

БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

УДК 681.785; 681.518.5; 504.064.3

С. М. Кватернюк

ОПТИМАЛЬНИЙ СИНТЕЗ ЗАСОБІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація: У роботі проаналізовано можливості вибору оптимальної структури засобів мультиспектрального телевізійного контролю та діагностування з метою забезпечення необхідної точності вимірювань біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, а також необхідної достовірності контролю стану неоднорідних біологічних середовищ. Задача оптимального вибору робочих довжин хвиль спектральних каналів та їх ширини засобів телевізійного вимірювального контролю та діагностики розв'язана за допомогою покрокової множинної регресії з включенням незалежних змінних. Наведено приклади розрахунку оптимальної структури засобів телевізійного вимірювального контролю та діагностики при використанні різних типів джерел випромінювання.

Ключові слова: мультиспектральний контроль, засіб контролю, телевізійний вимірювальний контроль, неоднорідне середовище

Аннотация: В работе проанализированы возможности выбора оптимальной структуры средств мультиспектрального телевизионного контроля и диагностирования с целью обеспечения требуемой точности измерений биофизических и структурных параметров неоднородных биологических сред, а также необходимой достоверности контроля состояния неоднородных биологических сред. Задача оптимального выбора рабочих длин волн спектральных каналов и их ширины средств телевизионного измерительного контроля и диагностики решена с помощью пошаговой множественной регрессии с включением независимых переменных. Приведены примеры расчета оптимальной структуры средств телевизионного измерительного контроля и диагностики при использовании различных типов источников излучения.

Ключевые слова: мультиспектральный контроль, средства контроля, телевизионный измерительный контроль, неоднородная среда

Abstract: The paper analyzes the possibilities of choosing the optimal structure of multispectral television monitoring and diagnostic tools to ensure the required accuracy of measurements of biophysical and structural parameters of inhomogeneous biological media, as well as the necessary reliability of monitoring the state of heterogeneous biological media. The problem of the optimal choice of operating wavelengths of spectral channels and their widths for television measurement control and diagnostics is solved by a stepwise multiple regression with inclusion of independent variables. Examples are given of calculating the optimal structure of television measuring instruments and diagnostics using different types of radiation sources.

Key words: multispectral control, means of control, television measurement control, inhomogeneous medium

Вступ

Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ здійснюється на основі обробки масиву мультиспектральних зображень досліджуваного об'єкту отриманих ПЗЗ камерою на n довжинах хвиль з вибраними діапазонами довжин хвиль у кожному з вимірювальних каналів. Вибір оптимальної кількості спектральних каналів, діапазону довжин хвиль кожного з каналів та необхідної роздільної здатності ПЗЗ-камери здійснюється при оптимізації структури вимірювального засобу на основі пошуку відмінностей при статистичній обробці спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбивання досліджуваних об'єктів, з апіорі відомим станом, що забезпечує необхідні параметри швидкодії, вірогідності контролю чи точності діагностування. Відмінність між придатним та непридатним об'єктом визначається, як відстань у n -вимірному мультиспектральному просторі для кожного пікселя з масиву мультиспектральних зображень. Крім того, координати у n -вимірному мультиспектральному просторі елементів зображення порівнюються з координатами шкали, що відповідають відомим станам досліджуваного об'єкту. Побудова оптимальних засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування полягає у виборі оптимальної кількості спектральних каналів, діапазону довжин хвиль кожного з каналів та необхідної роздільної здатності ПЗЗ-камери на основі статистичної обробки спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбивання досліджуваних об'єктів.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення достовірності контролю біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ з використанням методів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю.

Метою дослідження є підвищення достовірності контролю та точності діагностування параметрів

неоднорідних біологічних середовищ шляхом вдосконалення мультиспектральних методів телевізійного вимірювального контролю.

Спектральні характеристики джерел випромінювання і ПЗЗ-камери засобу мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю

Реалізувати метод мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю можливо двома способами: використавши широкосмугове джерело випромінювання і вузькосмугові фільтри на вході ПЗЗ камери або вузькосмугові джерела випромінювання і широкосмугову ПЗЗ камеру. У даній роботі використано другий підхід.

Перевіримо можливість використання у якості джерел випромінювання лінійки світлодіодів, лінійки лазерних діодів чи перестроюваного монохроматора з щілиною, що забезпечує ширину смуги пропускання 5, 10 та 20 нм. При цьому спектральні характеристики джерел випромінювання наведено на рис. 1.

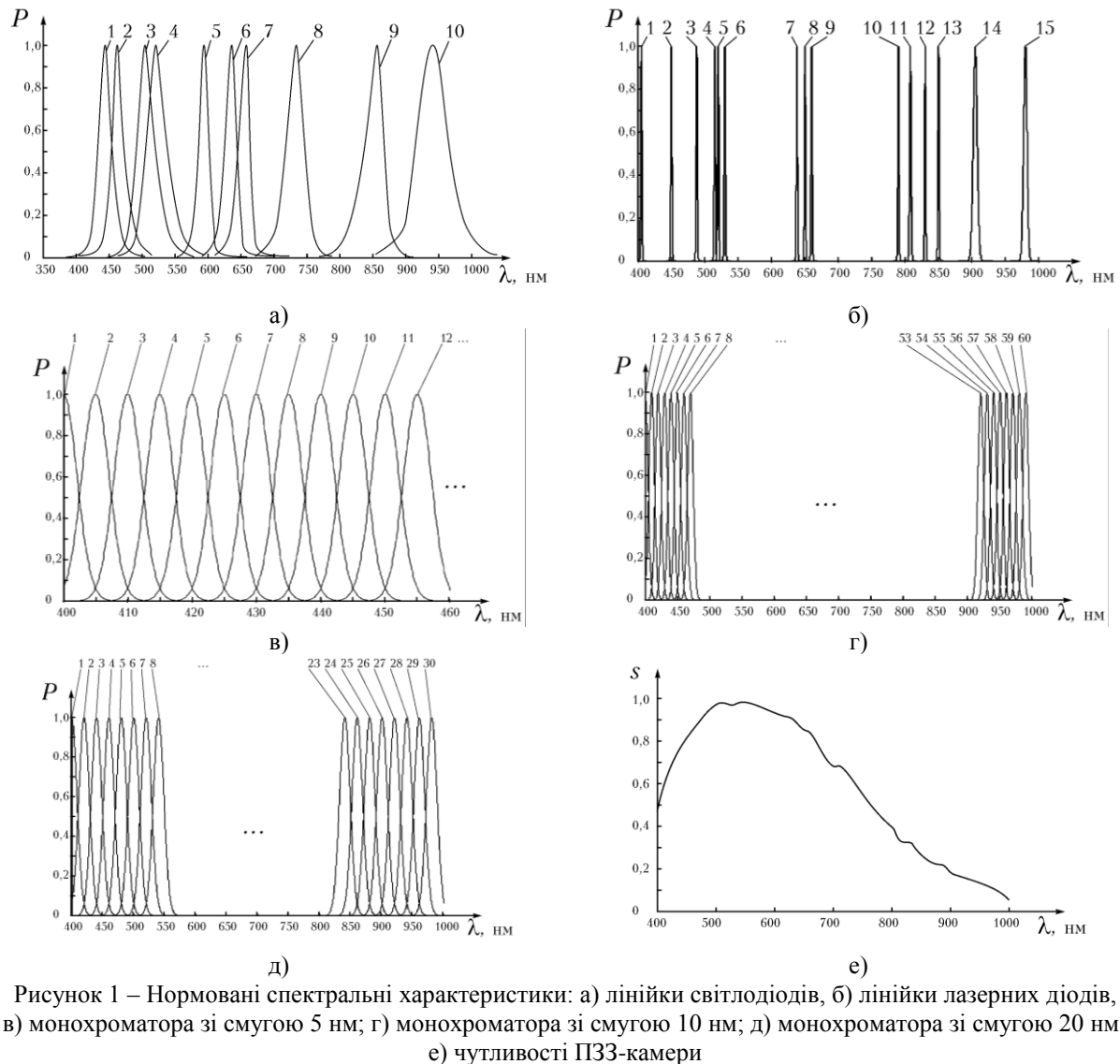


Рисунок 1 – Нормовані спектральні характеристики: а) лінійки світлодіодів, б) лінійки лазерних діодів, в) монохроматора зі смугою 5 нм; г) монохроматора зі смугою 10 нм; д) монохроматора зі смугою 20 нм; е) чутливості ПЗЗ-камери

На рис. 1,а наведено спектральні характеристики випромінювання лінійки світлодіодів наступних типів з такими параметрами домінуючої довжини хвилі та ширини смуги випромінювання на рівні 0,5: 1 – PM2B-1LDE, 455 нм (20 нм); 2 – PM2B-1LBE, 465 нм (20 нм); 3 – PM2B-1LCE, 505 нм (30 нм); 4 – PM2B-1LGE, 525 нм (30 нм); 5 – PM2B-1LAE, 592 нм (20 нм); 6 – PM2B-1LRE, 623 нм (20 нм); 7 – PM2B-1LME, 660 нм (20 нм); 8 – PM2B-1LEE, 730 нм (30 нм); 9 – SFH 4235, 850 нм (30 нм); 10 – TSAL4400, 940 нм (50 нм) [1–3];

На рис. 1,б наведено спектральні характеристики випромінювання лінійки лазерних діодів наступних типів з такими параметрами домінуючої довжини хвилі та ширини смуги випромінювання на рівні 0,5: 1 – SLD3236VF, 405 нм (2 нм); 2 – PL 450B, 450 нм (2 нм); 3 – PLT5 488, 488 нм (2 нм); 4 – PL 515,

515 нм (2 нм); 5 – PL520, 520 нм (2 нм); 6 – PLT5 520_B3, 530 нм (2 нм); 7– ML520G71, 638 нм (2 нм); 8 – LPC836, 650 нм (2 нм); 9 – ML101U29, 660 нм (2 нм); 10 – SLD231VL, 790 нм (2 нм); 11 – RLCO-808-5000-TO3, 808 нм (2,5 нм); 12 – GH0832BA2A, 830 нм (2 нм); 13 – PL-SLC-00-S20-C0, 850 нм (2 нм); 14 – SPL LL90, 905 нм (7 нм); 15 – SPL LL93, 980 нм (6 нм) [4–14].

На рис. 1,в–д наведено спектральні характеристики випромінювання для монохроматора МУМ-2 зі зміною довжини хвилі від 400 до 1000 нм, який використовує щілини, що забезпечують ширину смуги випромінювання на рівні 0,5, 10 та 20 нм. При цьому буде забезпечено 120, 60 та 30 спектральних каналів для вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

У якості ПЗЗ камери використаємо MDC140BW з такими параметрами: розділова здатність 1,3 Мп, спектральний діапазон 350-1000 нм, динамічний діапазон 66 дБ. Спектральна характеристика чутливості даної ПЗЗ камери наведена на рис. 1,е [15].

Математичне моделювання спектрів дифузного відбивання для опосередкованого вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ

Вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ проведемо на прикладі нормальних та патологічних ділянок біотканин шкіри людини. У якості математичної моделі для розв'язання прямої оптичної задачі розрахунку спектральних характеристик неоднорідного біологічного середовища при відомих його біофізичних та структурних параметрах використаємо моделі наведені у роботах [16, 17] з такими параметрами:

1. Нормальна інтактна шкіра людини: об'ємний вміст меланіну змінюється від 0,5% до 3% з кроком 0,0168%; об'ємний вміст крові у шарах дерми 2%; насиченість крові киснем 98%; гематокрит 45%; концентрація гемоглобіну 2,306 ммоль/л;

2. Патологічна ділянка шкіри людини з крововиливом: об'ємний вміст крові у дермі змінюється від 20% до 50% з кроком 0,2013 %, об'ємний вміст меланіну 1,8%;

3. Патологічна ділянка шкіри людини зі зміною оксигенації від 60% до 99% з кроком 0,26%, об'ємний вміст крові у шарах дерми 35%; об'ємний вміст меланіну 1,8%.

Для кожного з випадків отримано 150 спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбиття з роздільною здатністю 0,1 нм. На рис.2 показано спектральні характеристики при зміні параметрів відповідних біофізичних структурних параметрів у визначеному інтервалі із заданим кроком.

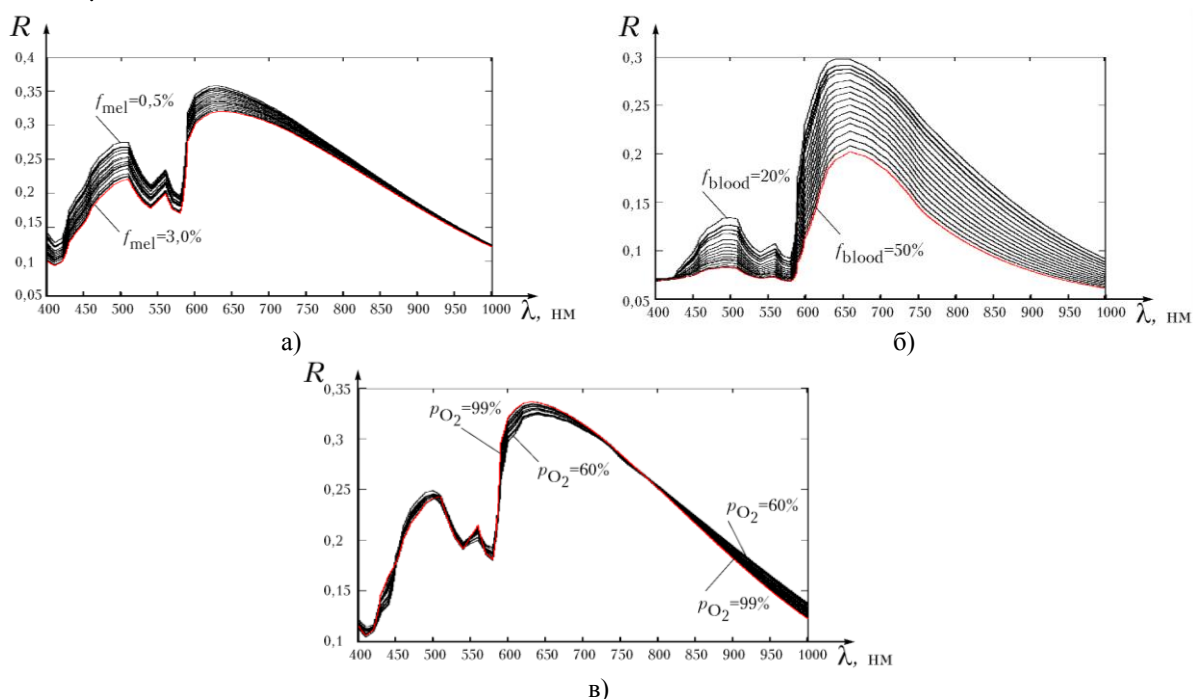


Рисунок 3 – Спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття неоднорідного біологічного середовища шкіри людини при заданих біофізичних та структурних параметрах

Отримавши спектральні характеристики об'єкту дослідження, джерела випромінювання та ПЗЗ камери розрахуємо мультиспектральні параметри [18]:

$$\begin{cases} M_1 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_1(\lambda_i) s(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda; \\ M_2 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_2(\lambda_i) s(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda; \\ \dots \\ M_n = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_n(\lambda_i) s(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda. \end{cases} \quad (1)$$

де $P_j(\lambda_i)$ – спектральна характеристика джерела випромінювання, $s(\lambda_i)$ – спектральна характеристика чутливості ПЗЗ камери, $R(\lambda_i)$ – спектральна характеристика коефіцієнту дифузного відбиття об'єкту дослідження.

Мультиспектральні телевізійні вимірювання здійснюються опосередковано. Похибку вимірювання мультиспектральних параметрів прийmemo рівною 2%, що відповідає використанню ПЗЗ камери з розрядністю 10 біт, співвідношенням сигнал-шум 66 дБ і роздільною здатністю 1,3 Мп. Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками при зміні об'ємної концентрації меланіну та використанні джерела випромінювання на основі лінійки світлодіодів наведено на рис.3.

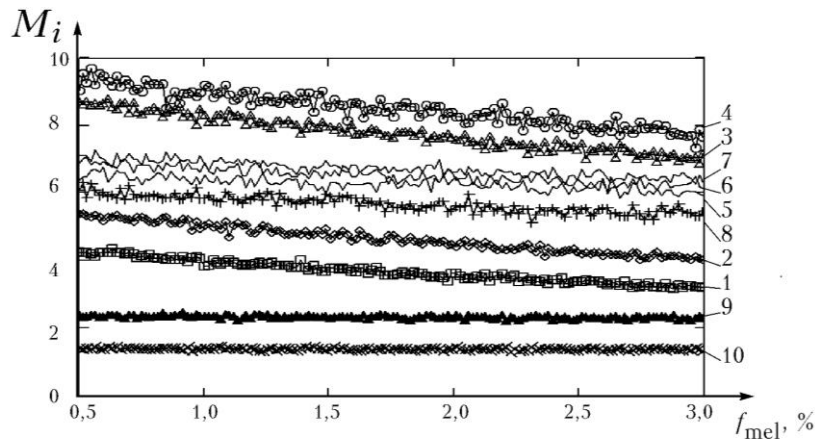


Рисунок 3 – Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками при використанні джерела випромінювання на основі лінійки світлодіодів

Вибір оптимальної структури засобів мультиспектрального телевізійного контролю та діагностування

Розв'язання оберненої оптичної задачі для визначення біофізичних і структурних неоднорідного біологічного середовища за мультиспектральними параметрами можна провести декількома способами:

- за допомогою розв'язку систем трансцендентних рівнянь;
- за допомогою множинної регресії;
- на основі нечіткої логіки;
- на основі нейромережі.

Розглянемо окремий випадок, коли необхідно знайти один з невідомих біофізичних чи структурних параметрів середовища, якщо інші біофізичні та структурні параметри розподілені за нормальним законом розподілу з відомим середньоарифметичним значенням та середньоквадратичним відхиленням ($M \pm СКВ$).

Вихідними даними для виконання множинної регресії є таблиця, у якій у якості вихідної (залежної) змінної є один з біофізичних чи структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, що змінювався у певному діапазоні з заданим кроком у ході математичного моделювання спектральних характеристик (розв'язку прямої оптичної задачі), а незалежними змінними є мультиспектральні параметри, отримані на етапі моделювання мультиспектральних телевізійних вимірювань.

Приклад таблиці вихідних даних для визначення об'ємної концентрації меланіну в шкірі наведено у табл.1 за умови використана ПЗЗ камери типу MDC140BW та джерела випромінювання на основі лазерних діодів.

Таблиця 1 – Приклад вихідних даних для опорядкованого вимірювання об'ємної концентрації меланіну за мультиспектральними параметрами з використанням множинної регресії

$f_{mel}, \%$	M_{405}	M_{450}	M_{488}	M_{515}	M_{520}	M_{530}	M_{638}	...	M_{980}
0,0050	0,1567	0,3781	0,5448	0,5443	0,5175	0,4556	0,6467	...	0,0830
0,0052	0,1535	0,3669	0,5507	0,5446	0,5131	0,4728	0,6488	...	0,0814
0,0053	0,1563	0,3808	0,5410	0,5440	0,5135	0,4666	0,6702	...	0,0828
0,0055	0,1482	0,3607	0,5364	0,5539	0,5231	0,4730	0,6716	...	0,0786
0,0057	0,1502	0,3615	0,5395	0,5135	0,5102	0,4571	0,6600	...	0,0850
0,0058	0,1496	0,3720	0,5418	0,5276	0,4971	0,4587	0,6694	...	0,0788
...
0,1505	0,1121	0,2802	0,4320	0,4494	0,4207	0,3891	0,5913	...	0,0784
0,0300	0,1098	0,2774	0,4065	0,4452	0,4056	0,3908	0,6104	...	0,0814

Множинну регресію виконуємо у програмі STATISTICA 6.0. Загальне призначення множинної регресії полягає у аналізі зв'язку між декількома незалежними змінними та залежною змінною. При цьому ступінь залежності незалежних змінних і залежної змінної виражається за допомогою коефіцієнта множинної регресії R.

З використанням покрокової регресії проаналізуємо незалежні змінні (у даному випадку, мультиспектральні параметри), що дозволяють найбільш точно визначити залежні змінні – біофізичні і структурні параметри неоднорідних біологічних середовищ. На початку необхідно визначити, які мультиспектральні параметри, що відповідають певним довжинам хвиль та спектральним діапазонам, дозволяють найбільш точно здійснювати непрямі (опосередковані) вимірювання одного з біофізичних чи структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ. Для випадку, наведеного у табл. 1 за мультиспектральними параметрами визначається об'ємна концентрація меланіну.

Використаємо процедуру виконання множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних, що здійснює вибір незалежних змінних на кожному кроці додаючи чи видаляючи їх з моделі виходячи із заданого користувачем критерію [19, 20]. Прийmemo значення критерію Фішера F у програмі STATISTICA по замовчуванню, а саме незалежна змінна включається у модель, якщо $F > 1$, і виключається з моделі, якщо $F = 0$. Задасмо в програмі STATISTICA 6.0 відображення результатів множинної регресії на кожному кроці, а саме виведення критерію Фішера F, коефіцієнту детермінації R та стандартної похибки рівняння регресії Δ .

