЕКСПЕРЕМЕНТИ

На основі запропонованих методів, розроблено програмний-алгоритмічний комплекс «Audio Editor», в якому використано побудовані методи та алгоритми, які описані вище. Цей ПАК розв'язує такі задачі: 1) визначення місць у звукоряді відеоконтенту для вставлення тифлокоментарів, 2) начитування тифлокоментарів, 3) вибір з множини начитаних тифлокоментарів релевантного, який відповідає певним параметрам (час, семантика), 4) нормалізація основної звукової доріжки, 5) побудова паралельної звукової доріжки з накладених тифлокоментарів, 6) поєднання звукоряду з відеоконтентом. Результатом роботи ПАК є змонтована звукова доріжка, яку можна експортувати, або в звуковий файл форматів WAV та MP3, або у формат відео-файлу AVI, MPEG, WMV. За допомогою цього ПАК адаптовано для осіб з вадами зору фільм «Доторкнись і побач» (в Інтернеті фільм з тифлокоментарем можна переглянути за адресою: [https://www.youtube.com/watch?v=3h\\_73FNAq3M](https://www.youtube.com/watch?v=3h_73FNAq3M)).

На рис. 3 наведено сюжети кінофільму «Доторкнись і побач», а у табл. 1 наведено часові рамки цих сюжетів, та їхній опис за допомогою тифлокоментарів.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експерименту наведено на рис. 4. Зліва наведено відносну кількість схвальних відповідей на питання після перегляду фільму «Доторкнись і побач» без тифлокоментарів, а з правої сторони – після перегляду з тифлокоментарями. Були задані такі запитання:

1. Чи зрозуміли ви сам сюжет, його розвиток протягом відеоконтенту?
2. Чи не було моментів у відеоконтенті коли Ви втратили зрозумілість того, що відбувається на екрані (незрозумілі звуку, шуми)?



Рисунок 3 – Сцени зміни сюжету протягом 0:00 – 1:10 хв.

Таблиця 1 – Опис окремих сюжетів фільму «Доторкнись і побач» за допомогою тифлокоментарів

Оригінал фільму	Часовий проміжок	Тифлокоментарі
0:00-1:10 (Без будь яких пояснень грає саундтрек)	0:00–0:08	титр: Доторкнись і побач. Дощовий, вечірній Львів. У мерехтливих вогнях ліхтарів площі Ринок «пробігає» трамвай. Чоловік одягнутий у коричневу куртку з капшоном йде вулицею.  Під пазухою він несе коробку з подарунковою стрічкою.  Необачно переходячи дорогу його збиває автомобіль. До нього вискакує водій:
	0:12–0:16	
	0:17–0:25	
	0:32–0:40	
	0:41–0:57	
0:59–1:07		

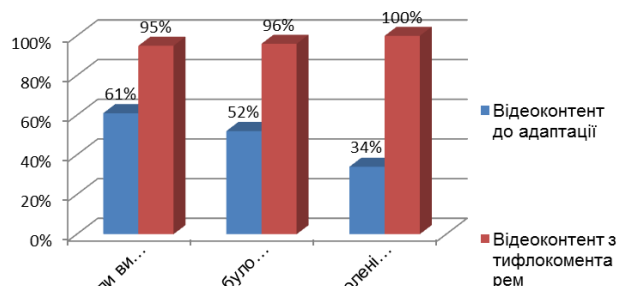


Рисунок 4 – Графік співставлення відповідей глядачів

3. Чи задоволені Ви переглядом даного відеоконтенту з тифлокоментарем?

Тим самим експериментально доведено доцільність застосування методу тифлокоментування для опису сюжетів відеоконтенту, що дало змогу до 30% підвищити сприйняття відеоконтенту особам з вадами зору.



## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Сьогодні в усьому світі ведеться активна робота над розробленням новітніх інформаційних технологій, які допомагають особам з фізичними вадами здоров'я максимально самостійно взаємодіяти з іншими людьми та комп'ютерами, забезпечувати себе необхідною інформацією [10–11]. Проблематика доступності до інформації для осіб з вадами зору спричинена неякісним способом представлення інформації на сайтах, малою адаптованістю сучасного телебачення до потреб таких людей.

У світі немає розроблених інформаційних систем, які би забезпечували повний комплекс технологічного процесу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору, є одиничні системи, які виконують лише деякі функції, але по-перше, вони комерційні, а по-друге, і вони мають певні недоліки. Це спричинено складністю адаптації та об'єднання різних програмних та апаратних засобів у одну систему. У результаті немає повноцінних розроблених програмно-алгоритмічних засобів, які би забезпечували вирішення сформульованих задач.

## ВИСНОВКИ

Проблема доступу до відеоконтенту осіб з вадами зору дуже гостро стоїть в даний час. У проблематиці навчання таких людей також виникають великі проблеми, людина яка отримує інформацію повинна мати добре розвинену увагу, мати достатній запас знань, що дозволяють сприймати інформацію на слух.

Тифлокоментування як спосіб донесення інформації до незрячого або слабкозрячого користувача є надзвичайно якісним методом донесення суті, важливих деталей того, що зрячі бачать в конкретний момент на екрані телевізора, дисплеї монітора або навіть на театральній сцені. Вперше розроблено математичне забезпечення подання відеоконтенту для осіб з вадами зору на основі процесу тифлокоментування, яке базується на спектральному аналізі побудови паралельної звукової доріжки, що дало змогу формалізувати процес адаптування відеоконтенту для осіб з вадами зору. На основі теорії асоціативних правил та логіки першого порядку розроблено правила побудови тифлокоментарів, які служать базою для сценаристів та звукорежисерів, які здійснюють процес адаптування відеоконтенту до потреб осіб з вадами зору. Для автоматизації процесу побудови відеоконтенту для осіб з вадами зору розроблено архітектуру та реалізовано програмно-алгоритмічний комплекс тифлокоментування, функціонування якого ґрунтується на пошуку місць у відеоконтенті для вставки тифлокоментарів, на читуванні у часові рамки відповідних тифлокоментарів, редагуванні і накладанні аудіоряду з тифлокоментарем на відеоряд. Отримав подальший розвиток метод пошуку ділянок тиші в звукових даних на основі використання перетворювання WaveLet, який складається із 4 етапів (фільтрація ділянки звуку, перевірка щільності спектру,

перевірка кореляції спектру з еталонним спектром, згладжування ділянок масиву), що дало змогу визначити ділянки тиші для вставлення тифлокоментарів у відеоконтент. Експериментально доведено доцільність застосування тифлокоментарів для опису сюжету відеоконтенту для осіб з вадами зору, що дало змогу до 30% підвищити ефективність сприйняття відеоконтенту такими глядачами. За допомогою розроблених методів і програмних засобів, адаптовано та викладено у вільний доступ короткометражний фільм «Доторкнись і побач».

## ПОДЯКИ

Дослідження, що становлять матеріал статті, безпосередньо пов'язані з науково-дослідним напрямом кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка». Результати, викладені у роботі, виконано відповідно до державної науково-дослідної роботи за темою Міністерства освіти і науки України ДБ «ЖЕСТ» у 2011–2012 рр. (номер державної реєстрації 0111U001222).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Петров Ю. І. Організація і методика навчання сліпих орієнтуванню в просторі / Ю. І. Петров. – М. : ВОС, 1998. – 276 с.
2. Демчук А. Б. Відеоконтент для незрячих: метод тифлокоментування / А. Б. Демчук // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2014. – №1 (30). – С. 146–149.
3. Ваньшин С. Н. Словесное описание для слепых / С. Н. Ваньшин, О. П. Ваньшинаю. – М. : Логосвос, 2011. – 62 с.
4. Земцова М. И. Пути компенсации слепоты в процессе познавательной и трудовой деятельности / М. И. Земцова. – М. : Изво АПН РСФСР, 1956. – 420 с.
5. Таланчук П. М. Супровід навчання студентів з особливими потребами в інтегрованому освітньому середовищі / П. М. Таланчук, К. О. Кольченко, Г. Ф. Нікуліна. – К. : Соцінформ, 2004. – 128 с.
6. Кунанець Н. Е. Організація освітніх та інформаційних процесів для людей з вадами зору із застосуванням спеціальних комп'ютерних технологій / Н. Е. Кунанець, О. А. Лозицький, В. В. Пасічник // *Матер. III наук.-практ. конф. «Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі»*. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2011. – С. 156–158.
7. Литвин В. В. Метод автоматизованої розбудови та оцінювання якості онтологій баз знань / В. В. Литвин, М. Я. Гопяк, А. Б. Демчук // *Автоматизовані системи управління та прилади автоматики*. Харків : ХНУРЕ, 2012. – № 161. – С. 62–69.
8. Демчук А. Б. Метод побудови інтелектуального агента на основі онтології предметної області. / А. Б. Демчук, В. В. Литвин, М. М. Войчишен // *Інформаційні системи та мережі*. Вісник НУ «Львівська політехніка». – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2011. – № 715. – С. 215–225.
9. Палагин А. В. Архитектура онтологоуправляемых компьютерных систем / А. В. Палагин // *Кибернетика и системный анализ*. – 2006. – № 2. – С. 111–125.
10. Нивиков П. С. Элементы математической логики 2-е изд. / П. С. Новиков. – М. : Наука, 1973. – 400 с.
11. Гильберт Д. Основы теоретической логики / Д. Гильберт, В. Аккеман. – М. : ГИИЛ, 1947. – 302 с.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2016.

Після доробки 20.05.2016.

Лытвын В. В.<sup>1</sup>, Демчук А. Б.<sup>2</sup>, Оборская О. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, ассистент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина

<sup>3</sup>Аспирант кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВИДЕОКОНТЕНТА ДЛЯ ЛИЦ С НАРУШЕНИЕМ ЗРЕНИЯ

В статье исследована проблема доступа к видеоконтенту людей с полной или частичной потерей зрения, рассмотрены тифлокомментирования, как метод адаптации видеоконтента для незрячих. При исследовании проблемы доступа слабовидящих к видеоконтенту, следует понимать, что большинство информации предоставляется зрителю посредством изображения, так, незрячие слышат все слова актеров, звуки окружающей среды, процессов на экране, но им трудно идентифицировать кому какие слова относятся, что именно в данный конкретный момент происходит с героями, что изображено в данной сцене, какова реакция актеров, их эмоции, которые чаще всего выражаются с помощью движений или мимики. Тифлокомментари к фильмам для незрячих людей – вот один из реальных шагов решения ограниченности доступа к такому виду контента. Разработаны математическое обеспечение представления видеоконтента для лиц с недостатками зрения на основе использования теории координации, спектрального анализа. Также построена архитектура программно-алгоритмического комплекса адаптации видеоконтента для людей с недостатками зрения. Реализован метод поиска свободных от диалогов и других важных звуков мест в видеоконтенте, которые служат для вставки тифлокомментариев. На основе логики 1-го порядка и ассоциативных правил разработаны правила тифлокомментирования для тифлокомментаторов, сценаристов и звукорежиссеров. Решена актуальная научно-прикладная задача представления видеоконтента в формате, доступном для восприятия людям с плохим зрением. Экспериментально доказана целесообразность применения метода тифлокомментирования для описания сюжетов видеоконтента, что позволило до 30% повысить восприятие видеоконтента лицам с недостатками зрения.

**Ключевые слова:** программно-алгоритмический комплекс, тифлокомментирование, тифлокомментатор, аудиодескрипция, представление видеоконтента для лиц с недостатками зрения, видеоконтент, недостаток зрения, адаптированный видеоконтент.

Lytvyn V. V.<sup>1</sup>, Demchuk A. B.<sup>2</sup>, Oborska O. V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dr.Sc., Professor, Head of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Assistant of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>3</sup>Postgraduate student of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUBMISSION VIDEO CONTENT FOR VISUALLY IMPAIRED PEOPLE

The article studies the problem of access to video people with complete or partial loss of vision, are considered typhlocomments as video content adaptation method for the blind. In the study of the problem of access of visually impaired to the video, it is understood that most of the information provided the viewer through the image, so that the blind can hear all the words of the actors, environment sounds, the processes on the screen, but it is difficult to identify anyone what words are, that it is at this particular moment it happens to the characters, what is depicted in this scene, what is the reaction of the actors, their emotions, which are often expressed through movement and facial expressions. Tiflokommentari to films for blind people – that's one of the real steps solutions limited access to view this content. Developed software representation of video content for persons with visual impairments through the use of the coordination theory of spectral analysis. Also built the architecture of software and algorithmic complex adaptation of video content for people with visual impairments. Implemented method for finding free conversations and other important sounds in video sites, which are used to insert typhlocomments. On the basis of the logic of the 1-st order and association rules are designed for rules typhlocomments typhlocommentators, writers and sound engineers. Back-to-date scientific and applied problem presentation video in a format accessible to the perception of people with poor eyesight. Experimentally proved the feasibility of typhlocomments method to describe the scenes video, which allowed up to 30% increase in the perception of video content for people with visual impairments.

**Keywords:** complex algorithmic search include video-insertion typhlocomments, audiodescription, submitting video content for people with visual impairments, video content, defect of vision, is adapted video content.

## REFERENCES

1. Petrov U. I. Organizatsiya technique navchannya sliph orientuvannu prostori. Moscow, VOS, 1998, 276 p.
2. Demchuk A. B. Vydeokontent for the blind: the method tyflokomentuvannya, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2014, No. 1 (30), pp. 146–149.
3. Vanshina S. N., Vanshinayu O. P. Slovesne opysannja dlya slipyh. Moscow, Logosvos, 2011, 62 p.
4. Zemtsova M. I. Puti compensation v process poznavatelnoj i trudovoy deyatel'nosti. Moscow, APN RSFSR, 1956, 420 p.
5. Talanchuk P. M., Kolchenko K. O., Nikulina G. F. Suprovid navchannya studentiv s osoblivimi potrebami in integrovanomu osvithnomu seredovischi [Text]. Kiev, Socinform, 2004, 128 p.
6. Kunanets N. E., Lozitsky O. A., Pasichnik V. V. Organizatsiya osvithnih Ta informatsiynih protsesiv dlya lyudey s vadami zoru iz zastosuvannam spetsialnih komp'yuternih tehnologiy, *Mater. III nauk. prakt. konf. "Innovatsiyi komp'yuterni tehnologii in vischij shkoli"*. Lviv, Vid-vo Lvivskoi politehniky, 2011, pp. 156–158.
7. Lytvyn V. V., Hopyak M. J., Demchuk A. B. Metod avtomatyzovanoyi rozbudovy ta otsynuyannya yakosti ontolohiy baz znan, *Avtomatyzovani systemy upravlinnya ta prylady avtomatyky*. Harkiv, XNYRE, 2012, No. 161, pp. 62–69.
8. Demchuk A. B., Lytvyn V. V., Voychysheh M. N. Metod pobudovy intelektualnoho ahenta on osnovi ontolohiyi predmetnoy oblasti. Informatsiyi systemy ta merezhi. Visnyk NU «Lvivska politehniky». Lviv, NU «Lvivska politehniky», 2011, No. 715, pp. 215–225.
9. Palagin A. V. Arhitektura ontologoupravlyayemyh kompyuternyh sistem, *Kibernetika and sistemnyy analiz*, 2006, No. 2, pp. 111–125.
10. Nivikov P. S. Elementy matematicheskoy logiki 2 yzd. Moskva, Nauka, 1973, 400 p.
11. Gilbert D., Akkeman V. Osnovy teoreticheskoy logiki. Moskva, GIL 1947, 302 p.

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, докторант, доцент кафедры информационной безопасности и компьютерной инженерии Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности и компьютерной инженерии Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина

<sup>3</sup>Ст. преподаватель кафедры прикладной математики Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина

## КОМБИНИРОВАННОЕ ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

В работе предложен метод комбинированного факториального кодирования данных, направленный на обеспечение контроля целостности информации, предусматривающий комплексную защиту от навязывания ложных данных (имитозащиту) и ошибок в канале связи. Основная идея предложенного метода кодирования состоит в совмещении процедур полного факториального кодирования, использующего перестановку в качестве проверочной части кодового слова, и циклического избыточного кодирования (CRC). При этом проверочная часть кодового слова комбинированного факториального кода формируется путем вычисления остатка от деления проверочной части кодового слова полного факториального кода, представленной в виде многочлена, на кодовый полином CRC-кода. Определены основные свойства комбинированного факториального кода, выполнена оценка достоверности передачи, крипто- и имитостойкости. Выполнен сравнительный анализ обнаруживающей способности (вероятности необнаруженной кодом ошибки) и энергетического выигрыша для полного и комбинированного факториального кодирования при условии независимости возникающих в канале связи ошибок и их биномиального распределения. Определены пути улучшения представленной оценки вероятности необнаруженной факториальным кодом ошибки. Даны рекомендации по применению полного и комбинированного факториального кодирования.

**Ключевые слова:** факториальный код, перестановка, контроль целостности информации, помехоустойчивое кодирование, достоверность передачи, стойкость.

### НОМЕНКЛАТУРА

FFC – Full Factorial Code;

ИЦ – Information Integrity Control;

CFC – Combined Factorial Code;

CRC – Cyclic Redundancy Code (циклический избыточный код);

КФК – комбинированный факториальный код;

КЦИ – контроль целостности информации;

ПФК – полный факториальный код;

РОС – решающая обратная связь;

ФСС – факториальная система счисления;

$\Delta P$  – энергетический выигрыш;

$\varepsilon_{n_{CFC}}(x)$  – вектор ошибки, воздействующий на кодовое слово КФК;

$\varepsilon_k(x)$  – вектор ошибки, воздействующий на информационную часть кодового слова КФК;

$\varepsilon_{r_{CFC}}(x)$  – вектор ошибки, воздействующий на проверочную часть кодового слова КФК;

$\varepsilon_{r_{CFC}}^{\wedge}(x)$  – ошибка, возникающая при формировании в приемнике проверочной части кодового слова КФК;

$v_{CFC}$  – скорость КФК;

$\pi(0)$  – базовая перестановка множества целых чисел  $\{0; 1; 2; \dots; M-1\}$ ;

$\pi(t)$  – перестановка в дискретный момент времени  $t$ ;

$\amalg$  – символ конкатенации (присоединения);

$A(x)$  – информационная часть кодового слова, представленная в виде многочлена;

$C(x)$  – кодовое слово, представленное в виде многочлена;

$D_{CFC}(x)$  – принятый из канала вектор кодового слова КФК;

$B(t)$  – факториальная запись числа, которое определяет порядковый номер перестановки;

$b_i(t)$  –  $i$ -й факториальный коэффициент синдрома перестановки в момент времени  $t$ ;

$f_{CFC}(j)$  – число ошибок веса  $j \in [0; n]$ , не обнаруживаемых КФК;

$G(x)$  – многочлен, образующий CRC-код;

$h^2$  – соотношение сигнал/шум;

$h_0^2$  – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее вероятность битовой ошибки  $p_0$  на его выходе;

$h_{eq}^2$  – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее эквивалентную вероятность битовой ошибки на его выходе  $p_{0eq}$ ;

$i$  – номер факториального коэффициента синдрома перестановки;

$k$  – число двоичных символов в информационной части блока данных;

$M$  – порядок (количество элементов) перестановки;

$N_{r_{CFC}}$  – количество возможных многочленов  $G(x)$  степени  $r_{CFC}$ , образующих CRC-код;

$n$  – полная длина блока данных;

$P_{ИЦ}(CFC)$  – вероятность взлома системы КЦИ КФК при однократной попытке подбора ключа;

$P_{ИС}(FFC)$  – вероятность взлома системы КЦИ ПФК при однократной попытке подбора ключа;

$P_{MAC}(CFC)$  – вероятность подбора имитовставки КФК в одном блоке данных;

$P_{MAC}(FFC)$  – вероятность подбора имитовставки ПФК в одном блоке данных;

$P_{ud}$  – вероятность необнаруженной ошибки;

$P_{ud}(CFC, p_0)$  – вероятность необнаруженной ошибки при использовании КФК;

$p_0$  – переходная вероятность двоичного симметричного канала связи;

$p_{0eq}$  – эквивалентная вероятность битовой ошибки на выходе некогерентного приемника;

$Q$  – вероятность безошибочного приема кодового слова;

$R(x)$  – проверочная часть кодового слова, представленная в виде многочлена;

$R_{CFC}(x)$  – проверочная часть кодового слова КФК, представленная в виде многочлена;

$R_{FFC}(x)$  – проверочная часть кодового слова ПФК, представленная в виде многочлена;

$\hat{R}_{CFC}(x)$  – проверочная часть кодового слова КФК, вычисленная в приемнике и представленная в виде многочлена;

$\hat{R}_{FFC}(x)$  – проверочная часть кодового слова ПФК, вычисленная в приемнике и представленная в виде многочлена;

$r$  – число двоичных символов в проверочной части блока данных;

$r_{CFC}$  – число двоичных символов в проверочной части блока данных КФК;

$S_{CFC}(x)$  – синдром ошибки КФК;

$S_F(t)$  – синдром перестановки в момент времени  $t$ ;

$T_{br}$  – среднее время взлома системы КЦИ (подбора имитовставки).

## ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное управление финансовыми операциями и электронным документооборотом приводит к необходимости обеспечения конфиденциальности и контроля целостности информации – КЦИ (ПС), который предусматривает защиту от навязывания ложных данных и обнаружение ошибок, вносимых каналом связи в процессе передачи сообщения. Эти обстоятельства стимулируют интенсивное развитие методов кодирования, которые обеспечивают комплексное решение задач криптозащиты, имитозащиты и защиты данных от ошибок, обусловленных действием помех в канале связи. Совмещение перечисленных функций позволяет сократить вводимую избыточность и уменьшить затраты производительности процессора, а его освобожденный ресурс – использовать для выполнения сервисных задач. В работах [1, 2] для разработки указанных методов кодирования предложено использовать систему счисления в остаточных классах, а в работе [3] – факториальную систему счисления (ФСС). Настоящая работа продолжает нача-

тое в [4] исследование методов факториального кодирования информации – кодирования, использующего ФСС для формирования кодового слова.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [4] представлен метод факториального кодирования, основанный на представлении проверочной части кодового слова в виде одной перестановки порядка  $M$ , который выбирается исходя из заданного набора свойств кода. При этом под перестановкой понимается упорядоченный набор символов  $\{0; 1; 2; \dots; M-1\}$ , расположенных в порядке, который определяется информационной последовательностью и алгоритмом кодирования. Поскольку сумма чисел перестановки не зависит от порядка их следования, она постоянна и априорно известна. Поэтому в дополнение к ранее перечисленным свойствам данного метода кодирования отнесем также свойство самосинхронизации – возможности определения границ блока данных (синхронизации циклов) без использования специального, уникального (не используемого источником данных) символа, называемого маркером, флагом или разделителем.

Введем следующие определения.

**Определение 1.** Полным факториальным кодом (ПФК) называется систематический избыточный код, использующий в качестве проверочной части кодового слова перестановку чисел порядка  $M$ , которая определяется информационной последовательностью и алгоритмом кодирования.

Свойства ПФК подробно исследованы в [4]. Вместе с тем факториальное кодирование не ограничивается ПФК и может быть существенно расширено. В частности, представляет интерес кодирование, которое совмещает принципы факториального и циклического кодирования.

**Определение 2.** Комбинированным факториальным кодом (КФК) называется систематический избыточный код, использующий в качестве проверочной части кодового слова контрольную сумму циклического избыточного кода (CRC), вычисленную по проверочной части кодового слова ПФК.

Целью данной работы является исследование метода комбинированного факториального кодирования и оценка его характеристик при комплексном решении задач защиты информации и контроля ее целостности в системах передачи данных с решающей обратной связью (РОС).

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Рассмотрим простейшую систему с РОС, где прямой канал – двоичный симметричный с переходной вероятностью  $p_0$  ( $q_0 = 1 - p_0$ ), обратный канал – идеальный, а символы, составляющие сообщение, являются элементами поля  $F_2 = \{0; 1\}$ . Пусть  $k$  и  $r$  – число двоичных символов в информационной и проверочной частях блока данных соответственно,  $n = k + r$  – полная длина блока.

Заметим, что перестановка для ПФК вычисляется по информационной последовательности таким образом, чтобы каждый из ее используемых символов существенно влиял на результат вычислений. Согласно [5], формирование проверочной части (перестановки) осуществляется за счет итерационной процедуры модификации

інформаційними символами синдрому перестановки  $S_F(t)$ . Синдром перестановки [6]  $S_F(t) = \{b_{M-1}(t), b_{M-2}(t), \dots, b_0(t)\}$  представляє собою послідовність факторіальних коефіцієнтів  $b_i(t)$  ( $0 \leq b_{M-1-i}(t) \leq M-1-i$ ) в факторіальній записі числа  $B(t)$ , яке визначає порядковий номер перестановки  $\pi(t)$  в дискретний момент часу  $t$  і відображає її точкою (контрольною точкою) відрізка  $[0; M!-1]$  числової осі

$$B(t) = \sum_{i=0}^{M-1} b_{M-1-i}(t) \cdot (M-1-i)!$$

Методи модифікації синдрому інформаційними символами можуть бути різними [5, 7].

Базова перестановка  $\pi(0)$ , відносно якої проводиться формування перевіркової частини (перестановки  $\pi(t)$ ) може бути відкритою або закритою.

В роботі [4] детально розглянуті властивості та виявляюча здатність ПФК. При цьому показано, що помилка декодування (помилка, яку код не виявляє) виникає тоді, коли завада, що впливає на перевірку частини блоку, перетворює передану перестановку  $\pi(t)$  в іншу перестановку  $\pi'(t)$ , яка збігається з перестановкою  $\pi''(t)$ , обчисленою декодером за прийнятими з помилками інформаційною частини блоку.

Визначимо властивості та виявляючу здатність ПФК. При цьому оцінимо наступні кількісні показники:

- швидкість коду;
- ймовірність не виявленої кодом помилки;
- ймовірність входу коду методом «грубої сили».

Як і в [4], використовуємо загальноприйнятий [8 С. 601; 9, С. 232; 10, С. 361] підхід до розгляду наборів (векторів) над полем  $F_2$  в вигляді елементів алгебри многочленів з коефіцієнтами з  $F_2$ .

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Концепція ПФК (CFC) поєднує факторіальне кодування з циклічним надлишковим кодуванням. При цьому по інформаційній послідовності спочатку обчислюється перевірна частина кодового слова ПФК, після чого по одержаній перестановці, представленій в вигляді многочлена  $R_{FFC}(x)$  степені  $(r_{FFC}-1)$ , обчислюється вирахунок

$$R_{CFC}(x) = |R_{FFC}(x)|_{G(x)}, \quad (1)$$

де  $G(x)$  – многочлен степені  $r_{CFC}$ , що утворює CRC-код.

Блок даних, що складається з інформаційної частини  $A(x)$  (розмірності  $k$  біт) та перевіркової частини  $R(x) = R_{CFC}(x)$  (розмірності  $r = r_{CFC}$  біт), виводиться в канал зв'язу в вигляді  $C(x) = A(x) \amalg R(x)$ , де  $\amalg$  – сим-

вол конкатенації (присоединения)  $(C(x) = x^r \cdot A(x) \oplus R(x))$ . Повна довжина блоку  $n = n_{CFC} = k + r_{CFC}$  біт, швидкість ПФК  $v_{CFC} = k / (k + r_{CFC})$ .

Оцінка достовірності передачі може бути одержана наступним чином. При передачі по каналу зв'язу на блок даних впливає вектор помилки  $\varepsilon_{n_{CFC}}(x)$  з потужністю множини векторів  $\mu\{\varepsilon_{n_{CFC}}(x)\} = 2^n$ . Цей вектор може бути представлений в вигляді конкатенації двох векторів – вектора завади, що покриває інформаційну частини блоку з  $k$  біт, та вектора завади, що покриває перевірку частини блоку з  $r_{CFC}$  біт:

$$\varepsilon_{n_{CFC}}(x) = \varepsilon_k(x) \amalg \varepsilon_{r_{CFC}}(x).$$

Отже прийнятий з каналу зв'язу вектор має вигляд

$$\begin{aligned} D_{CFC}(x) &= C_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{n_{CFC}}(x) = \\ &= (A(x) \oplus \varepsilon_k(x)) \amalg (R_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}(x)). \end{aligned}$$

В приймачі по прийнятій з каналу послідовності  $A(x) \oplus \varepsilon_k(x)$  формуються перевірна частина (перестановка) для ПФК. По її двоїчній репрезентації  $\hat{R}_{FFC}(x)$  згідно (1) обчислюється залишок  $\hat{R}_{CFC}(x) = | \hat{R}_{FFC}(x) |_{G(x)}$ . Цей залишок може бути представлений в вигляді  $\hat{R}_{CFC}(x) = R_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}^\wedge(x)$ , де  $\varepsilon_{r_{CFC}}^\wedge(x)$  – помилка, що виникає при формуванні в приймачі перевіркової частини та перетворює передану перевірку частини в будь-яку з  $2^{r_{CFC}}$  можливих значень.

Ситуація, коли обчислена в приймачі та прийнята з каналу перевірка частини збігаються  $(\hat{R}_{CFC}(x) = R_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}(x))$ , є ознакою відсутності помилок в прийнятій блоку та служить основою для висновку його користувачу. Відповідно, ситуація  $\hat{R}_{CFC}(x) \neq R_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}(x)$  є ознакою помилки блоку даних та служить основою для його повторного отримання.

Отже синдром помилки приймає вигляд:

$$\begin{aligned} S_{CFC}(x) &= (R_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}^\wedge(x)) \oplus \\ &\oplus (R_{CFC}(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}(x)) = \varepsilon_{r_{CFC}}^\wedge(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}(x). \end{aligned}$$

Якщо  $\varepsilon_{n_{CFC}}(x) = 0$ , то  $S_{CFC}(x) = 0$ . Отже рівність  $S_{CFC}(x) = 0$  є ознакою відсутності модифікації блоку даних.

Разом з тим, якщо  $\varepsilon_{n_{CFC}}(x) \neq 0$  і  $\varepsilon_{r_{CFC}}^\wedge(x) \oplus \varepsilon_{r_{CFC}}(x) = 0$ , виникають невиявлені

ошибки на выходе декодера. Заметим, что  $\varepsilon_{r_{CFC}}^{\wedge}(x)$  и  $\varepsilon_{r_{CFC}}(x)$  статистически независимы, а ошибки декодирования при  $\varepsilon_k(x) \neq 0$  и  $\varepsilon_{r_{CFC}}^{\wedge}(x) = \varepsilon_{r_{CFC}}(x) = 0$  являются результатом возникновения коллизий.

Примем, что данные на входе и выходе блока формирования перестановки являются статистически независимыми. При этом перестановки, формируемые в нем по принятым с ошибками информационным частям блока данных, распределены равномерно с вероятностью (см. формулы (1), (11) в [4]):

$$P_r^{\wedge} = \begin{cases} (1 - q_0^k) / M! & \text{при } M! < 2^k, \\ (1 - q_0^k) / (2^k - 1) & \text{при } M! \geq 2^k. \end{cases}$$

Примем также, что  $r_{CFC} \leq k$  и  $2^{r_{CFC}} \leq M!$ . Тогда вероятность появления каждого из  $2^{r_{CFC}}$  возможных векторов  $R_{CFC}(x)$ , и, соответственно, каждого из  $2^{r_{CFC}}$  возможных векторов  $\varepsilon_{r_{CFC}}^{\wedge}(x)$ , равна  $P_{r_{CFC}}^{\wedge} = (1 - q_0^k) / 2^{r_{CFC}}$  и определяет вероятность необнаруженной ошибки КФК кодом:

$$P_{ud}(CFC, p_0) = P\{\varepsilon_{r_{CFC}}^{\wedge}(x) = \varepsilon_{r_{CFC}}(x)\} = (1 - q_0^k) / 2^{r_{CFC}}. \quad (2)$$

Оценка крипто- и имитостойкости ПФК и КФК может быть получена следующим образом. Выполним количественную оценку стойкости факториальных кодов от несанкционированного чтения и/или навязывания ложных данных при атаке только на передаваемые данные и взломе методом «грубой силы» путем перебора множества значений ключевого пространства.

При использовании ПФК информационная часть блока данных передается в открытом (не преобразованном) виде, поэтому этот код не обеспечивает криптографическую защиту данных. Согласно [4, 5], контрольная сумма (перестановка) обеспечивает имитозащиту данных с вероятностью взлома системы КЦИ при однократной попытке подбора ключа  $P_{ИС}(FFC) \leq (M!)^{-2}$  и вероятностью подбора имитовставки в одном блоке данных  $P_{МАС}(FFC) = (M!)^{-1}$ .

При использовании КФК информационная часть блока данных передается, как и при ПФК, в открытом виде, поэтому КФК также не обеспечивает криптографическую защиту данных. Вероятность подбора ключа КЦИ при однократной попытке

$$P_{ИС}(CFC) = P_{ИС}(FFC) \cdot (N_{r_{CFC}})^{-1} \leq (M!)^{-2} \cdot (N_{r_{CFC}})^{-1},$$

где  $N_{r_{CFC}}$  – количество возможных многочленов  $G(x)$  степени  $r_{CFC}$ , образующий CRC-код. Вероятность подбора имитовставки для одного блока данных при однократной попытке  $P_{МАС}(CFC) = 2^{-r_{CFC}}$ .

Среднее время взлома системы КЦИ (подбора имитовставки) определяется выражением  $T_{br} = 0,5 / (P_{br} \cdot N)$  сек, где  $P_{br}$  – вероятность взлома системы КЦИ (подбора

имитовставки) для анализируемого кода,  $N$  – производительность компьютерной группировки, выполняющей процедуру взлома (ключей/сек).

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Энергетический выигрыш  $\Delta P$  при применении факториального кодирования будем определять для оптимального некогерентного приемника двоичных сигналов с ЧМн. Такой приемник характеризуется вероятностью битовой ошибки  $p = 0,5 \cdot e^{-0,5h^2}$  [11, С. 45], где  $h^2$  – соотношение сигнал/шум (отношение энергии сигнала, приходящейся на 1 бит принимаемого сообщения, к спектральной плотности мощности шума). Тогда энергетический выигрыш

$$\Delta P = 10 \lg \frac{(h_{eq})^2}{h_0^2} = 10 \lg \frac{\ln(2p_{0eq})}{\ln(2p_0)},$$

где  $h_0^2 = 2 \ln(2p_0)$  – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее вероятность битовой ошибки  $p_0$  на его выходе;  $h_{eq}^2$  – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее эквивалентную вероятность битовой ошибки на его выходе  $p_{0eq}$ , определенную в [12, С. 676] как вероятность ошибки в гипотетическом симметричном постоянном двоичном канале, при которой вероятность безошибочного приема достаточно длинного сообщения такая же, как и в рассматриваемой системе:

$$(1 - p_{0eq})^k = (1 - P_{ud})^{1/(Q + P_{ud})},$$

где  $Q = (1 - p_0)^n$ .

Согласно [12, С. 677], при  $p_{0eq} \cdot P_{ud} \ll 1$  эквивалентная вероятность битовой ошибки

$$p_{0eq} \approx \frac{P_{ud}}{k(Q + P_{ud})}.$$

**Пример.** Оценим энергетический выигрыш КФК для некогерентного приема при  $p_0 = 10^{-3}$ ,  $n = 1400$  и  $r_{CFC} = 16$ ,  $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ . Тогда  $k = 1384$ ,  $v_{CFC} = 1384/1400 = 0,988$ , а  $P_{ud}(CFC, p_0) = 1,14 \cdot 10^{-5}$ . Энергетический выигрыш  $\Delta P = 4,25$  дБ.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены графики зависимостей оценок вероятностей необнаруженной ошибки  $P_{ud}$  от длины информационной части блока  $k$  в результате применения КФК, ПФК и CRC-кода при  $p_0 = 10^{-3}$ . Оценки для CRC-кода заимствованы из работы [4], использующей результаты из [13].

Графики зависимостей оценок энергетического выигрыша  $\Delta P$  от длины информационной части блока  $k$  в результате применения КФК, ПФК и CRC-кода при  $p_0 = 10^{-3}$  представлены на рис. 2.

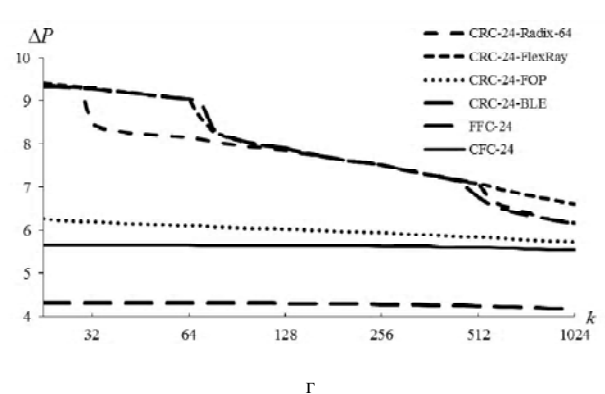
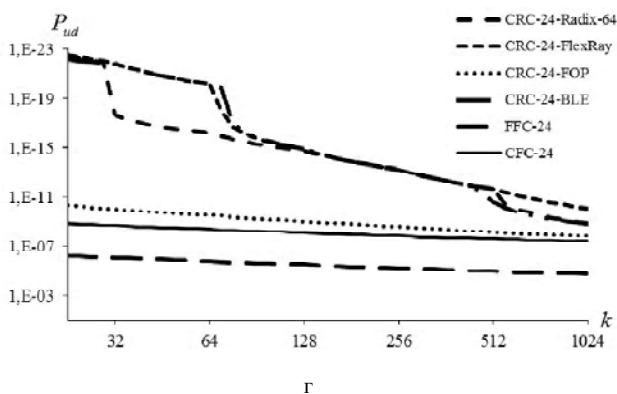
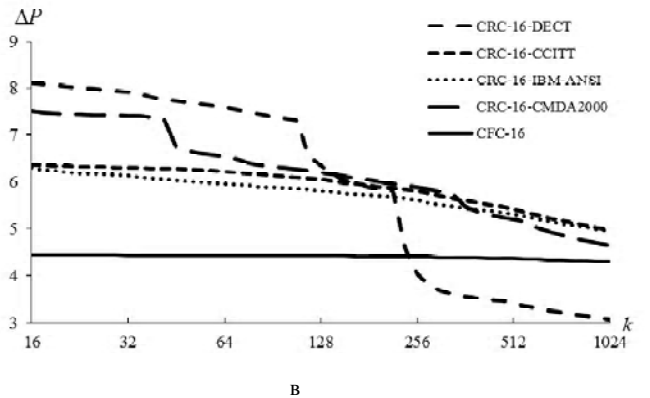
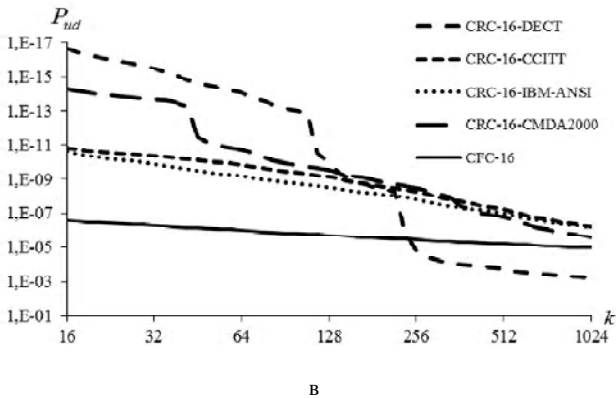
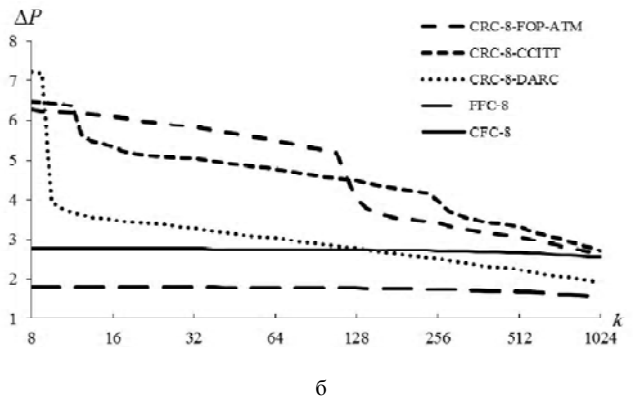
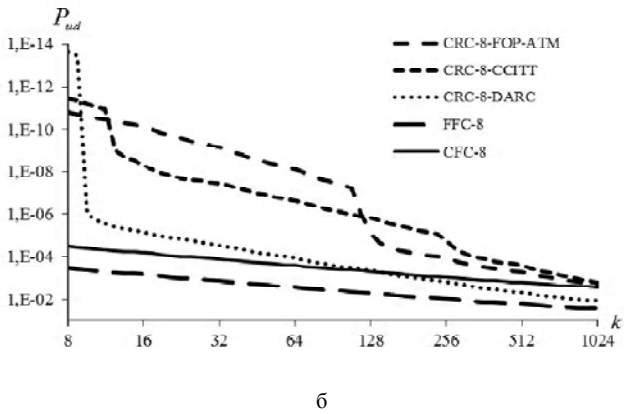
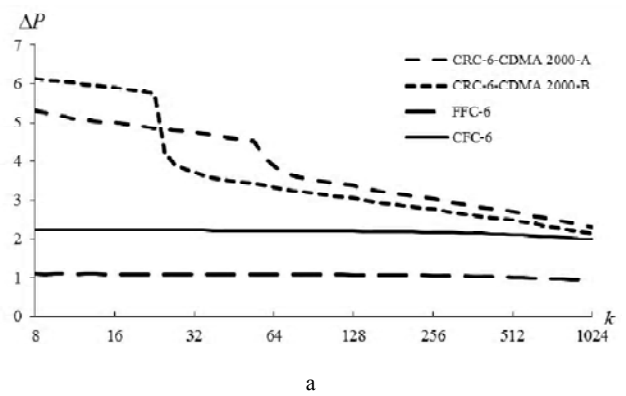
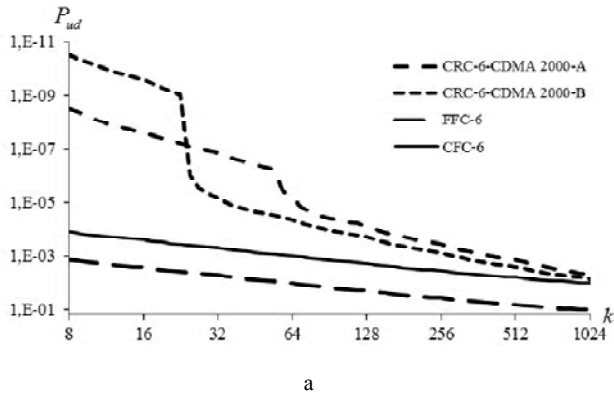


Рисунок 1 – Графики зависимостей оценок вероятностей необнаруженной ошибки от длины информационной части при  $p_0 = 10^{-3}$  и а –  $r = 6$ ; б –  $r = 8$ ; в –  $r = 16$ ; г –  $r = 24$

Рисунок 2 – Графики зависимостей оценок энергетического выигрыша от длины информационной части при  $p_0 = 10^{-3}$  и а –  $r = 6$ ; б –  $r = 8$ ; в –  $r = 16$ ; г –  $r = 24$

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 1 и 2 свидетельствуют о том, что обнаруживающая способность КФК выше, чем ПФК при одинаковых скоростях кодов и кодировании символов перестановки ПФК равномерным двоичным кодом. Кроме того, длина проверочной части КФК определяется только кодовым полиномом и может принимать любое целое положительное значение (в то время как для ПФК  $r_{FFC} = M \cdot (\text{entier}(\log_2 M) + 1)$ ;  $r \in \{2; 6; 8; 15; 18; 21; 24; 36 \dots\}$ ). Вместе с тем обнаруживающая способность КФК в целом уступает обнаруживающей способности циклического избыточного кода, однако для некоторых образующих полиномов CRC-кода и длины информационной части справедливо  $\Delta P_{CFC} > \Delta P_{CRC}$ . Так, например,  $\Delta P_{CFC-8} > \Delta P_{CRC-8-DARC}$  при  $k \geq 146$  ( $\Delta P_{CRC-8-DARC} - \Delta P_{CFC-8} \approx -0,638$  дБ при  $k = 1024$ ), а  $\Delta P_{CFC-16} > \Delta P_{CRC-16-DECT}$  при  $k \geq 243$  ( $\Delta P_{CRC-16-DECT} - \Delta P_{CFC-16} \approx -1,219$  дБ при  $k = 1024$ ). Следует отметить, что оценка вероятности необнаруженной ошибки CRC-кода определена практически точно, в то время как оценка КФК (4) может быть лучше. Для этого, как и для формирования используемой здесь оценки энергетического выигрыша CRC-кода, необходимо определить число ошибок веса  $n$ , не обнаруживаемых КФК.