На основі даних табл.1 програма виконала покрокову множинну регресію у 8 кроків поступово додаючи змінні зважаючи на їх внесок у точність визначення заданого параметру (у даному випадку об'ємної концентрації меланіну f_{mel}). Результати розрахунків на кожному кроці множинної регресії наведено у табл.2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку множинної регресії для опорядкованого вимірювання об'ємної концентрації меланіну з покроковим додаванням змінних

N	λ , нм	F	Δ	R
1	450	2210,499	0,001832198	0,96811581
2	450; 488	1735,674	0,001479228	0,97947625
3	450; 488; 405	1501,809	0,001304660	0,98418077
4	450; 488; 405; 515	1424,171	0,001164183	0,98751121
5	450; 488; 405; 515; 830	1218,834	0,001126579	0,98839077
6	450; 488; 405; 515; 830; 530	1068,931	0,001098883	0,98903481
7	450; 488; 405; 515; 830; 530; 660	959,7527	0,001074286	0,98959644
8	450; 488; 405; 515; 830; 530; 660; 638	871,2122	0,001055199	0,99003572

Перевіримо незалежні змінні, які використовуються при виконанні регресії на наявність кореляційного зв'язку між собою, тобто здійснимо перевірку наявності мультиколінеарності (табл. 3). Оскільки між мультиспектральними параметрами M_{405} , M_{450} , M_{488} , M_{515} , M_{530} , M_{638} , M_{660} отримано коефіцієнт кореляції понад 0,7, тобто існує сильний кореляційний зв'язок, то виникає явище мультиколінеарності.

Мультиколінеарність є загальною проблемою для багатьох методів кореляційного аналізу [19, 20]. Мультиколінеарність – це явище, що може виникнути при побудові множинної кореляційно-регресійної моделі при наявності лінійного взаємозв'язку між двома чи більше факторними ознаками [21]. Наявність мультиколінеарності не дозволяє побудувати якісну регресійну модель, оскільки призводить до зміщення оцінок регресії між факторними ознаками, що робить неможливим визначення чіткого впливу різних

факторів на результуючу ознаку. При цьому програма STATISTICA видає повідомлення про погану обумовленість матриці.

Таблиця 3 – Перевірка мультиколінеарності мультиспектральних параметрів для опорядкованого вимірювання об'ємної концентрації меланіну

	M ₄₀₅	M ₄₅₀	M ₄₈₈	M ₅₁₅	M ₅₃₀	M ₆₃₈	M ₆₆₀	M ₈₃₀
M ₄₀₅	1,000000	0,953907	0,929987	0,908744	0,875725	0,791316	0,774044	0,511367
M ₄₅₀	0,953907	1,000000	0,942450	0,925497	0,886978	0,796939	0,758432	0,494900
M ₄₈₈	0,929987	0,942450	1,000000	0,923531	0,877584	0,803897	0,744765	0,486039
M ₅₁₅	0,908744	0,925497	0,923531	1,000000	0,874725	0,808480	0,762579	0,489927
M ₅₃₀	0,875725	0,886978	0,877584	0,874725	1,000000	0,731873	0,679933	0,504686
M ₆₃₈	0,791316	0,796939	0,803897	0,808480	0,731873	1,000000	0,645976	0,476874
M ₆₆₀	0,774044	0,758432	0,744765	0,762579	0,679933	0,645976	1,000000	0,418668
M ₈₃₀	0,511367	0,494900	0,486039	0,489927	0,504686	0,476874	0,418668	1,000000

Мультиколінеарність не знижує якість прогнозованих значень показників, оскільки зростання кількості досліджуваних факторів підвищує значення коефіцієнта детермінації, а відповідно і точність прогнозу. Однак на визначення оцінок дійсних значень параметрів регресії мультиколінеарність впливає негативно та призводить до виникнення великих похибок. Якщо у аналіз включена велика кількість незалежних змінних, то виникнення проблеми мультиколінеарності може стати помітним не одразу, а вже після включення змінних у регресійне рівняння [21]. У випадку коли ця проблема виникає, це означає, що хоча б одна із залежних змінних (предикаторів) є зайвою при наявності інших предикаторів [19, 20]. Програма STATISTICA використовує декілька статистичних індикаторів такої надлишковості, зокрема, толерантність, а також деякі засоби для усунення надлишковості, наприклад, гребінчасту регресію. Для оцінювання отриманих рівнянь множинної регресії використовують аналіз залишків. Для усунення мультиколінеарності необхідне вилучення однієї чи декількох корельованих факторних ознак.

Таким чином, для усунення мультиколінеарності вилучимо змінні, між якими існує сильний кореляційний зв'язок і залишимо лише дві спектральні смуги з довжинами хвиль 450 і 830 нм. При цьому забезпечується $F=1194,476$; $\Delta=0,00176$ і $R=0,9706$.

Наступний приклад розрахунку множинної регресії проведемо на основі визначення коефіцієнту оксигенації крові в шкірі. Приклад вихідних даних для опорядкованого вимірювання оксигенації крові за мультиспектральними параметрами при використанні у якості джерела випромінювання лінійки світлодіодів наведено у табл. 4. Аналогічні таблиці побудовані при використанні у якості джерел випромінювання світлодіодів, лазерних діодів і монохроматора.

Таблиця 4 – Приклад вихідних даних для опорядкованого вимірювання оксигенації крові за мультиспектральними параметрами з використанням множинної регресії

PO ₂ , %	M ₄₅₅	M ₄₆₅	M ₅₀₅	M ₅₂₅	M ₅₉₂	M ₆₂₃	M ₆₆₀	...	M ₉₄₀
0,6000	0,9047	0,9720	0,9524	0,9469	0,9006	0,9083	0,8789	...	0,9976
0,6026	0,8851	0,9496	0,9742	0,9596	0,9039	0,9429	0,8849	...	0,9520
0,6052	0,9140	0,9904	0,9635	0,9681	0,9126	0,9343	0,9141	...	0,9572
0,6079	0,8572	0,9286	0,9434	0,9700	0,9162	0,9389	0,9153	...	0,9761
0,6105	0,8630	0,9314	0,9517	0,9028	0,8990	0,9129	0,8991	...	0,9937
0,6131	0,8728	0,9645	0,9599	0,9317	0,8805	0,9202	0,9137	...	0,9881
...
0,9874	0,9731	0,9506	0,9691	0,9682	0,9553	0,9588	0,9280	...	0,8711
0,9900	0,9331	0,9313	0,9104	0,9619	0,9317	0,9784	0,9537	...	0,8995

Використаємо процедуру виконання множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних. Результати розрахунку множинної регресії для опорядкованого вимірювання оксигенації крові з покроковим додаванням змінних та використанням у якості джерела випромінювання лінійки світлодіодів наведено у табл. 5.

За результатом покрокової множинної регресії з метою визначення оксигенації крові за мультиспектральними параметрами при використанні світлодіодів отримано 8 спектральних інтервалів (940; 592; 455; 465; 623; 660; 850; 505 нм), що дозволило досягти $F=68,236$; $\Delta=0,053$ і $R=0,891$. При перевірці на мультиколінеарність отримано коефіцієнти кореляції менше 0,7, тобто між цими змінними кореляційний зв'язок відсутній, що показує відсутність явища мультиколінеарності.

Таблиця 5 – Результати розрахунку множинної регресії для опорядкованого вимірювання оксигенації крові з покроковим додаванням змінних

N	λ , нм	F	Δ	R
1	940	177,1117	0,076983674	0,73808664
2	940; 592	164,3551	0,063641982	0,83125710
2	940; 592; 455	140,0078	0,058344212	0,86142911
3	940; 592; 455; 465	119,9360	0,055534634	0,87630185
4	940; 592; 455; 465; 623	101,4373	0,054395411	0,88253339
5	940; 592; 455; 465; 623; 660	88,23648	0,053529724	0,88731896
6	940; 592; 455; 465; 623; 660; 850	77,53894	0,053044671	0,89029877
7	940; 592; 455; 465; 623; 660; 850; 505	68,23609	0,052962900	0,89147438

Аналогічно, при використанні у якості джерел випромінювання лазерних діодів отримано 5 спектральних інтервалів (980; 905; 638; 660; 650 нм) при $F=126,12$; $\Delta=0,04987$ і $R=0,902$. При перевірці на мультиколінеарність отримано коефіцієнти кореляції менше 0,7, що показує відсутність явища мультиколінеарності. При використанні у якості джерела випромінювання монохроматора з шириною щілини 20 нм отримано 6 спектральних інтервалів (1000; 820; 480; 440; 400; 460 нм) при $F=40917,82$; $\Delta=0,0028$ і $R=0,99971$.

Висновки

Засоби мультиспектрального вимірювального контролю та діагностики біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ ґрунтуються на опосередкованому вимірюванні параметрів з використанням множинної регресії. При цьому постає задача оптимального вибору структури вимірювальних засобів, зокрема робочих довжин хвиль спектральних каналів та їх ширини. У даній роботі ця задача розв'язана за допомогою покрокової множинної регресії з включенням незалежних змінних. Показано приклади розрахунку оптимальної структури засобів телевізійного вимірювального контролю та діагностики при використанні у якості джерел випромінювання лінійки світлодіодів, лазерних діодів, а також монохроматора. Вибір тієї чи іншої структури вимірювальних засобів визначається необхідною точністю опосередкованого вимірювання необхідних біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, що в результаті забезпечить достатню достовірність контролю. Запропонований підхід до оптимального синтезу дозволяє вдосконалити засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування [18, 22].

Список використаних джерел

1. ProLight PM2B-1LxE 1W Power LED Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://www.micropik.com/PDF/PM2B-1Lxx-Rx.pdf>.
2. IR-Lumineszenzdiode (850 nm) mit hoher Ausgangsleistung High Power Infrared Emitter (850 nm). SFH 4235 Technical Datasheet. [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00221909_0.pdf.
3. High Power Infrared Emitting Diode, 940 nm, GaAlAs/GaAs TSAL4400. Technical Datasheet. [Electronic resource]. URL: <http://www.vishay.com/doc?81006>.
4. SONY Laser Diode 3236VF Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://www.datasheetspdf.com/datasheet/SLD3236VF.html>.
5. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PLT5 450B. Blue Laser Diode in TO56 Package Version 0.4 Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00251627_0.pdf/PLT5%20450B.pdf.
6. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PLT5 488. Cyan Laser Diode in TO56 Package Preliminary Version 0.2 Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00206440_0.pdf/PLT5%20488.pdf.
7. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PL 515 PRELIMINARY. Green Laser Diode in TO38 ICut Package. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.semicomvisual.com/wp-content/uploads/2015/04/pl_515datasheet.pdf.
8. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PL 520B. Green Laser Diode in TO38 ICut Package Version 0.2. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00234693_0.pdf/PL%20520.pdf.
9. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PLT5 520_B1_2_3. Green Laser Diode in TO56 Package Version 0.1. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://www.chips4light.com/assets/Uploads/PLT5-520-B1-2-3.pdf>.
10. Mitsubishi Laser Diode ML520G71. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL:

- <http://www.laser66.com/html/ML520G71.pdf>.
11. Mitsubishi Laser Diode ML1xx29. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <https://www.rairarubiabooks.com/related-pdf-datasheet-mitsubishi.html>.
 12. SONY Laser Diode SLD231VL. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/sony/a6802259.pdf>.
 13. Roithner Laser Technik GmbH. Laser Diode RLCO-808-5000-TO3. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_div/rlco-808-5000-to3.pdf
 14. Sharp Laser Diode GH0832BA2A . Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.sesl-sharp.com/Products/pdf/led_laser201303_e.pdf.
 15. ScopeTek Product Manual. – SCOPETEK. – 2015. – 116p.
 16. Моделювання спектральних характеристик шару епідермісу біотканини шкіри як об'єкту біомедичної діагностики / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, Ю. С. Любчик, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 218–222.
 17. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 50–56..
 18. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 15–22.
 19. Большаков А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учебное пособие для вузов. / А. А. Большаков, Р. Н. Каримов – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 522 с.
 20. Дубровская Л. И. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие / Л. И. Дубровская, Г. Б. Князев – Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. – 120 с.
 21. Азарова А. О. Економетрія : навчальний посібник / А. О. Азарова, Н. В. Саченюк-Кавецька, О. М. Роїк, Ю. В. Міронова. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 304 с..
 22. Спосіб визначення дистанції пострілу на основі мультиспектрального дослідження вогнепальних пошкоджень шкіри людини / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк; О. Є. Кватернюк [та ін.]// Патент України №117337 G01N 21/25 (2006.01) G01N 33/48 (2006.01)/ заявл. 27.12.2016; опубл. 26.06.2017; Бюл. № 12. – 5 с.

Відомості про авторів

Кватернюк Сергій Михайлович – к.т.н., доцент кафедри екології і екологічної безпеки; Вінницький національний технічний університет.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.738.5:004.056.5(045)

Р. В. Грищук, В. М. Мамарєв, К. В. Молодецька-Гринчук

КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОФІЛІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ АКТОРІВ У СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСАХ (НА ПРИКЛАДІ МІКРОБЛОГУ TWITTER)

Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова, Житомир

Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ

Житомирський національний агроєкологічний університет, Житомир

Анотація. Соціальні інтернет-сервіси (СІС) представляють собою популярний засіб соціальної комунікації учасників віртуальних спільнот – акторів. Одночасно СІС перетворилися на ефективний інструмент проведення інформаційних операцій, спрямованих проти інформаційної безпеки держави. Тому важливим науковим завданням є своєчасне виявлення ознак інформаційних операцій у СІС. На попередніх етапах досліджень розроблено метод побудови профілів інформаційної безпеки акторів у СІС, який дозволяє оцінити рівень їх загрози як можливого учасника інформаційної операції. Запропонований метод узагальнений на всі СІС і не враховує різноманітність набору атрибутів профілів у окремих сервісах. Отже, перспективним напрямком досліджень є адаптація даного методу для конкретного СІС і його верифікація для подальшого використання у системі забезпечення інформаційної безпеки держави. У статті виконано експериментальне дослідження методу на прикладі мікроблогу Twitter. Встановлено, що точність та швидкість побудови профілів залежить від алгоритму бінарної класифікації, який застосовується на етапі віднесення актора до одного із заданих класів загроз. Отримані результати збіжні з відомими академічними дослідженнями, що свідчить про доцільність застосування розробленого методу для автоматизації процедур раннього виявлення ознак інформаційних операцій у СІС.

Ключові слова: соціальний інтернет-сервіс, актор, інформаційна безпека, машинне навчання, бінарна класифікація, загрози, оцінювання.

Аннотация. Социальные интернет-сервисы (СИС) представляют собой популярное средство социальной коммуникации участников виртуальных сообществ – акторов. Одновременно СИС превратились в эффективный инструмент проведения информационных операций, направленных против информационной безопасности государства. Поэтому важной научной задачей является своевременное выявление признаков информационных операций в СИС. На предыдущих этапах исследований разработан метод построения профилей информационной безопасности акторов в СИС, который позволяет оценить уровень их угрозы как возможного участника информационной операции. Предложенный метод обобщен на все СИС и не учитывает разнообразие набора атрибутов профилей в отдельных сервисах. Итого, перспективным направлением исследований является адаптация данного метода для конкретного СИС и его верификация для дальнейшего использования в системе обеспечения информационной безопасности государства. В статье выполнено экспериментальное исследование метода на примере микроблога Twitter. Установлено, что точность и быстродействие построения профилей зависит от алгоритма бинарной классификации, который применяется на этапе отнесения актора к одному из заданных классов угроз. Полученные результаты совпадают с известными академическими исследованиями, что свидетельствует о целесообразности применения разработанного метода для автоматизации процедур раннего выявления признаков информационных операций в СИС.

Ключевые слова: социальный интернет-сервис, актор, информационная безопасность, машинное обучение, бинарная классификация, угрозы, оценивание.

Abstract. Social networking services (SNS) are a popular means of social communication for members of virtual communities - actors. At the same time, SNS have become an effective tool for conducting information operations directed against state information security. Therefore, an important scientific task is the timely detection of signs of information operations in the SNS. In the previous stages of research, a method for constructing profiles of information security actors in the SNS, which allows to assess the level of their threat as a possible participant in the information operation. The proposed method is generalized to all SNS and does not take into account the diversity of the set of attributes of profiles in individual services. Consequently, the perspective direction of research is the adaptation of this method for a specific SNS and its verification for further use in the system of providing information security of the state. An experimental study of the method is performed on the example of the microblogging Twitter. It is established that the accuracy and speed of the construction of profiles depends on the algorithm of the binary classification, which is used at the stage of assigning the actor to one of the given classes of threats. The obtained results coincide with the known academic studies, which testifies to the expediency of application of the developed method for automation of procedures for early detection of signs of information operations in the SNS.

Key words: social networking service, actor, information security, machine learning, binary classification, threats, evaluation.

Вступ

Соціальні інтернет-сервіси (СІС) нині перетворилися на ефективну контент-платформу, яка об'єднує учасників віртуальних спільнот – акторів у групи за їх інтересами [1, 2]. Інколи такими інтересами стають питання державотворення, які в свою чергу нерозривно пов'язані з інформаційною безпекою людини, суспільства та держави. Останнім часом СІС де-факто стають інструментом інформаційних операцій [3], оскільки в них цілеспрямовано поширюється недостовірний або викривлений контент. Наприклад, під час гібридної війни в Україні у мікроблозі *Twitter* агресором, колабораціоністами та їх прибічниками поширювався контент з метою маніпулювання суспільною думкою акторів, нарощування суспільної напруженості, зростання протестних настроїв, спонукання до міжнародної ворожнечі [3, 4]. Тому одним із важливих завдань, які покладаються на систему забезпечення інформаційної безпе-

ки держави, є своєчасне виявлення ознак інформаційних операцій, у тому числі й тих, що використовують як інструмент СІС.

Актуальність

Аналіз останніх досліджень і публікацій [5–8] показав відсутність загальноприйнятих методик аналізу профілів акторів у СІС. Відомо [3], що профіль актора у СІС і розроблений або поширюваний ним контент є одним з джерел інформації про його власника. Тому зазвичай, як показано в [9], встановлення профіля інформаційної безпеки актора в СІС виконується засобами методів машинного навчання, що дозволяє проводити класифікацію профілів акторів за різними ознаками [6]. У публікації [9], яка ґрунтується на дослідженнях *M. Pennacchiotti* та *A. M. Popescu* [7], запропоновано оцінювати профіль інформаційної безпеки актора, а саме рівень його загрози як можливого учасника інформаційних акцій на основі агрегування характеристик профіля в СІС. Розроблений підхід до побудови профілів інформаційної безпеки акторів узагальнений на різні види СІС. Але при цьому він не враховує різноманітність набору атрибутів профілів у окремих СІС, зокрема обмеженість інформації про актора і відсутність віртуальних спільнот у деяких сервісах, наприклад *Twitter*. З метою усунення виявлених протиріч в [9] запропоновано відносити актора до одного із попередньо заданих класів загрози, суть якого полягає у оцінюванні характеристик профілю актора у СІС за категоріями: атрибути профілю актора; активність публікації актором контенту; лінгвістичні ознаки контенту актора; зв'язки актора з учасниками віртуальної спільноти. Але на практиці даний метод потребує верифікації та адаптації для конкретного виду СІС залежно від набору атрибутів профілю актора, який використовується у ньому. Тому перспективним напрямком досліджень є адаптація методу побудови профілів інформаційної безпеки акторів для конкретного СІС і його верифікація для подальшого використання у системі забезпечення інформаційної безпеки держави.

Мета

Метою статті є класифікація профілів інформаційної безпеки акторів у СІС для практичного застосування відповідних методів завчасного виявлення ознак інформаційних операцій.

Задачі

1. Обґрунтувати вибір набору вхідних даних для класифікації профілів інформаційної безпеки акторів у СІС.
2. Провести експериментальне дослідження методу побудови профілів інформаційної безпеки акторів із врахуванням особливостей функціонування обраного СІС.

Вибір вхідних даних для класифікації профілів інформаційної безпеки акторів

Серед множини існуючих СІС для проведення досліджень обрано мережу мікроблогів *Twitter*. Таке рішення обумовлене її високою популярністю, пов'язаною з простотою публікації та швидким пошуком контенту за геш-тегами; використанням в організації масових вуличних протестів під час подій «арабської весни» [10]; доступністю підготовлених баз даних (БД) акаунтів акторів, що забезпечують можливість співставлення отриманих результатів з академічними дослідженнями.

Вхідними даними для проведення експерименту обрано БД акаунтів акторів мікроблогу *Twitter*, отриману в рамках проекту *TheFakeProject* [11], що виконувався групою дослідників *Institute of Informatics and Telematics of the Italian National Research Council* (Італія). Структурно база складається з множини акаунтів реальних користувачів та множини фейкових акаунтів [11] (рис. 1).

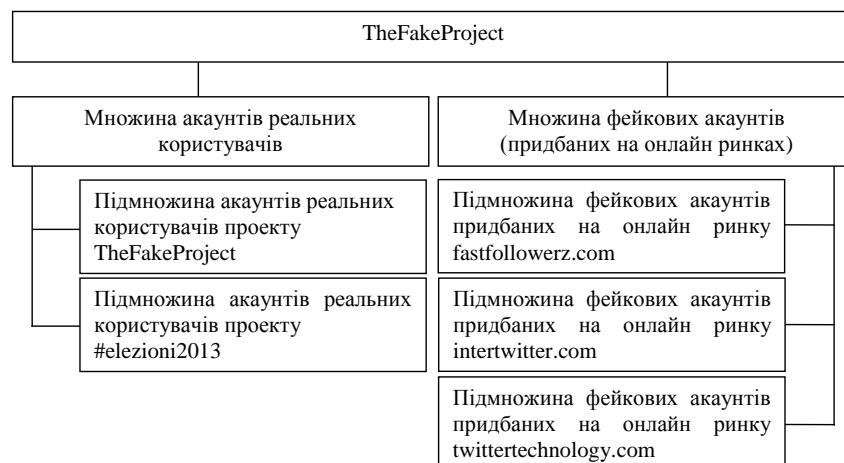


Рисунок 1 – Структура бази даних акторів мережі мікроблогу *Twitter* проекту *TheFakeProject*

Множина профілів реальних акторів створена шляхом агрегації результатів академічних досліджень проектів *TheFakeProject* та *#elezioni2013* (*University of Perugia and Sapienza University of Rome*). Множину фейкових облікових записів сформували придбані на онлайн ринках мережі мікроблогу *Twitter* (<http://fastfollowerz.com>, <http://intertwitter.com>, <http://twittertechnology.com>) 3000 фейкових акаунтів, які зберігаються у відповідній БД. Враховуючи принципові відмінності в концепції функціонування мережі мікроблогу *Twitter* від інших СІС, підхід до побудови профілів інформаційної безпеки акторів адаптовано з урахуванням наступних припущень та обмежень:

БД акаунтів користувачів мережі мікроблогу *Twitter* проекту *TheFakeProject* не є репрезентативною і може бути використана виключно на початковому етапі проектування модуля побудови профілів інформаційної безпеки системи забезпечення інформаційної безпеки держави;

у БД активність публікацій акторами контенту не синхронізована за часом і тематикою, що практично унеможливує віднесення актора до одного із класів загроз за результатами контент-аналізу повідомлень;

результати попередньої обробки даних не вносять вагомих похибок в результати класифікації.

Експериментальне дослідження методу побудови профілів інформаційної безпеки акторів із врахуванням особливостей функціонування мікроблогу *Twitter*

Для досягнення поставленої мети визначено основні етапи проведення експерименту, які зводяться до такого.

Етап 1. Селекція параметрів сигнатур. Для адекватності проведеного експерименту, при попередній підготовці даних, з БД акаунтів користувачів проекту *TheFakeProject* вилучені малоінформативні та унікальні параметри, які забезпечують однозначну класифікацію підкласів. У табл. 1 представлено атрибути профілів акторів у БД акаунтів, а у третьому стовпчику позначено обрані (+), виключені (-) та використані розрахункові зважені значення атрибутів (*).

Таблиця 1 – Атрибути профілів акторів у БД акаунтів

Категорії профілю інформаційної безпеки актора	Параметр	Обрано/ виключено/ розраховано	Причина виключення
Атрибути профілю актора	id	-	Унікальний
	name	-	Унікальний
	screen_name	-	Унікальний
	statuses_count	+	
	created_at	-	Малоінформативний
	url	-	Малоінформативний
	lang	-	Малоінформативний
	time_zone	-	Малоінформативний
	location	-	Малоінформативний
	default_profile	-	Малоінформативний
	default_profile_image	-	Малоінформативний
	geo_enabled	-	Малоінформативний
	profile_image_url	-	Малоінформативний
	profile_banner_url	-	Малоінформативний
	profile_use_background_image	-	Малоінформативний
	profile_background_image_url_https	-	Малоінформативний
	profile_text_color	-	Малоінформативний
	profile_image_url_https	-	Малоінформативний
	profile_sidebar_border_color	-	Малоінформативний
	profile_background_tile	-	Малоінформативний
	profile_sidebar_fill_color	-	Малоінформативний
	profile_background_image_url	-	Малоінформативний
	profile_background_color	-	Малоінформативний
	profile_link_color	-	Малоінформативний
	utc_offset	-	Малоінформативний
	protected	-	Малоінформативний
verified	-	Малоінформативний	
description	-	Малоінформативний	
updated	-	Малоінформативний	

Активність публікації актором контенту	created_at	-	Малоінформативний
	id	-	Малоінформативний
	text	-	Малоінформативний
	source	-	Малоінформативний
	user_id	-	Малоінформативний
	truncated	-	Малоінформативний
	in_reply_to_status_id	-	Малоінформативний
	in_reply_to_user_id	+	
	in_reply_to_screen_name	-	Малоінформативний
	retweeted_status_id	-	Малоінформативний
	geo	-	Малоінформативний
	place	-	Малоінформативний
	retweet_count	+	
	reply_count	-	Малоінформативний
	favorite_count	-	Малоінформативний
	num_hashtags	*	
	num_urls	*	
	num_mentions	*	
timestamp	-	Малоінформативний	
Лінгвістичні ознаки контенту актора	Публікацій акторами контенту не синхронізована за часом та тематикою публікацій, що робить лінгвістичні ознаки малоінформативними		
Зв'язки актора з учасниками СІС	followers_count	+	
	friends_count	+	
	favourites_count	+	
	listed_count	+	

Етап 2. Формування тестової множини. Аналіз БД проекту *TheFakeProject* показав, що за кількісним співвідношенням фейкових акаунтів і профілів реальних користувачів вона є незбалансованою. Тому на наступному етапі із записів БД методом рандомізації сформовано тестову множину, яка складається з 158 реальних (*real*) і 154 та фейкових (*fake*) акаунтів. Виходячи з результатів проведених досліджень [12] тестова множина сформована таким чином, щоб забезпечити вимогу збалансованості та мінімізувати вплив похибок перенавчання класифікаційних моделей.

Етап 3. Введення метрик оцінювання якості результатів класифікації. Нехай X – множина об'єктів, Y – кінцева множина класів, y^* – рішення щодо належності акторів до одного з класів. Класифікація об'єкта зводиться до відображення $y^* : X \rightarrow Y$. Передбачений клас об'єкта, отриманий в результаті відображення y^* , може або співпасти в реальному класом, або ні. Тоді на виході класифікатора можуть бути чотири наступні результати:

TP (*true positives*) – клас 1 вірно класифіковано;

FP (*false positives*) – клас 1 у результаті класифікації помилково віднесено до класу 2;

FN (*false negatives*) – клас 2 помилково класифіковано, як клас 1;

TN (*true negatives*) – клас 2 класифіковано вірно.

При цьому матриця спряженості бінарного класифікатора має вигляд, як подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця спряженості бінарного класифікатора

Істинний клас	Результат класифікації	
	Клас 1	Клас 2
Клас 1	TP	FP
Клас 2	FN	TN

З метою оцінювання результатів класифікації введено наступні метрики.

1) Достовірність (*accuracy*) – ступінь збігу результатів відображення з істинними класами

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

2) Точність (*precision*) показує, яка частка об'єктів від загального числа віднесених до даного класу класифікована вірно

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

3) Повнота (*recall*) – метрика, що відображає частку від загального числа об'єктів істинного класу, класифіковану коректно

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

4) Для адекватної оцінки результатів класифікації введено метрику, яка об'єднує інформацію про точність і повноту алгоритму, що суперечать один одному – *F*-міру. *F*-міра (*F-measure*) – інтегральний показник, що розраховується як гармонійне середнє між точністю і повнотою

$$F_{\text{measure}} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

5) *MCC* (*Matthew Correlation Coefficient*) – коефіцієнт кореляції, який враховує всі значення матриці спряженості

$$MCC = \frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP + FN)(TP + FP)(TN + FP)(TN + FN)}}$$

Етап 4. Експериментальна перевірка припущення про репрезентативність тестової множини. На основі введених метрик виконано перевірку припущення про репрезентативність сформованої тестової множини і виконано оцінювання відповідних похибок (табл. 3). Для цього побудову класифікаційних моделей проведено на основі алгоритмів машинного навчання *Random Forest*, *J48*, *Bayesian Network*, а результати класифікації порівнювалися за введеними на етапі 3 метриками.

Таблиця 3 – Похибки алгоритмів машинного навчання

Алгоритм	Множини профілів акторів	Метрики				
		<i>accuracy</i>	<i>precision</i>	<i>recall</i>	<i>F-measure</i>	<i>MCC</i>
<i>Random Forest</i>	<i>TheFakeProject</i>	0,994	0,997	0,990	0,994	0,987
	Тестова множина	0,994	0,994	0,994	0,994	0,987
	Похибка	0,000	0,003	-0,004	0	0
<i>J48</i>	<i>TheFakeProject</i>	0,992	0,991	0,992	0,992	0,983
	Тестова множина	0,987	0,987	0,987	0,987	0,974
	Похибка	0,005	0,004	0,005	0,005	0,009
<i>Bayesian Network</i>	<i>TheFakeProject</i>	0,960	0,965	0,954	0,960	0,921
	Тестова множина	0,971	0,972	0,971	0,971	0,943
	Похибка	-0,011	-0,007	-0,017	-0,011	-0,022

Враховуючи порядок формування тестової множини і отримані похибки введених метрик, які в найгіршому випадку не перевищують 0,022, вважатимемо, що сформована множина є репрезентативною відносно генеральної сукупності – БД *TheFakeProject*.

Етап 5. Вибір алгоритмів бінарної класифікації. Для цього виконано побудову класифікаційних моделей на основі наступних алгоритмів: *OneR*, *NaiveBayes*, *BayesNet*, *J48*, *RandomForest*, *DecisionTable*, *JRip*, *AdaBoost M1* (*OneR*), *AdaBoost M1* (*Naive Bayes*). Уніфікацію результатів відбору забезпечено використанням розробленої університетом Уайката системи аналізу даних *Weka* [13] **Ошибка! Источник ссылки не найден.** і реалізованими в її бібліотеках відповідними алгоритмами машинного навчання. Узагальнюючі здатності алгоритмів оцінювались з використанням процедури емпіричного оцінювання (*cross-validation*) з параметром розбиття 10. Структурна схема послідовності побудови класифікаційних моделей представлена на рис. 2. Отримані оцінки точності класифікації алгоритмів за введеними метриками подані в табл. 4.

За результатами аналізу табл. 4 можна зробити наступні висновки. Відносно прості алгоритми *OneR*, *NaiveBayes* за умови найвищої швидкодії забезпечують невисокі показники точності, достовірності та повноти класифікації. Найвищі показники за введеними метриками забезпечують алгоритми на базі дерев рішень *J48*, *RandomForest*. При цьому алгоритм *J48* по відношенню до *RandomForest* має значно вищу швидкодію.

Етап 6. Виділення класів загроз акторів. Тестову множину було поділено на наступні класи: реальний активний актор (*active_real*), реальний пасивний актор (*passive_real*), фейковий активний актор (*active_fake*), фейковий пасивний актор (*passive_fake*). Поділ на такі класи ґрунтується на припущенні про універсальність закону Меткалфа [14] і можливість його застосування не тільки для інформаційно-телекомунікаційних мереж, а й СІС як мереж соціальних взаємозв'язків акторів. Виходячи з такого при-

пущення, корисність актора як суб'єкта інформаційної операції пропорційна квадрату кількості його друзів.

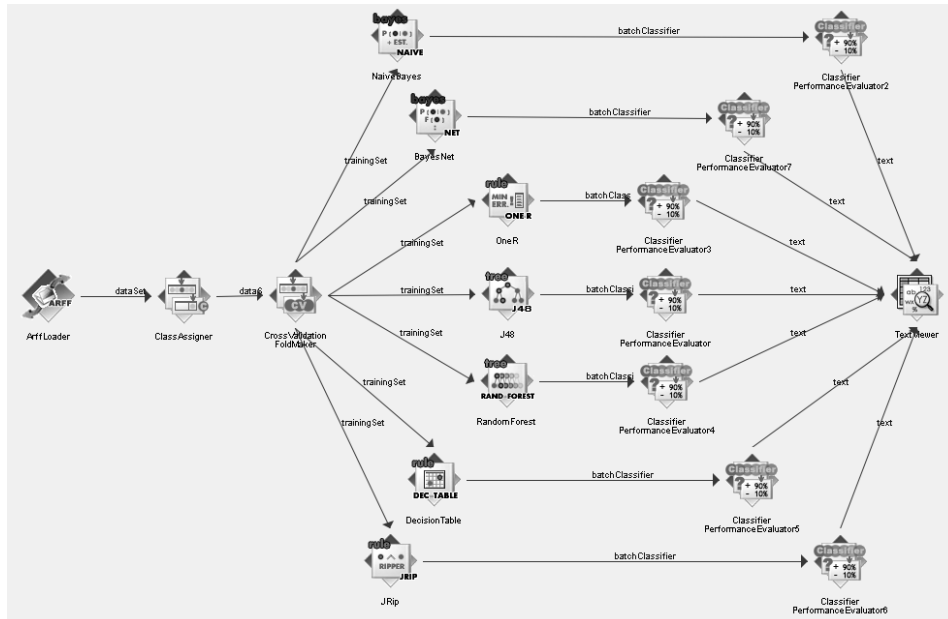


Рисунок 2 – Структурна схема послідовності побудови класифікаційних моделей у системі аналізу даних *Weka*

Таблиця 4 – Оцінки точності класифікації

Алгоритм	Час побудови класифікаційної моделі	<i>accuracy</i>	<i>precision</i>	<i>recall</i>	<i>F-measure</i>	<i>MCC</i>	
<i>OneR</i>	0,01	0,949	0,932	0,949	0,94	0,878	real_users
		0,929	0,947	0,929	0,938	0,878	fake_users
		0,939	0,939	0,939	0,939	0,878	Weighted Avg
<i>NaiveBayes</i>	0,02	0,975	0,981	0,975	0,978	0,955	real_users
		0,981	0,974	0,981	0,977	0,955	fake_users
		0,978	0,978	0,978	0,978	0,955	Weighted Avg
<i>BayesNet</i>	0,06	0,994	0,952	0,994	0,972	0,943	real_users
		0,948	0,993	0,948	0,970	0,943	fake_users
		0,971	0,972	0,971	0,971	0,943	Weighted Avg
<i>J48</i>	0,02	0,987	0,987	0,987	0,987	0,974	real_users
		0,987	0,987	0,987	0,987	0,974	fake_users
		0,987	0,987	0,987	0,987	0,974	Weighted Avg
<i>RandomForest</i>	0,07	0,994	0,994	0,994	0,994	0,987	real_users
		0,994	0,994	0,994	0,994	0,987	fake_users
		0,994	0,994	0,994	0,994	0,987	Weighted Avg
<i>DecisionTable</i>	0,16	0,981	0,957	0,981	0,969	0,936	real_users
		0,955	0,98	0,955	0,967	0,936	fake_users
		0,968	0,968	0,968	0,968	0,936	Weighted Avg
<i>JRip</i>	0,06	0,987	0,994	0,987	0,99	0,981	real_users
		0,994	0,987	0,994	0,99	0,981	fake_users
		0,99	0,99	0,99	0,99	0,981	Weighted Avg
<i>AdaBoost M1 (Naive Bayes)</i>	0,06	0,975	0,994	0,975	0,984	0,968	real_users
		0,994	0,975	0,994	0,984	0,968	fake_users
		0,984	0,984	0,984	0,984	0,968	Weighted Avg
<i>AdaBoost M1 (OneR)</i>	0,05	0,968	0,975	0,968	0,971	0,942	real_users
		0,974	0,968	0,974	0,971	0,942	fake_users
		0,971	0,971	0,971	0,971	0,942	Weighted Avg

Такий ефект пояснюється зростанням швидкості поширення контенту актором зі збільшенням кількості його друзів і, як наслідок, зацікавленості суб'єктів інформаційних операцій до його залучення. Такі акторів віднесено до класу активних потенційних загроз (*active_real*), у протилежному випадку – до класу *passive_real*. Аналогічний поділ виконано і для фейкових акаунтів акторів.

Етап 7. Оцінювання точності класифікації різними алгоритмами. Для більш детального аналізу результатів класифікації профілів акторів обрано три алгоритми класифікації з тих, які забезпечили досягнення найвищих значень введених метрик оцінювання – *J48*, *RandomForest*, *JRip*. Отримані в результаті побудови класифікаційних моделей значення метрик оцінювання для обраних алгоритмів машинного навчання подані в табл. 5.

Таблиця 5 – Метрики оцінювання алгоритмів за класами

Істинний клас	Алгоритм	<i>accuracy</i>	<i>precision</i>	<i>recall</i>	<i>F-measure</i>	<i>MCC</i>
PASSIVE_FAKE	J48	0,972	0,972	0,972	0,972	0,958
	RandomForest	0,991	0,982	0,991	0,986	0,979
	JRip	0,963	0,963	0,963	0,963	0,944
ACTIVE_FAKE	J48	1	0,957	1	0,978	0,975
	RandomForest	1	0,978	1	0,989	0,987
	JRip	0,956	0,956	0,956	0,956	0,948
PASSIVE_REAL	J48	0,976	0,984	0,976	0,980	0,967
	RandomForest	0,984	1	0,984	0,992	0,987
	JRip	0,976	0,969	0,976	0,973	0,954
ACTIVE_REAL	J48	0,968	1	0,968	0,984	0,982
	RandomForest	1	1	1	1	1
	JRip	0,935	0,967	0,935	0,951	0,946

З табл. 5 видно, що обраними алгоритмами найбільш повно класифікується клас *active_real*, найгірше – *passive_fake*. Клас *active_fake* більш точно визначають алгоритми *J48* і *JRip*, а клас *passive_real* – алгоритми *RandomForest* та *JRip*. При цьому загальну найвищу точність розподілу за класами забезпечує алгоритм *RandomForest*. Отримані результати збіжні з результатами академічних досліджень [15, 16] і задовольняють вимогам швидкодії, які висуваються до підсистем виявлення загроз у СІС. Вибір конкретного методу класифікації для побудови профілів інформаційної безпеки акторів доцільно робити залежно від специфіки інформаційної операції у СІС і вимог до точності та швидкодії підсистеми виявлення ознак загроз.

Висновки

1. Експериментально доведено дієвість запропонованого методу побудови профілів інформаційної безпеки акторів СІС для вирішення проблеми завчасного виявлення ознак загроз інформаційній безпеці держави. Розроблений підхід може бути адаптовано для застосування у різних видах СІС з метою врахування особливостей їх функціонування.

2. Встановлено, що вибір методу класифікації виконується відповідно до вимог точності та швидкодії окремих складових системи забезпечення інформаційної безпеки держави у СІС. Використання підходу до побудови профілів інформаційної безпеки акторів у СІС підвищить загальну ефективність функціонування системи інформаційної безпеки держави у СІС, що є актуальною проблемою для України.

Список літератури

1. Analysis of topological characteristics of huge online social networking services / Y.-Y. Ahn, S. Han, H. Kwak, S. Moon, H. Jeong // Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web. – ACM, New York, 2007. – PP. 835–844.
2. Keenan A. Sociability and social interaction on social networking websites / A. Keenan, A. Shiri // LibraryReview. – Vol. 58, Iss. 6. – PP. 438–450.
3. Гришук Р. В. Основи кібернетичної безпеки : монографія / Р. В. Гришук, Ю. Г. Даник ; під заг. ред. Ю. Г. Даника. – Житомир : ЖНАЕУ, 2016. – 636 с.
4. Молодецька К. В. Узагальнена класифікація загроз інформаційній безпеці держави в соціальних інтернет-сервісах / К. В. Молодецька // Защита информации : сб. науч. труд. – 2016. – Вып. 23. – С. 75–87.
5. Определение демографических атрибутов пользователей микроблогов / А. Коршунов, И. Белобородов, А. Гомзин [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. – 2013. – Т. 25. – С. 179–194.

6. Гомзин А. Г. Методы построения социо-демографических профилей пользователей сети Интернет / А. Г. Гомзин, С. Д. Кузнецов // Труды Института системного программирования РАН. – 2015. – Т. 27. – Вып. 4. – С. 129–143.
7. Pennacchiotti M. Democrats, republicans and Starbucks aficionados: user classification in Twitter / M. Pennacchiotti, A. M. Popescu // Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and datamining. – ACM, 2011. – С. 430–438.
8. Beller C. I'm a Belieber: Social Roles via Self-identification and Conceptual Attributes / C. Belleretal // Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – 2014. – PP. 181–186.
9. Молодецька-Гринчук К. В. Метод побудови профілів інформаційної безпеки акторів соціальних інтернет-сервісів / К. В. Молодецька-Гринчук // Інформаційна безпека. – 2017. – № 2(26). – С. 104–110.
10. Горбулін В. П. Інформаційні операції та безпека суспільства: загрози, протидія, моделювання: монографія / В. П. Горбулін, О. Г. Додонов, Д. В. Ланде. – К. : Інтертехнологія, 2009. – 164 с.
11. MIB Datasets : [Online resource] / MIB Datasets. – Access mode : <http://mib.projects.iit.cnr.it/dataset.html>. – Title from the screen.
12. Weiss G. M. Learning when training data are costly: the effect of class distribution on tree induction / G. M. Weiss, F. Provost // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2003. – 19. – PP. 315–354.
13. Weka 3 – Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java / Weka. – Access mode : <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>. – Title from the screen.
14. Меткалф Б. Закон Меткалфа сорок лет спустя после рождения Ethernet / Б. Меткалф // Открытые системы. СУБД. – 2014. – № 1. – С. 44–47.
15. Cresci S. Fame for sale: Efficient detection of fake Twitter followers / S. Cresci, R. Di Pietro, M. Petrocchi, A. Spognardi, M. Tesconi // Decision Support Systems. – 2015. – Vol. 80. – PP. 56–71.
16. Jensen U. Random Forest classification of Twitter users to detect features linked to bot susceptibility / U. Jensen, Chr. Schenk // Professional profile of Ulf Aslak. – Access mode : <http://ulfaslak.com/portfolio/sigproc-sp.pdf>. – Title from the screen.

Відомості про авторів

Гришук Руслан Валентинович – д.т.н., старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного відділу інформаційної та кібернетичної безпеки наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Мамарєв Віктор Миколайович – к.т.н., провідний інженер відділу науково-дослідної та випробувальної роботи Національного центру управління та випробувань космічних засобів, вул. Московська, 8.