Выполним сравнительную оценку свойств помехоустойчивых кодов. Результаты анализа приведем в табл. 1.

Анализ свойств представленных кодов позволяет сформулировать следующие рекомендации по их применению: при необходимости обеспечения КЦИ при ее передаче или хранении можно использовать ПФК или КФК; причем, если не требуется самосинхронизации кода, более эффективно использовать КФК.

## ВЫВОДЫ

Разработанные принципы комбинированного факториального кодирования позволяют расширить научно-техническую базу методов и средств контроля целостности информации при ее хранении и передаче.

Свойства комбинированного факториального кодирования:

- информационная часть кодового слова передается в канал связи в исходном виде, поэтому данный код не обеспечивает защиту информации от несанкционированного чтения;

- процедура формирования проверочной части кодового слова обеспечивает сцепление всех информационных символов, разрушая при этом их статистические связи, закон формирования проверочной части может быть скрыт, что в совокупности обеспечивает возможность ее использования в качестве имитовставки сообщения и совмещение функций имитозащиты и защиты от ошибок в канале связи;

- при одинаковых длине кодовой комбинации и скорости кода обнаруживающая способность КФК выше, чем ПФК, однако ниже CRC-кода;

- КФК не обладает свойством самосинхронизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 75935 Україна, МПК H03M13/31 (2006.01). Спосіб забезпечення цілісності інформації на базі коду умовних лишків / Василенко В. С., Чунарьова А. В., Василенко М. Ю., Чунарьов А. В. ; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – №u2012103515; заявл. 26.03.2012; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 4 с.
2. Пат. 75938 Україна, МПК H03M13/31 (2006.01). Спосіб забезпечення цілісності інформації на базі лишково-хеммінгового коду / Василенко В. С., Чунарьова А. В., Василенко М. Ю., Чунарьов А. В. ; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – №u2012103518; заявл. 26.03.2012; опубл. 25.12.2012, Бюл. №24. – 4 с.
3. Горячев А. В. Обнаружение ошибок в перестановках / А. В. Горячев // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2009. – № 4. – С. 126–134.
4. Фауре Э. В. Контроль целостности информации на основе факториальной системы счисления / Э. В. Фауре, В. В. Швидкий, А. И. Щерба // Journal of Qafqaz University. Mathematics and computer science. – 2016. – № 2, Т. 4. – (В печати).
5. Фауре Э. В. Метод формирования имитовставки на основе перестановок / Э. В. Фауре, В. В. Швидкий, В. А. Щерба // Захист інформації. – 2014. – № 4, Т. 16. – С. 334–340. – Режим доступа: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/334/8755>.
6. Фауре Э. В. Метод формирования воспроизводимой непредсказуемой последовательности перестановок / Э. В. Фауре, В. В. Швидкий, А. И. Щерба // Безпека інформації. – 2014. – № 3, Т. 20. – С. 253–258. – Режим доступа: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/article/view/7552/8608>.
7. Швидкий В. В. Дослідження статистичних властивостей колізій під час формування імітовставки на основі перестановок / В. В. Швидкий, В. С. Клопко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції, Черкаси, 14–20 березня 2016 р. – Черкаси, 2016 р. – С. 17.
8. Лидл Р. Конечные поля: В 2 т. Т. 2 / Р. Лидл, Г. Нидеррайтер ; [пер. с англ. под ред. Нечаева В. И.] – М. : Мир, 1988. – 822 с. – (Редакция литературы по математическим наукам).
9. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон ; [пер. с англ. под ред. Р. Л. Добрушина, С. И. Самойленко] – М. : Мир, 1976. – 590 с. – (Редакция литературы по новой технике).
10. Прокис Д. Цифровая связь / Джон Прокис ; [пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского]. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
11. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н. Л. Теплов. – М. : Связь, 1964. – 360 с.
12. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений / Л. М. Финк. – [Изд. 2-е, перераб. и дополн.]. – М. : Советское радио, 1970. – 728 с.
13. Koopman P. Best CRC Polynomials [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://users.ece.cmu.edu/~koopman/crc/index.html>.

Статья поступила в редакции 09.08.2016.

После доработки 18.08.2016.

Таблица 1 – Свойства помехоустойчивых кодов

Код	Систематический	Помехоустойчивый	Криптоустойкий	Имитостойкий	Самосинхронизирующийся
ПФК	+	+	–	+	+
КФК	+	+	–	+	–
CRC	+	+	–	–	–



Фауре Е. В.<sup>1</sup>, Швидкий В. В.<sup>2</sup>, Щерба В. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, докторант, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

<sup>3</sup>Ст. викладач кафедри прикладної математики Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

### КОМБІНОВАНЕ ФАКТОРІАЛЬНЕ КОДУВАННЯ ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

У роботі запропоновано метод комбінованого факторіального кодування даних, спрямований на забезпечення контролю цілісності інформації, який передбачає комплексний захист від нав'язування хибних даних (імітозахист) і помилок у каналі зв'язку. Основна ідея запропонованого методу кодування полягає в поєднанні процедур повного факторіального кодування, що використовує перестановку в якості перевірної частини кодового слова, і циклічного надлишкового кодування (CRC). При цьому перевірна частина кодового слова комбінованого факторіального коду формується шляхом обчислення залишку від ділення перевірної частини кодового слова повного факторіального коду, представленої у вигляді многочлена, на кодовий поліном CRC-коду. Визначено основні властивості комбінованого факторіального коду, виконано оцінку достовірності передавання, крипто- й імітостійкості. Виконано порівняльний аналіз виявляючої здатності (ймовірності невиявленої кодом помилки) й енергетичного виграшу для повного та комбінованого факторіального кодування за умови незалежності помилок, що виникають у каналі зв'язку, та їх біноміального розподілу. Визначено шляхи поліпшення представленої оцінки ймовірності невиявленої факторіальним кодом помилки. Надано рекомендації щодо застосування повного і комбінованого факторіального кодування.

**Ключові слова:** факторіальний код, перестановка, контроль цілісності інформації, завадостійке кодування, достовірність передавання, стійкість.

Faure E. V.<sup>1</sup>, Shvydkyj V. V.<sup>2</sup>, Shcherba V. O.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Post-Doctoral Associate, Associate Professor of Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

<sup>3</sup>Senior Lecturer of Department of Applied mathematics, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

### COMBINED FACTORIAL CODING AND ITS PROPERTIES

In this paper the authors propose a method of combined factorial data coding directed to the information integrity control that provides a comprehensive protection against intentional alteration of data and communication channel errors. The basic idea of the proposed method consists in combining of procedures of full factorial coding that uses a permutation as a codeword check value, and a cyclic redundancy coding (CRC). In this case a codeword check value of combined factorial code is generated from a codeword check value of full factorial code represented by a polynomial, by the CRC polynomial modulo. The basic properties of the combined factorial code are defined. The assessments of transmission reliability, cryptographic strength and strength against intentional alteration of data are evaluated. A comparative analysis of detecting ability (probability of an error undetected by the code) and energy gain for the full and combined factorial coding is done on the condition of independence of errors that appear in communication channel and their binomial distribution. The ways of improvement of the presented assessment of the probability of an undetected by factorial code error are defined. Recommendations for the use of full and combined factorial coding are given.

**Keywords:** factorial code, permutation, information integrity control, error control coding, transmission accuracy, strength.

### REFERENCES

1. Vasylenko V. S., Chunar'ova A. V., Vasylenko M. Ju., Chunar'ov A. V. Pat. 75935 Ukrai'na, MPK N03M13/31 (2006.01). Sposib zabezpechennja cilisnosti informacii' na bazi kodu umovnyh lyshkiv ; zajavnyk ta patentovlasnyk Nacional'nyj aviacijnyj universytet. №u2012103515; zajavl. 26.03.2012; opubl. 25.12.2012, Bjul. №24, 4 p.
2. Vasylenko V. S., Chunar'ova A. V., Vasylenko M. Ju., Chunar'ov A. V. Pat. 75938 Ukrai'na, MPK N03M13/31 (2006.01). Sposib zabezpechennja cilisnosti informacii' na bazi lyshkovo-hemmingovogo kodu ; zajavnyk ta patentovlasnyk Nacional'nyj aviacijnyj universytet. – №u2012103518; zajavl. 26.03.2012; opubl. 25.12.2012, Bjul. №24, 4 p.
3. Goryachev A.V. Obnaruzhenie oshibok v perestanovkax, *Visnyk SumDU. Seriya Tehnichni nauky*, 2009, No. 4, pp. 126–134.
4. Faure E. V., Shvydkyj V. V., Shherba A. I. Kontrol' celostnosti informacii na osnovе faktorial'noj sistemy schisleniya, *Journal of Qafqaz University. Mathematics and computer science*, 2016, No. 2, Vol. 4. (V pechati).
5. Faure E. V., Shvydkyj V. V., Shherba V. A. Metod formirovaniya imitovstavki na osnovе perestanovok, *Zaxist informacii*, 2014, No. 4, Vol. 16, pp. 334–340. Access mode: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/334/8755>.
6. Faure E. V., Shvydkyj V. V., Shherba A. I. Metod formirovaniya vosproizvodimoy nepredskazuemoj posledovatel'nosti perestanovok, *Bezpeka informacii*, 2014, No. 3, Vol. 20, pp. 253–258. Access mode: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/article/view/7552/8608>.
7. Shvydkyj V. V., Klopko V. S. Doslidzhennja statystychnyh vlastyvoستej kolizij pid chas formuvannja imitovstavky na osnovi perestanovok, *Avtomatyzacija ta komp'juterno-integrovani tehnologii' u vyrobnyctvi ta osviti: stan, dosjagnennja, perspektyvy rozvytku: materialy Vseukrai'ns'koi' naukovopraktychnoi' Internet-konferencii'*, Cherkasy, 14–20 bereznja 2016 r. Cherkasy, 2016 r, P. 17.
8. Lidl R., Niderrajter G. ; [per. s angl. pod red. Nechaeva V. I.] Konechnye polya: V 2 t. T. 2. Moscow, Mir, 1988, 822 p. (Redakciya literatury po matematicheskim naukam).
9. Piterson U., Ue'ldon E'. ; [per. s angl. pod red. R. L. Dobrushina, S. I. Samojlenko] Kody, ispravlyayushhie oshibki. Moscow, Mir, 1976, 590 p. (Redakciya literatury po novej texnike).
10. Prokis D. [per. s angl. pod red. D. D. Klovskogo]. Cifrovaya svyaz'. Moscow, Radio i svyaz', 2000, 800 p.
11. Teplov N. L. Pomexoustojchivost' sistem peredachi diskretnoj informacii. Moscow, Svyaz', 1964, 360 p.
12. Fink L. M. Teoriya peredachi diskretnyx soobshhenij. [Izd. 2-e, pererab. i dopoln.]. Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.
13. Koopman P. Best CRC Polynomials [Electronic resource]. Access mode: <http://users.ece.cmu.edu/~koopman/crc/index.html>.

## РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ВЕРИФІКАЦІЇ СОЦІАЛЬНО-ДЕМОГРАФІЧНИХ ДАНИХ УЧАСНИКА ВІРТУАЛЬНОЇ СПІЛЬНОТИ

Вирішено важливе завдання розроблення системи верифікації соціально-демографічних даних учасника віртуальної спільноти на основі проведення комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційного наповнення великої вибірки україномовних віртуальних спільнот. Предметом дослідження є методи та засоби перевірки достовірності соціально-демографічних характеристик учасників віртуальних спільнот на основі комп'ютерно-лінгвістичного аналізу результатів їх комунікативної взаємодії. Метою роботи є перевірка правдивості персональних даних, які учасники надають у своїх облікових даних на основі результатів комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційних слідів учасників веб-спільнот. Для практичної реалізації поставлених завдань розроблено структуру програмного забезпечення для верифікації соціально-демографічного портрета веб-учасника. Запропоновано метод верифікації персональних даних учасника віртуальної спільноти на основі аналізу інформаційних слідів учасників віртуальних спільнот. Уперше розроблено метод перевірки достовірності персональних даних веб-учасників, що дало змогу спроектувати засіб верифікації соціально-демографічних характеристик учасника веб-спільноти. У результаті проведених досліджень розроблено систему верифікації соціально-демографічних даних учасників віртуальних спільнот, яка формує верифіковані соціально-демографічні портрети цих учасників віртуальних спільнот. Також представлено користувацький інтерфейс розробленої системи верифікації соціально-демографічних даних учасників віртуальних спільнот. Отримані результати системи дозволяють підвищити ефективність загального процесу управління веб-спільнотами. Апробації розроблених методів і засобів для вирішення завдань у веб-адміністрування спільноти доводиться їх результативність та ефективність. Кількість фальшивих спрацювань системи верифікації не перевищує 18%.

**Ключові слова:** система верифікації, персональні дані, соціально-демографічні характеристики, аналіз, учасник, віртуальна спільнота.

### НОМЕНКЛАТУРА

WWW – всесвітня мережа (англ. World Wide Web);

ВС – віртуальна спільнота;

ОЗ – обліковий запис;

СД – соціально-демографічний;

СДП – соціально-демографічний портрет;

СДХ – соціально-демографічна характеристика;

УВС – учасник віртуальної спільноти.

### ВСТУП

Популярність віртуальних спільнот з кожним днем збільшується. Практично, таке інтерактивне спілкування у віртуальних спільнотах є невід'ємною частиною особистого та професійного життя сучасної людини.

Користувачі віртуальних спільнот надають про себе великі об'єми інформації, зокрема і конфіденційної.

Перевірка правдивості персональних даних, які учасники надають у своїх облікових даних є актуальним завданням у зв'язку з необхідністю виявлення протиправних дій веб-користувачів, які є образливими для опонентів з психологічного, фінансового, юридичного погляду. Зокрема, виявлення веб-користувачів, які займаються шантажем, надсилають листи з погрозами, поширюють брехливу і наклепницьку інформацію та займаються іншими видами електронного хуліганства, що полягає у проведенні комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційного наповнення доволі великої вибірки віртуальних спільнот Укрнету.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вирішення актуальних завдань наукових досліджень у віртуальних спільнотах є необхідністю функціонування будь-якої віртуальної спільноти. Актуальні завдання сучасних наукових досліджень соціальних спільнот можна поділити на три типи: правові (вдосконалення систе-

ми правил комунікативної поведінки для УВС); організаційні (методи покращення функціонування системи віртуальних спільнот сприяє підвищенню ефективності та покращення функціонування веб-спільнот); економічні (розроблення нових механізмів та підходів до застосування інтернет-реклами, таргетингу).

Підвищення ефективності функціонування ВС – результат виконання таких завдань:

- відсіювання небажаного інформаційного наповнення;
- підвищення якості інформаційного наповнення;
- фільтрація учасників за повнотою заповнення ОЗ персональними даними;
- зменшення витрат на модерування спільнотою;
- зменшення конфліктних ситуацій у спільноті;
- комп'ютерно-лінгвістичний аналіз достовірності персональних даних УВС;
- автоматизування комп'ютерно-лінгвістичного опрацювання контенту.

Метою роботи є розроблення методів і засобів перевірки достовірності СДХ учасників віртуальних спільнот за результатами комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційних слідів учасників ВС.

Мета роботи визначає необхідність виконання таких актуальних задач:

- дослідити специфіку та виділити основні ознаки онлайн-комунікації УВС шляхом комп'ютерно-лінгвістичного аналізу їхнього інформаційного наповнення;
- спроектувати структуру програмного комплексу комп'ютерно-лінгвістичної перевірки достовірності СДХ учасника віртуальної спільноти;
- створити засіб верифікації персональних даних учасників веб-спільноти;
- апробувати програмний комплекс комп'ютерно-лінгвістичної перевірки достовірності соціально-демографічних характеристик УВС.

Отже, реалізація наведених вище завдань вагомо впливає на функціонування ВС, що дає можливість спростити та пришвидшити виконання обов'язків адміністратора ВС.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У дослідженнях віртуальних спільнот у WWW науковці виокремлюють чимало напрямів, оскільки у зв'язку з появою нових тенденцій розвитку віртуальних спільнот сфера досліджень збільшується буквально щодня.

Проаналізувавши сучасні праці науковців [1–5], виявлено, що в останні роки з'явилося багато публікацій про особливості функціонування віртуальних спільнот.

Дослідження віртуальних спільнот почалися з вивчення комп'ютерно-опосередкованої комунікації – комунікації, яка ґрунтується на використанні комп'ютера, що спрощує та розширює сферу комунікації [2] та дослідженням соціальної зміни пов'язана відчуження і втратою спільноти у кіберпросторі, створюючи спільноти за інтересами [3], спричиненої впровадженням комп'ютерних технологій. Поняття та функціонування віртуальних спільнот є дискусійним питанням для багатьох науковців [3].

Тематичні конференції (веб-форуми та дискусійні групи) в мережі Інтернет [1], електронні дошки оголошень та інші види комп'ютерно-опосередкованої комунікації виникли з метою відтворити відчуття спільноти, що з'являється в учасників ВС, які беруть участь у комунікації з метою відновлення соціальних зв'язків у віртуальній спільноті.

Компонента спільноти як зв'язку певних груп, має найбільше значення в контексті комп'ютерно-опосередкованої комунікації і твердить, що ці три ознаки є в комп'ютерно-опосередкованій комунікації.

Віртуальна спільнота [4] – це група людей зі спільними інтересами, регулярно та тривалою комунікацією за допомогою Інтернету через спільне місцезнаходження або механізм. З іншого боку, віртуальну спільноту визначають як мережу взаємозв'язків осіб у кіберпросторі [5]. Часто веб-спільноти суттєво впливають на їхніх учасників, пропонуючи можливості навчального середовища, досягнення інтерактивності та способи обміну архівів контактів у системах знань.

Аналіз діяльності віртуальних спільнот є об'єктом наукових досліджень, серед яких чітко виділяються три основні напрями: аналіз дій учасників (web usage mining); аналіз веб-структур (web structure mining); аналіз контенту (web content mining).

Однією із важливих проблем аналізу контенту ВС сьогодні є аналіз персональних даних ВС. Попри суттєве значення для подальшого розвитку цієї сфери досліджень досі не розроблено дієвих методів аналізу саме персональної інформації в обліковому записі УВС.

Зважаючи на вищенаведений аналіз наукових праць, серед відомих літературних джерел відчутним є брак ґрунтовних досліджень з верифікації персональної інформації користувачів мережі Інтернет та дослідження достовірності СДХ учасників соціальних комунікацій, зокрема ВС з метою покращення їх функціонування. Це, своєю чергою, породжує актуальну проблему розроблення нових методів та засобів аналізу достовірності СДХ учасників віртуальних спільнот, які би мали належне наукове обґрунтування, формалізацію, прогнозовану результативність та універсальність.

## 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Ефективне функціонування спільноти залежить від ряду чинників, як об'єктивних, так і суб'єктивних. Проте, наявні на сьогодні методи та засоби, що використовуються у глобальних сервісах, в повній мірі не виконують усіх завдань, які б задовольнили потреби власників та модераторів в управлінні віртуальними проектами, зокрема віртуальними спільнотами. Розроблення методів та засобів перевірки достовірності персональних даних у обліковому записі користувача є одним з найбільш значимих факторів, які впливають на покращення функціонування віртуальної спільноти.

Дослідження, виконані під час роботи, ґрунтуються на методах структурного аналізу для дослідження інформаційного наповнення веб-учасників та методи аналізу веб-контенту, спрямовані на дослідження вербальних характеристик текстів. Для вирішення завдань моделювання структури системи валідації СД портрета веб-учасника використано теоретико-множинні підходи та апарат теорії реляційних баз даних. Засоби формування соціально-демографічних портретів веб-учасників розроблено на основі сучасних веб-технологій.

До програмного засобу для верифікації СДП веб-учасника ставляться високі вимоги, адже цей засіб в реальному часі повинен опрацьовувати великий масив динамічної інформації. Також треба звертати увагу на постійний ріст активності учасників популярної ВС, які невпинно генерують не завжди якісне та адекватне, до цілей позиціонування спільноти у вебі, інформаційне наповнення. Звичайно, такий сценарій розвитку ВС є перешкодою для ефективного функціонування спільноти в конкурентному середовищі.

Серед задач, які вимагають окремого підходу до валідації персональних даних УВС, методом комп'ютерно-лінгвістичного аналізу контенту, виокремлено наступні:

- брак якісного та достовірного інформаційного наповнення;
- мінімалізація анонімності користувачів [6–7];
- сприйняття спільноти, як платформи для довільної реалізації своїх бізнес ідей [8–9];
- невелика успішність ВС, що призводить до низької рентабельності веб-проекту;
- необхідність великих капіталовкладень власниками веб-спільноти;
- вагомими та необґрунтованими затратами часу у модеруванні спільнотою;
- уникнення загроз інформаційної безпеки учасників ВС, що можуть призвести до кримінальної відповідальності власника спільноти [10];
- низька конкурентоспроможність в порівнянні з іншими спільнотами;
- проблеми в управлінні віртуальною спільнотою (високий рівень конфліктів, низький авторитет модераторів та ін.);
- покращення методів інтернет-таргетингу [11–12].

Усі вищеперераховані задачі враховані при розробленні структури програмного забезпечення для верифікації *соціально-демографічного портрета веб-учасника* [13–16]. Розроблення саме програмного засобу верифікації – «Верифікатор СДХ веб-учасника» (див. рис. 1) вирішить багато актуальних задач в модеруванні та управлінні спільнотами у WWW.



Рисунок 1 – Схема функціонування системи «Верифікатор СДХ веб-учасника»

Для верифікації СДХ та побудови соціально-демографічного портрета УВС автором розроблено чітку структуру програмного забезпечення «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника». Ключовим елементом цієї структури є схема функціонування цієї системи. Тепер детально опишемо кожен етап схеми функціонування системи «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника».

З переліку віртуальних спільнот, які належать власнику чи доступні модератору, здійснюється вибір віртуальної спільноти і з бази учасників обраної віртуальної спільноти обираємо конкретного учасника або множини учасників.

Соціально-демографічний портрет будуємо лише з верифікованих СДХ учасника ВС, тобто з персональних даних учасника, достовірність яких перевірено методом комп'ютерно-лінгвістичного аналізу. Тож, побудова СД портрета ґрунтується на верифікації СДХ учасника ВС. Побудова СДП відбувається згідно алгоритму формування СДП учасника віртуальної спільноти. Блок-схема алгоритму формування СДП зображено на рис. 2.

Мета алгоритму – перевірити достовірність максимальної кількості персональної інформації, яку УВС вказав у своєму обліковому записі методом комп'ютерно-лінгвістичної верифікації СДХ учасника ВС.

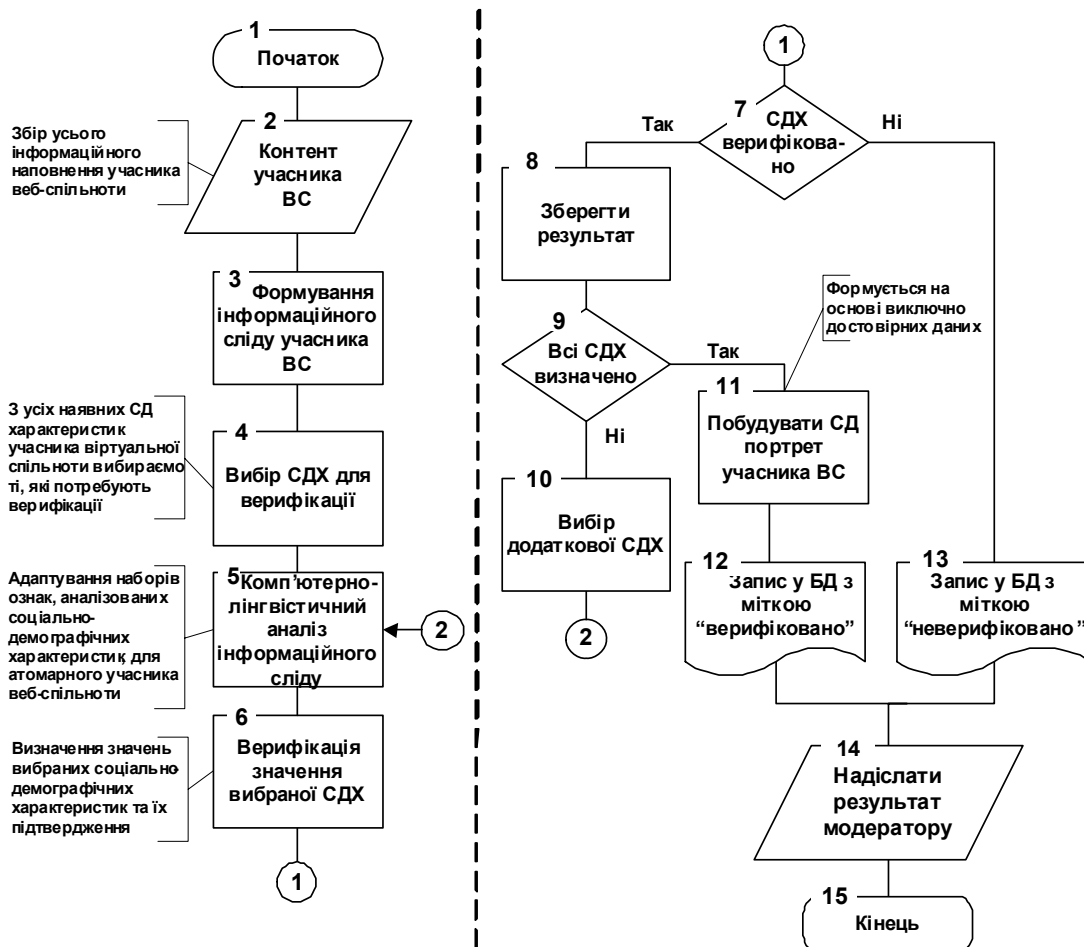


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму формування СДП учасника віртуальної спільноти

Основою алгоритму є інформаційний слід УВС – інформаційного наповнення віртуальної спільноти конкретного УВС.

Відповідно до цього алгоритму, є можливість здати параметри вибору характеристик, тобто обрати саме потрібні СДХ для верифікації. Перевірку достовірності всіх СД характеристик налаштовано по замовчуванню.

Соціально-демографічний портрет УВС будується виключно з верифікованих СДХ. Тобто відповідність вказаним даним у обліковому записі реальним характеристикам УВС. На основі верифікації СДХ та побудованого СДП система «Верифікатор СДХ веб-учасника» класифікує учасників за фактом здійснення чи нездійснення перевірки достовірності.

*Формування соціально-демографічного портрета.* На цьому етапі відбувається саме вже формування СДП на основі результатів верифікації СДХ. Система формує результати у табличному вигляді.

**4 ЕКСПЕРИМЕНТИ**

Для вирішення вищенаведених завдань потрібно спробувати програмний засіб для верифікації персональних даних УВС. Зважаючи на специфіку середовищ соціальних комунікацій, варто звернути увагу на деякі спеціальні вимоги до програмного засобу «Верифікатор СДХ веб-учасника»: задоволення потреб користувача при розв’язанні конкретної функціональної задачі; зрозумілість і логічність виводу результатів, що зменшить час прийняття рішення та покращить їх якість; можливість нарощення функціональності, тобто адаптування та збільшення функціонального блоку програмного засобу відповідно до потреб конкретного учасника [16]; простота аналізу, збереження та використання результатів, впровадження їх у діяльність віртуальної спільноти. Відповідно до цих вимог створено програмне забезпечення для верифікації СДП веб-учасника (рис. 3).

Результати програми «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника» з результатами верифікації даних учасника веб-форуму «Львів. Форум Рідного Міста» – Andreas представлено на рис. 4.

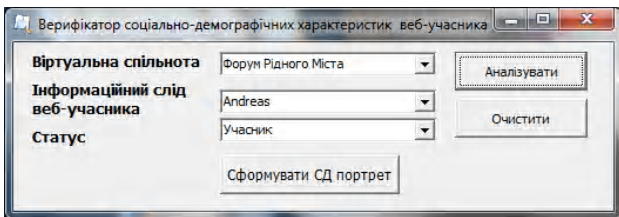


Рисунок 3 – Запит на верифікацію облікового запису веб-форуму «Львів. Форум Рідного Міста» користувача Andreas

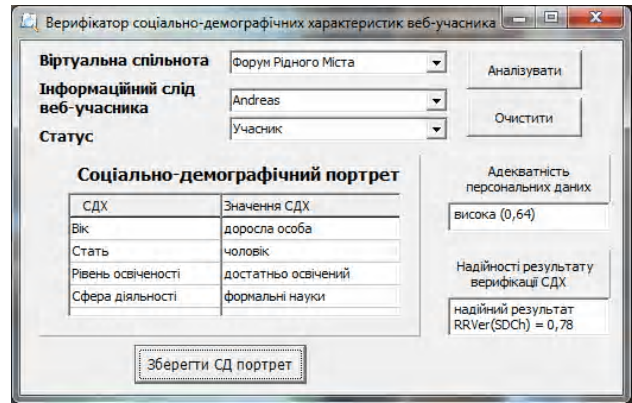


Рисунок 4 – Результати верифікації СДП учасника «Львів. Форум Рідного Міста» – Andreas

Модель словника СД маркерів є складовою цієї системи «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника».

Для ефективного використання програмного засобу «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника» результати його роботи автоматично імплементовані у функціонування ВС.

Апробація такого методу здійснено у таких віртуальних спільнотах [17–18]: «Львів. Форум Рідного Міста», «Малеча», «Дівочі посиденьки», «Rock.Lviv.Ua» та «Теревені».

**5 РЕЗУЛЬТАТИ**

За алгоритмом обчислення надійності результату процесу верифікації СДХ визначено кількість фальшивих спрацьовувань системи верифікації СДХ учасників п’ятьох досліджуваних віртуальних спільнот. Результати подано у табличному варіанті (див. табл. 1).

**6 ОБГОВОРЕННЯ**

На сьогоднішній день для задач верифікації інформації УВС існують лише дорогі комплекси рішення, які не задовольняють усіх потреб власників в задачі управління ВС. Розроблення якісного та відносно недорогого механізму валідації СДХ зумовлене потребою в ідентифікації користувачів на етапі бурхливого розвитку віртуальної спільноти.

Відносна кількість фальшивих спрацьовувань системи верифікації персональних даних УВС на тестовій множині учасників п’яти популярних веб-спільнот прийнята для завдань управління ВС і фактично є ймовірністю помилки системи (табл. 1).

Ефективність системи верифікації персональних даних [19] показує, що у 2–4 рази (залежно від типу, мети та специфіки веб-спільноти) зменшується навантаження з перевірки персональних даних на модераторів, відповідно і суттєвим є зниження часових та фінансових затрат на адміністрування віртуальних спільнот.

Таблиця 1 – Результативність системи верифікації СД характеристик

Віртуальні спільноти	Малеча	Дівочі посиденьки	Rock.Lviv.Ua	Теревені	Львів. Форум Рідного Міста
Кількість перевірених учасників	1631	504	216	386	345
Відносна кількість фальшивих спрацьовувань, %	13	8	16	18	7
Ефективність, %	70	62	55	58	62

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу розроблення системи верифікації інформації учасників ВС, на основі комп'ютерно-лінгвістичних методів верифікації масиву користувачького контенту ВС.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у науковому обґрунтуванні та розробленні методів та засобів верифікації СДХ учасників веб-спільнот.

Уперше розроблено метод перевірки достовірності персональних даних ВС, який полягає у порівнянні заявлених СДХ у облікових записках ВС із їхнього СДП, які сформовані на основі результатів комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційних слідів ВС, що дало змогу спроектувати засіб верифікації СДХ учасника веб-спільноти. Удосконалено метод адміністрування ВС, що дало змогу істотно зменшити кількість недостовірних контенту ВС та виявляти неправдиві персональні дані веб-учасників.

Розроблено метод комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційного сліду ВС шляхом відбору та аналізу особистісних лексико-семантичних та лексико-синтаксичних, граматичних особливостей мовлення кожного окремого ВС та побудови його СДП, що дає змогу верифікувати персональні дані, які задекларував цей УВС.

Практичне значення одержаних результатів роботи зумовлено тим, що вони дають змогу перевірити достовірність персональних даних УВС на основі аналізу їхніх інформаційних слідів.

Розроблено алгоритми верифікації персональних даних облікових записів УВС, шляхом побудови їхніх інформаційних слідів на основі результатів аналізу контенту ВС, що дало змогу підвищити їхню керованість та ефективність адміністрування.

Розроблено структуру програмного комплексу засобів перевірки достовірності даних шляхом формування СДП для автоматизації процесу верифікації масиву користувачького інформаційного наповнення.

Кількість фальшивих спрацювань системи верифікації СДХ учасника веб-спільноти не перевищує 18%.

Таким чином, результати апробації комплексу комп'ютерно-лінгвістичної перевірки достовірності СДХ учасника веб-спільноти показали, що запропонований метод перевірки достовірності соціально-демографічних характеристик УВС на основі методів верифікації масиву користувачького інформаційного наповнення WWW ефективніший від відомих методів, і дало змогу реалізувати систему підтримки прийняття рішень для фахівця з управління веб-спільнотами у сфері опрацювання персональних даних.

Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні запропонованого підходу для вирішення практичних задач управління віртуальними спільнотами.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в межах зареєстрованих наукових тематик кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка», зокрема «Розробка методів і засобів реалізації соціальних систем в мережі Інтернет в умовах розвитку інформаційного суспільства» (номер держреєстрації 0110U005019) та «Аналіз та моделювання процесів соціальних комунікацій у Інтернеті як основи інформаційного суспільства» (номер держреєстрації 0113U005285).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jones S. Cybersociety: Computer-mediated communication and community / S. Jones. – Thousand Oaks, CA : Sage, 1995. – P. 1–34.

- Oldenburg R. Great good place: Cafes, coffee shops, community centers, beauty parlors, general stores, bars, hangouts, and how they get you through the day / R. Oldenburg. – NY : Paragon House. – 2009. – P. 185–243.
- Ludlow P. Crypto anarchy, cyberstates, and pirate utopias / P. Ludlow. – Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2001. – P. 65–129.
- Arinze B. Some antecedents and effects of trust in virtual communities / B. Arinze, C. Ridings, D. Gefen // Journal of Strategic Information Systems. – 2002. – № 11. – P. 271–395.
- Rheingold H. The virtual community: Homesteading on the electronic frontier / H. Rheingold. – Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2000. – P. 169–229.
- Федушко С. Алгоритм валідації інтернет-імен користувачів віртуальних спільнот / С. Федушко, Ю. Серов // Вісник НУ «ЛП»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2011. – № 719. – С. 215–219.
- Fedushko S. Design of registration and validation algorithm of member's personal data / S. Fedushko, Yu. Syerov // International Journal of Informatics and Communication Technology. – 2013. – Vol. 2, No. 2. – P. 93–98. DOI: 10.11591/ij-ict.v2i2.3960.
- Andruxhiv A. Integrating new library services into the University Information System / A. Andruxhiv, M. Sokil, S. Fedushko // Library management. – 2014. – No. 1 (6). – P. 79–87.
- Fedushko S. Concept of Strategic Positioning for Travel Agency in Social Networks / S. Fedushko, J. Bekesh // Open J. of Communications and Software. – 2014. – Vol. 1(2). – P. 1–9.
- Fedushko S. Algorithm of the cyber criminals identification / S. Fedushko, N. Bardyn // Global Journal of Engineering, Design & Technology. – 2013. – Vol. 2, No. 4. – P. 56–62.
- Федушко С. Особливості визначення та опису соціально-демографічних характеристик в соціальних комунікаціях / С. Федушко // Вісник НУ «ЛП»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – № 694. – Львів, 2011. – С. 75–85.
- Peleschshyn A. Gender similarities and differences in online identity and Internet communication / A. Peleschshyn, S. Fedushko // Computer Science and Information Technologies: Proc. of the Intern. Conf. «CSIT-2010». – Lviv, 2010. – P. 195–198.
- Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member [Electronic resource] / S. Fedushko // Webology. – 2014. – Vol. 11, No. 2, Article 126. – Available at: <http://www.webology.org/2014/v11n2/a126.pdf> DOI: 10.6084/m9.figshare.205664.
- Syerov Yu. The computer-linguistic analysis of socio-demographic profile of virtual community member / Yu. Syerov, A. Peleschshyn, S. Fedushko // Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics. – 2013. – Vol. 4 (1). – P. 1–13.
- The verification of virtual community member's socio-demographic profile / [Fedushko S., Peleschshyn O., Peleschshyn A., Syerov Yu.] // Advanced Computing: An International Journal. – AIRCC, 2013. – Vol. 4, No. 3. – P. 29–38. DOI: 10.5121/acij.2013.4303.
- Verification of socio-demographic characteristics of virtual community members / [Fedushko S., Peleschshyn A., Korzh R., Syerov Yu.] // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 632.
- The cataloging of virtual communities of educational thematic [Electronic resource] / [Korzh R., Peleschshyn A., Syerov Yu., Fedushko S.] // Webology. – 2014. – Vol. 11, No. 1, Article 117. – 16 p. Available at: <http://webology.org/2014/v11n1/a117.pdf>. DOI: 10.6084/m9.figshare.2056650.
- Determination of the account personal data adequacy of web-community member / Fedushko S., Syerov Yu., Peleschshyn A., Korzh R. // Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics. – Vol. 15 (1). – 2015. – P. 1–12.
- Федушко С. С. Методи та засоби комп'ютерно-лінгвістичного аналізу достовірності соціально-демографічних характеристик учасників віртуальних спільнот: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 10.02.21 – «Структурна, прикладна та математична лінгвістика» / Федушко С. С.; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Л., 2015. – 20 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.2183.9121.

Стаття надійшла до редакції 01.03.2016.

Після доробки 14.05.2016.

Федушко С. С.

Ассистент кафедры социальных коммуникаций и информационной деятельности Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

#### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕРИФИКАЦИИ СОЦИАЛЬНО-ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ УЧАСТНИКОВ ВИРТУАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

Решено важная задача разработки системы верификации социально-демографических данных участника виртуального сообщества на основе проведения компьютерно-лингвистического анализа информационного наполнения большой выборки украиноязычных виртуальных сообществ. Предметом исследования являются методы и средства проверки подлинности социально-демографических характеристик участников виртуальных сообществ на основе компьютерно-лингвистического анализа результатов их коммуникативного взаимодействия. Целью работы является проверка достоверности персональных данных, которые участники предоставляют в своих учетных данных на основе результатов компьютерно-лингвистического анализа информационных следов участников веб-сообществ. Для практической реализации поставленных задач разработана структура программного обеспечения для верификации социально-демографического портрета веб-участника. Предложен метод верификации персональных данных участника виртуального сообщества на основе анализа информационных следов участников виртуальных сообществ. Впервые разработан метод проверки достоверности персональных данных о участниках, что позволило спроектировать средство верификации социально-демографических характеристик участника веб-сообщества. В результате проведенных исследований разработана система верификации социально-демографических данных участников виртуальных сообществ, которая формирует верифицированные социально-демографические портреты этих участников виртуальных сообществ. Также представлены интерфейс разработанной системы верификации социально-демографических данных участников виртуальных сообществ. Полученные результаты системы позволяют повысить эффективность общего процесса управления веб-сообществами. Апробации разработанных методов и средств для решения задач в веб-администрировании сообщества приходится их результативность и эффективность. Количество фальшивых срабатываний системы верификации не превышает 18%.

**Ключевые слова:** система верификации, персональные данные, социально-демографические характеристики, анализ, участник, виртуальная сообщество.

Fedushko S. S.

Assistant of Social Communications and Information Activities Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

#### DEVELOPMENT OF VERIFICATION SYSTEM OF SOCIO-DEMOGRAPHIC DATA OF VIRTUAL COMMUNITY MEMBER

The important task of developing verification system of data of virtual community member on the basis of computer-linguistic analysis of the content of a large sample of Ukrainian virtual communities is solved. The subject of research is methods and tools for verification of web-members socio-demographic characteristics based on computer-linguistic analysis of their communicative interaction results. The aim of paper is to verifying web-user personal data on the basis of computer-linguistic analysis of web-members information tracks. The structure of verification software for web-user profile is designed for a practical implementation of assigned tasks. The method of personal data verification of web-members by analyzing information track of virtual community member is conducted. For the first time the method for checking the authenticity of web members personal data, which helped to design of verification tool for socio-demographic characteristics of web-member is developed. The verification system of data of web-members, which forms the verified socio-demographic profiles of web-members, is developed as a result of conducted experiments. Also the user interface of the developed verification system web-members data is presented. Effectiveness and efficiency of use of the developed methods and means for solving tasks in web-communities administration is proved by their approbation. The number of false results of verification system is 18%.

**Keywords:** system of verification, personal data, socio-demographic characteristics, analysis, member, virtual community.