Молодецька-Гринчук Катерина Валеріївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем, Житомирський національний агроекологічний університет, бульвар Старий, 7.

УДК 378.14:004

Р. Н. Кветний

ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ УНІВЕРСИТЕТСЬКОЇ ОСВІТИ В ІТ ГАЛУЗІ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. В статті розглянуто питання ефективної організації університетської освіти в області ІТ, яка залежить від можливостей університетів забезпечити певні умови для підготовки спеціалістів (ці умови виділені у статті), а також від залучення до цього ІТ компаній, що працюють для світового ринку, та їх співробітників. Наведено приклади постановки такої роботи у Львівському ІТ кластері та у Вінницькому національному технічному університеті, що базується на багаторічній злагодженій співпраці місцевих ІТ бізнесменів та університетів.

Ключові слова: інформаційні технології (ІТ), стартап, світовий ринок, висококваліфіковані викладачі, спеціальні дисципліни, бакалаврські та магістерські роботи, індивідуальний підхід, ІТ кластер.

Анотация. В статье рассмотрены вопросы эффективной организации университетского образования в области, ИТ, которая определяется способностью университетов обеспечить определенные условия для подготовки специалистов (эти условия выделены в статье), а также от вовлечения в этот процесс ИТ компаний, работающих для мирового рынка, и их сотрудников. Приведены примеры решения этой проблемы в Львовском ИТ кластере и в Винницком национальном техническом университете, где эта работа базируется на многолетнем сотрудничестве местных ИТ бизнесменов и университетов.

Ключевые слова: информационные технологии (ИТ), стартап, мировой рынок, высококвалифицированные преподаватели, специальные дисциплины, бакалаврские и магистерские работы, индивидуальный подход, ИТ кластер.

Annotation. Problems of effective organization of university education in IT field describe in the article. It depend on possibilities of universities to provide some pointed conditions for human resources development (education of students) and involving of IT companies provided products and projects for world IT market. Examples of successful resolving such problems in Lviv IT cluster and Vinnytsya national technic university represent.

Key words: information technologies (IT), startup, world market, high-qualified lecturers, special subjects, bachelor and master thesis, individual approach, IT cluster.

Вступ

ІТ галузь на сьогодні стала головним двигуном економічного прогресу. Це шанс для України швидше досягти когорти країн з високим розвитком суспільства і рівнем людського життя. Таким шляхом йдуть сьогодні Ізраїль, Китай, Індія, Північна Корея, а ще раніше на цей шлях вступила Японія. Через певну близькість менталітету ми можемо взяти за приклад шлях Ізраїлю [1], де створена система організації університетської підготовки і підтримки та навчання талановитої молоді і впровадження, супроводження та фінансування винаходів та стартапів від зародження ідей до їх промислового використання. Велику роль в цьому відіграє ефективна організація підготовки молодих спеціалістів саме в ІТ галузі. Є багато статей та досліджень, що присвячені аналізу рівня підготовки ІТ спеціалістів, змісту програм навчання та організації процесу підготовки ІТ спеціалістів [2,3,4]. Але, на наш погляд, який базується на багаторічному досвіді підготовки таких спеціалістів, результатом якого є успішне функціонування низки ІТ фірм у Вінницькому регіоні та робота багатьох випускників в провідних світових компаніях, існує ряд суб'єктивних чинників, які відіграють головну роль в результативності університетської освіти, тобто доведенню її випускників до рівня сучасних вимог ІТ індустрії. При цьому зміст та спеціальність не відіграють вирішальної ролі, так як головне це закласти базові ІТ знання, навчити студентів постійно працювати над самовдосконаленням та дати можливість стажуватися в умовах реального ІТ виробництва для потреб світового ринку.

Мета статті

Метою статті є визначення шляхів та чинників підвищення ефективності ІТ освіти в українських університетах.

Основна частина

В 2016 році разом з впровадженням Закону України «Про вищу освіту» [5] і інтеграцію України в європейську і світову освітню спільноту в Україні введено новий перелік спеціальностей, по яких проводиться вузівське навчання.

Виділимо серед них такі, що є основними для підготовки спеціалістів в області ІТ, та наведені у таблиці 1 [6,7]:

Таблиця 1 – Галузі знань і спеціальності, по яких здійснюється підготовка спеціалістів в області ІТ в Україні

ГАЛУЗІ ЗНАНЬ	СПЕЦІАЛЬНОСТІ
12 Інформаційні технології	121 Інженерія програмного забезпечення 122 Комп'ютерні науки 123 Комп'ютерна інженерія 124 Системний аналіз 125 Кібербезпека 126 Інформаційні системи та технології
15 Автоматизація та приладобудування	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Головні складові, від яких залежить ефективність ІТ підготовки, на наш погляд, такі:

1. Викладання базових дисциплін на перших курсах висококваліфікованими викладачами, що дасть базу для сприйняття та засвоєння спеціальних дисциплін. Тут треба виділити цикли загальноосвітніх дисциплін (у першу чергу, математика) і дисципліни базові для ІТ галузі (теорія алгоритмів, дискретна математика, теорія систем). Безсумнівною умовою успішної підготовки при цьому є задовільний рівень шкільної підготовки студентів, що для ІТ галузі є природнім.

2. Викладання спеціальних дисциплін на старших курсах спеціалістами – професіоналами, які поєднують роботу в університеті з професійною діяльністю в ІТ компанії, що займається сучасними розробками для світового ринку. Ідеально було б, щоб технології, що застосовуються в цих проектах, співпадали з тематикою предметів, які викладаються. Відкриття тих чи інших спеціальностей з наведеного переліку в певному університеті повинно корелюватися з наявністю поряд з університетом серйозної ІТ компанії, що займається відповідними проектами. Ця спрямованість повинна відобразитися у пропонуваній спеціалізації у змісті освітньо-професійної програми для бакалаврів та освітньо-наукової для магістрів. Безумовно, не заважать і спеціальні курси, що викладають факультативно провідні спеціалісти з ІТ фірм для студентів.

3. Можливість студентами починаючи з молодших курсів проходити стажування, практику, виконувати бакалаврські, а в майбутньому і магістерські роботи, на конкретних ІТ підприємствах, де в ідеалі створюються підрозділи та філії випускових кафедр і де ними керують ті ж самі викладачі, що проводять заняття. Сюди ж вони мають можливість і працевлаштуватися після завершення навчання, хоча через конкуренцію на ринку праці ніяких юридичних зобов'язань, крім тих, що вказано в «Законах про працю» [8] при цьому не існує.

4. Важливим є викладання спеціальних предметів, які підготують студентів до конкуренції на ринку праці і впровадженню своїх ідей в практику. На молодших курсах це дисципліни, пов'язані з пошуком роботи, підготовкою резюме, презентацій, проходження співбесід, поведінці у великих колективах, спілкуванні з керівництвом та підлеглими. Сюди ж треба віднести практичну іноземну (англійську) мову: технічну та для спілкування. На старших курсах особливе значення мають предмети, які входять до так званого циклу Шкіл Стартапів (патентування, пріоритети, конкуренція, залучення інвестицій, бізнес-плани та розвиток бізнесу тощо). Вони можуть частково вивчатися як в рамках загальної програми, так і в Спеціальних Школах Стартапів (по типу Школи Стартапів Сікорські Челлендж під керівництвом Ігора Пеєра в Київській політехніці, а зараз вже й у Вінниці, Маріуполі та Дніпрі [9,10]. І завданням сучасного університету є необхідність створення чи залучення такої Школи.

5. Також необхідним є можливість університетів використовувати індивідуальні форми навчання для тих студентів, хто на старших курсах вже починає працювати на часткову або, навіть, на повну зайнятність. Це потребує від керівників підрозділів та конкретних викладачів готовності йти на певні компроміси та трансформацію програм дисциплін, де частину розділів ці працюючі студенти повинні опанувати самостійно, а лабораторні, практичні роботи та тематику курсових робіт та проектів потрібно узгоджувати з проектами, що виконуються ними на місці працевлаштування. Але можливість працювати і здатність, як професійна, так і психологічна (тому що, щоб поєднувати працю та навчання треба мати не тільки знання, а й достатню психологічну стійкість) важить більше ніж просто присутність на заняттях. І якщо студент вже затребуваний на ІТ ринку праці, то свою справу, в головному, університет виконав!

Для реалізації цих складових потрібне бажання великих ІТ компаній повернутися обличчям до університетів і вкладати певні кошти в підтримку університетів, які зараз знаходяться на дуже стислому бюджетному фінансуванні.

Як приклад вдалого досвіду можна навести Lviv IT Cluster. Цього вересня Львівський ІТ Кластер почав підготовку за новими бакалаврськими програмами у місцевих університетах: «Artificial

Intelligence» у Львівській політехніці, «Data Science» та «Computer Science» в ЛНУ ім. І. Франка на факультеті прикладної математики і «Data Science & Intelligent Systems» в ЛНУ на факультеті електроніки. Вже другий рік діє програма «Internet of Things» у Львівській політехніці, яка стала першою спробою не просто модернізувати освіту, а створити абсолютно нову інноваційну програму [11].

Можна навести другий приклад, в якому ці ж цілі досягаються дещо по-іншому. У Вінниці через наявність хорошого рівня базової шкільної підготовки (кілька відомих фізико-математичних гімназій та ліцеїв), традицій колишнього центра радіоелектронної промисловості та відомого в Україні технічного університету ще з кінця 80-х років склалася певна співдружність ІТ підприємців та вузівських викладачів. Вінниця є одним з провідних ІТ центрів України. Більшість ІТ компаній створена та очолюється вихованцями університету (Вінінтерактив [12], Делфи [13], Інновінн [14], Спільна Справа [15]), а згодом тут виникли і філії світових гігантів в аутсоринговому ІТ бізнесі наприклад Сіклум, Ерам, Плаутика та інші. Ці компанії як раз і базуються на вихованцях університету і з більшою чи меншою ефективністю сприяють виконанню зазначених в нашій статті складових.

Висновок

Таким чином, в статті виділено головні, на думку автора, складові успішної організації ІТ освіти на рівні університетів та приклади реалізації цих ідей в провідних університетах України.

Список літератури

1. Что делать с дефицитом IT-кадров: опыт Израиля. [Електронний ресурс] Кони́на. М. Режим доступу до статті: <https://dou.ua/forums/topic/21376/> - Назва з екрана.
2. Поперешняк С.В. Системи обробки інформації. — 2010. — № 7(88). — С. 127-131.
3. Щедролюсьєв Д.Є. Особливості підготовки ІЕ-фахівців в українських вищих навчальних закладах// Комп'ютер у сім'ї та школі - №8, 2010.-с.12-15
4. Spivakovskiy A. Peculiarities of IT Management at Institutions of Higher Education// Інформаційні технології в освіті. Випуск 2.-Херсон. -2008. - С. 22–29.
5. Закон України «Про вищу освіту». [Електронний ресурс]. Режим доступу до закону: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/T141556.html- Назва з екрана.
6. Перелік галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти. [Електронний ресурс]: Кабінет Міністрів України постанова від 29 квітня 2015 р. № 266, Київ. Режим доступу до постанови: <http://vz.org.ua/zakonodavstvo/101-perelik-galuzej-znan-i-spetsialnostej>.
7. Урядовий портал. [Електронний ресурс]: Текст документа: “Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015р. № 266” №53-редакція від 01.02.2017. Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=249722170>- Назва з екрана.
8. Кодекс законів про працю України. [Електронний ресурс]: Кодекс законів затверджується Законом № 322-VIII від 10.12.71 ВВР, 1971, додаток до № 50, ст. 375. Режим доступу до кодексу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/322-08> – Назва з екрана.
9. Головна сторінка стартап школа Sikorsky Challenge. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.sikorskychallenge.com/>
10. Електронне посилання на “IV конкурс стартапів Sikorsky Challenge 2017”. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://startup.kpi.ua/> – Назва з екрана.
11. Як і чому почалась революція ІТ-освіти у Львові [Електронний ресурс]: Верес. З. Львів освіта стаття. Режим доступу: <https://dou.ua/lenta/columns/lviv-it-education/> – Назва з екрана.
12. Головна сторінка компанії Win Interactive [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.win-interactive.com/>
13. Головна сторінка компанії Delphi [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://udelphi.com/>,
14. Головна сторінка компанії InnovinnProm [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://innovinnprom.com/>
15. Головна сторінка компанії Spilna Sprava [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sprava.net/>

Відомості про авторів

Квстний Роман Наумович – член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, д. т. н., професор, завідувач кафедри АІВТ, Вінницький національний технічний університет.

УДК 004.77

Т. І. Трояновська, Л. А. Савицька, В. Ю. Тарануха

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПОПУЛЯРИЗАЦІЇ КОМЕРЦІЙНИХ ВЕБ-РЕСУРСІВ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. Дана робота присвячена дослідженню методів та засобів для комплексної популяризації комерційних інтернет-ресурсів з метою максимально ефективною, успішною і повноцінною популяризації. Зокрема, виконано аналіз основних технологій для виведення комерційного веб-ресурсу на провідні позиції, розширення цільової аудиторії, збільшення клієнтської бази, збільшення числа реальних продажів та підвищення якості сервісу, розглянуто найбільш критичні помилки процесів популяризації комерційних веб-ресурсів та шляхи їх уникнення, запропоновано модель популяризації комерційних веб-ресурсів та алгоритм залучення потенційних клієнтів.

Ключові слова: методи та засоби популяризації веб-ресурсів, просування, виведення на провідні позиції, SEO, помилки в процесі популяризації, модель популяризації веб-ресурсів, алгоритм залучення клієнтів.

Abstract. This work is devoted to methods and tools for complex commercial popularization of Internet resources to the most effective, successful and full promotion. In particular, the analysis of the core technology to display a commercial Web resource in a leading position, expanding the target audience, increase customer base, increase the number of actual sales and improve service quality, considered the most critical bugs processes popularize commercial web resources and ways to avoid them, the model popularization of commercial web resources and algorithm leads.

Keywords: methods and tools for popularization of web resources, promotion and launch of a leader, SEO, mistakes in the process of promotion, popularization model web, algorithm attract customers.

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию методов и средств для комплексной популяризации коммерческих интернет-ресурсов с целью максимально эффективной, успешной и полноценной популяризации. В частности, выполнен анализ основных технологий для вывода коммерческого веб-ресурса на лидирующие позиции, расширение целевой аудитории, увеличение клиентской базы, увеличение числа реальных продаж и повышение качества сервиса, рассмотрены наиболее критические ошибки процессов популяризации коммерческих веб-ресурсов и пути их избегания, предложена модель популяризации коммерческих веб-ресурсов и алгоритм привлечения потенциальных клиентов.

Ключевые слова: методы и средства популяризации веб-ресурсов, продвижение, вывод на лидирующие позиции, SEO, ошибки в процессе популяризации, модель популяризации веб-ресурсов, алгоритм привлечения клиентов.

Вступ

Нині комерційні інтернет-ресурси дуже популярні, їх розглядають і як майданчик для збільшення обсягів продажів, і для створення бізнесу з нуля. Проте існує нестача конкретних дійових моделей та алгоритмів популяризації комерційних проєктів у мережі Інтернет. Один з найбільш важливих факторів успішного веб-ресурсу – це його оптимізація і комплексний підхід базується на формулі з трьох компонентів, від яких залежить результат кампанії з популяризації: залучення, конверсія і аналітика.

Актуальність

В сучасному світі торгівля засобами Інтернет стала невід'ємною частиною нашого життя. Зараз в Інтернеті можна купити майже все. Однак різні товари і послуги продаються з різним успіхом, що пов'язано з особливостями інтернет-бізнесу. Переважно, покупці проживають у великих містах і для оплати покупок використовують готівку, пластикові картки, банківські перекази або електронні гроші. Проте не всі комерційні веб-ресурси однаково успішні. Це залежить від багатьох факторів, зокрема наповненості сайту унікальним контентом, технічної оптимізації сайту, зручності для користувача [1]. Активні гравці інтернет-бізнесу отримують величезні прибутки, тому можуть дозволити собі витратити величезні кошти на просування свого інтернет-ресурсу. Переваги інтернет-бізнесу очевидні: великий охоплення аудиторії, ексклюзивні можливості з розширення товарного асортименту, безмежні можливості по залученню відвідувачів на сайт, а в результаті – збільшення продажів і прибутків.

Мета

Метою статті є аналіз методів та засобів популяризації комерційних веб-ресурсів для збільшення аудиторії сайту; розробка моделі популяризації комерційного веб-ресурсу; розробка алгоритму для залучення потенційних клієнтів.

Задачі

1. Виконати класифікацію методів та засобів популяризації комерційних веб-ресурсів;
2. Аналіз критичних помилок при популяризації комерційних веб-ресурсів;
3. Розробка моделі популяризації комерційного веб-ресурсу;
4. Розробка алгоритму для залучення потенційних клієнтів.

Загальна класифікація методів та засобів популяризації інтернет-магазинів

Добре продумана комерція і хороший сайт на сучасному високо-конкурентному ринку самі по собі вже не приносять грандіозного успіху, саме тому у більшості комерційних веб-ресурсів бюджет на популяризацію в рази більше, ніж на створення. Процес просування повинен бути націленим на довгострокові результати: створення лояльності серед споживачів і їх прихильності, при цьому потрібно пам'ятати про залучення нових покупців. Важливо змушувати покупців повертатися до ресурсу знову і знову, саме за рахунок цього найбільші комерційні веб-ресурси актуальні та корисні. Все це має враховувати єдина маркетингова стратегія, в якій будуть закладені інструменти залучення нових потенційних покупців і утримання старих – тільки так можна привести веб-ресурс до довготривалого успіху, адже, як відомо, 80% прибутку приносять 20% постійних покупців [3].

На рис. 1 показано схематичне зображення методів та засобів популяризації веб-ресурсу. Для комерційного веб-ресурсу мережа Інтернет – це головний комунікаційний майданчик, основне просування буде відбуватися саме тут. Ефективних каналів популяризації досить багато. Перше місце, де обов'язково варто зареєструвати новий комерційний веб-ресурс – це спеціалізовані торгові майданчики, адже там реєстрація безкоштовна і потенційних покупців там вже дуже багато. В результаті товари веб-ресурсу будуть розміщені на торгових майданчиках, а потенційні покупці будуть щодня відвідувати інтернет-ресурс.

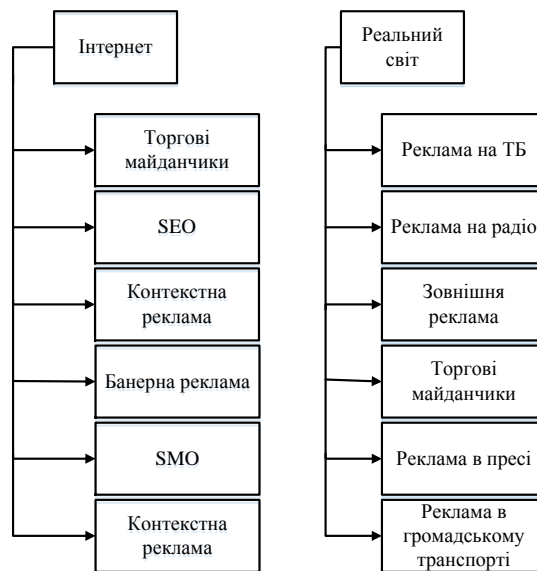


Рисунок 1 –Класифікація методів та засобів популяризації інтернет-ресурсів

Нині популяризація в пошукових системах (SEO) – це один з основних каналів просування комерційного веб-ресурсу. Інструменти SEO дають постійний потік нових потенційних клієнтів, які цілеспрямовано шукали певний продукт засобами пошукових систем. Для популяризації потрібно розробити популярні запити, це можна зробити за допомогою спеціальних інструментів пошукових систем, хоча краще довірити це SEO-фахівцеві. Важливо просуватися по «запитам, що продають», коли людина не просто шукає продукт, а вже готова його купити, наприклад, якщо інтернет-магазин продає холодильники, таким запитом буде «купити холодильник», то користувач вже готовий зробити покупку. З «запитів, що продають» конверсія буде значно вищою.

Процесом SEO можна зайнятися як власними силами, так і віддати підряднику. Досвід показує, що своїми силами проекти досить рідко досягають відмінних результатів, тому не варто економити на цьому і віддати перевагу послугам професійної компанії. Просуватися потрібно або в десятку провідних позицій, або в п'ятірку, іноді результати роботи SEO-фахівця рухають веб-ресурс навіть у провідну трійку, але це недешево, особливо в конкурентних тематиках, а значної переваги не принесе. Усі позиції за першою десяткою практично не приносять ефективності. Посилання з результатів пошуку повинні вестися на продукт, який шукає користувач. При цьому завжди є значний ризик, що обумовлені позиції не будуть досягнуті (просування на перші місця в середньому тривають 3-4 місяці, потім буде підтримка на перших місцях). Така специфіка даної сфери діяльності, тому можна сміливо вимагати від підрядника 100% відповідальності. Компаній, які можуть надати такі умови, досить мало але вони є, поширена умова отримання таких послуг – повернення підрядником оплати за слова, які не вийшли в топ. В результаті комер-

ційний веб-ресурс буде легко знайти в пошукових системах при пошуку певних категорій продуктів і його щодня будуть відвідувати потенційні клієнти.