#### REFERENCES

- Jones S. Cybersociety: Computer-mediated communication and community. Thousand Oaks, CA, Sage, 1995, pp. 1–34.
- Oldenburg R. Great good place: Cafes, coffee shops, community centers, beauty parlors, general stores, bars, hangouts, and how they get you through the day. NY, Paragon House, 2009, pp. 185–243.
- Ludlow P. Crypto anarchy, cyberstates, and pirate utopias. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2001, pp. 65–129.
- Arinze B., Ridings C., Gefen D. Some antecedents and effects of trust in virtual communities, *Journal of Strategic Information Systems*, 2002, No. 11, pp. 271–395.
- Rheingold H. The virtual community: Homesteading on the electronic frontier. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2000, pp. 169–229.
- Fedushko S., Syerov Yu. Alhorytm validatsiyi internet-imen korystuvachiv virtual'nykh spil'not, *Visnyk NU «LP»: Kompiuterni nauky ta informatsiyini tekhnolohiyi*. L'viv, 2011, No. 719, pp. 215–219.
- Fedushko S., Syerov Yu. Design of registration and validation algorithm of member's personal data, *International Journal of Informatics and Communication Technology*, 2013, Vol. 2, No. 2, pp. 93–98. DOI: 10.11591/ij-ict.v2i2.3960.
- Andrukhiv A., Sokil M., Fedushko S. Integrating new library services into the University Information System, *Library management*, 2014, No. 1 (6), pp. 79–87.
- Fedushko S., Bekesh J. Concept of Strategic Positioning for Travel Agency in Social Networks, *Open J. of Communications and Software*, 2014, Vol. 1(2), pp. 1–9.
- Fedushko S., Bardyn N. Algorithm of the cyber criminals identification, *Global Journal of Engineering, Design & Technology*, 2013, Vol. 2, No. 4, pp. 56–62.
- Fedushko S. Osoblyvosti vyznachennya ta opysu sotsial'no-demohrafichnykh kharakterystyk v sotsial'nykh komunikatsiyakh, *Visnyk NU «LP», Kompiuterni nauky ta informatsiyini tekhnolohiyi*, No. 694, L'viv, 2011, pp. 75–85.
- Peleschyshyn A., Fedushko S. Gender similarities and differences in online identity and Internet communication, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the Intern. Conf. «CSIT-2010»*. Lviv, 2010, pp. 195–198.
- Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member [Electronic resource], *Webology*, 2014, Vol. 11, No. 2, Article 126. Available at: <http://www.webology.org/2014/v11n2/a126.pdf>. DOI: 10.6084/m9.figshare.205664.
- Syerov Yu., Peleschyshyn A., Fedushko S. The computer-linguistic analysis of socio-demographic profile of virtual community member, *Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics*, 2013, Vol. 4 (1), pp. 1–13.
- Fedushko S., Peleschyshyn O., Peleschyshyn A., Syerov Yu. The verification of virtual community member's socio-demographic profile, *Advanced Computing: An International Journal*. – AIRCC, 2013, Vol. 4, No. 3, pp. 29–38. DOI: 10.5121/acij.2013.4303.
- Fedushko S., Peleschyshyn A., Korzh R., Syerov Yu. Verification of socio-demographic characteristics of virtual community members, / *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. Lviv-Slavske, 2014, pp. 632.
- Korzh R., Peleschyshyn A., Syerov Yu., Fedushko S. The cataloging of virtual communities of educational thematic [Electronic resource], *Webology*, 2014, Vol. 11, No. 1, Article 117, 16 p. Available at: <http://webology.org/2014/v11n1/a117.pdf>. DOI: 10.6084/m9.figshare.2056650.
- Fedushko S., Syerov Yu., Peleschyshyn A., Korzh R. Determination of the account personal data adequacy of web-community member, *Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics*, 2015, Vol. 15 (1), pp. 1–12.
- Fedushko S. S. Methods and means of computer-linguistic verification of web communities members socio-demographic characteristics. Thesis for a Ph. D degree in specialty 10.02.21 – structural, applied and mathematical linguistics. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2015, 20 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2183.9121 [in Ukrainian].



# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 629.764

Авдєєв В. В.

*Д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматизованого управління Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна*

#### ТОЧНІСТЬ І ЗАПАС СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РАКЕТИ

Розроблена методика отримання оцінок показників точності компенсації збурювального прискорення спираючись на лінійну стаціонарну в околі певної точки траєкторії модель плоского обертального руху ракети космічного призначення із врахуванням інерції виконавчого пристрою. Кількісно вони визначаються двома векторами похибок, координати яких – це нескладні аналітичні залежності від коефіцієнтів рівнянь руху і закону регулювання.

Метою дослідження є встановлення зв'язку між координатами векторів похибок і запасом стійкості системи на площині коренів характеристичного поліному, що дасть можливість обґрунтованого вибору коефіцієнтів закону регулювання на початковому етапі розробки системи управління.

Вперше з урахуванням специфіки ракети космічного призначення розроблена методика встановлення зв'язку між координатами векторів похибок при дії лінійного збурювального прискорення, коефіцієнтами закону регулювання, до якого входять чотири координати вектору стану, і запасом стійкості системи стабілізації обертального руху на площині коренів характеристичного поліному.

Визначені три незалежних координати векторів похибок, що дає можливість варіації коефіцієнта закону регулювання при кутовій швидкості ракети або рульового органу виходячи із критерію найбільшого запасу стійкості без зміни показників точності.

Результати роботи можуть бути використані для прийняття технічних рішень при проектуванні системи управління обертальним рухом ракети.

**Ключові слова:** похибки стабілізації, запас стійкості, закон регулювання.

#### НОМЕНКЛАТУРА

АС – автомат стабілізації;

ОУ – об'єкт управління;

РКП – ракета космічного призначення;

СС – система стабілізації;

ХП – характеристичний поліном;

$\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{a}^*$  – матриця об'єкту управління, системи стабілізації обертального руху ракети у площині ризику відповідно;

$a_{\psi\psi}$ ,  $a'_{\psi\psi}$ ,  $a_{\psi\delta}$  – коефіцієнти рівнянь обертального руху ракети у площині ризику;

$\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  – вектори коефіцієнтів при сигналі управління та збурювальному прискоренні;

$\mathbf{C}$  – матриця керуваності;

$e_{r0}$ ,  $e_{r1}$  – вектори похибок;

$e_{r01}$ ,  $e_{r11}$ ,  $e_{r13}$  – незалежні координати векторів похибок;

$g_1$ ,  $g_2$  – позначення в рівняннях (12), (13), (14);

$k_{\psi}$ ,  $k'_{\psi}$ ,  $k_{\delta}$ ,  $k'_{\delta}$  – коефіцієнти закону регулювання;

$m(t)$  – збурювальне прискорення залежно від часу  $t$ ;

$m_0$ ,  $\dot{m}_0$  – постійна складова  $m(t)$ , його похідна за часом;

$Q$ ,  $q_1 - q_4$  – характеристичний поліном, його коефіцієнти;

$s$  – змінна комплексного типу;

$T_{AC}$  – постійна часу автомата стабілізації;

$\mathbf{u}$  – управління – сигнал на виході регулятора;

$\mathbf{x}$  – вектор стану системи стабілізації обертального руху ракети;

$\delta$ ,  $\dot{\delta}$  – кут повороту рульового органу, його похідна за часом;

$\Delta$  – позначення у рівнянні (10);

$\eta$  – запас стійкості на площині коренів характеристичного поліному;



$\mu = 1/T_{AC}^2$ ;

$\nu$  – позначення в рівняннях (12), (14);

$\xi$  – коефіцієнт демпфування автомата стабілізації;

$\psi, \dot{\psi}$  – кут ризику ракети, його похідна за часом.

## ВСТУП

Особливість ракети комічного призначення (РКП) як об'єкта управління рухом в широкому протягом польоту діапазоні масово-інерційних характеристик, швидкостей і висоти, а також в наявності осциляторів, обумовлених кінцевою жорсткістю корпусу та коливаннями рідкого палива [1]. Це ускладнює задачу підтримання у заданих межах кінематичних параметрів при дії збурювальних факторів і нерідко в процесі проектування контурів управління вимагає прийняття компромісних рішень з метою досягнення заданих показників системи стабілізації (СС). Для проектування контурів управління найбільш поширено знайшли використання методи передатних функцій і частотних характеристик, кореневого годографа та аналітичного конструювання регуляторів [2]. Передатні функції зручні для оцінки точності стабілізації, частотні і кореневі – для оцінки запасу стійкості та швидкодії, тоді як метод аналітичного конструювання визначає параметри контуру управління виходячи з якості перехідного процесу компенсації збурень, яка кількісно характеризується критерієм переважно у вигляді інтегралу від квадратів координат вектору стану.

Об'єктом дослідження є контур управління СС плоского обертального руху РКП, предметом дослідження є залежність показників точності компенсації збурювальних факторів і запасу стійкості від параметрів контуру управління. Метою роботи є встановлення зв'язку між точністю стабілізації при дії лінійного збурення, запасом стійкості на площині коренів характеристичного поліному СС і коефіцієнтами закону регулювання.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Згідно прийнятому формалізму дослідження систем автоматичного регулювання їх прийнято розділяти на об'єкт управління (ОУ) і регулятор. Одна із особливостей РКП у тому, що рівняння збуреного руху в площині ризику і в площині тангажа однакові, тому під ОУ в даній роботі мається на увазі обертальний рух ракети як твердого тіла у площині ризику, з дослідження якого починається процес проектування СС [3]. З використанням методу заморожених коефіцієнтів [4] модель ОУ описується рівнянням:

$$\dot{x} = a \cdot x + b \cdot u + c \cdot m, \quad (1)$$

де координатами вектору стану  $x$  є кут ризику  $\psi$ , кутова швидкість  $\dot{\psi}$ , кут повороту руля курсу  $\delta$  і кутова швидкість  $\dot{\delta}$ , тобто  $x^T = [\psi \quad \dot{\psi} \quad \delta \quad \dot{\delta}]$ .

На вхід ОУ діє управління  $u$  – сигнал регулятора, залежність якого від координат вектору стану може бути встановлена різними методами, зокрема, методом аналітичного конструювання [2], модального управління [5] чи виходячи із показників точності компенсації дії збурювального обертального прискорення  $m$ , як це прийнято у даній

роботі. У випадку РКП його основними складовими є відхилення конструкції від геометричної і масової симетрії та боковий вітер на атмосферній ділянці польоту.

Функцію регулятора в СС виконує автомат стабілізації (АС), виходом якого є сигнал  $u$ , що входить в рівняння (1). Залежність  $u$  від координат вектору стану є закон регулювання.

Динамічні характеристики виконавчого пристрою АС прийнято включати в математичну модель ОУ [3], тому елементами матриці  $a$  (1) є не тільки традиційні коефіцієнти [3, 6]  $a_{\psi\psi}, a'_{\psi\psi}, a_{\psi\delta}$ , які залежать від параметрів РКП і траєкторії, а й постійна часу АС  $T_{AC}$  та коефіцієнт демпфування  $\xi$ :

$$a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{\psi\psi} & a'_{\psi\psi} & a_{\psi\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\mu & -\xi \cdot \mu \cdot T_{AC} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $\mu = 1/T_{AC}^2$ .

Збурення  $m$  (1) впливає тільки на кут ризику  $\psi$  та його похідні, а скалярне управління  $u$  – на кут повороту руля  $\delta$  і його похідні, тому  $4r1$  – матриці  $b$  і  $c$  такі:

$$b^T = [0 \ 0 \ 0 \ \mu], \quad c^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0]. \quad (3)$$

Ставиться задача розробити методику встановлення зв'язку між елементами вектору похибок СС при компенсації лінійного відносно часу збурення, запасом стійкості на площині коренів характеристичного поліному і коефіцієнтами закону регулювання.

Наявність такої методики дасть можливість на початковому етапі розробки СС визначати коефіцієнти закону регулювання виходячи із вимог точності і запасу стійкості.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Підтримання кінематичних параметрів РКП у заданих межах, тобто стабілізація руху, через широкий в процесі польоту діапазон параметрів та наявність осциляторів, обумовлених кінцевою жорсткістю корпусу та паливом у баках, є однією з найскладніших прикладних задач теорії управління [1, 3]. Для дослідження динамічних характеристик РКП як об'єкта управління розроблені методи використання апарату передатних функцій, частотних характеристик та кореневого годографа [3–5]. Побудовані області стійкості на площині коефіцієнтів закону регулювання [1, 6], враховані особливості роботи СС з використанням бортової цифрової машини при квантування рівня сигналів та дискретизації у часі [7].

Для зменшення енергетичних втрат РКП від дії аеродинамічних сил запропонований спосіб стабілізації, у якому замість традиційного закону регулювання у вигляді функції кутів і кутових швидкостей ризику і тангажа прийнято регулювання залежно від кутів ковзання та атаки [8], що знайшло використання у ракетах «Аріан», «Енергія» та «Зеніт».

Завдяки покращенню швидкодії і збільшенню ємності пам'яті бортових цифрових машин з'являється можливість з метою покращення показників СС ввести в традиційний закон регулювання доданки, пропорційні похідній за часом кутової швидкості [6, 9] та кута повороту руля. Показано, що це дає зменшення статичної похибки і тривалості перехідного процесу при збереженні заданого запасу стійкості на площині двох коефіцієнтів закону регулювання.

Аналіз доступних джерел показує, що питання встановлення зв'язку між точністю компенсації збурювального прискорення, запасом стійкості і коефіцієнтами закону регулювання для СС обертального руху РКП ще не знайшли достатнього висвітлення.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

#### 3.1 Перевірка керованості

Забезпечення стійкості СС обертального руху вибором коефіцієнтів закону регулювання і використання методів аналітичного конструювання регуляторів можливе за умови повної керованості ОУ [10]. Для ОУ (1), (2), (3) ця умова виконується, коли ранг матриці

$$C = [b : ab : a^2b : a^3b] \quad (4)$$

не дорівнює нулю. Після нескладних перетворень відповідно до (4) з урахуванням (2), (3) отримуємо:

$$\det C = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{\psi\delta} \cdot \mu \\ 0 & 0 & a_{\psi\delta} \cdot \mu & c_{24} \\ 0 & \mu & c_{33} & c_{34} \\ \mu & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{vmatrix} = -\mu^4 \cdot a_{\psi\delta}^2 \neq 0,$$

тобто умова повної керованості ОУ виконується.

#### 3.2 Точність СС

Кількісно цей показник прийнято характеризувати векторами похибок. Для їх отримання рівняння ОУ (1) слід доповнити залежністю управління  $u$  від координат вектору стану, яку називають законом регулювання.

Методи модального управління [5] і аналітичного конструювання регуляторів [2] визначають закон регулювання у вигляді лінійної функції координат вектору стану (1), який прийнято [3, 6] записувати як лінійну комбінацію кутів повороту РКП і руля курсу та їх похідних за часом:

$$u = k_{\psi} \cdot \psi + k'_{\psi} \cdot \dot{\psi} + k_{\delta} \cdot \delta + k'_{\delta} \cdot \dot{\delta}. \quad (5)$$

Із врахуванням (5) рівняння СС обертального руху РКП у площині рискання матиме вигляд

$$\dot{x} = a^* \cdot x + c \cdot m,$$

$$a^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{\psi\psi} & a'_{\psi\psi} & a_{\psi\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \mu \cdot k_{\psi} & \mu \cdot k'_{\psi} & \mu \cdot (k_{\delta} - 1) & \mu \cdot (k'_{\delta} - \xi \cdot T_{AC}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Матриці  $a^*$  (6) і  $c$  (3) будуть використані для визначення коефіцієнтів характеристичного поліному (ХП) і

відповідно його коренів, а також векторів похибок, які кількісно характеризують точність СС при дії збурювального прискорення  $m(t)$ .

Функція  $m(t)$  є випадковою і нестационарною [3], її характеристики уточнюються в результаті накопичення досвіду. На початковому етапі проектування для отримання нескладних аналітичних оцінок показників точності залежно від коефіцієнтів закону регулювання (5) ця функція може бути прийнята лінійною відносно часу  $t$ , тобто

$$m(t) = m_0 + \dot{m}_0 \cdot t. \quad (7)$$

У випадку збурення (7), для оцінки показників точності СС достатньо визначити два вектори похибок [10]:

$$e_{r0} = -(a^*)^{-1} \cdot c, \quad e_{r1} = -(a^*)^{-2} \cdot c, \quad (8)$$

де  $a^*$ ,  $c$  даються виразами (6) і (3) відповідно.

Вектори (8) визначають усталений рух після закінчення перехідного процесу:

$$x = e_{r0} \cdot (m_0 + \dot{m}_0 \cdot t) + e_{r1} \cdot \dot{m}_0. \quad (9)$$

Структура матриці  $a^*$  така, що при знаходженні елементів оберненої матриці  $(a^*)^{-1}$ , від якої залежать вектори похибок, утворюється чотири групи рівнянь, кожна з яких розв'язується незалежно. Це дає можливість отримати нескладні аналітичні вирази чотирьох координат векторів (8) через коефіцієнти (5) закону регулювання і рівнянь ОУ (1), (2):

$$e_{r0} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 1 - k_{\delta} \\ 0 \\ k_{\psi} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta = a_{\psi\psi}(k_{\delta} - 1) - k_{\psi} a_{\psi\delta}; \quad (10)$$

$$e_{r1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta} [a_{\psi\psi} \cdot (k_{\delta} - 1) - a_{\psi\delta} \cdot (k'_{\psi} \cdot (k_{\delta} - 1) - k_{\psi} \cdot (k'_{\delta} - \xi \cdot T_{AC}))] \\ 1 - k_{\delta} \\ \frac{1}{\Delta} [(1 - k_{\delta}) \cdot (a'_{\psi\psi} \cdot k_{\psi} - a_{\psi\psi} \cdot k'_{\psi}) - a_{\psi\psi} \cdot k_{\psi} \cdot (k'_{\delta} - \xi \cdot T_{AC})] \\ k_{\psi} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Координати вектору  $x$ , визначені спираючись на (9), (10), (11), після закінчення перехідного процесу збігаються з результатами чисельного інтегрування рівнянь (6) при дії збурення (7).

Вектори похибок встановлюють залежність статичної похибки СС при компенсації збурювального прискорення (7) від параметрів РКП і коефіцієнтів закону регулювання (5).

Аналіз показує, що із шести ненульових координат векторів (10), (11) незалежними між собою є тільки три. Звідси виходить, що один із коефіцієнтів закону регулювання (5) –  $k'_{\psi}$  або  $k'_{\delta}$  може бути призначений довільно при збереженні незмінними заданих значень координат векторів (10), (11).

Коли довільно призначається  $k'_{\delta}$ , то рівняння для знаходження решти коефіцієнтів закону регулювання (5) такі:

$$\left. \begin{aligned} e_{r11} \cdot g_2^2 \cdot k_{\psi} - a_{\psi\delta} \cdot g_1 \cdot k'_{\psi} &= -a'_{\psi\psi} \cdot g_1 + a_{\psi\delta} \cdot v \\ (e_{r13} \cdot g_2^2 - g_1 \cdot a'_{\psi\psi}) \cdot k_{\psi} + g_1 \cdot a_{\psi\psi} \cdot k'_{\psi} &= -a_{\psi\psi} \cdot v \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

$$\text{де } g_1 = \frac{er_{01} \cdot |a_{\psi\delta}|}{1 + er_{01} \cdot a_{\psi\psi}}, g_2 = |a_{\psi\delta}| - a_{\psi\psi} \cdot g_1, v = k'_\delta - \xi \cdot T_{AC}$$

Із системи рівнянь (12) визначаються коефіцієнти  $k_\psi, k'_\psi$ , а з урахуванням (10) коефіцієнт

$$k_\delta = 1 - g_1 \cdot k_\psi. \quad (13)$$

Якщо довільно призначається коефіцієнт закону регулювання (5)  $k'_\psi$ , то система рівнянь для знаходження решти коефіцієнтів має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} er_{11} \cdot g_2^2 \cdot k_\psi - a_{\psi\delta} \cdot v &= g_1 \cdot (a_{\psi\delta} \cdot k'_\psi - a'_{\psi\psi}) \\ (er_{13} \cdot g_2^2 - g_1 \cdot a'_{\psi\psi}) \cdot k_\psi + a_{\psi\psi} \cdot v &= -g_1 \cdot a_{\psi\psi} \cdot k'_\psi \end{aligned} \right\} (14)$$

Розв'язок (14) дає значення  $k_\psi$  та  $k'_\delta = v + \xi \cdot T_{AC}$ , а співвідношення (13) –  $k_\delta$ .

Співставлення систем (12), (14) показує, що залежність між коефіцієнтами при кутових швидкостях закону регулювання (5) однакова для обох варіантів вибору коефіцієнта, що призначається довільно; при цьому варіації  $k'_\psi$  чи  $k'_\delta$  не змінюють коефіцієнтів  $k_\psi, k_\delta$ .

Отже, коли пріоритетним показником СС є точність компенсації збурень, тобто задані значення незалежних координат векторів (10), (11)  $er_{01}, er_{11}, er_{13}$ , то коефіцієнти закону регулювання (5)  $k_\psi, k_\delta$  однозначно знаходяться із системи рівнянь (12), (13) або (14) відповідно до того який із решти коефіцієнтів  $k'_\psi$  чи  $k'_\delta$  є довільно вибраним.

Вибір значення  $k'_\delta$  (або  $k'_\psi$ ) не змінює вибраних показників точності СС ( $er_{01}, er_{11}, er_{13}$ ) і коефіцієнтів  $k_\psi, k_\delta$ , але, як показують розрахунки, впливає на її запас стійкості.

### 3.3 Запас стійкості

Під цим поняттям мається на увазі відстань  $\eta$  від уявної осі площини коренів ХП СС до найближчого кореня [10].

Як відомо, розрахунок коренів виконується у послідовності: математична модель, коефіцієнти ХП, корені.

Канонічний запис ХП системи четвертого порядку такий:

$$Q(s) = \det(a^* - s \cdot E) = s^4 + \sum_{i=1}^4 q_i \cdot s^{i-1}, \quad (15)$$

де  $s$  – змінна комплексного типу,  $E$  – одинична матриця,  $q_i$  – коефіцієнти ХП, їх залежність від елементів матриці  $a^*$  (6) визначається виразами:

$$q_1 = \mu \cdot [a_{\psi\psi} \cdot (k_\delta - 1) - a_{\psi\delta} \cdot k_\psi],$$

$$q_2 = \mu \cdot [a_{\psi\psi} \cdot (k'_\delta - \xi \cdot T_{AC}) - a_{\psi\delta} \cdot k'_\psi + (k_\delta - 1) \cdot a'_{\psi\psi}],$$

$$q_3 = \mu \cdot [(k'_\delta - \xi \cdot T_{AC}) \cdot a'_{\psi\psi} + 1 - k_\delta] - a_{\psi\psi},$$

$$q_4 = -[a'_{\psi\psi} + \mu \cdot (k'_\delta - \xi \cdot T_{AC})].$$

Запас стійкості  $\eta$  при варіаціях коефіцієнта закону регулювання (5)  $k'_\delta$  і постійних значеннях координат  $er_{01}, er_{11}, er_{13}$  векторів похибок (10), (11), а також коефіцієнтів  $k_\psi, k_\delta$  має максимум (рис. 1), який відповідає дійсному кореню кратності два ХП  $Q(s)$  (15). Залежність на рисунку 1 отримана при значеннях координат векторів (10), (11)  $er_{01} = 0,6378 c^2; er_{11} = -0,7840 c^3; er_{13} = 0,9387 c^3$ . Коефіцієнти  $k_\psi, k'_\psi$  закону регулювання (5) визначаються з рівнянь (12), при цьому для наведеного прикладу  $k_\delta = -0,4496, k_\psi = 9,19$ .

Відповідно до співвідношення (13) на площині  $k_\delta, k'_\psi$  має місце пряма лінія постійного значення координати  $er_{01}$  вектору (10). Можна показати також, що від вибору точки на цій прямій не залежить і координата  $er_{11}$  вектору похибок (11). Коли на цій прямій зафіксована певна точка, то цим визначені коефіцієнти  $k_\psi$  і  $k_\delta$  закону регулювання (5), а залежність між коефіцієнтами  $k'_\psi$  і  $k'_\delta$  встановлюється з першої координати вектору (11):

$$k'_\psi = \frac{er_{11} \cdot \Delta^2 + a'_{\psi\psi} \cdot (1 - k_\delta) + a_{\psi\delta} \cdot k_\psi \cdot (\xi \cdot T_{AC} - k'_\delta)}{(1 - k_\delta) \cdot a_{\psi\delta}}. \quad (16)$$

Критерієм для вибору точки на прямій (13) може бути запас стійкості СС і координата  $er_{13}$  вектору похибок (11). В ітераційному процесу визначення коефіцієнтів  $k'_\psi$  і  $k'_\delta$  виходячи із вимоги забезпечення найбільшого запасу стійкості  $\eta$  використовується співвідношення (16) і ХП  $Q(s)$  (15). Для даних ОУ (рисунок 1) залежність запасу стійкості від коефіцієнта  $k'_\delta$  є обернено пропорційною (рис. 2), тоді як координати  $er_{13}$  вектору похибок (11) – прямо пропорційною (в наведених межах  $k'_\delta$  вона зростає від  $0,930 c^3$  до  $0,976 c^3$ ). Значення коефіцієнта  $k'_\delta$  закону регулювання (5), при яких запас стійкості СС найбільший, пропорційні  $k_\delta$ , вони залежать також від постійної часу виконавчого пристрою  $T_{AC}$ .

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ

1. Кількісна оцінка точності СС у вигляді векторів похибок (10), (11).

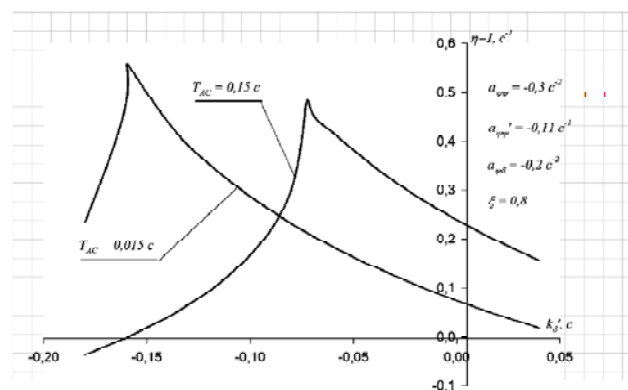


Рисунок 1.

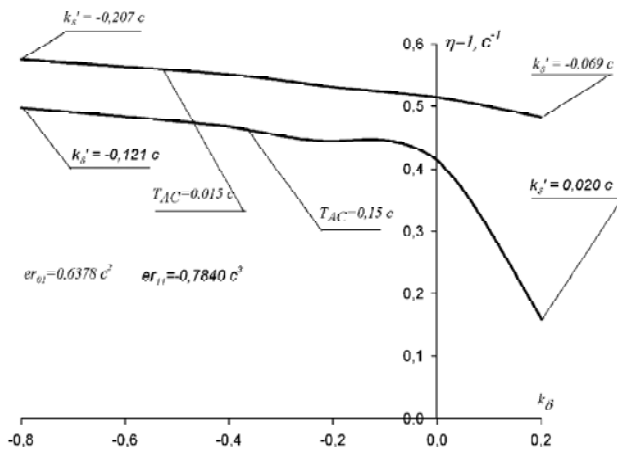


Рисунок 2.

2. Системи рівнянь (12), (14) та співвідношення (13) для визначення трьох коефіцієнтів закону регулювання при заданих значеннях трьох координат векторів похибок.

3. Необхідні для розрахунку запасу стійкості СС коефіцієнти ХП (15), виражені через параметри РКП та коефіцієнти закону регулювання.

4. Приклади залежності запасу стійкості від коефіцієнта закону регулювання при кутовій швидкості рульового органу (рис. 1) та від вибору точки на прямій (13) постійного значення координат векторів похибок  $er_{01}$ ,  $er_{11}$  (рис. 2).

5. Рівняння (16) для визначення одного із коефіцієнтів закону регулювання при кутовій швидкості, коли задані значення координат векторів похибок  $er_{01}$ ,  $er_{11}$  при фіксованій точці на прямій (13) їх постійного значення.

## 5 ОБГОВОРЕННЯ

Геометричні, масово-інерційні, траєкторні та інші параметри ракети кінцевими виразами перераховуються в коефіцієнти  $a_{\psi\psi}$ ,  $a'_{\psi\psi}$ ,  $a_{\psi\delta}$  ОУ, під яким мається на увазі обертальний рух у площині ризику. До основних динамічних характеристик АС, що традиційно входять до ОУ, відносяться постійна часу  $T_{AC}$  та коефіцієнт демпфування  $\xi$ . В околі вибраної точки траєкторії відомі оцінки збурювальних прискорень, спираючись на які і задану точність стабілізації кутового положення ракети, по отриманим у роботі кінцевим аналітичним співвідношенням, до яких входять п'ять названих параметрів ОУ, можна на початковому етапі розробки системи управління визначити коефіцієнти закону регулювання при кутах повороту ракети та рульового органу і один із коефіцієнтів при кутовій швидкості (ракети чи рульового органу). Варіація одного із коефіцієнтів при кутовій швидкості у законі регулювання дає можливість збільшити запас стійкості на площині коренів характеристичного поліному СС.

Окремого дослідження вимагає питання встановлення зв'язку між коефіцієнтами закону регулювання і вимогами до обмеження зверху потужності автомату стабілізації.

## ВИСНОВКИ

1. Отримані оцінки точності компенсації лінійного збурювального прискорення системою стабілізації плоского обертального руху ракети у вигляді нескладних аналітичних залежностей векторів похибок від її параметрів і коефіцієнтів закону регулювання.

2. Встановлено, що із шести ненульових координат векторів незалежними є тільки три. Це дає можливість вибирати один із коефіцієнтів закону регулювання при кутовій швидкості ракети або рульового органу без зміни показників точності виходячи із критерію найбільшого запасу стійкості на площині коренів характеристичного поліному.

3. Між коефіцієнтами закону регулювання при кутах повороту ракети і рульового органу при постійних значеннях двох координат векторів похибок має місце прямолінійна залежність, вибір точки на якій за критерієм запасу стійкості визначає коефіцієнти закону регулювання при кутових швидкостях ракети і рульового органу, а також значення третьої із незалежних координат векторів похибок.

Результати роботи можуть бути використані для прийняття технічних рішень при проектуванні системи управління обертальним рухом ракети.

## ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної теми № ФТФ-30-13 Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара «Методичне забезпечення систем керування і зв'язку. Моделювання і оптимізація складних процесів і систем», № держ. реєстрації 0114 U000189.

Автор висловлює подяку колективу філіалу кафедри систем автоматизованого управління у державному конструкторському бюро «Південне» за підтримку при виконанні роботи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Динамическое проектирование ракет. Задачи динамики ракет и космических ступеней : монография / [Игдалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков Н. В., Шептун Ю. Д. ; под. ред. акад. С. Н. Конюхова. – Д. : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та, 2010. – 264 с.
2. Красовский А. А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами / А. А. Красовский. – М. : Машиностроение, 1969. – 240 с.
3. Айзенберг Я. Е. Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов / Я. Е. Айзенберг, В. Г. Сухолюбый. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
4. Колесников К. С. Динамика ракет / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1980. – 376 с.
5. Кузовков Н. Т. Системы стабилизации летательных аппаратов (баллистических и зенитных ракет) / Н. Т. Кузовков. – М. : Высш. шк., 1976. – 364 с.
6. Авдеев В. В. Коэффициенты ошибок стабилизации вращательного движения ракеты / В. В. Авдеев // Техническая механика. – 2014. – № 3. – С. 71–78.
7. Динамика систем управления ракет с бортовыми цифровыми вычислительными машинами / под ред. М. С. Хитрика и С. М. Федорова. – М. : Машиностроение, 1976. – 272 с.
8. Управление по углам атаки и скольжения первых ступеней РН / [Айзенберг Я. Е., Златкин Ю. М., Калногуз А. Н. и др.] // Космична наука і технологія. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 61–80.
9. Авдеев В. В. Влияние закона управления и постоянной времени регулятора на запас устойчивости системы стабилизации вращательного движения ракет [Электронный ресурс] / В. В. Авдеев // Сб. докл. научной конф. «Информационные технологии в управлении сложными системами» (июнь 2013 г.). – С. 1–3. ISBN 978-966-02-6863-0.4.01
10. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.

Стаття надійшла до редакції 22.01.2016.

Після доробки 10.02.2016.

Авдеев В. В.

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного управления Днепропетровского национального университета им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина

#### ТОЧНОСТЬ И ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ

Разработана методика получения оценок показателей точности компенсации возмущающего ускорения с использованием линейной стационарной в окрестности определенной точки траектории модели плоского вращательного движения ракеты космического назначения с учетом инерции исполнительного устройства. Количественно они определяются двумя векторами ошибок, координаты которых выражаются несложными аналитическими зависимостями от коэффициентов уравнений движения и закона регулирования.

Цель исследования в установлении связи между координатами векторов ошибок и запасом устойчивости системы на плоскости корней характеристического полинома, что даст возможность обоснованного выбора коэффициентов закона регулирования на начальном этапе разработки системы управления.

Впервые с учетом специфики ракеты космического назначения разработана методика установления связи между координатами векторов ошибок при действии линейного возмущающего ускорения, коэффициентами закона регулирования, в который входят четыре координаты вектора состояния, и запасом устойчивости системы стабилизации вращательного движения на плоскости корней характеристического полинома.

Определены три независимых координаты векторов ошибок, что дает возможность вариации коэффициента закона регулирования при угловой скорости ракеты или рулевого органа исходя из критерия наибольшего запаса устойчивости без изменения показателей точности.

Результаты работы могут быть использованы для принятия технических решений при проектировании системы управления вращательным движением ракеты.

**Ключевые слова:** ошибки стабилизации, запас устойчивости, закон регулирования.

Avdejev V. V.

Dr. Sc., Professor, Professor of Department of Automated Control of O. Gontchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine

#### ACCURACY AND STABILITY FACTOR OF A ROCKET ROTATION STABILIZATION SYSTEM

Methodology of receipt of the exactness indexes estimations by equalization of a disturbing acceleration is worked out with the use of the linear model of a cosmic rocket rotation stationary in region of the determined trajectory point with taking in account of an actuating device inertia. In terms of quantity they are determined by two vectors of errors the coordinates of that are expressed by simple analytical dependences on coefficients of the motion equations and the law of control.

The purpose of the research is to establish a connection between the coordinates of vectors of errors and the system's stability factor on the plane of roots of characteristic polynomial, that will give a possibility of grounded choice of coefficients of a control law while the initial stage of the control system project development.

For the first time, taking in account the cosmic rocket specificity, methodology for establishing of connection between coordinates of error vectors by linear disturbing acceleration, control law coefficients, which include four coordinates of the state vector, and stability factor of stabilizing system of the rotation motion on the plane of a characteristic polynomial roots was developed.

We determined three independent coordinates of error vectors, which allows variation coefficient of a control law at the angular velocity of a rocket or a steering body on the basis of the criterion of the largest stability factor without changing the parameters of accuracy.

The results of the work can be used by the technical decision-making while designing the rocket control system of rotational motion.

**Keywords:** stabilization errors, stability factor, control law.

#### REFERENCES

1. Igdalov I. M. Kutchma L. D., Poljakov N. V., Sheptun Ju. D.; pod red. akad. S. N. Konjuchova Dinamitcheskoje proektirovanie raket. Zadatchi dinamiki raket i kosmitcheskych stupeney: monographia. D. Izd-vo Dnjepropetr. naz. un-ta, 2010, 264 p.
2. Krasovsky A. A. Analititcheskoje konstruirovanie konturov upravlenija letatelnyimi apparatami. Moscow, Mashinostrojenie, 1969, 240 p.
3. Ajzenberg J. E., Suchorebry V. G. Proektirovanie system stabilizazii nositelej kosmitcheskych apparatov. Moscow, Mashinostrojenie, 1986, 224 p.
4. Kolesnikov K. S. Dinamika raket. Moscow, Mashinostrojenie, 1980, 376 p.
5. Kuzovkov N. T. Systemy stabilizazii letatelnych apparatov (ballistitcheskych i zenitnych raket). Moscow, Vysshaja shk., 1976, 364 p.
6. Avdejev V. V. Koeffizienty oshibok stabilizazii vrashtchatelnogo dvizgenia raket, *Technicheskaja mehanika*, 2014, No. 3, pp. 71–78.
7. Dynamika system upravlenija raket s bortovymi zifrovimi vytschislitelnyimi mashinami, Pod red. M. S. Chitrika i S. M. Fedorova. Moscow, Mashinostrojenie, 1976, 272 p.
8. Ajzenberg J. E., Zlatkin Ju. M., Kalnoguz A. N., Batajev V. A., Kuzmin A. I. Upravlenije po uglam ataki i skolzgenija pervych stupeney RN, *Kosmitchna nauka i tehnologija*, 2002, Vol. 8, No. 1, pp. 61–80.
9. Avdejev V. V. Vlijanie zakona upravlenija i postojannoj vremeni regulatora na zapas ustojtchivosti systemy stabilizazii vrashtchatelnogo dvizgenia raket [Electron resource], *Sb. dokl. nautchnoj konf. 'Informatsionnye tehnologii v upravleniji slozgnymi sistemami' (June 2013)*. pp. 1–3. ISBN 978-966-02-6863-0. 4.01.
10. Spravotchnik po teorii avtomatitcheskogo upravlenija, Pod red. A. A. Krasovskogo. Moscow, Nauka, 1987, 712 p.

УДК 519.852.6

Мамедов К. Ш.<sup>1</sup>, Мамедова А. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р физ.-мат. наук, профессор Бакинського Государственного Университета и зав. отделом Института Систем Управления НАН Азербайджана, Азербайджан, Баку

<sup>2</sup>Докторант, научный сотрудник Института Систем Управления НАН Азербайджана, Азербайджан, Баку

## ПОНЯТИЯ СУБОПТИМИСТИЧЕСКОГО И СУБПЕССИМИСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ИХ В ИНТЕРВАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ БУЛЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В работе рассмотрена интервальная задача булевого программирования. Даны некоторые экономические интерпретации этой задачи, в результате которых построена экономико-математическая модель. Введены понятия допустимого, оптимистического, пессимистического, субоптимистического и субпессимистического решений задачи булевого программирования с целочисленными интервальными данными. Разработаны два алгоритма построения субоптимистического и субпессимистического решений этой задачи. Естественно, что эти решения могут отличаться от оптимистического и пессимистического решений. Поэтому необходимо оценить относительные погрешности найденных субоптимистических и субпессимистических решений от оптимистического и пессимистического, соответственно. С этой целью построена мажорирующая функция типа Лагранжа. Доказано, что минимальное значение этой функции является верхней границей оптимистического и пессимистического значений целевой функции, соответственно. Минимизацией этой функции находится верхняя граница субоптимистического и субпессимистического значений целевой функции. Проведены вычислительные эксперименты по решению задач различной размерности.

**Ключевые слова:** задача булевого программирования с целочисленными интервальными данными, оптимистическое решение, пессимистическое решение, субоптимистическое решение, субпессимистическое решение, максимальное приращение функционала, нелинейный штраф, функция Лагранжа, вычислительные эксперименты.

### НОМЕНКЛАТУРА

$\bar{c}_j, \bar{c}_j, \bar{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}, \bar{b}_i, \bar{b}_i$  – заданные целые неотрицательные числа;

$j_*$  – фиксированный номер;

$x_j$  –  $j$ -й неизвестный;

$X$  –  $n$ -мерный вектор;

$X^o$  – оптимистическое решение;

$f^o$  – оптимистическое значение;

$X^p$  – пессимистическое решение;

$f^p$  – пессимистическое значение;

$X^{so}$  – субоптимистическое решение;

$f^{so}$  – субоптимистическое значение;

$X^{sp}$  – субпессимистическое решение;

$f^{sp}$  – субпессимистическое значение;

$\bar{q}_i, \bar{q}_i$  – штраф (цена) за использование  $i$ -го ресурса для оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\omega^o, \omega^p$  – множества некоторых индексов при построении функции Лагранжа для оптимистической и пессимистической стратегий, соответственно;

$\omega^{so}, \omega^{sp}$  – множества индексов переменных, принимающих единичные значения при построении оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\bar{r}_i, \bar{r}_i$  – использованные  $i$ -е ресурсы для оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\bar{Q}_j, \bar{Q}_j$  – общий штраф за использование оставшихся ресурсов для неизвестных  $x_j$  оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\bar{f}_j, \bar{f}_j$  – приращение значения целевой функции для

$j$ -го объекта каждой единицы общего штрафа для оптимистической и пессимистической стратегий, соответственно;

$f_M^{so}, f_M^{sp}, f_C^{so}, f_C^{sp}$  – субоптимистическое и субпессимистическое значения функции (1), найденные методами максимального приращения и нелинейного штрафа, соответственно;

$\bar{f}^{so}, \bar{f}^{sp}$  – верхние границы субоптимистического и субпессимистического значений, соответственно;

$\delta_M^{so}, \delta_M^{sp}, \delta_C^{so}, \delta_C^{sp}$  – относительные погрешности субоптимистического и субпессимистического значения, найденные методом максимального приращения и нелинейного штрафа от своей верхней границы, соответственно;

$b_M^{so}, b_M^{sp}, b_C^{so}, b_C^{sp}$  – средние единицы уменьшения заданных правых частей системы ограничений, соответствующие субоптимистическому и субпессимистическому решениям, полученным методами максимального приращения и нелинейного штрафа;

$N_M^{so}, N_M^{sp}, N_C^{so}, N_C^{sp}$  – число наилучших найденных субоптимистических и субпессимистических решений среди задач одинаковой размерности;

$N$  – число различных задач одинаковой размерности.

### ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим следующую задачу:

$$\sum_{j=1}^n [\bar{c}_j, \bar{c}_j] x_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n [\bar{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}] x_j \leq [\bar{b}_i, \bar{b}_i] \quad (i = \overline{1, m}), \quad (2)$$

$$x_j = 0 \vee 1 \quad (j = \overline{1, n}). \quad (3)$$

Здесь предполагается, что  $\underline{c}_j, \bar{c}_j, \underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}, \underline{b}_i, \bar{b}_i$  ( $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ ) заданные целые неотрицательные числа. Задача (1)–(3) называется задачей булевого программирования с целочисленными интервальными данными или интервальная задача булевого программирования.

Целью данной работы является создание методов построения субоптимистического и субпессимистического решения задачи (1)–(3) (понятия оптимистического, пессимистического, субоптимистического и субпессимистического решения вводятся ниже).

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеются  $n$  объектов, каждый из которых можно или нельзя использовать. Если объект с определенным номером  $j_*$  ( $j_* \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) выбирается для использования, то возможное полученное значение прибыли принадлежит заданному целочисленному интервалу  $[\underline{c}_{j_*}, \bar{c}_{j_*}]$  ( $j_* \in \{1, 2, \dots, n\}$ ). При этом, необходимо затратить ресурсы из заданных целочисленных интервалов  $[\underline{a}_{ij_*}, \bar{a}_{ij_*}]$  ( $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ ). Допустим, что для использования заданных объектов выделен  $m$  тип общих ресурсов из заданных целочисленных интервалов  $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$  ( $i = \overline{1, m}$ ). Естественно, что необходимо выбирать для использования такие объекты, чтобы общие расходы не превышали бы заранее выделенные ресурсы  $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$  ( $i = \overline{1, m}$ ). При этом общая прибыль должна быть максимеальной. Очевидно, что введя переменные для каждого объекта  $j$  ( $j = \overline{1, n}$ ),

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й объект выбирается;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

получим математическую модель этой задачи в виде (1)–(3). Отметим, что поскольку задача (1)–(3) является обобщенной формой известной задачи булевого программирования, то она также входит в класс NP-полных, т.е. является «трудно решаемой». Поэтому для задачи (1)–(3) необходимо ввести различные понятия решений (допустимого, оптимистического, пессимистического, субоптимистического и субпессимистического решения) и разрабатывать соответствующие методы решений.