Контекстна реклама – це такий тип реклами, яка показується на тематичних сторінках, перш за все в результатах пошуку і на тематичних сайтах-партнерах, з оплатою за натискання. Задумка хороша, але ефективність поступово падає, зараз можна часто чути таке поняття як «фальшиві кліки», коли на рекламу реагують не потенційні клієнти, а прямі конкуренти з метою витратити даремно гроші рекламодавця. Зараз відсоток «фальшивих кліків» за різними підрахунками може доходити до 30%, однак інші 70% є потенційними клієнтами, тому цей інструмент варто використовувати. Контекстна реклама показується з прив'язкою до ключових слів, її можна показувати по тим же словам, що і просувається сайт за допомогою SEO. Це буде особливо ефективним, поки сайт не вийде в топ, потім слова варто замінити на загальні. Таким чином, за «словами, що продають» стоять потенційні клієнти і вони будуть приходити на веб-ресурс, а по «загальним» словам, наприклад, з контекстної реклами охоплюється вся цільова аудиторія. Також контекстну рекламу можна поділити за різними параметрами і, перш за все, за географічними регіонами, щоб реклама показувалася тільки споживачам з цільового для веб-ресурсу регіону, а на деяких майданчиках є можливість налаштувати соціальний таргетинг за статтю, віком, інтересами і т.д. [2]. У результаті рекламу інтернет-магазину будуть бачити на тематичних сторінках, і щодня на сайт інтернет-магазину будуть заходити потенційні клієнти.

Банерна реклама є дорогим іміджевим інструментом, який добре підходить для створення так званого, ступеню впізнання комерційного веб-ресурсу. Безпосередніх продажів майже не приносить, також як і не провидить відвідувачів на веб-ресурс, але елемент в загальній маркетинговій стратегії важливий. Рекламуватися потрібно на тематичних майданчиках, де багато цільової аудиторії. Для товарів масового вжитку можна рекламуватися на загально-тематичних порталах. Самі банери можна зробити нестандартними, наприклад, в текстовому (HTML) форматі з декількома популярними товарами, цінами і кнопками «купити» до кожного з них, а самі товари можна динамічно змінювати. Такий нехитрий хід підвищить кількість кліків по банеру і може привести чимало потенційних покупців на сайт. На багатьох рекламних майданчиках є можливість налаштувати географічний таргетинг, а на деяких – навіть соціальний. В результаті про комерційний веб-ресурс дізнаватимуться, до нього підвищуватиметься довіра, і цей хід може призвести до збільшення покупців на сайті.

Реклама в блогах і соціальних мережах (SMO) – досить новий та гнучкий рекламний інструмент. На заході він вже встиг себе зарекомендувати як один з найефективніших. Важливо не тільки зареєструватися і почати запрошувати людей, а ще й зробити групи цікавими для них, залучаючи їх в обговорення, зацікавивши різноманітними конкурсами, обговорюючи з покупцями їх побажання, проводити опитування і інші цікаві користувачам заходи. За групами потрібно постійно стежити, видаляти спам, приймати нових покупців і т.д. Поступово групи наберуть значну кількість учасників, велика кількість з яких стануть покупцями.

Нині популяризація комерційного веб-ресурсу в реальному світі – група менш ефективних, але цілком придатних інструментів для просування. Є два основних недоліки популяризації в реальному світі: ефективність нижча, а ціна вища в порівнянні з просуванням в мережі Інтернет. Саме тому до цих методів варто переходити тоді, коли канали популяризації в Інтернеті вже використовуються по максимуму.

Реклама на телебаченні – самий стандартний і найдорожчий інструмент. Дуже добре підходить для створення іміджу і довіри. Рекламуватися варто під час тематичних передач або на тематичних каналах. Зараз вибір досить великий, з цим може допомогти рекламне агентство, яке займається ТВ рекламою. Така реклама доступна тільки найбільшим комерційним веб-ресурсам, часто це інтернет-магазини великих роздрібних мереж. Особливу увагу потрібно приділити розробці рекламного ролика, і в ньому потрібно не тільки висвітлити переваги самого інтернет-магазину, а й змусити споживача зайти на сайт.

Реклама на радіо буде особливо ефективна для популяризації веб-ресурсів, пов'язаних з автомобільною тематикою, оскільки велика частина їх аудиторії саме автомобілісти. Хоча і для багатьох інших сегментів така реклама буде працювати. Запускати рекламу варто відразу на декількох популярних радіоканалах на період не менше 2-х тижнів з 8-10 щоденними виходами; а в самому ролику потрібно обов'язково звернути увагу покупців на сайт магазину і дати телефон.

Зовнішня реклама буде ефективна для комерційних веб-ресурсів із широким вибором товарів масового вжитку, дієва у великих містах та є інструментом формування іміджу. При розміщенні зовнішньої реклами потрібно звернути увагу на рекламний макет і врахувати, що переважна більшість людей, які зможуть побачити цю рекламу, матимуть мало часу її розглянути. Тому об'єкти повинні бути великими (в тому числі сайт і телефон), а рекламний макет не повинен бути перевантажений інформацією. Можна розмістити рекламу вздовж доріг, де часто трапляються затори.

Реклама в пресі підходить тематичним веб-ресурсами, які можуть ефективно рекламуватися в тематичній пресі. Сама реклама повинна виходити 3-4 рази поспіль, щоб споживач на неї звернув увагу і за-

пам'ятав, за розміром не менш 1/4 частини сторінки. Не варто давати рекламу на останніх кількох сторінках видання, в яких традиційно розміщується тільки реклама, такі сторінки майже ніхто не читає, і відповідно реклама там дешева, але неефективна.

Реклама в громадському транспорті буде ефективна для веб-ресурсів, які орієнтуються на цільову аудиторію міста. Формати є різні, найкраще підходить реклама всередині транспорту з розміщенням на строк не менше місяця. У рекламному макеті теж потрібно виділити сайт магазину і телефон. Крім вищезначених традиційних видів реклами є і менш популярні, але теж досить ефективні для деяких сегментів, наприклад, реклама в ліфтах, кінотеатрах і т.д.

Аналіз критичних помилок при популяризації комерційних веб-ресурсів

Оптимізація сайтів електронної комерції набагато складніша, ніж блогів або корпоративних сайтів. Це зумовлено наявністю великої кількості сторінок з безліччю товарів, які постійно змінюються, і, таким чином, виникає багато проблем, які роблять оптимізацію критичною точкою росту для веб-ресурсів [4, 5].

Перша помилка – це недостатній опис товару. В загальному, відсутність текстового опису продукту робить неможливим потрапляння сторінки в топ запитів пошукової системи. Отже, чим більш унікальний контент використовується для опису продукту, тим краще для процесу SEO. Не потрібно копіювати контент з інших сайтів, слід використовувати якісний текст, який допоможе користувачу прийняти рішення щодо покупки.

Друга помилка – використання опису продукту від виробника. Якщо виявляється використання опису продукції з документації виробника, даний комерційний веб-ресурс буде гарантовано закритим для пошукових систем. Завжди потрібно використовувати унікальний контент, тому для уникнення конфліктів з пошуковими системами слід змінити текст, наданий виробником продукції на унікальний. Можна ігнорувати дану рекомендацію, якщо сторінки веб-ресурсу не індексуються.

Третя помилка – недостатня кількість реальних відгуків. Близько 70% покупців шукають відгуки про товар на сайті. Це означає, що якщо комерційний веб-ресурс не має сторінок із відгуками, то автоматично втрачається велика кількість потенційних клієнтів. Перевага застосування сторінок із відгуками полягає в постійному створенні унікального контенту, що є перевагою для просування у пошукових системах.

Четверта проблема – часто сторінки продуктів не оптимізовані під вимоги пошукових запитів. Для уникнення цієї проблеми потрібно використовувати чітко визначені назви товарів, завжди слід заповнити параметр alt при додаванні картинки на сайт.

П'ята помилка – не унікальні назви. Для уникнення цієї проблеми слід структурувати назву комерційного веб-ресурсу.

Шоста проблема – велика кількість дубльованого контенту. При повторенні однотипних сторінок на сайті слід вилучити їх з числа індексованих. Це слід робити, щоб не мати проблем з пошуковими системами.

Аналізуючи проблеми популяризації комерційного веб-ресурсу, можна сказати, що головним правилом SEO є пріоритетність зручності та простоти використання веб-ресурсу. Що більше часу люди проводять на сайті і менше повертається до результатів пошуку – тим краще сайт сприймає пошукова система.

Модель популяризації комерційного веб-ресурсу

Розглянемо найефективніші способи залучення відвідувачів до комерційного веб-ресурсу у вигляді моделі популяризації комерційного веб-ресурсу (рис. 2).

SEO просування підвищить позиції комерційного веб-ресурсу в пошуку, забезпечить зростання обсягів відвідуваності сайту і, відповідно, збільшить продажі товарів та прибутки. Популяризація веб-ресурсу за допомогою SEO займає певну кількість часу для досягнення бажаних цілей, зате винагороджується стабільними і довгостроковими результатами. Весь SEO-процес складається з таких важливих частин як: 1) аналіз сайтів конкурентів, 2) розробка SEO стратегії, 3) підбір ключових слів, 4) створення семантичного ядра, 5) внутрішня оптимізація, 6) усунення дублікатів сторінок, 7) усунення помилок, 8) вибір основного дзеркала комерційного веб-ресурсу, 9) створення sitemap, застосування геолокації по регіону, 10) створення robots.txt, 11) закриття технічних сторінок на сайті, 12) написання оптимізованих текстів, 13) внутрішнє переадресування посилань, 14) зовнішня оптимізація сайту, 15) аналітика змін (посилання, позиції, відвідуваність, конкуренти).

Контекстна реклама є ефективним методом залучення відвідувачів. У порівнянні з SEO-оптимізацією результат можна отримати у короткий строк. Принцип контекстної реклами простий, оплата йде за кожен перехід по ключовому слову з пошукових систем або сайтів партнерів. Контекстна реклама є основним видом заробітку безпосередньо пошукових систем.

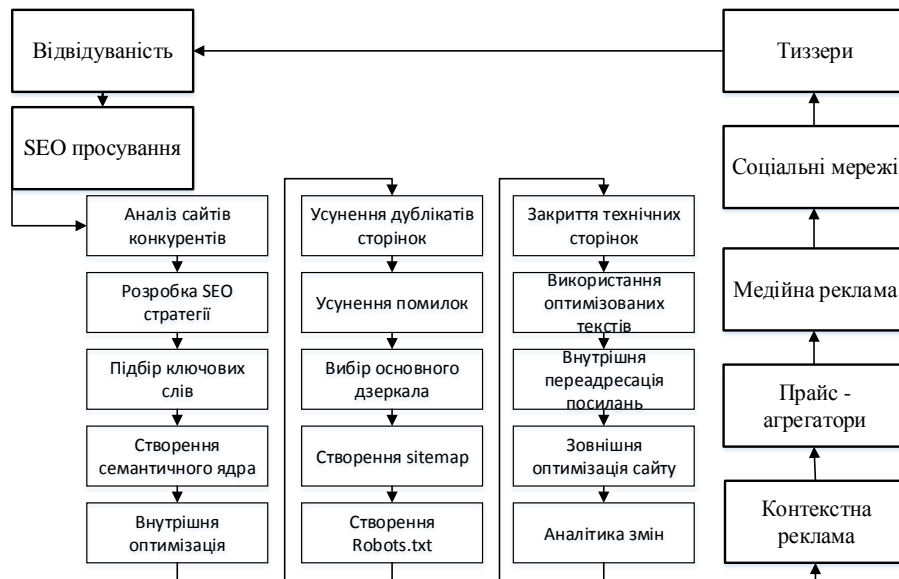


Рисунок 2 – Модель популяризації комерційного веб-ресурсу

Реклама в прайс-агрегаторах – це сайти порівняння цін, на яких відвідувач вибирає товар і переходить за посиланням на потрібний комерційний веб-ресурс, який йому підходить за параметрами (ефективна, якщо ціна є найнижчою на ринку або близька до такої). Прайс-агрегаторів існує безліч, для різних завдань, різної аудиторії.

Медійна реклама або графічні оголошення, які розміщуються через Google. Навіть з невеликим бюджетом можна заявити про комерційний веб-ресурс широкій аудиторії. А також важливо те, що її можна чітко налаштувати: за потрібним регіоном, інтересами користувача.

Соціальні мережі є хорошим способом реклами, так як багато людей проводять в них багато часу.

Тизерна реклама є ефективним методом залучення відвідувачів на сайт. Її використовують вже безліч веб-ресурсів, щоб отримувати зацікавлених відвідувачів. Виглядають тизери практично так само як і рекламні банери в соціальних мережах.

Розробка алгоритму залучення потенційних клієнтів

Основною специфічною особливістю комерційних веб-ресурсів є велика кількість сторінок, що при грамотному підході є величезним плюсом з точки зору пошукової оптимізації, але в більшості випадків викликає у свого власника проблеми дублювання сторінок, а отже – погане ранжування сайту в цілому. При популяризації веб-ресурсу основну увагу необхідно звернути саме на технічну оптимізацію і складання семантичного ядра, інакше буде складно потрапити у топові списки пошукових систем на етапі просування. Варто скласти детальне семантичне поле і на його основі виконати структурування веб-ресурсу. На рисунку 3 детально показаний алгоритм, який пропонується до використати для успішної популяризації комерційних веб-ресурсів.

Підготовчий етап починається з обрання доменного імені. Вибираючи безпосередньо домен сайту, варто знайти максимально коротку назву, яка добре запам'ятовується. Далі необхідно обрати хостинг для комерційного веб-ресурсу і CMS, причому обирати хостинг необхідно зважаючи на особливості CMS. Підготовчий етап починається з обрання доменного імені. Вибираючи безпосередньо домен сайту, варто знайти максимально коротку назву, яка добре запам'ятовується. Далі необхідно обрати хостинг для комерційного веб-ресурсу і CMS, причому обирати хостинг необхідно зважаючи на особливості CMS.

Замовляючи сайт, заснований на загальній платформі ви фактично не є його власником. Тобто при розірванні контракту з компанією-розробником втрачаєте веб-ресурс. Ви не маєте доступу до файлів сайту, а всі необхідні технічні зміни необхідно погоджувати з компанією-розробником за окрему плату.

Під час технічної оптимізації, насамперед, необхідно створити дзеркало сайту. Якщо сайт ще не був проіндексований пошуковими системами, то в якості головного дзеркала можна вибрати будь-який сервіс. Якщо сайт вже в індексі, то необхідно перевірити, яке дзеркало є основним.

Далі необхідно провести вивантаження сайту за допомогою програми XENU, яка допоможе визначити некоректні посилання, дублі сторінок, дублі інших параметрів, наприклад, Title і т. п. Далі необхідно налаштувати файл Robots.txt. В кожному окремому випадку Robots.txt буде містити директиви для конкретного сайту, але можна виділити ряд загальних рекомендацій: для кожного User-Agent повинна бути вказана адреса sitemap, фізичні службові папки, сторінки тегів і категорій мають бути закриті від індексації, всі директиви мають бути продубльованими для пошукової системи.

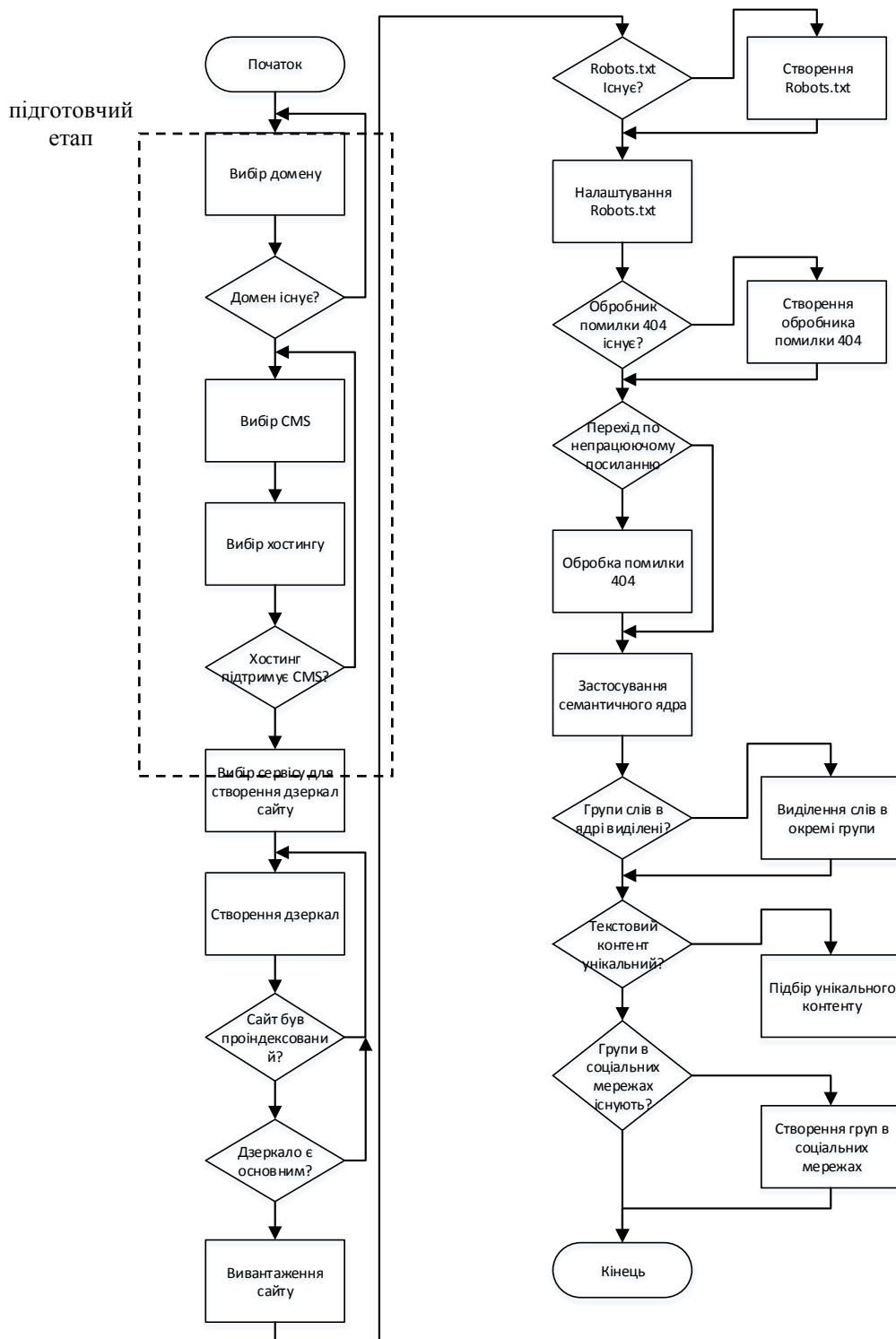


Рисунок 3 – Алгоритм залучення потенційних клієнтів комерційного веб-ресурсу

Обробка помилки 404 дуже важлива. Вона виникає в тому випадку, якщо користувач перейшов по непрацюючому посиланню або помилився при введенні адреси сторінки. У більшості сайтів, на жаль, дана помилка не оброблена, що призводить до спрацьовування серверної помилки 404, що вкрай не бажано і відлякує клієнтів комерційного веб-ресурсу.

Застосування семантичного ядра на готовий каркас комерційного веб-ресурсу, або ж можна створити каркас відштовхуючись від структури ядра. Варто відзначити, що семантичне поле – це весь набір фраз по тематиці, а ядро – вибрані для популяризації фрази, розбиті на групи і підгрупи. Виділяти групи

слів в ядрі необхідно залежно від їх семантичної близькості. Кожна група повинна містити як явно комерційні запити (зі словами купити, продати, замовити, ціна і т.д.) так і явно інформаційні (зі словами фото, види, характеристики, особливості і т.д.).

Робота з контентом є важливим етапом популяризації комерційного веб-ресурсу. Для успішного популяризації кожна значуща сторінка вашого веб-ресурсу повинна містити унікальний текстовий контент. При оптимізації тексту головної сторінки необхідно визначитися з ключовими словами. Сучасні пошукові системи враховують внутрішні і комерційні фактори та чинники веб-ресурсу.

Комерційні чинники, які характеризують якісний комерційний веб-ресурс:

- Наявність сторінки з контактами, де надані всі можливі способи зворотного зв'язку: e-mail, телефон, Skype, ICQ і т.д.;
- Наявність сторінки «Про компанію», де надана юридична інформація, коротка історія компанії і її місія. Існує думка, що персоналізація компанії відіграє позитивну роль при ранжуванні комерційних сайтів (наявність фотографій співробітників, короткий опис і займана посада);
- Наявність схеми проїзду. Опис схеми проїзду на маршрутному таксі, трамваї, метро і т.д.;
- Наявність на веб-ресурсі акцій і знижок, банерів;
- Наявність на веб-ресурсі on-line консультанта;
- Можливість замовити зворотний дзвінок;
- Загальна величина товарної матриці. Достовірно відомо, що веб-ресурси з більшою товарною матрицею ранжуються значно краще;
- Можливості доставки з перерахуванням всіх можливих способів доставки товару;
- Можливість пошуку по веб-ресурсу;
- Можливість багаторівневого сортування товарів з розвинутою системою параметрів.

Враховавши вищеописані пункти в процесі популяризації комерційного веб-ресурсу буде покращена лояльність пошукових систем, а разом з нею і конверсія. Зовнішня популяризація комерційного веб-ресурсу залежить від стратегії зовнішньої оптимізації. Насамперед, необхідно мати кілька якісних посилань з сайтів новин. Одним з основних критеріїв, що характеризують успішний веб-ресурс є наявність зацікавленої соціальної спільноти. Насамперед варто створити групи для сайту в найбільших соціальних мережах. Пошукові системи активно враховують інтеграцію сайту з соціальними мережами і особливо цінується наявність трафіку з соціальних мереж. Потрібно також передбачити додавання соціальних кнопок на кожен товар вашого веб-ресурсу, наприклад, «Подобасться», «Поділитися» та можливість коментування і даний фактор буде враховуватися пошуковими системами, як позитивний сигнал.

Висновки

В результаті виконання даної роботи було виконано класифікацію методів та засобів популяризації комерційних веб-ресурсів, виявлено найбільш дієві та результативні методи та засоби. Також проаналізовано критичні помилки та зроблено висновки про методи їх уникнення. Виходячи з цього, була розроблена нова модель популяризації комерційних веб-ресурсів, що дасть змогу покращити рейтинг сайту, підвищити позиції у пошуковій видачі та збільшити загальну довіру. Був розроблений алгоритм залучення потенційних клієнтів, який дає можливість поетапно максимально ефективно і якісно оптимізувати інтернет-магазин, однак всі ці дії потребують постійних коректив на великому проміжку часу, інакше популяризацію веб-ресурсу не можна вважати успішним. Детально розглянуто всі етапи пошукової оптимізації інтернет-магазину, важливість популяризації в соціальних мережах.

Список літератури

1. Захарченко С. М. Застосування односторінкових веб-орієнтованих інтерфейсів в соціально значущих проектах. / С. М. Захарченко, Т. І. Трояновська, О. В. Бойко В. С. Рибаченко // Вісник ХНУ, №3, 2016р., с. 33-39.
2. Трояновська, Т. Алгоритм структурованої візуалізації XML-файлів [Текст] / Трояновська Т. І., Бойко О. В. // „Intrenet-Education-Science” : Міжнародна науково-технічна конференція, 11–14 жовтня 2016 р. – Вінниця : КІВЦ ВНТУ, 2016. – С. 142–144. ISBN 966–641–102–4.
3. Райцин М.А., Кураков О.С. «Эффективное продвижение сайтов». Москва, 2010г.
4. Гроховский Л.О. «SEO: руководство по внутренним факторам». Москва: Центр исследований и образования «ТопЭксперт.РФ», 2011г.
5. Гроховский Л.О. «Продвижение порталов и интернет-магазинов». Санкт-Петербург, 2014г.

Відомості про авторів

Трояновська Тетяна Іванівна, к.т.н., доцент кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ, кафедра обчислювальної техніки.

Савицька Людмила Анатоліївна, к. т. н., доцент кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ, кафедра обчислювальної техніки.

Тарануха Владислав Юрійович, бакалавр кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ, кафедра обчислювальної техніки.

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК УДК 004.432

О. Д. Азаров, О. І. Черняк, Л. А. Савицька

АСПЕКТИ КРИТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ВИКЛАДАННЯ ПОНЯТТЯ ПОЛІМОРФІЗМУ В ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОМУ ПРОГРАМУВАННІ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. У статті запропоновано аспекти подання інформації про поліморфізм в ООП на основі критичного підходу, який полягає у визначенні суті даної парадигми, її переваг і недоліків, аналізу проблем на цьому напрямку, розкриття механізмів поліморфізму та аналізу їх ефективності. Актуальність даної статті пов'язана з тим, що українським студентам властиве критичне сприйняття інформації як необхідна передумова для ефективного практичного використання отриманих знань. Загострення уваги студентів не лише на перевагах, але також і на недоліках інструментів мови програмування дозволяє їм визначити межі можливостей даних інструментів і, таким чином, застерегти від неефективного їх використання. Це особливо важливо для технології ООП, оскільки неправильне використання даного підходу може значно погіршити ефективність розробки програм. Дана методологія була успішно застосована автором у процесі викладання програмування в рамках дисциплін "Програмування", "Технології програмування", "Інженерія програмного забезпечення", "Прикладне програмування".

Ключові слова: об'єктно-орієнтоване програмування, методологія викладання, поліморфізм.

Анотация. В статье описаны аспекты представления информации о полиморфизме в ООП на основе критического подхода, который заключается в определении сути данной парадигмы, ее преимуществ и недостатков, анализа проблем на этом направлении, раскрытие механизмов полиморфизма и анализа их эффективности. Актуальность данной статьи связана с тем, что украинским студентам свойственно критическое восприятие информации как необходимое условие для эффективного практического использования полученных знаний. Концентрация внимания студентов не только на преимуществах, но также и на недостатках инструментов языка программирования позволяет определить границы возможностей данных инструментов и, таким образом, предостеречь от неэффективного их использования. Это особенно важно для технологии ООП, так как неправильное использование данного подхода может значительно ухудшить эффективность разработки программ. Данная методология была успешно применена автором в процессе преподавания программирования в рамках дисциплин "Программирование", "Технологии программирования", "Инженерия программного обеспечения", "Прикладное программирование".

Ключевые слова: объектно-ориентированное программирование, методология преподавания, полиморфизм

Abstract. The article describes the aspects of the presentation of information about polymorphism in the OOP on the basis of a critical approach which consists in determining the essence of this paradigm, its advantages and disadvantages, analysis of problems in this direction, disclosure of mechanisms of polymorphism and analysis of their effectiveness. The urgency of this article is due to the fact that Ukrainian students have a critical perception of information as a prerequisite for the effective practical use of the knowledge gained. The intensification of students' attention not only on advantages but also on the disadvantages of programming language tools allows them to determine the limits of the capabilities of these tools and, thus, to prevent their ineffective use. This is especially important for OOP, because the misuse of this approach may significantly impair the effectiveness of program development. This methodology was successfully applied by the author in the course of teaching programming within the disciplines "Programming", "Programming Technologies", "Software Engineering", "Applied Programming". Using the proposed approach in the learning process has confirmed its effectiveness.

Key words: object-oriented programming, teaching methodology, polymorphism.

Вступ

Об'єктно-орієнтований підхід до побудови програмного забезпечення дозволив значно підвищити ефективність програмування, що в період розширення сфер використання обчислювальної техніки стало вирішальним чинником успішного впровадження програмних засобів у виробничій діяльності і побуті людини. З'явившись вперше у мові C++, даний підхід забезпечив настільки значні переваги на етапі розробки програм, що отримав назву об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) і по суті став еталоном при створенні складних програмних комплексів [1]. На даний момент практично кожна сучасна мова програмування високого рівня в тому чи іншому виді реалізує принципи ООП. Тому глибоке розуміння студентами ООП і знання техніки його використання є необхідним етапом в отриманні фаху з програмної інженерії. Перед викладачами, які викладають програмування, постає задача роз'яснити суть, переваги і недоліки ООП та навчити творчо і ефективно його застосовувати. При вирішенні даної задачі виникає проблема, яка полягає у тому, що ментальність сприйняття інформації у вітчизняних студентів не зовсім відповідає способу її подання в іноземній літературі з програмування, на основі якої в основному відбувається викладання. [2]. До того ж, у своїй більшості, вітчизняні та російськомовні підручники і посібники фактично повторюють методологію подання матеріалу зарубіжних джерел [3].

Основною відмінністю освоєння навчального матеріалу українськими студентами є критичне його сприйняття, як необхідна передумова для практичного застосування. Однак автори зарубіжних книжок (а за ними і вітчизняні автори) старанно уникають критичного підходу у своїх роботах. Можливо це пов'язано з тим, що крім подання інформації дані роботи виконують ще й рекламну функцію. Тому часто

О. Д. Азаров, О. І. Черняк, Л. А. Савицька, 2017

студенти не розуміють переваги й недоліки інструментів ООП і через це не завжди знають, для яких задач, в яких випадках і як їх ефективно використовувати. При вивченні ООП одним з найбільш складних для студентів є поняття поліморфізму і механізмів його реалізації.

Мета

Метою статті є аспекти подання інформації про поліморфізм в об'єктно-орієнтованому програмуванні на основі критичного підходу що полягає у визначенні передумов і причин введення даної парадигми, її переваг і недоліків, аналізу проблем на цьому напрямку, розкриття механізмів поліморфізму та аналізу їх ефективності. Особлива увага приділяється віртуальним функціям, як найбільш складному поняттю для ефективного використання ООП. Дана методологія була застосована автором у процесі викладання програмування в рамках дисциплін "Програмування", "Технології програмування", "Інженерія програмного забезпечення", "Прикладне програмування" [4]. Використання запропонованого підходу у навчальному процесі підтвердило його ефективність.

Аспекти методології

Зазвичай вивчення ООП розпочинається з визначення трьох парадигм, що реалізує дана технологія: інкапсуляції, успадкування і поліморфізму. Проте, подальше викладання практично не пов'язане з цими парадигмами. Тому студенти, як правило, не розуміють значення такої інформації. Пропонується розпочати викладання даної теми з пояснення, що ООП було розроблено для ліквідації недоліків найбільш популярних на той час технологій програмування. Зростання розмірів розроблюваних програм виявили дві основних проблеми: по-перше, значно зросла кількість помилок у програмах, а по-друге, написання коду стало займати багато часу. Проте, існуючі в той час технології процедурного і структурного програмування перестали бути ефективними для подолання цих проблем. Тому постала необхідність розробити нову технологію, яка б дозволила зменшити кількість помилок та використовувати раніше написаний код. Саме ці задачі і вирішує технологія ООП, яка базується на трьох принципах: інкапсуляції (для зменшення кількості помилок), а також успадкуванні і поліморфізму (для повторного використання коду). Інкапсуляція дозволяє зменшити кількість помилок за рахунок абстрагування від внутрішньої структури об'єктів. Успадкування використовується для запозичення розробленого раніше коду при конструюванні власних класів, а поліморфізм, зменшуючи типову залежність, дозволяє розширити повторне використання коду. Такий підхід дозволить студентам зрозуміти, що означають парадигми ООП і чому саме ці парадигми реалізовані.

Слід зазначити, що ООП має як переваги, так і недоліки. До переваг, крім вирішення вказаних раніше задач, можна віднести можливість розпаралелювання процесу розробки і відлагодження програми, полегшення модифікації коду, рефакторинг та інші. Всі вони походять з того, що в даній технології програми розбиваються на окремі функціонально і структурно завершені модулі – об'єкти, а людині властиво думати об'єктами. Саме це і обумовило ефективність даної технології. Серед недоліків ООП можна вказати збільшення коду програм та часу їх виконання.

До вивчення механізмів поліморфізму потрібно переходити після освоєння студентами поняття інкапсуляції, та ознайомлення їх з основами успадкування. Головна суть інкапсуляції полягає у тому, що вона вирішує задачу зменшення кількості помилок за рахунок закриття змінних класу і організації контрольованого доступу до них за допомогою функцій. Успадкування вирішує задачу повторного використання коду за рахунок надання можливості при конструюванні нових класів використовувати як частини розроблені раніше класи, а не переписувати знову такий самий код. Поліморфізм також призначений для вирішення даної задачі, оскільки він дозволяє зробити код, що буде повторно використовуватись, більш універсальним за рахунок незалежності від оброблюваних типів. Проте, в мовах компіляторного типу неможливо досягти повної типової незалежності. Крім того, єдиного цілісного механізму поліморфізму не існує. Слід підкреслити, що принципи організації ООП і механізми їх реалізації – це різні речі, між якими може не бути однозначного відображення. Один принцип може реалізуватись декількома механізмами, а деякі механізми можуть реалізувати не один, а декілька принципів. Наприклад, перевизначення функцій можна віднести як до успадкування, так і до поліморфізму.

До основних механізмів реалізації поліморфізму у мові C++ можна віднести такі: перевантаження функцій, перевизначення функцій, віртуальні функції, інтерфейси, параметризовані типи. Дещо більші можливості поліморфізму мають мови C# [5] і Java [6].

Перевантаження функцій дозволяє вести певну незалежність від типу функції. Критичний підхід до вивчення поняття перевантаження функцій полягає у роз'ясненні того, що на рівні реалізації перевантаження являє собою просто створення функцій з однаковим іменем, але різними наборами параметрів. Потім у процесі компіляції дані функції отримують різні імена. Це полегшує розуміння

технології перевантаження.

Перевизначення функцій напряму створено для реалізації поліморфізму. Даний механізм полягає у тому, що у похідному класі створюється функція, яка має таку саму сигнатуру, як і функція базового класу, але інше тіло. Це дозволяє змінювати поведінку об'єктів похідних класів. Критичний підхід до вивчення поняття перевизначення функцій полягає у роз'ясненні того, що такий механізм не завжди коректно працює. Існують випадки, коли вказівнику на базовий клас потрібно присвоювати адресу об'єкта похідного класу. У таких випадках через раннє зв'язування замість перевизначеної функції похідного класу буде помилково викликатись функція базового класу. Саме для ліквідації даного недоліку і були створені віртуальні функції, які об'являються у базових класах і реалізують відкладене зв'язування. Приклад реалізації поліморфізму за допомогою віртуальних функцій у C++:

```
class A
{
public:
    virtual void F{cout<<"A";}
}
class B:public A
{
public:
    void F(){cout<<"B";}
}
void main()
{
    A a *pa;
    B b;
    pa=&a;
    pa->F(); // виводиться A
    pa=&b;
    pa->F(); // виводиться B
}
```

Критичний підхід до вивчення поняття віртуальних функцій полягає у роз'ясненні того, що механізм відкладеного зв'язування потребує додаткових витрат часу і пам'яті. Тому віртуальною функцією роблять лише у тому випадку, коли у поточній програмі чи при повторному використанні коду потрібно буде змінювати тип об'єкта зв'язаного із вказівником, через який викликається дана функція. Певним недоліком віртуальних функцій у мові C++ є те, що один раз специфікована віртуальною у базовому класі дана функція залишається віртуальною у всій ієрархії успадкування, що іноді є недоцільним. У мові C# надано більше можливостей для роботи з віртуальними функціями у контексті поліморфізму. Дана мова програмування дозволяє керувати віртуальністю функцій не лише у базовому, але і у похідних класах. Для цього у похідному класі при перевизначенні віртуальної функції вказується одне з ключових слів "override" чи "new". Якщо вказано "override", то функція реалізує об'явлену у базовому класі віртуальність і передає її далі по ієрархії успадкування. Якщо ж вказано "new" чи не вказано нічого, то функція не реалізує віртуальність і не передає її по ієрархії успадкування. Приклад керування віртуальністю у мові C#:

```
class A
{
    public virtual void F(){Console.WriteLine("A")}
}
class B:A
{
    public override void F(){Console.Writeline("B");}
}
class C:A
{
    public new void F(){Console.WriteLine("C");}
}
class Program
{
    A a=new B();
```

```

a.F(); // виводиться B
a=new C();
a.F(); // виводиться A
}

```

Інтерфейси розширюють можливості поліморфізму. Фактично використання інтерфейсу є видом успадкування певної функціональності а реалізація функцій інтерфейсу подібна до їх переважання із врахуванням того, що віртуальність у цих функціях закладена за замовчуванням. Тому всі особливості реалізації поліморфізму тут повторюються. Критичний підхід до викладання поняття інтерфейсів полягає у визначенні їхніх переваг і недоліків. Перевага інтерфейсів у тому, що за допомогою них можна реалізувати поліморфізм не лише для класів, які зв'язані між собою успадкуванням. Недоліком інтерфейсів є те, що їх не можна змінювати, оскільки це призведе до необхідності зміни коду у класах, що реалізують дані інтерфейси.

Параметризовані типи дозволяють реалізувати поліморфізм за рахунок відкладення конкретизації типів до етапу виконання. Вони широко використовуються при створенні бібліотек і дозволяють розробляти повністю незалежний від типів код. Проте, повна незалежність від типу є також і недоліком, оскільки такі бібліотеки повинні реалізувати лише ту обробку, що дозволена у всіх конкретизаціях. Недотримання цієї умови призводить до появи неконтрольованих помилок на етапі виконання. Для розширення можливостей повторного використання коду з параметризованими типами у мові C# введені так звані обмеження, що дозволяють на етапі компіляції виявляти помилки, викликані некоректною конкретизацією. Отже, параметризовані типи потрібно використовувати лише в тих випадках, коли над ними виконуються дії, допустимі для кожної з подальших конкретизацій.

Висновки

Мова програмування є інструментарієм для створення програм. Кожна з її технологій і кожен з механізмів є певними інструментами, що мають свої переваги і недоліки. Як правило, нові інструменти вводяться для ліквідації недоліків виявлених при використанні вже існуючих інструментів. Загострення уваги студентів не лише на перевагах, але також і на недоліках інструментів мови програмування дозволяє їм визначити межі можливостей даних інструментів і, таким чином, застерегти від неефективного їх використання. Це особливо важливо для технології ООП, оскільки неправильне використання даного підходу може значно погіршити ефективність розробки програм.

У статті подано лише окремі аспекти критичного підходу до викладання поліморфізму і взагалі ООП. Проте, даний підхід може бути розширений і використовуватись не лише для викладання поняття поліморфізму.

Список літератури

1. Страуструп Б. Язык программирования C++. Специальное издание / Б. Страуструп : Пер. с англ. – М.: Издательство Бином, 2011 – 1136 с.
2. Эккель Б. Философия C++. Практическое программирование / Б. Эккель, Ч. Эллисон : Пер. с англ. – СПб. : Питер, 2004. – 608 с.
3. Павловская Т. А. C/C++. Программирование на языке высокого уровня / Т. А. Павловская – СПб. : Питер, 2002. – 464 с.
4. Азаров О. Д. Прикладне програмування : навч. посібник / О. Д. Азаров, О. І. Черняк, Л. А. Савицька – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 131 с.
5. Троэлсен Э. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5, 6-е изд. / Э. Троэлсен : Пер. с англ. – М. : ООО "И. Д. Вильямс", 2013. – 1312 с.
6. Дейтел Х. М. Технология программирования на Java 2 / Х. М. Дейтел, П. Дж. Дейтел, С. И. Сантри : Пер. с англ. – М.: ООО "Бином-Пресс", 2003 – 560 с.

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович– док. техн. наук, професор кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет.

Черняк Олександр Іванович– канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет.

Савицька Людмила Анатоліївна, к. т. н., доцент кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ, кафедра обчислювальної техніки.

УДК 004.02

Р. М. Бабаков

АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

Донецкий национальный университет имени Василя Стуса, г. Винница

Аннотация. Для микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов сформулирована задача алгебраического синтеза, представленная частью процесса структурного синтеза данного класса автоматов. Дано формальное определение решения задачи алгебраического синтеза. Введено понятие методологии алгебраического синтеза. Предложен общий алгоритм алгебраического синтеза, основанный на полном переборе с ограничениями.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, алгебраический синтез, алгоритм.

Анотація. Для мікропрограммного автомата з операційним автоматом переходів сформульовано задачу алгебраїчного синтезу як частини процесу структурного синтезу даного класу автоматів. Дано формальне визначення рішення задачі алгебраїчного синтезу. Уведено поняття методології алгебраїчного синтезу. Запропонований загальний алгоритм алгебраїчного синтезу, оснований на повному переборі із обмеженнями.

Ключові слова: мікропрограммний автомат, операційний автомат переходів, алгебраїчний синтез, алгоритм.

Abstract. For a microprogram final-state machine with datapath of transition, the problem of algebraic synthesis, which is a part of the process of structural synthesis of a given class of final-state machine, is formulated. A formal definition of the solution of the problem of algebraic synthesis is given. The concept of the methodology of algebraic synthesis is introduced. A general algorithm for algebraic synthesis based on a full search with constraints is proposed.

Key words: microprogram final-state machine, datapath of transitions, algebraic synthesis, algorithm.

Введение

Микропрограммный автомат (МПА) представляет собой одну из форм реализации цифровых устройств управления (УУ), являющихся важной составной частью современных вычислительных систем и во многом определяющих их основные характеристики [1, 2]. Сегодня известно множество структурных реализаций МПА и методов их синтеза, использующих в своей основе различные подходы к оптимизации тех или иных параметров МПА [3, 4]. Одной из таких структур является микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП), использующий представление функции переходов автомата в виде множества частичных функций [5]. К настоящему моменту вопросы синтеза данного класса автоматов остаются неисследованными. Данная статья посвящена проблеме формализации процесса синтеза микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов.

Актуальность

Логическая схема МПА традиционно характеризуется относительно высоким быстродействием наряду со значительными затратами аппаратуры. При этом одной из важных научно-практических задач является уменьшение аппаратных затрат в логической схеме автомата, способствующее снижению стоимости вычислительных систем на базе МПА и расширению области их эффективного использования. Одним из путей решения данной задачи является реализация МПА в виде МПА с ОАП [6]. Это актуализирует задачу формализации процесса синтеза МПА с ОАП, рассматриваемую в данной работе.

Цель

Целью статьи является формализация процесса синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов.

Задачи

1. Формулировка задачи синтеза МПА с ОАП.
2. Определение методологии алгебраического синтеза МПА с ОАП.
3. Разработка формального метода синтеза МПА с ОАП.

Микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов

Структурная схема МПА с ОАП приведена на рис. 1 и включает следующие основные блоки [5, 6]:

– ОАП: операционный автомат переходов, выполняющий преобразования кода состояния автомата с помощью множества операций переходов (ОП) под управлением кода ОП, представленного множеством сигналов Z ;

– Z -подсхема: формирует код операции переходов Z на основании кода текущего состояния T и сигналов логических условий X ;

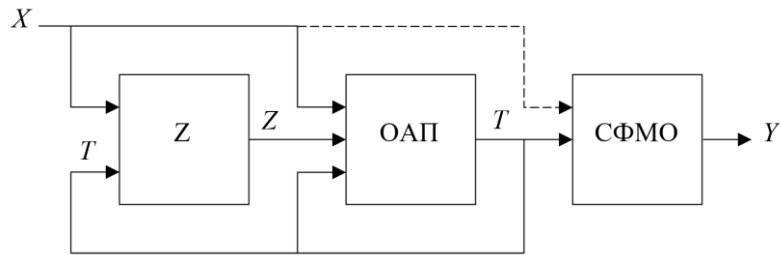


Рисунок 1 – Структурная схема МПА с ОАП

– СФМО: схема формирования микроопераций, формирующая множество микроопераций Y . Наличие связи, показанной пунктиром, позволяет рассматривать данную структуру как автомат Мили, отсутствие связи – как автомат Мура.