Естественно, что для каждого  $i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) должны выполняться условия

$$\sum_{j=1}^n \underline{a}_{ij} x_j > \bar{b}_i \quad (i = \overline{1, m}).$$

В противном случае, если для всех  $i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) эти условия не выполняются, то вектор  $X = (1, 1, \dots, 1)$  удовлет-

воряет системе неравенств (2) и будет оптимальным решением. С другой стороны, если для некоторого  $i_*$  выполняется соотношение  $\sum_{j=1}^n \underline{a}_{i_*j} > \bar{b}_{i_*}$ , то неравенство с этим номером  $i_*$  необходимо отбросить из системы (2), поскольку оно не является ограничением.

### 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Задача (1)–(3) интенсивно исследовалась авторами работ [1–12], начиная с 80-х годов XX века. В этих работах рассмотрены задачи с одним или со многими ограничениями булевого [1, 4, 5, 8, 9–16] и целочисленного [3, 5–7] программирования с коэффициентами из различных классов.

Отметим, что в рассмотренных работах [1–12] коэффициенты задач выбираются либо как неточные числа, либо из определенного класса. В этих работах выбором различных стратегий разработаны алгоритмы решения соответствующих задач. Эти стратегии в основном следующие:

I) В задаче только коэффициенты функции (1) выбираются из определенного класса и фиксируются. Очевидно, что в этом случае имеются достаточно большое число вариантов задач.

II) Функция (1) заменяется многочисленными функциями рассмотренного класса. Естественно, что в этом случае необходимо решить достаточно большое количество задач.

III) Коэффициенты функции (1) и ограничений (2) выбираются из определенного класса и в процессе решения фиксируются конкретные числа из этого класса.

IV) В задаче принимаются оптимистические и пессимистические стратегии и на их основе разрабатываются методы решения.

Однако, если коэффициенты целевой функции и ограничений являются не постоянными числами а интервалами, то прикладные задачи будут более реально моделированными.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сначала введем следующие понятия для задачи (1)–(3).

**Определение 1.** Двоичный  $n$ -мерный вектор  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  будем называть допустимым решением задачи (1)–(3), если для  $\forall a_{ij} \in [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$  и

$$\forall b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i], (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}) \text{ выполняются соотношения}$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}).$$

Из этого определения видно, что в отличие от задачи булевого программирования, в задаче (1)–(3) понятия оптимального решения, оптимального значения целевой функции и т. д. должны иметь другой смысл. Ибо для удовлетворения системы (2) должно соблюдаться условие непревышения суммы некоторых целочисленных интервалов от заданного целочисленного интервала и при этом сумма некоторых других целочисленных интервалов должна быть максимальной или как можно большей. С этой целью введем следующие определения.

**Определение 2.** Допустимое решение  $X^o = (x_1^o, x_2^o, \dots, x_n^o)$  задачи (1)–(3) назовем оптимистическим решением, если значение  $f^o = \sum_{j=1}^n c_j x_j^o$  будет максимальным (наибольшим). Число  $f^o$  назовем оптимистическим значением целевой функции.

**Определение 3.** Допустимое решение  $X^p = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p)$  задачи (1)–(3) назовем пессимистическим решением, если значение  $f^p = \sum_{j=1}^n c_j x_j^p$  будет максимальным (наибольшим). Число  $f^p$  называем пессимистическим значением целевой функции.

**Определение 4.** Допустимое решение  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$  задачи (1)–(3) называем субоптимистическим, если значение  $f^{so} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{so}$  будет максимальным по некоторому критерию. Число  $f^{so}$  назовем субоптимистическим значением целевой функции.

**Определение 3.** Допустимое решение  $X^p = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p)$  задачи (1)–(3) назовем пессимистическим решением, если значение  $f^p = \sum_{j=1}^n c_j x_j^p$  будет максимальным (наибольшим). Число  $f^p$  называем пессимистическим значением целевой функции.

**Определение 4.** Допустимое решение  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$  задачи (1)–(3) называем субоптимистическим, если значение  $f^{so} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{so}$  будет максимальным по некоторому критерию. Число  $f^{so}$  назовем субоптимистическим значением целевой функции.

**Определение 5.** Допустимое решение  $X^{sp} = (x_1^{sp}, x_2^{sp}, \dots, x_n^{sp})$  задачи (1)–(3) назовем субпессимистическим, если значение  $f^{sp} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{sp}$  будет максимальным по некоторому критерию. Число  $f^{sp}$  назовем субпессимистическим значением целевой функции.

Отметим, что критерии, упоминающиеся в определениях 4 и 5, приводятся ниже.

Учитывая вышеприведенную интерпретацию задачи (1)–(3), для построения субоптимистического и субпессимистического решения в работе [19] выведены следующие критерии:

$$j_* = \arg \max_j \frac{c_j}{\max_i a_{ij}}, \quad (4)$$

$$j_* = \arg \max_j \frac{c_j}{\max_i a_{ij}}. \quad (5)$$

При оптимистической и пессимистической стратегии номер неизвестного  $j_*$ , для которого можно принять  $x_{j_*}^{so} = 1$ , определяется по критериям (4) и (5), соответственно.

Решения  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$  и  $X^{sp} = (x_1^{sp}, x_2^{sp}, \dots, x_n^{sp})$  построенные по критериям (4) и (5) назовем, соответственно, субоптимистическим и субпессимистическим. Как видно из критериев (4) и (5), в процессе построения решения каждый раз выбирается такой номер неизвестного  $j_*$ , для которого приращение функционала будет максимальным. Поэтому в работе [19] этот метод называется методом **максимального приращения функционала**. Тогда субоптимистическое или субпессимистическое значения функции (1) будут соответственно равны

$$f^{so} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{so} \text{ и } f^{sp} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{sp}.$$

Однако, нам нужно найти субоптимистические решение  $X^o = (x_1^o, x_2^o, \dots, x_n^o)$  или субпессимистические решение  $X^p = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p)$ , для которых соответствующее значение функции (1) было не меньше, чем  $f^{so}$  или  $f^{sp}$  соответственно и одновременно соответствующие этим решениям правые части  $b_i (i = \overline{1, m})$  были не больше, чем исходные значения  $b_i (i = \overline{1, m})$ . С этой целью используем принцип дихотомии. Вначале приняв  $b_i := \lfloor (b_i + \bar{b}_i) / 2 \rfloor$ , ( $i = \overline{1, m}$ ), где  $\lfloor z \rfloor$  означает целую часть числа  $z$  и решая полученную задачу (1)–(3) находим субоптимистическое  $X^o = (x_1^o, x_2^o, \dots, x_n^o)$  или субпессимистическое решения  $X^p = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p)$  и соответствующие значения

$$f^o = \sum_{j=1}^n c_j x_j^o \text{ и } f^p = \sum_{j=1}^n c_j x_j^p$$

функции (1). Если  $f^o < f^{so}$  ( $f^p < f^{sp}$ ), то принимаем  $\underline{b}_i := b_i (i = \overline{1, m})$ , иначе, т.е. если  $f^p \geq f^{sp}$  ( $f^o \geq f^{so}$ ), то запоминаем  $x_j^{so} := x_j^o (x_j^{sp} := x_j^p) (j = \overline{1, n})$ ,

$f^{so} = f^o$  ( $f^{sp} = f^p$ ) и принимая  $\bar{b}_i := b_i (i = \overline{1, m})$  заново определяем  $b_i := \lfloor (b_i + \bar{b}_i) / 2 \rfloor$  ( $i = \overline{1, m}$ ). Далее решается очередная задача (1)–(3). Этот процесс вычисления продолжается до тех пор, пока при очередном делении пополам не получится  $\underline{b}_i := b_i (i = \overline{1, m})$ . Тогда последний за-



помненний  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$  ( $X^{sp} = (x_1^{sp}, x_2^{sp}, \dots, x_n^{sp})$ )  
будет субоптимистическим (субпессимистическим) реше-  
нием и  $f^{so}$  ( $f^{sp}$ ) субоптимистическим (субпессими-  
стическим) значением целевой функции рассмотренной  
задаче. Отметим, что вначале процесса деления попо-  
лам, запомнили заданные в правых частях системы (2)  
 $\bar{b}_i (i = \overline{1, m})$  как  $\bar{b}_i^o (i = \overline{1, m})$ , а потом поменяли  
 $\bar{b}_i (i = \overline{1, m})$ . Поэтому для выяснения качества разрабо-  
танного метода, необходимо проанализировать величину  
 $\Delta_i = \bar{b}_i^o - b_i (i = \overline{1, m})$  при проведении экспериментов с  
задачами различной размерности.

Теперь изложим другой метод для построения субоп-  
тимистического и субпессимистического решения зада-  
чи (1)–(3). Сначала запишем эту задачу в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^n [c_j, \bar{c}_j] x_j \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n [a_{ij}, \bar{a}_{ij}] x_j \leq b_i, \quad (i = \overline{1, m}), \quad (7)$$

$$x_j = 0 \vee 1 \quad (j = \overline{1, n}). \quad (8)$$

Здесь,  $\alpha_{ij} = a_{ij}/b_i$ ,  $\bar{\alpha}_{ij} = \bar{a}_{ij}/b_i$  ( $i = \overline{1, m}$   $j = \overline{1, n}$ ),  
 $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$ ,  $0 \leq \bar{\alpha}_{ij} \leq 1$ , ( $i = \overline{1, m}$ ), ( $j = \overline{1, n}$ ). Примем следу-  
ющие обозначения:

$$\underline{P}_j = (\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{mj})^T, \quad \bar{P}_j = (\bar{\alpha}_{1j}, \bar{\alpha}_{2j}, \dots, \bar{\alpha}_{mj})^T, \\ (j = \overline{1, n}), \quad P_o = (1, 1, \dots, 1)^T.$$

Процесс построения субоптимистического и субпес-  
симистического решения начинается с начального ре-  
шения  $X = (0, 0, \dots, 0)$ . Допустим необходимо построить  
субоптимистическое решение  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$   
задачи (9)–(11). (Процесс построения субпессимистичес-  
кого решения аналогичен и указан ниже). Если для неко-  
торого  $j_*$  принято  $x_{j_*}^{so} = 1$ , то в правых частях системы  
(10) остаются ресурсы  $P_o = (1 - \alpha_{1j_*}, 1 - \alpha_{2j_*}, \dots, 1 - \alpha_{mj_*})$   
для принятия очередного  $x_j^{so} = 1$  ( $j = \overline{1, n}$ ). Введем штраф  
(цена) за использование единицы остаточных ресурсов  
 $P_o$  для принятия очередного  $x_{j_*}^{so} = 1$ , ( $j = \overline{1, n}$ ). Для это-  
го необходимо учесть что, чем меньше оставшаяся часть  
ресурсов  $(1 - \alpha_{ij_*})$ , тем больше должен быть штраф  
(цена) за его дальнейшее использование. При этом с  
уменьшением оставшейся части ресурса  $i$  штраф (цена)  
должен расти быстрее. Такой принцип построения ре-  
шения, вообще говоря, создает возможность использо-

вания оставшихся ресурсов  $P_o$  равномерно и постро-  
ить наиболее лучшее решение. В качестве такого штра-  
фа мы принимаем

$$q_i = \frac{1}{1 - \alpha_{ij_*}}, \quad (i = \overline{1, m}). \quad (12)$$

Отметим, что при каждом очередном принятии  
 $x_{j_*} = 1$ , знаменатель штрафа (12) уменьшается. Следо-  
вательно, штраф (цена) дефицитных ресурсов растет  
быстрее по нелинейному закону.

Для вывода более общей формулы, примем следу-  
ющие обозначения:

$$\omega^{so} = \{j \mid x_j^{so} = 1\}, \quad \Omega = \{1, 2, \dots, n\} \quad (13)$$

$$r_i = \sum_{j \in \omega^{so}} \alpha_{ij}, \quad (i = \overline{1, m}) \quad (14)$$

Тогда в качестве штрафа (цена) за использование остав-  
шихся ресурсов  $P_o = (1 - r_1, 1 - r_2, \dots, 1 - r_m)$  (т. е. пра-  
вых частей системы (10)) вместо формулы (12) примем

$$q_i = \frac{1}{1 - r_i}, \quad (i = \overline{1, m}). \quad (15)$$

Отсюда видно, что с уменьшением оставшихся ре-  
сурсов  $1 - r_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) штраф (цена)  $q_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) за их ис-  
пользование возрастает быстрее нелинейным образом.  
Поэтому этот метод назван нами **методом нелинейного**  
**штрафа**. Очевидно, что в этих случаях использование  
дефицитных ресурсов ограничиваются. Тогда общий  
штраф за использование оставшихся ресурсов для неиз-  
вестных  $x_j$  составляет:

$$\underline{Q}_j = \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} q_i \quad (j \in \Omega). \quad (16)$$

При этом приращение значения функции (9) для каж-  
дой единицы общего штрафа для оптимистической стра-  
тегии будет

$$\bar{f}_j = \frac{\bar{c}_j}{\underline{Q}_j}, \quad (j \in \Omega). \quad (17)$$

Естественно, что для принятия  $x_{j_*}^{so} = 1$  нужно выби-  
рать  $j_*$  по критерию

$$j_* = \arg \max_{j \in \Omega} \{\bar{f}_j\} \text{ или } \max_{j \in \Omega} \{\bar{f}_j\} = \bar{f}_{j_*}. \quad (18)$$

Таким образом, используя критерии (18), можно по-  
строить субоптимистическое решение задачи (6)–(8) (или  
(9)–(11)) следующим образом. Вначале принимаем  
 $X^{so} = (0, 0, \dots, 0)$ . Далее, каждый раз в соответствии с кри-  
терием (18), определяется очередной номер неизвест-  
ных  $j_*$  и проверяется возможность принятия  $x_{j_*} = 1$ .

Этот процесс завершается после рассмотрения всех номеров  $j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ). Опишем этот процесс вычисления в более подробной форме.

Вначале, зафиксировав  $b_i := \bar{b}_i$ , ( $i = \overline{1,m}$ ) строится задача (9)–(11). Далее принимаем начальное решение  $X^{so} = (0,0,\dots,0)$ . Тогда по формуле (13), (14) и (15) получается  $\omega^{so} = \emptyset$ ,  $r_i = 0$ ,  $q_i = 1$  ( $i = \overline{1,m}$ ). После этого, используя формулу (16), (17) и (18), последовательно находится номер  $j_*$  и принимается  $\Omega := \Omega \setminus \{j_*\}$ . Если  $\frac{P_{j_*}}{Q_{j_*}} \leq P_0$ , то принимаем  $P_0 := P_0 - \frac{P_{j_*}}{Q_{j_*}}$ ,  $x_{j_*}^{so} = 1$  и  $\omega^{so} := \omega^{so} \cup \{j_*\}$ . Очевидно, что величины  $r_i, q_i$ , ( $i = \overline{1,m}$ ),  $\frac{P_j}{Q_j}, \bar{f}_j$  ( $j = \overline{1,n}$ ) и номер  $j_*$  будут принимать новые значения. Иначе т.е. если соотношение  $\frac{P_j}{Q_j} \leq P_0$  не выполняется хотя бы для одной координаты, то принимая  $x_{j_*}^{so} := 0$ ,  $\Omega := \Omega \setminus \{j_*\}$  и по формуле (18) определяем очередной номер  $j_*$ .

Процесс построения решения завершается, когда  $\Omega = \emptyset$ . В результате получается субоптимистическое решение  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$  и соответствующее субоптимистическое значение  $f^{so} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{so}$  функции (6).

Отметим, что вышеуказанным образом аналогично можно построить субпессимистическое решение задачи (9)–(11). Только в этом случае формулы (12)–(18) будут иметь следующий вид:

$$\bar{q}_i = \frac{1}{1 - \alpha_{ij_*}}, \quad (i = \overline{1,m}), \quad \omega^{sp} = \{j \mid x_j^{sp} = 1\},$$

$$\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$\bar{r}_i = \sum_{j \in \omega^{sp}} \bar{\alpha}_{ij}, \quad (i = \overline{1,m}), \quad \bar{q}_i = \frac{1}{1 - \bar{r}_i}, \quad (i = \overline{1,m}),$$

$$\bar{Q}_j = \sum_{i=1}^m \bar{\alpha}_{ij} \bar{q}_i \quad (j \in \Omega)$$

$$\bar{f}_j = \frac{c_j}{\bar{Q}_j}, \quad (j \in \Omega), \quad j_* = \operatorname{argmax}_{j \in \Omega} \left\{ \bar{f}_j \right\}.$$

Используя эти величины субпессимистическое решение  $X^{sp} = (x_1^{sp}, x_2^{sp}, \dots, x_n^{sp})$  задачи (6)–(8) (или (9)–(11)) строится аналогично построению субоптимистического решения  $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_n^{so})$ . В результате получаем субпессимистическое значение  $f^{sp}$  функции (6), т.е.

$$f^{sp} = \sum_{j=1}^n c_j x_j^{sp}.$$

Отметим, что использованное нами в данной работе понятие нелинейного штрафа (цена) впервые было введено в работе [17] для задач булевого программирования. Необходимо отметить, что при построении субоптимистического или субпессимистического решений задачи (6)–(8) в правых частях системы (7) использовали фиксированные целые числа  $b_i$  ( $b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$ ) ( $i = \overline{1,m}$ ). С другой стороны, наилучшие субоптимистические и субпессимистические решения получаются после рассмотрения всех целых чисел в интервале  $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$  ( $i = \overline{1,m}$ ). Очевидно, что, если длина интервала  $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$  ( $i = \overline{1,m}$ ) достаточно большая, то придется решать огромное число задач. Поэтому с целью уменьшения числа решаемых задач, будем применять принцип дихотомии для интервалов  $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$  ( $i = \overline{1,m}$ ). Этот принцип изложен в пункте 3 настоящей работы.

Отметим, что для оценки погрешностей найденных субоптимистических и субпессимистических решений от оптимистического и пессимистического значения нами построена соответствующая мажорирующая функция типа Лагранжа в следующей форме

$$L^o(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = \sum_{j \in \omega^o} \bar{c}_j + \sum_{i=1}^m (b_i - \sum_{j \in \omega^o} a_{ij}) \lambda_i,$$

$$L^p(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = \sum_{j \in \omega^p} c_j + \sum_{i=1}^m (b_i - \sum_{j \in \omega^p} \bar{a}_{ij}) \lambda_i.$$

$$\text{Здесь } \omega^o = \left\{ j \mid \bar{c}_j - \sum_{i=1}^m \bar{a}_{ij} \lambda_i > 0 \right\}, \quad \omega^p = \left\{ j \mid c_j - \sum_{i=1}^m \bar{a}_{ij} \lambda_i > 0 \right\},$$

$b_i$  ( $i = \overline{1,m}$ ) – фиксированные числа в интервале  $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$  ( $i = \overline{1,m}$ ).

Имеет место следующая теорема.

**Теорема.** Для оптимистического –  $f^o$  и пессимистического –  $f^p$  значений задачи (1)–(3) справедливы следующие соотношения.

$$f^o \leq \min_{\lambda_i \geq 0} L^o(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m), \quad f^p \leq \min_{\lambda_i \geq 0} L^p(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m).$$

Очевидно, что  $f^{so} \leq f^o$ ,  $f^{sp} \leq f^p$ . Из теоремы видно, что минимизируя функции  $L^o(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$  или  $L^p(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ , можно найти верхние границы  $\bar{f}^{so}$  и  $\bar{f}^{sp}$  для  $f^o$  и  $f^p$  соответственно. Следовательно, относительные погрешности  $\delta^{so}$  и  $\delta^{sp}$  для субоптимистического и субпессимистического значений оцениваются соответственно следующим образом:

$$\delta^{so} \leq \left( \bar{f}^{so} - f^{so} \right) / \bar{f}^{so}, \quad \delta^{sp} \leq \left( \bar{f}^{sp} - f^{sp} \right) / \bar{f}^{sp}.$$

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки качества разработанных методов, они были запрограммированы на языке Delphi 7. Разрабо-

таные программы использовались при проведении ряда вычислительных экспериментов по решению задач различной размерности. Коэффициенты решенных задач являются случайными целыми числами, удовлетворяющими следующим условиям:

$$0 \leq \underline{a}_{ij} \leq 999, \quad 0 < \bar{a}_{ij} \leq 999, \quad 0 < \underline{c}_j \leq 999, \quad 0 < \bar{c}_j \leq 999, \\ i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}.$$

Если оказывалось, что  $\bar{a}_{ij} < \underline{a}_{ij}$  или  $\bar{c}_j < \underline{c}_j$ , то принимаем  $\bar{a}_{ij} := \underline{a}_{ij} + 10$  и  $\bar{c}_j := \underline{c}_j + 10$  соответственно.