Внутренняя структура ОАП включает операционную часть (ОЧ), образованную множеством комбинационных схем (КС) и мультиплексором результата (МХ), а также регистр памяти (РП), используемый в каждой операции ОАП в качестве регистра исходных данных и регистра результата (рис. 2).

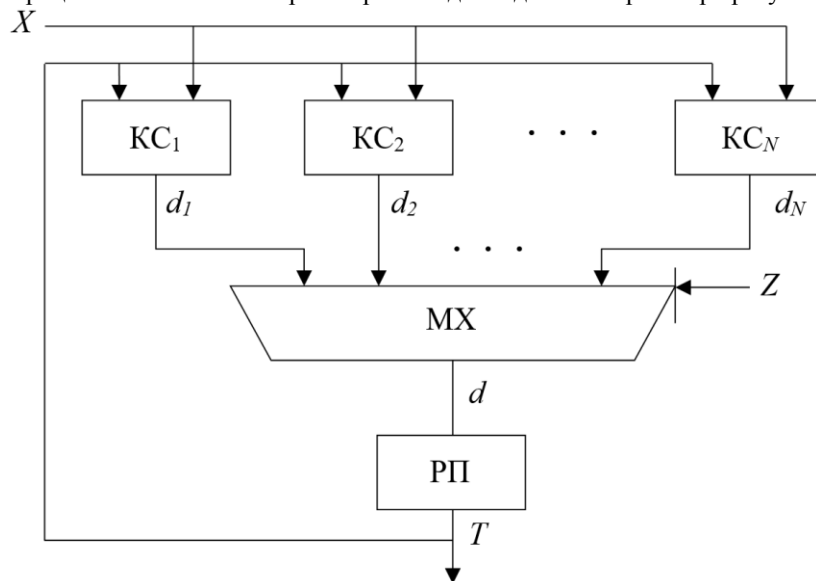


Рисунок 1 – Структурная схема операционного автомата переходов

Каждый блок КС отражает определенный закон преобразования кодов состояний автомата в соответствии с одной из промежуточных алгебр переходов, реализуя, таким образом, некоторое подмножество переходов автомата и формируя структурный (двоичный) код d_i [7]. Мультиплексирование кодов d_i - d_N дает код состояния перехода d , поступающий в РП. Разрядность кода Z определяется как $\lceil \log_2 N \rceil$.

В работе [7] приведена математическая модель МПА с ОАП, представляемая системой изоморфизмов (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\delta_1} \leftrightarrow G_{I_1} \leftrightarrow G_{d_1}; \\ G_{\delta_2} \leftrightarrow G_{I_2} \leftrightarrow G_{d_i}; \\ \dots \\ G_{\delta_{N_i}} \leftrightarrow G_{I_{N_i}} \leftrightarrow G_{d_{N_i}}; \\ G_{\delta} \leftrightarrow G_d; \\ G_{\lambda} \leftrightarrow G_l. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь G_{δ_i} , G_{I_i} , G_{d_i} – соответственно абстрактная частичная, промежуточная и структурная частичная алгебры переходов, реализующие один и тот же закон преобразования кодов состояний для различных интерпретаций кодов состояний. Изоморфизм $G_{\delta} \leftrightarrow G_d$, устанавливаемый между абстрактной алгеб-

рой переходов G_δ и структурной алгеброй переходов G_d , выражает однозначность и уникальность структурных (двоичных) кодов всех состояний автомата. Подобную задачу выполняет и изоморфизм $G_\lambda \leftrightarrow G_l$, устанавливаемый между абстрактной алгеброй выходов G_λ и структурной алгеброй выходов G_l .

Задача алгебраического синтеза МПА с ОАП

Если система (1) задана, то:

- заданы абстрактная и структурная алгебры переходов, причем таким образом, что переходы автомата реализуются с помощью множества операций переходов;
- заданы абстрактная и структурная алгебры выходов, элементы которых совпадают с одноименными элементами абстрактной и структурной алгебр переходов соответственно.

Иначе говоря, заданная система (1) говорит о том, что для некоторого абстрактного автомата существует эквивалентный ему структурный автомат, построенный на основе принципа операционного преобразования кодов состояний.

При синтезе логической схемы МПА с ОАП необходимо учитывать следующее:

1. Изоморфизм $G_\delta \leftrightarrow G_d$ системы (1) определяет структурные (двоичные) коды состояний и их разрядность, которая учитывается при синтезе всех узлов логической схемы МПА с ОАП.

2. Каждая тройка изоморфизмов $G_{\delta_i} \leftrightarrow G_{l_i}$, $G_{l_i} \leftrightarrow G_{d_i}$ и $G_{\delta_i} \leftrightarrow G_{d_i}$, представленная в системе (1) единым изоморфизмом $G_{\delta_i} \leftrightarrow G_{l_i} \leftrightarrow G_{d_i}$, выступает в качестве исходных данных для построения комбинационной схемы $КС_{d_i}$, которая реализует операцию переходов O_i .

3. Изоморфизм $G_\lambda \leftrightarrow G_l$ не затрагивает функцию переходов автомата, в связи с чем не имеет отношения к операционному автомату переходов. С этой точки зрения система (1) не накладывает каких-либо ограничений на способ реализации функции выходов автомата. Тем не менее, объединение изоморфизмов $G_\lambda \leftrightarrow G_l$ и $G_\delta \leftrightarrow G_d$ в одной системе требует, чтобы синтез блока СФМО выполнялся для значений структурных кодов состояний и структурных кодов входных сигналов, определяемых изоморфизмом $G_\delta \leftrightarrow G_d$.

Таким образом, построение системы (1) предшествует синтезу логической схемы МПА с ОАП. Назовем процесс построения системы (1) *алгебраическим синтезом МПА с ОАП*. Тогда структурный синтез МПА с ОАП может быть представлен двумя этапами:

1. Алгебраический синтез автомата.
2. Синтез логической схемы автомата.

Следовательно, получаем две задачи структурного синтеза МПА с ОАП:

- задача алгебраического синтеза автомата;
- задача синтеза логической схемы автомата по результатам алгебраического синтеза.

Под *задачей алгебраического синтеза МПА с ОАП* будем понимать задачу построения системы изоморфизмов (1). Суть данной задачи состоит в выявлении и установлении закономерностей в преобразовании структурных кодов состояний и входных сигналов при реализации автоматных переходов.

Проведенные автором исследования показали, что для одного и того же автомата может быть сформировано, в общем случае, несколько различных систем изоморфизмов (1). Назовем любую построенную для заданного автомата систему (1), в которой $N_l > 0$, *формальным решением задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП*, а множество всех возможных систем – *множеством формальных решений* данной задачи для заданного автомата. Систему (1), в которой $N_l = 0$, не будем считать формальным решением, поскольку в ней все переходы реализуются каноническим способом без использования промежуточных алгебр, а структура МПА с ОАП, вырождается в каноническую структуру МПА [2].

Исключим из множества формальных решений те системы, при использовании которых аппаратные затраты в логической схеме МПА с ОАП оказываются больше или равны затратам в логической схеме эквивалентного МПА с канонической структурой. Также исключим системы, при которых результирующая схема МПА с ОАП не удовлетворяет каким-либо дополнительным критериям проектирования. Полученное в результате множество систем изоморфизмов вида (1) назовем *множеством эффективных решений задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП*, подразумевая под эффективностью выигрыш в аппаратных затратах.

Можно утверждать, что во множестве эффективных решений существует такая система вида (1), при которой логическая схема МПА с ОАП при заданных условиях проектирования обладает минималь-

но возможными затратами аппаратуры среди всех систем данного множества. Назовем такую систему *оптимальным решением задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП*. Теоретически допустимо существование нескольких оптимальных решений, образующих *множество оптимальных решений задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП*.

В общем случае в процессе алгебраического синтеза МПА с ОАП формирование множества оптимальных решений не является обязательным. Не является обязательным и поиск всех элементов множества эффективных решений. Тем не менее, увеличение количества найденных эффективных решений способствует повышению результативности структурного синтеза МПА с ОАП, поскольку каждое очередное найденное решение может оказаться по критерию аппаратурных затрат лучше всех решений, найденных ранее.

Любое формальное решение задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП предполагает некоторые исходные данные и результаты. Пусть абстрактный автомат задан двойкой $\langle G_\delta, G_\lambda \rangle$, компоненты которой известны до начала формирования системы изоморфизмов (1) и при алгебраическом синтезе могут рассматриваться в качестве исходных данных [7]. В общем случае к исходным данным могут быть также отнесены следующие факторы:

1. Критерий оптимизации логической схемы автомата.

Помимо основного критерия оптимизации, которым для МПА с ОАП выступают затраты аппаратуры в логической схеме автомата, в процессе проектирования могут быть установлены различные ограничения к характеристикам результирующей схемы, например:

- минимально достаточное быстродействие;
- максимально допустимое время выполнения алгоритма;
- максимально допустимое энергопотребление;
- совместимость с тем или иным элементным базисом;
- надежность

и другие. Критерии оптимизации и установленные ограничения могут оказывать влияние как на алгоритмическую реализацию отдельных этапов синтеза МПА с ОАП, так и на их последовательность.

2. Множество операций переходов.

В некоторых случаях множество операций переходов или его часть не формируются в процессе алгебраического синтеза автомата, а являются изначально заданными и неизменяемыми. Примером является ситуация, когда в качестве ОАП выступает некоторое стандартное АЛУ, содержащее фиксированный набор функциональных узлов. В этом случае множество операций переходов не может выбираться произвольно и формируется из множества операций данного АЛУ. Подобные ограничения, накладываемые на множество ОП, не могут привести к невозможности синтеза МПА с ОАП – те переходы, которые не могут быть реализованы одной из ОП, всегда могут быть реализованы отдельной системой канонических уравнений. Тем не менее, следствием ограничений может быть то, что результирующая схема автомата не будет удовлетворять заданным критериям проектирования.

3. Структурные коды состояний и входных сигналов.

С теоретической точки зрения допустима ситуация, когда структурные коды состояний заданы до начала алгебраического синтеза автомата. Это возможно, например, в том случае, если схема СФМО по каким-то причинам синтезирована заранее в виде отдельного модуля. Такая схема рассчитана на использование в качестве кодов состояний строго определенных двоичных векторов. Также изначально заданными могут быть и структурные коды входных сигналов.

Что касается результатов решения задачи алгебраического синтеза, то в общем случае к ним могут быть отнесены все без исключения элементы системы (1). При этом отдельно следует выделить возможность модификации элементов G_δ и G_λ , что эквивалентно модификации исходного абстрактного автомата. Данная возможность обусловлена существованием ряда известных методов преобразования алгоритма, реализуемого МПА [2], результатом которых является увеличение количества состояний и переходов автомата. Если для алгоритма, имплементируемого МПА с ОАП, такие преобразования допустимы, их использование в процессе алгебраического синтеза автомата может оказаться целесообразным и способствовать повышению эффективности методов синтеза МПА с ОАП.

Методология алгебраического синтеза МПА с ОАП

Под *методом алгебраического синтеза МПА с ОАП* будем понимать некоторую последовательность этапов, в результате выполнения которых может быть получено требуемое (формальное, эффективное или оптимальное) решение задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП, выражаемое системой изоморфизмов (1), или множество таких решений.

Разработка метода алгебраического синтеза не является очевидной задачей. В данном процессе следует иметь в виду, что для отдельного этапа синтеза допустимо, в общем случае, несколько различных

алгоритмических реализаций. Например, если требуется выбрать промежуточные коды состояний при заданном множестве операций переходов, можно воспользоваться следующими способами:

- полный перебор вариантов;
- частичный перебор вариантов;
- алгоритмы, не использующие перебор вариантов;
- алгоритмы, допускающие преобразование исходной граф-схемы алгоритма (ГСА)

и другие. Отдельные реализации могут различаться как временем выполнения, так и качеством результата. Также при разработке метода алгебраического синтеза должны учитываться факторы, выступающие в качестве исходных данных. Они могут оказывать влияние как на реализацию этапов синтеза, так и на их последовательность.

Таким образом, можно говорить о потенциальном существовании множества методов алгебраического синтеза МПА с ОАП, характеризующихся разной эффективностью с позиций временных затрат и результативности. Методы могут различаться:

- исходными данными;
- набором этапов синтеза;
- последовательностью этапов;
- алгоритмической реализацией отдельных этапов.

Вариативность этих составляющих приводит к задаче разработки методов алгебраического синтеза МПА с ОАП. В рамках данной задачи должны рассматриваться такие вопросы, как:

- поиск принципов и подходов к организации и построению методов алгебраического синтеза МПА с ОАП;
- разработка методов, приемов, способов и процедур, используемых при реализации отдельных этапов алгебраического синтеза автоматов;
- разработка формализованных методов алгебраического синтеза МПА с ОАП;
- анализ эффективности методов алгебраического синтеза и определение области их применения.

Каждый из этих вопросов не имеет однозначного решения и образует отдельное направление исследований.

Назовем научную область, охватывающую любые теоретические и практические вопросы, имеющие отношение к алгебраическому синтезу МПА с ОАП, *методологией алгебраического синтеза микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов*. Термин «методология» здесь будем трактовать как совокупность принципов и подходов к выполнению определенной деятельности (теоретический аспект), а также как совокупность методов, приемов, способов и процедур соответствующей деятельности (практический аспект) [8]. По мнению автора, введение понятия методологии алгебраического синтеза МПА с ОАП способствует систематизации существующих и последующих научных результатов в данной предметной области.

Метод алгебраического синтеза МПА с ОАП

В данной работе предлагается метод алгебраического синтеза МПА с ОАП, основанный на частичном переборе вариантов и использующий фиксированное множество операций переходов наряду с возможностью добавления транзитных состояний [9]. Метод включает следующие основные шаги:

1. Выбор разрядности структурных кодов состояний и задание множества допустимых структурных кодов состояний.
2. Определение для каждого состояния a_i частоты выполнения $q(a_i)$ по методике, изложенной в [10].
3. Выбор состояния $a(q_{max})$ с максимальным значением q .
4. Перебор в некотором порядке всех структурных кодов.
5. Кодирование состояния $a(q_{max})$ очередным структурным кодом.
6. Попытка реализовать все переходы из состояния $a(q_{max})$ посредством операций переходов из заданного множества ОП. Если реализация возможна, переход к шагу 7, иначе – к шагу 9.
7. Реализация остальных переходов автомата с помощью операций переходов или каноническим способом, с учетом результатов выполнения шага 5.
8. Представление результатов выполнения шагов 5-7 в виде формального решения задачи алгебраического синтеза и добавление его ко множеству формальных решений.
9. Если для кодирования $a(q_{max})$ перебраны все возможные структурные коды, переход к шагу 10, иначе – к шагу 5.
10. Анализ сформированного множества формальных решений задачи алгебраического синтеза.

Добавление транзитных состояний, допустимое при выполнении шагов 6 и 7, приводит к увеличению среднего числа переходов автомата, выполняемых за один цикл его работы. Это число тем больше, чем больше частота состояния, из которого осуществляется переход в транзитное состояние. В результате увеличивается среднее время выполнения алгоритма, имплементируемого МПА с ОАП.

С этой точки зрения целесообразно в первую очередь реализовывать переходы из состояния с максимальной частотой выполнения (шаги 2 и 3 алгоритма). На шаге 6 количество кодов, допустимых для кодирования состояний переходов из $a(q_{max})$, является максимально возможным, что в общем случае способствует снижению количества транзитных состояний в данных переходах.

Пусть, например, задано множество операций переходов $O = \{O_1, O_2\}$, где

$$O_1 : K(a^{t+1}) = (K(a^t) + 5) \bmod 8, \tag{2}$$

$$O_2 : K(a^{t+1}) = K_{I_2}(a^t) \oplus 100_2. \tag{3}$$

Здесь $K(a^t)$ – код текущего состояния, $K(a^{t+1})$ – код состояния перехода, «mod 8» – операция определения остатка от целочисленного деления на 8, « \oplus » – операция поразрядного исключающего ИЛИ.

Пусть МПА с ОАП задан ГСА Γ (рис. 3). На рис. 4 графически показано одно из формальных решений задачи алгебраического синтеза, полученное в результате выполнения предложенного метода алгебраического синтеза.

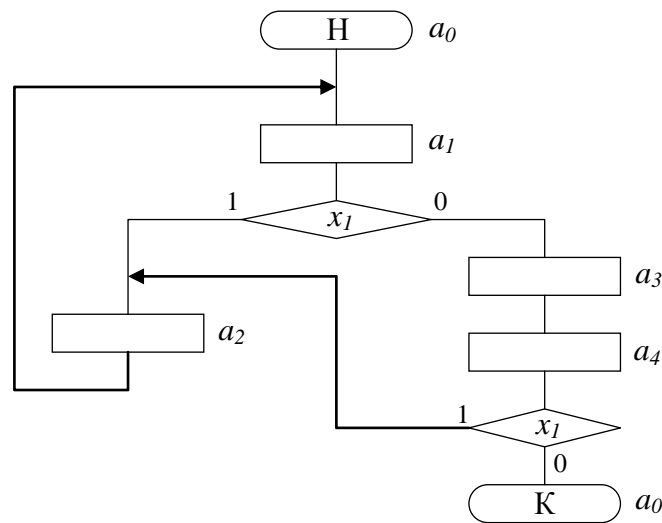


Рисунок 3 – Граф-схема алгоритма Γ

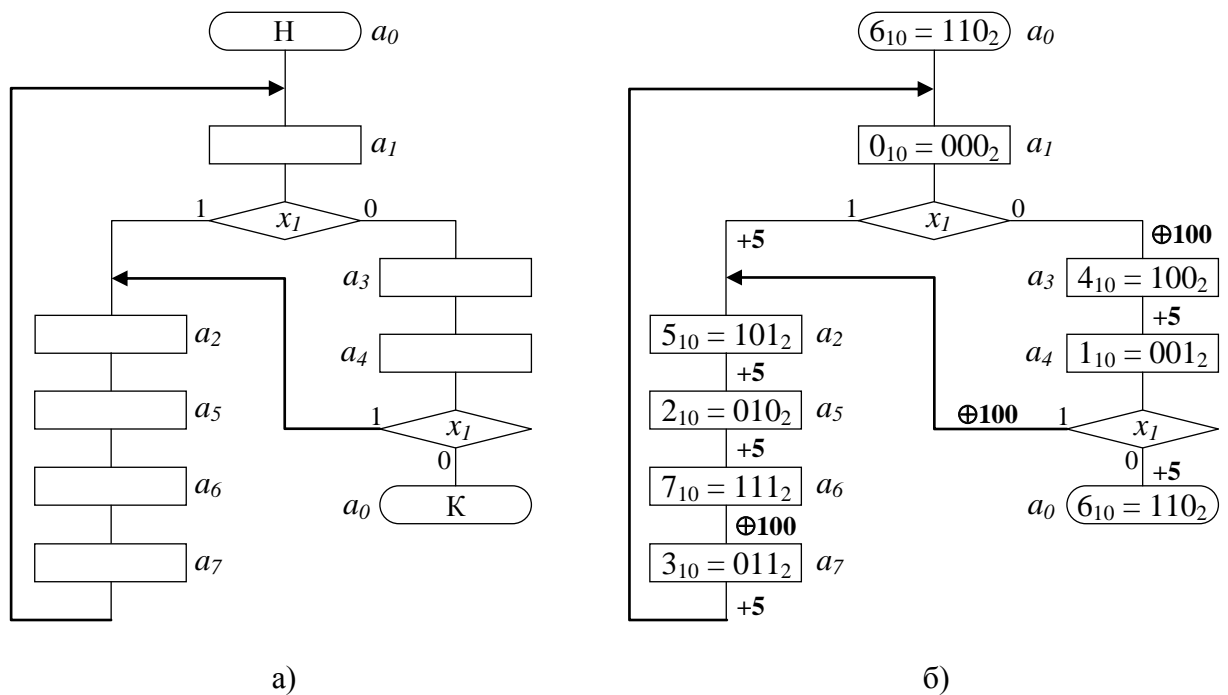


Рисунок 4 – Графическое представление формального решения задачи алгебраического синтеза (ГСА Γ)

На рис. 4, *a* показана преобразованная ГСА G , содержащая три дополнительных транзитных состояния a_5 - a_6 . На рис. 4, *b* показаны коды состояний и ОП, используемые для реализации переходов автомата. При этом переход из a_0 в a_1 реализуется каноническим способом. Отметим, что при вероятности истинности условия x_1 , равной 0.2, состояние a_1 в ГСА G обладает максимальным значением q . По этой причине a_1 было закодировано первым, благодаря чему все переходы из a_1 реализованы без использования транзитных состояний.

Чтобы определить, является ли полученное формальное решение задачи алгебраического синтеза эффективным, необходимо сравнить аппаратные затраты в логической схеме МПА с ОАП с затратами в схеме МПА с другой структурой (например, канонического МПА, [2]). Для этого может быть использована методика HDL-моделирования, предполагающая использование базиса ПЛИС и соответствующих САПР [11, 12].

Выводы

1. Задача алгебраического синтеза МПА с ОАП сводится к заданию системы изоморфизмов (1) и является одним из этапов структурного синтеза данного класса автоматов. Данная задача наряду с методами ее решения является частью методологии алгебраического синтеза МПА с ОАП.