Кроме того, правые части ограничений  $\underline{b}_i$  и  $\bar{b}_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) определяются как

$$\underline{b}_i := \left[ \frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \underline{a}_{ij} \right], \quad \bar{b}_i := \left[ \frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \right] \quad (i = \overline{1, m}).$$

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных экспериментов представлены в таблицах 1–6, где

$$\delta_M^{so} = \left( \bar{f}^{so} - f_M^{so} \right) / \bar{f}^{so}, \quad \delta_C^{so} = \left( \bar{f}^{so} - f_C^{so} \right) / \bar{f}^{so},$$

$$\delta_M^{sp} = \left( \bar{f}^{sp} - f_M^{sp} \right) / \bar{f}^{sp}, \quad \delta_C^{sp} = \left( \bar{f}^{sp} - f_C^{sp} \right) / \bar{f}^{sp},$$

$$b_M^{so} = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m (\bar{b}_i - b_i^{so}(M)) \right), \quad b_C^{so} = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m (\bar{b}_i - b_i^{so}(C)) \right),$$

$$b_M^{sp} = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m (\bar{b}_i - b_i^{sp}(M)) \right), \quad b_C^{sp} = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m (\bar{b}_i - b_i^{sp}(C)) \right),$$

$$b_i^{so}(M) = \sum_{j=1}^n \underline{a}_{ij} x_j^{so}(M), \quad b_i^{so}(C) = \sum_{j=1}^n \underline{a}_{ij} x_j^{so}(C),$$

$$b_i^{sp}(M) = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j^{sp}(M), \quad b_i^{sp}(C) = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j^{sp}(C).$$

Здесь

$$X^{so}(M) = (x_1^{so}(M), x_2^{so}(M), \dots, x_n^{so}(M)),$$

$$X^{so}(C) = (x_1^{so}(C), x_2^{so}(C), \dots, x_n^{so}(C)),$$

$$X^{sp}(M) = (x_1^{sp}(M), x_2^{sp}(M), \dots, x_n^{sp}(M)),$$

$$X^{sp}(C) = (x_1^{sp}(C), x_2^{sp}(C), \dots, x_n^{sp}(C)).$$

являются субоптимистическим и субпессимистическим решениями, построенными методами максимального приращения и нелинейного штрафа, соответственно.

Таблица 1 – Значения функции (1) и их погрешности ( $m \times n = 20 \times 500$ )

$N$	1	2	3	4	5
$f_M^{so}$	4072,00	4046,00	4059,00	3952,00	4038,00
$f_C^{so}$	4099,00	4065,00	4082,00	3971,00	4048,00
$\bar{f}^{so}$	4113,00	4087,00	4111,00	3998,00	4067,00
$f_M^{sp}$	804,00	789,00	800,00	778,00	782,00
$f_C^{sp}$	811,00	798,00	813,00	793,00	793,00
$\bar{f}^{sp}$	826,00	815,00	827,00	807,00	811,00
$\delta_M^{so}$	0,0100	0,0100	0,0126	0,0115	0,0071
$\delta_C^{so}$	0,0053	0,0054	0,0083	0,0068	0,0059
$\delta_M^{sp}$	0,0266	0,0319	0,0326	0,0359	0,0358
$\delta_C^{sp}$	0,0182	0,0209	0,0169	0,0173	0,0222
$b_M^{so}$	11,45	16,90	16,35	20,95	11,60
$b_C^{so}$	10,10	18,85	20,35	23,40	16,75
$b_M^{sp}$	35,50	35,60	32,30	36,95	47,90
$b_C^{sp}$	34,95	36,70	36,30	33,80	47,20

Таблица 2 – Значения функции (1) и их погрешности ( $m \times n = 20 \times 1000$ )

$N$	1	2	3	4	5
$f_M^{so}$	8200,00	8182,00	8104,00	8081,00	8137,00
$f_C^{so}$	8251,00	8248,00	8171,00	8127,00	8192,00
$\bar{f}^{so}$	8276,00	8268,00	8195,00	8154,00	8218,00
$f_M^{sp}$	1632,00	1617,00	1616,00	1576,00	1606,00
$f_C^{sp}$	1655,00	1643,00	1635,00	1602,00	1623,00
$\bar{f}^{sp}$	1670,00	1660,00	1656,00	1617,00	1645,00
$\delta_M^{so}$	0,0092	0,0104	0,0111	0,0090	0,0099
$\delta_C^{so}$	0,0039	0,0036	0,0033	0,0038	0,0032
$\delta_M^{sp}$	0,0228	0,0259	0,0242	0,0254	0,0237
$\delta_C^{sp}$	0,0090	0,0033	0,0127	0,0093	0,0134
$b_M^{so}$	17,40	34,55	33,75	35,75	22,80
$b_C^{so}$	18,00	23,60	20,80	32,75	1685,00
$b_M^{sp}$	41,80	29,10	40,05	40,00	34,70
$b_C^{sp}$	36,75	38,10	47,20	39,20	32,05

Таблица 3 – Значения функции (1) и их погрешности ( $m \times n = 50 \times 500$ )

$N$	1	2	3	4	5
$f_M^{so}$	3943,00	3968,00	4031,00	4084,00	4007,00
$f_C^{so}$	3961,00	3986,00	4037,00	4103,00	4011,00
$\bar{f}^{so}$	3988,00	4025,00	4075,00	4137,00	4046,00
$f_M^{sp}$	776,00	775,00	765,00	796,00	782,00
$f_C^{sp}$	783,00	782,00	761,00	798,00	776,00
$\bar{f}^{sp}$	798,00	801,00	788,00	823,00	804,00
$\delta_M^{so}$	0,0113	0,0142	0,0108	0,0128	0,0096
$\delta_C^{so}$	0,0070	0,0107	0,0101	0,0104	0,0087
$\delta_M^{sp}$	0,0276	0,0325	0,0292	0,0328	0,0274
$\delta_C^{sp}$	0,0188	0,0237	0,0343	0,0304	0,0348
$b_M^{so}$	31,8400	38,3800	30,9400	34,9400	31,4800
$b_C^{so}$	31,66	41,12	35,52	33,24	35,54
$b_M^{sp}$	51,4200	61,7600	64,2400	49,9800	50,0600
$b_C^{sp}$	45,66	52,94	86,84	60,82	74,08

Таблица 4 – Значения функции (1) и их погрешности ( $m \times n = 50 \times 1000$ )

$N$	1	2	3	4	5
$f_M^{so}$	8148,00	7984,00	8244,00	7970,00	8099,00
$f_C^{so}$	8195,00	8015,00	8258,00	8010,00	8106,00
$\bar{f}^{so}$	8243,00	8063,00	8309,00	8056,00	8169,00
$f_M^{sp}$	1593,00	1575,00	1620,00	1560,00	1581,00
$f_C^{sp}$	1609,00	1583,00	1615,00	1566,00	1597,00
$\bar{f}^{sp}$	1633,00	1614,00	1654,00	1592,00	1623,00
$\delta_M^{so}$	0,0115	0,0098	0,0078	0,0107	0,0086
$\delta_C^{so}$	0,0070	0,0068	0,0064	0,0057	0,0081
$\delta_M^{sp}$	0,0245	0,0242	0,0206	0,0201	0,0259
$\delta_C^{sp}$	0,0147	0,0192	0,0236	0,0163	0,0160
$b_M^{so}$	42,6200	55,4800	34,8400	52,2400	44,1600
$b_C^{so}$	43,06	52,96	43,98	51,60	50,86
$b_M^{sp}$	71,3400	74,8600	69,9800	78,1600	72,9800
$b_C^{sp}$	65,86	85,08	101,02	82,86	74,92

Таблица 5 – Показатели эффективности методов

$m \times n$	20×100	20×200	20×500	20×1000
$N_C^{so}$	2	5	5	5
$N_M^{so}$	1	0	0	0
$N_C^{sp}$	3	1	5	5
$N_M^{sp}$	2	2	0	0

Таблица 6 – Показатели эффективности методов

$m \times n$	50×100	50×200	50×500	50×1000
$N_C^{so}$	5	4	5	5
$N_M^{so}$	0	0	0	0
$N_C^{sp}$	2	3	3	4
$N_M^{sp}$	3	2	2	1

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов, представленные в таблицах 1–6, еще раз подтверждают высокую эффективность разработанных методов.

Из выше приведенных таблиц видно, что для 40 случайно выбранных задач значения функции (1), найденные методом нелинейного штрафа, в большинстве случаев лучше, чем значения, определенные методом максимального приращения (эти методы изложены в разделе 3). Однако, в нескольких случаях субпессимистические значения найденные методом максимального приращения, были лучшими. Для задач размерностей  $20 \times 100$ ,  $20 \times 200$ ,  $50 \times 200$  оба метода дали одинаковые значения. Поэтому в таблицах 5 и 6 число соответствующих задач меньше пяти. С другой стороны, относительные погрешности субоптимистических значений в методе максимального приращения и нелинейного штрафа меняются в интервалах  $[0,0071, 0,0428]$  и  $[0,0032, 0,0398]$ , соответственно. А для субпессимистических значений, соответственно, находятся в интервалах  $[0,0201, 0,1195]$  и  $[0,0033, 0,1081]$ .

## ВЫВОДЫ

Исходя из таблицы и обсуждений можно сделать следующие выводы. В работе решена задача булевого программирования с интервальными коэффициентами. Введены понятия субоптимистического и субпессимистического решений этой задачи. Для построения этих решений нами предложены два метода, названные «Метод максимального приращения функционала» и «Метод нелинейного штрафа». При вычислительных экспериментах метод нелинейного штрафа в большинстве случаев дает меньшие относительные погрешности. Поэтому можно считать метод нелинейного штрафа более эффективным. Кроме того, заданные в правых частях системы (2) числа  $\bar{b}_i$  ( $i = 1, m$ ) уменьшены в среднем на 11–55 единиц для субоптимистических решений и на 16–78 единиц для субпессимистических решений. Это дает возможность использовать меньше выделенных ресурсов для реальных экономических задач.

## БЛАГОДАРНОСТІ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Института систем управления НАН Азербайджана «Разработка методов решения, алгоритмов и программных средств для решения различных классов задач целочисленного программирования» (номер гос. регистрации № 0101 Аз 00736). Отметим, что часть этой работы рассмотрена авторами в работах [18, 19].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Libura M. Integer programming problems with inexact objective function / M. Libura // *Contr. And Cybern.* – 1980. – Vol. 9, № 4. – P. 189–202.
2. Ватолин А. А. О задачах линейного программирования с интервальными коэффициентами / А. А. Ватолин // *ЖВМ и МФ.* – 1984. – Т. 24, № 11. – С. 1629–1637.
3. Семенова Н. В. Решение одной задачи обобщенного целочисленного программирования / Н. В. Семенова // *Кибернетика.* – 1984. – № 5. – С. 25–31.
4. Леонтьев В. К. Устойчивость решений в задачах линейного булева программирования. / В. К. Леонтьев, К. Х. Мамутов // *ЖВМ и МФ.* – 1988. – Т. 28, № 10. – С. 1475–1481.
5. Рошин В. А. Вопросы решения и исследования одного класса задач неточного целочисленного программирования / В. А. Рошин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // *Кибернетика.* – 1989. – № 2. – С. 42–47.
6. Рошин В. А. Декомпозиционный подход к решению некоторых задач целочисленного программирования с неточными данными / В. А. Рошин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // *ЖВМ и МФ.* – 1990. – Т. 30, №5. – С. 786–791.
7. Сергиенко Т. И. Исследование устойчивости и параметрический анализ дискретных оптимизационных задач / Т. И. Сергиенко, Л. Н. Козерацкая, Т. Т. Лебедева. – К. : Наукова думка, 1995. – 170 с.
8. Emelichev V. A. On the radius of stability of a vector problem of linear Boolean programming / V. A. Emelichev, V. N. Krichko, D. P. Podkopaev // *Discrete Math. Appl.* – 2000. – Vol. 10. – P. 103–108.
9. Devyaterikova M. V. L-class enumeration algorithms for knapsack problem with interval data / M. V. Devyaterikova, A. A. Kolokolov // *International Conference on Operations Research: Book of Abstracts.* – Duisburg, 2001.
10. Девятерикова М. В. Алгоритмы перебора L-классов для задачи о рюкзаке с интервальными данными / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов. – Омск : Ом ГУ, 2001. – 20 с.
11. Devyaterikova M. V. L-class enumeration algorithms for one discrete production planning problem with interval input data / M. V. Devyaterikova, A. A. Kolokolov, A. P. Kolosov // *Computers and Operations Research.* – 2009. – Vol. 36, Issue 2. – P. 316–324.
12. Девятерикова М. В. Алгоритмы перебора L-классов для булевой задачи о рюкзаке с интервальными данными / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов, А. П. Колосов // *Материалы III Всероссийской конференции «Проблемы оптимизации и экономическое приложение».* – Омск : Изд-во Ом ГТУ, 2006. – С. 87.
13. Девятерикова М. В. Решение задачи о рюкзаке с интервальными данными на основе перебора L-классов / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов, А. П. Колосов // *Материалы III международной конференции «Ганаевские чтения».* – Минск, 2007. – С. 51–55.
14. Emelichev V. A. Stability criteria in vector combinatorial bottleneck problems in terms of binary realitions / V. A. Emelichev, K. G. Kuzmin // *Cybernetics and Systems Analysis.* – 2008. – Vol. 44, № 3. – P. 397–404.
15. Emelichev V. A. Quantitative stability analysis for vector problems of 0–1 programming / V. A. Emelichev, D. P. Podkopaev // *Discrete Optimitation.* – 2010. – №7. – P. 48–63.
16. Мамедов К. Ш. Один метод решения нечеткой задачи о ранце / К. Ш. Мамедов, С. Я. Гусейнов // *Современные проблемы информатизации Кибернетики и Информационные проблемы : респ. конф.: материалы.* – Баку, 2003. – Т. 3. – С. 10–13. (на азерб. языке)
17. Бабаев Дж. А. Методы построения субоптимальных решений многомерной задачи о ранце / Дж. А. Бабаев, К. Ш. Мамедов, М. Г. Мехтиев // *ЖВМ и МФ.* – 1978. – Т. 28, № 6. – С. 1443–1453.
18. Мамедов К. Ш. Понятия субоптимических и субпессимистических решений и методы построения их в задаче о ранце с интервальными данными / К. Ш. Мамедов, А. Г. Мамедова, С. Я. Гусейнов // *Изв. НАН Азербайджана.* – 2013. – № 6. – С. 164–173. (на азерб. языке)
19. Мамедов К. Ш. Методы построения субоптимических и субпессимистических решений в задаче Булевого программирования с интервальными данными / К. Ш. Мамедов, А. Г. Мамедова // *Изв. НАН Азербайджана.* 2014. – № 3. – С. 125–131.

Статья поступила в редакцию 10.02.2016.  
После доработки 27.02.2016.

Мамедов К. Ш.<sup>1</sup>, Мамедова А. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р фіз.-мат. наук, професор Бакинського Державного Університету і зав. відділом Інституту Систем Керування НАН Азербайджану, Азербайджан, Баку

<sup>2</sup>Докторант, науковий співробітник Інституту Систем Керування НАН Азербайджану, Азербайджан, Баку

#### ПОНЯТТЯ СУБОПТИМІСТИЧНОГО І СУБПЕСИМІСТИЧНОГО РІШЕНЬ ТА ПОБУДОВА ЇХ В ІНТЕРВАЛЬНІЙ ЗАДАЧІ БУЛЕВОГО ПРОГРАМУВАННЯ

У роботі розглянута інтервальна задача булевого програмування. Дано деякі економічні інтерпретації цієї задачі, у результаті яких побудована економіко-математична модель. Уведено поняття припустимого, оптимістичного, песимістичного, субоптимістичного і субпесимістичного рішень задачі булевого програмування з цілочисленими інтервальними даними. Розроблено два алгоритми побудови субоптимістичного і субпесимістичного рішень цієї задачі. Природно, що ці рішення можуть відрізнятися від оптимістичного і песимістичного рішень. Тому необхідно оцінити відносні погрішності знайдених субоптимістичних і субпесимістичних рішень від оптимістичного і песимістичного, відповідно. З цією метою побудована мажорувальна функція типу Лагранжа. Доведено, що мінімальне значення цієї функції є верхньою межею оптимістичного і песимістичного значень цільової функції, відповідно. Мінімізацією цієї функції знаходиться верхня межа субоптимістичного і субпесимістичного значень цільової функції. Проведено обчислювальні експерименти з вирішення задачі різної розмірності.

**Ключові слова:** задача булевого програмування з цілочисленими інтервальними даними, оптимістичне рішення, песимістичне рішення, субоптимістичне рішення, субпесимістичне рішення, максимальне збільшення функціонала, нелінійний штраф, функція Лагранжа, обчислювальні експерименти.

Mamedov K. Sh.<sup>1</sup>, Mamedova A. H.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr.Sc., Professor, Head of department of Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup>Scientific Worker of Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

#### DEFINITIONS OF SUBOPTIMISTIC AND SUBPESSIMISTIC SOLUTIONS AND THEIR CONSTRUCTION IN THE INTERVAL BOOLEAN PROGRAMMING PROBLEM

The work considers an interval examples of Boolean programming. Given some economic interpretation to this problem which result in the constructed economic-mathematical model. Introduced the definitions of optimistic, pessimistic, and suboptimistic, subpessimistic solutions for the Boolean programming problem with integer interval data are introduced. On the basis of the economic interpretation of the problem two algorithms are developed for the constructing of the suboptimistic and subpessimistic solutions of this task. Of course, when solutions may differ from suboptimistic and subpessimistic solutions. It is therefore necessary to estimate the relative error of the found to estimate the error of the suboptimistic and subpessimistic solutions from optimistic and pessimistic solutions appropriately. For this purpose Lagrange type majoring function is constructed. It is proved, that the minimum value of this function is the upper bound of the optimistic and pessimistic values of the objective function appropriately. Minimization of this function is in the upper border of the suboptimistic and subpessimistic values of the performance function. Numerous computational experiments on the examples with different dimensions are provided.

**Keywords:** Boolean programming problem, integer interval data, optimistic solution, pessimistic solution, suboptimistic solution, subpessimistic solution, non-linear penalty function, Lagrange function, computational experiments.

#### REFERENCES

1. Libura M. Integer programming problems with inexact objective function, *Contr. And Cybern.*, 1980, Vol. 9, No. 4, pp. 189–202.
2. Vatolin A. A. O zadachah linejnogo programmirovaniya s interval'nymi koeficientami, *ZhVM i MF*, 1984, Vol. 24, No. 11, pp. 1629–1637.
3. Semenova N. V. Reshenie odnoj zadachi obobshchennogo celochislennogo programmirovaniya, *Kibernetika*, 1984, No. 5, pp. 25–31.
4. Leont'ev V. K., Mamutov K. H. Ustojchivost' reshenij v zadachah linejnogo buleva programmirovaniya, *ZhVM i MF*, 1988, Vol. 28, No. 10, pp. 1475–1481.
5. Roshhin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Voprosy reshenija i issledovanija odnogo klassa zadach netochnogo celochislennogo programmirovaniya, *Kibernetika*, 1989, No. 2, pp. 42–47.
6. Roshhin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Dekompozicionnyj podhod k resheniju nekotoryh zadach celochislennogo programmirovaniya s netochnymi dannymi, *ZhVM i MF*, 1990, Vol. 30, No. 5, pp. 786–791.
7. Sergienko T. I., Kozerackaja L. N., Lebedeva T. T. Issledovanie ustojchivosti i parametricheskij analiz diskretnyh optimizacionnyh zadach. Kiev, Naukova dumka, 1995, 170 p.
8. Emelichev V. A., Krichko V. N., Podkopaev D. P. On the radius of stability of a vector problem of linear Boolean programming, *Discrete Math. Appl.*, 2000, Vol. 10, pp. 103–108.
9. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A. L-class enumeration algorithms for knapsack problem with interval data, *International Conference on Operations Research: Book of Abstracts*. Duisburg, 2001.
10. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A. Algoritmy perebora L-klassov dlja zadachi o rjuzake s interval'nymi dannymi. Omsk, Om GU, 2001, 20 p.
11. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A., Kolosov A. P. L-class enumeration algorithms for one discrete production planning problem with interval input data, *Computers and Operations Research*, 2009, Vol. 36, Issue 2, pp. 316–324.
12. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A., Kolosov A. P. Algoritmy perebora L-klassov dlja bulevoj zadachi o rjuzake s interval'nymi dannymi, *Materialy III Vserossijskoj konferencii «Problemy optimizacii i jekonomicheskoe prilozhenie»*. Omsk, Izd-vo Om GTU, 2006, P. 87.
13. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A., Kolosov A. P. Reshenie zadachi o rjuzake s interval'nymi dannymi na osnove perebora L-klassov, *Materialy III mezhdunarodnoj konferencii «Tanaevskie chtenija»*. Minsk, 2007, pp. 51–55.
14. Emelichev V. A., Kuzmin K. G. Stability criteria in vector combinatorial bottleneck problems in terms of binary realizations, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2008, Vol. 44, No. 3, pp. 397–404.
15. Emelichev V. A., Podkopaev D. P. Quantitative stability analysis for vector problems of 0–1 programming, *Discrete Optimization*, 2010, No. 7, pp. 48–63.
16. Mamedov K. Sh., Gusejnov S. Ja. Odin metod reshenija nechetkoj zadachi o rance / K.Sh.Mamedov, *Sovremennye problemy informatizacii Kibernetiki i Informacionnye problemy : resp. konf.: materialy*. Baku, 2003, Vol. 3, pp. 10–13. (na azerb. jazyke)
17. Babaev Dzh. A., Mamedov K. Sh., Mehtiev M. G. Metody postroenija suboptimal'nyh reshenij mnogomernoj zadachi o rance, *ZhVM i MF*, 1978, Vol. 28, No. 6, pp. 1443–1453.
18. Mamedov K. Sh., Mamedova A. G., Gusejnov S. Ja. Ponjatija suboptimicheskikh i subpessimisticheskikh reshenij i metody postroenija ih v zadache o rance s interval'nymi dannymi, *Izv. NAN Azerbajdzhana*, 2013, No. 6, pp. 164–173. (na azerb. jazyke)
19. Mamedov K. Sh., Mamedova A. G. Metody postroenija suboptimicheskikh i subpessimisticheskikh reshenij v zadache Bulevogo programmirovaniya s interval'nymi dannymi, *Izv. NAN Azerbajdzhana*, 2014, No. 3, pp. 125–131.

*Наукове видання*

**Радіоелектроніка,  
інформатика,  
управління**

**№ 3/2016**

**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 04.10.2016. Формат 60×84/8.  
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 12,79.  
Тираж 300 прим. Зам. № 921.*

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

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