2. Предложенный метод алгебраического синтеза МПА с ОАП позволяет получить формальное решение задачи алгебраического синтеза, однако не определяет его эффективность.

3. Полученные результаты определяют дальнейшее направление исследований, заключающееся в формализации процесса структурного синтеза МПА с ОАП, включающего, наряду с алгебраическим синтезом, синтез логической схемы автомата.

Список литературы

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов / В.М. Глушков. – М.: Физматгиз, 1962. – 476 с.
2. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов / С.И. Баранов. – Л.: Энергия, 1979. – 232 с.
3. Баркалов А.А. Синтез микропрограммных устройств управления / А.А. Баркалов, А.В. Палагин. – Киев: Институт кибернетики НАН Украины, 1997. – 135 с.
4. Баркалов А.А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах / А.А. Баркалов. – Донецк, ДонНТУ, 2002. – 262 с.
5. Бабаков Р.М. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Кибернетика и системный анализ. – 2011. – №2. – С. 21-26.
6. Babakov R. Research of Efficiency of Microprogram Final-State Machine with Datapath of Transitions / R. Babakov, A. Barkalov, L. Titarenko // Proceedings of 14th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). – February 21-25, 2017. – Polyana, Ukraine. – P. 203-206.
7. Бабаков Р.М. Математическая модель микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов / Р.М. Бабаков // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника». Выпуск 1 (22). – Красноармейск, ДонНТУ, 2016. – С. 54-57.
8. Філософський енциклопедичний словник / [Н.В. Хамітов]. – К.: Інститут філософії Національної академії наук України, Абрис, 2002. – 744 с.
9. Бабаков Р.М. Использование транзитных состояний в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов / Р.М. Бабаков, И.В. Ярош // Сборник научных трудов ДонНТУ. Серия: «Вычислительная техника и автоматизация». Выпуск 1 (29). – Красноармейск: ДонНТУ, 2016. – С. 56-64.
10. Майоров С.А. Структура электронных вычислительных машин / С.А. Майоров, Г.И. Новиков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 384с.
11. Зотов Ю.В. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы XILINX в САПР WebPack ISE / Ю.В. Зотов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 624 с.
12. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL / И.Е. Тарасов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 252 с.

Сведения об авторах

Бабаков Роман Маркович – к. т. н., доцент, доцент кафедры прикладної механіки та комп'ютерних технологій.

УДК 004.3'144:621.3.087.92

М. Л. Петришин, В. А. Ровінський

АЦП ПОРОЗРЯДНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ ДЛЯ ПРИШВИДШЕНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ.

Анотація. У роботі запропоновано метод, розроблено моделі, алгоритми та структурні схеми засобів аналого-цифрового перетворення із порозрядним врівноваженням в порядку від значень молодших позиційних мір до старших, що дозволило пришвидшити перетворення у вузьких діапазонах, визначених специфікою джерел інформації в системах керування технологічними процесами. Застосування кола визначення різниці двох знаків вхідної аналогової величини та сформованої суми врівноваження в околах значення одиничного кванту двох знаків, суміжних до цілочислового значення суми врівноваження, дозволило завершити процес перетворення за меншу кількість ітераційних кроків врівноваження. Здійснено порівняльну кількісну оцінку операційної складності запропонованих методів із класичним методом порозрядного врівноваження.

Ключові слова: перетворення форми інформації, аналого-цифрове перетворення, АЦП порозрядного врівноваження.

Аннотация. В работе предложены метод, разработаны модели, алгоритмы и структурные схемы средств средств преобразования с порозрядным уравниванием начиная от младших позиционных мер до старших, что позволило ускорить процесс преобразования в узких диапазонах, определенных спецификой источников информации в системах управления технологическими процессами. Применение цепи определения разницы двух знаков входной аналоговой величины и сформированной суммы уравнивания в пределах значения единичного кванта двух знаков целочисленного значения суммы уравнивания позволило завершить процесс преобразования за меньшее количество итерационных шагов уравнивания. Произведена сравнительная количественная оценка операционной сложности предложенных методов в сравнении с классическим методом порозрядного уравнивания.

Ключевые слова: преобразование формы информации, аналого-цифровое преобразование, АЦП порозрядного уравнивания.

Abstract. In this paper proposed a method, models, algorithms and structural schemes was developed of analogue-digital convertor with bitwise balancing in order from the lower positional measures values to older ones, which allowed to observe the transformations in the narrow bands defined by the specifics of the information sources in the technological control systems. Applying the circle of determining the difference between the two signs of the input analog value and the sum of the sum of the magnitudes in the okolahs, the value of the unit quantum of two symbols adjacent to the integer value of the sum of the balancing, allowed to complete the conversion process with less number of iterative balancing steps. The comparative quantitative estimation of the operational complexity of the proposed methods with the classical method of bitwise balancing is carried out.

Key words: transformation of information form, analog-to-digital conversion, ADC with bitwise balancing.

Вступ

Затосування інформаційних технологій в системах керування складними розосередженими технологічними процесами є ключовим чинником техніко-економічної ефективності виробництва. Ключову роль в таких системах відіграють засоби інформаційного спряження системи керування та технологічного процесу. Перетворення форми інформації (ПФІ) є системною функцією, що може займати до 50% часу, відведеного на процеси керування системою [1]. Тенденція зростання обсягів інформації, загострення вимог щодо отримання оперативної достовірної інформації про стан контрольованих технічних чи технологічних об'єктів вимагає удосконалення засобів ПФІ щодо точності, швидкодії та надійності. Зокрема, на атомному енергоблоці перетворюють до 10 тис. параметрів. По найбільш відповідальних параметрах крім централізованого здійснюється швидкодійний індивідуальний контроль [2]. Специфіка експлуатації автоматизованих систем управління технологічними процесами полягає в підтримці оптимальної працездатності об'єкта управління за результатами перетворення фізичних величин у вузьких діапазонах меж їх зміни [3]. Немає необхідності визначати із заданою швидкодією або точністю числові значення фізичних величин в повному діапазоні перетворення. Необхідно контролювати відповідність значень фізичних величин встановленим оптимальним значенням або межам (допускам). В складних і коштовних системах керування технологічними процесами переробки нафти, зокрема зневоднення і знесолення сирової нафти в електродегідраторах, здійснюється нагрівання нафти до температури 210÷220°C. Нафта, попередньо зневоднена і обезсолена, подається для нагрівання до 220÷230°C. Напіввідбензинена нафта нагрівається до температури 340÷350°C. Залишок з колони нагрівається до 340÷360°C. Зазвичай при атмосферній перегонці нафти температура підтримується на рівні 330÷360°C, а при вакуумній - 410÷450°C [4]. Типові режими технологічних параметрів процесу коксування: первинна сировина нагрівається до 370÷390°C, вступає в контакт з зустрічною парою, яка має температуру 430÷450°C. Температура верху реактора 420÷450°C, температура нагріву вторинної сировини 490÷510°C. З низу колони ректифікації вторинна сировина прокачується через змійовик з температурою 485÷500°C [5]. При формуванні плівок полікристалічного кремнію пластина повинна бути розігріта від нормальної температури до 600÷650°C, а плівок нітриду кремнію до 750÷800°C і утримуватися в зазначених діапазонах [6].

М. Л. Петришин, В. А. Ровінський, 2017

Актуальність

Таким чином, в автоматизованих системах управління технологічними процесами існує необхідність перетворення інформації в досить вузьких діапазонах оптимальних значень, що може становити від кількох до кільканадцяти відсотків повного діапазону визначення вхідного параметру. Цільовою функцією системи управління складними технологічними об'єктами є вироблення керуючих дій по утриманню системи в оптимальному режимі шляхом пришвидшеного перетворення інформації у вузькому діапазоні визначення параметру перетворення з метою оперативного запобігання виходу системи з оптимального та входження в нештатні чи аварійні режими.

Проблеми підвищення точності і швидкодії ППФІ вирішувалися і частково вирішуються за рахунок застосування більш досконалої елементарної бази. Так в роботах [7-10] запропоновані логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі (ЛАЦП) на комутованих конденсаторах, які значно переважають за технічними характеристиками логарифмічні перетворювачі інших типів та лінійні АЦП і тому викликають підвищену зацікавленість розробників апаратури найрізноманітнішого призначення. Ці ЛАЦП поділяються на ЛАЦП з перерозподілом і ЛАЦП із накопиченням заряду у конденсаторних комірках. Сьогодні ЛАЦП із перерозподілом заряду вивчено достатньо повно, проте ЛАЦП із накопиченням заряду досліджено недостатньо, і це ускладнює їх практичну реалізацію та оптимізацію. Серед різних типів ЛАЦП найвищі техніко-економічні показники забезпечують ЛАЦП на комутованих конденсаторах (КК), зокрема: вищу точність, безпосереднє перетворення аналогового вхідного сигналу на число-імпульсний код, можливість одержати довільну основу логарифма, більшу технологічність у виготовленні. Переважна більшість ЛАЦП на КК побудована на основі використання явища перерозподілу заряду (ПЗ) і хоч вже розроблено порівняно багато різних ЛАЦП на КК з накопиченням заряду (НЗ), питання систематизації та оцінки можливостей таких ЛАЦП залишаються невирішеними. З метою подальшого підвищення точності та швидкодії ЛАЦП потрібно використовувати складніші алгоритми логарифмічного аналого-цифрового перетворення, які б зменшували кількість тактів перетворення.

Проте за умов, коли можливості технології на певному етапі вичерпані, потрібні принципово інші підходи, що базуються, зокрема, на введенні надлишковості на різних рівнях проектування пристроїв і систем: функціонально-алгоритмічному, інформаційному і структурно-схемотехнічному. Слід зазначити, що перший і третій напрямки вже досить тривалий період мають місце в теоретичних дослідженнях і практичних розробках ряду наукових шкіл і дали свої позитивні результати. Проте зазначені підходи в основному дозволяють вирішувати тільки одну з проблем: або підвищення точності, або – швидкодії. Так, наприклад, підвищення швидкості високоточного аналого-цифрового перетворення може здійснюватися структурно-схемотехнічним шляхом (паралельно-последовні структури) або функціонально-алгоритмічним (багатокрокові інтегруючі АЦП). Підвищення ж точності, що досягається за допомогою даних підходів, орієнтованих на різні методи коригування статичних похибок, як правило, призводить до зниження швидкодії перетворювачів. У цьому зв'язку визначену нішу посідають дослідження, пов'язані з вирішенням проблем комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в проєктовані пристрої окремого виду надлишковості, а саме, у формі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ).[11-13].

Використання покращеної елементарної бази та застосування НПСЧ дає значне пришвидшення процесів ПФІ, проте актуальним є проведення досліджень щодо моделювання та розробки методів і засобів пришвидшеного аналого-цифрового перетворення (АЦП) у визначених вузьких діапазонах інформаційних параметрів та оптимального функціонування системи керування та нижчою швидкістю перетворення за межами діапазону оптимальних значень повного діапазону перетворення інформації.

Мета

Метою роботи є підвищення швидкодії АЦП внаслідок розробки та застосування методів адитивного та субтрактивно-адитивного порозрядного врівноваження зі змінним порядком формування суми розрядних ваг врівноваження від молодших значень розрядних ваг до старших значень ваг, а також визначенням різниці двох знаків вхідної аналогової величини та сформованої суми врівноваження в околах одиничного молодшого кванта, суміжних до цілочислового значення суми врівноваження, що дозволило збільшити швидкість у вузьких піддіапазонах перетворення, визначених специфікою джерел інформації в системах керування технологічними процесами.

Задачі

Для вирішення поставленої мети сформульовано та вирішено такі задачі наукового дослідження:

1. запропоновано нові методи адитивного та субтрактивно-адитивного врівноваження;
2. побудовано математичні моделі та блок-схеми алгоритмів АЦП;
3. здійснено порівняння запропонованих методів адитивного та субтрактивно-адитивного врівноваження з типовим методом порозрядного перетворення;

4. розроблено структурні схеми АЦП порозрядного врівноваження, що реалізують запропоновані методи перетворення.

Розв'язання задач

Метод адитивного перетворення

Метод адитивного перетворення ґрунтується на здійсненні ітераційного врівноваження в порядку формування на кожній з y -их ітерацій суми ваг S_y розрядів від значень молодших розрядних ваг $w_0=2^0$ до значень старших розрядних ваг $w_{n-1}=2^{n-1}$ із контролем попадання в суміжні межі молодшого кванту двох знаків $-1 \leq \Delta_y < 0$ та $0 \leq \Delta_y < 1$, де $\Delta_y = z - S_y$, z - числовий еквівалент величини перетворення U_{trans} , ціле число, приведене до числової шкали квантів повного діапазону перетворення $[0 \div 2^n)$. При цьому, на кожному y -му ітераційному кроку здійснюється формування значення суми S_{y+1} шляхом тільки додавання відповідних значень розрядних ваг w_p до значення суми S_y або тільки віднімання відповідних значень розрядних ваг w_r від значення суми S_y в залежності від значення різниці Δ_y , проте, значення коефіцієнта a_p не підлягає зміні одразу в наступній $y+1$ -ій ітерації.

$$S_{y+1} = \begin{cases} S_y - w_r, & \text{якщо } \Delta_y < -1 \\ S_y + w_p, & \text{якщо } \Delta_y \geq 1 \end{cases}, \quad (1)$$

$$a_r = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \Delta_y \geq -1 \\ 1, & \text{якщо } \Delta_y < -1 \end{cases}, \quad a_p = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \Delta_y < 1 \\ 1, & \text{якщо } \Delta_y \geq 1 \end{cases}.$$

Ітераційне збільшення значення сформованої суми S_{y+1} здійснюється шляхом додавання в порядку від значень молодших розрядних ваг w_0 до старших w_{i-1} за умови $\Delta_y \geq 1$. Ітераційне зменшення значення сформованої суми S_y можливе тільки шляхом віднімання в порядку від значень молодших ваг w_0 до старших w_{i-2} , тобто значення ваги w_r , яка підлягає відніманню в поточній зворотній r -ій ітерації, визначається в порядку завжди від значень молодших розрядів ваг w_1 до максимально старших w_{i-2} до моменту отримання різниці $\Delta_y > 0$, після чого можливе або завершення процесу перетворення при $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$, або ж, за умови $\Delta_y \geq 1$, можливе додавання розрядних ваг w_i від значень молодших розрядів ваг w_1 до старших w_{i-3} і так циклічно до виконання умови попадання значення z в межі діапазонів $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$ та завершення процесу врівноваження.

На кожному ітераційному кроку за результатами порівняння різниці Δ_y із межами визначення одиничного кванту ± 1 , якщо значення z потрапляє в діапазони $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$, процес перетворення z завершується

$$z \in \begin{cases} [S_y - 1; S_y), & \text{якщо } -1 \leq \Delta_y < 0 \\ [S_y; S_y + 1), & \text{якщо } 0 \leq \Delta_y < 1 \end{cases}, \quad (2)$$

інакше визначається значення суми S_{y+1} (1) та виконується наступна ітерація.

Таким чином,

якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$, то цифровий код сформованої суми $(S_y - 1)$ є вихідним двійковим кодом

$[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0] - 1$ перетворення значення z ;

якщо $0 \leq \Delta_y < 1$, то цифровий код сформованої суми S_y є вихідним двійковим кодом

$[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0]$ перетворення значення z .

Узагальнено y -й ітераційний цикл врівноваження можна представити так:

y w_{y-1} , $\Delta_y = z - S_y$, $S_y = \sum(a_i 2^i)$ $A = \{0; 1\}$

якщо $\Delta_y < -1$, то $S_{y+1} = S_y - w_r$, $a_r = 0$;

якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$, то $z \in [S_y - 1; S_y)$, $a_y = 1$, $z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0] - 1$;

якщо $0 \leq \Delta_y < 1$, то $z \in [S_y; S_y + 1)$, $a_y = 1$, $z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0]$;

якщо $\Delta_y \geq 1$, то $S_{y+1} = S_y + w_p$, $a_p = 1$.

Блок-схема алгоритму адитивного врівноваження від значень молодших розрядних ваг до старших та зворотним перетворенням від значень молодших розрядних ваг до старших зображена на рис. 1.

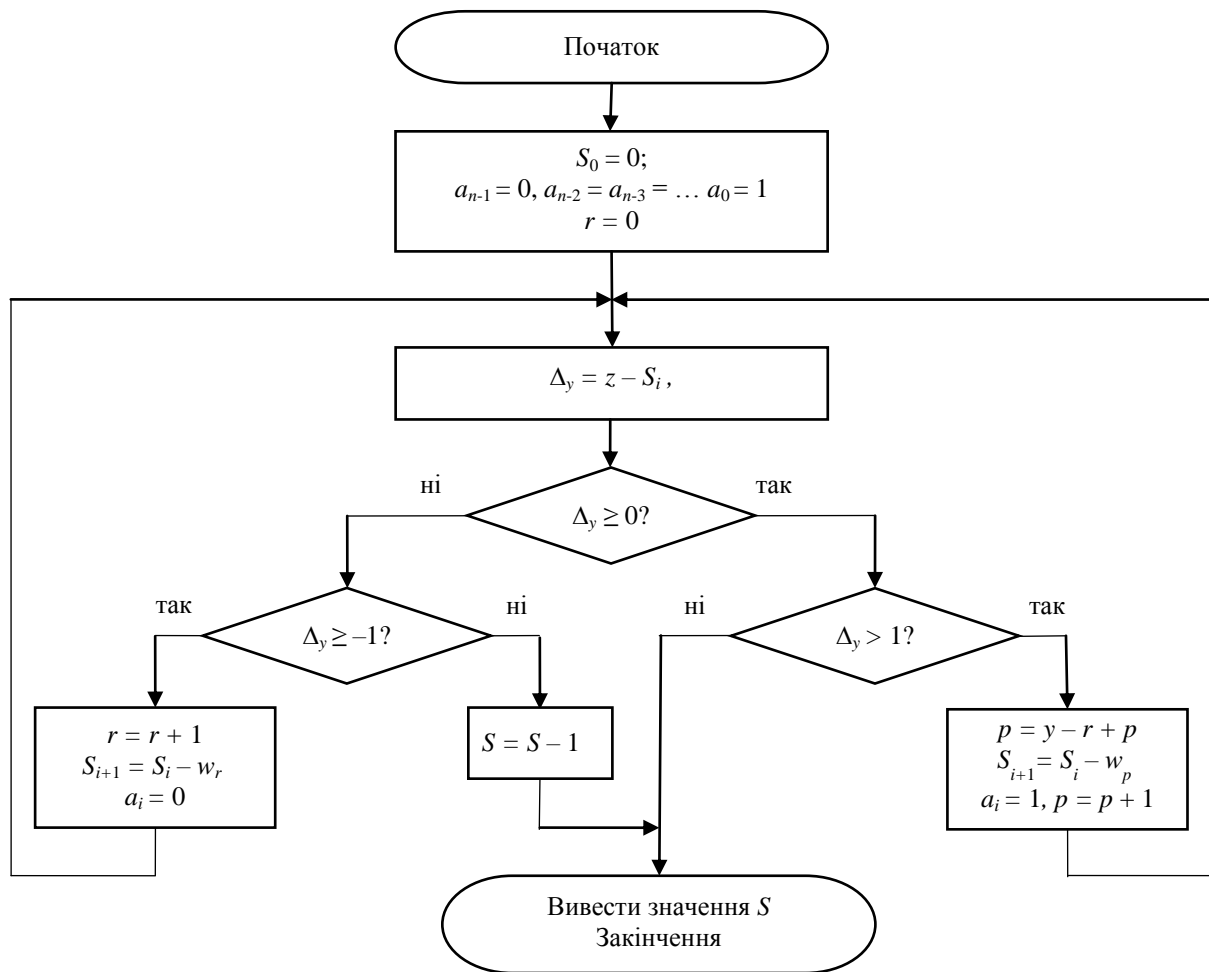


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму перетворення за адитивним методом.

Для базису кодування цифрових даних, елементи якого обчислено за позиційною формулою $w_i=2^i$, відмінність у реалізації запропонованого методу від відомого методу порозрядного врівноваження полягає у тому, що сума врівноваження S_y формується в порядку від значення молодшої розрядної ваги до старших, а також у здійсненні додаткового порівняння різниці Δ_y з межами визначення $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$, що дозволяє пришвидшити завершення процесу врівноваження.

Метод субтрактивно-адитивного перетворення

Запропоновано метод субтрактивно-адитивного перетворення, в якому при формуванні суми $S_i = \sum_{i=0}^{n-1} a_i q^i$ для подання розрядних коефіцієнтів a_i числових еквівалентів застосовано алфавіт $\mathbf{A}=\{-1; 0; 1\}$. Як показали результати дослідження, субтрактивно-адитивне врівноваження в порядку від молодших значень розрядів мір $w_1=q^1$ до старших $w_{n-1}=q^{n-1}$ можливо реалізувати тільки за основою $q=3$ симетричного трійкового числення в симетрично розширеному в 2 рази діапазоні перетворення двох знаків $\left[\sum_{i=0}^{n-1} -a_i 3^i \div 0 \div \sum_{i=0}^{n-1} +a_i 3^i \right)$ при кількості операцій $n-1$. Для цього методу властивим є перетворення без застосування значення молодшої ваги $w_0(3^0) = 1$, оскільки на кожному кроці здійснюється порівняння різниці Δ_y із межами ± 1 значення молодшого кванту перетворення.

Іншим чинником пришвидшення процесу врівноваження є зменшення кількості операцій, оскільки в основі методу перетворення відсутні операції знімання розрядних ваг w_i одразу після їх додавання на ітераційних кроках врівноваження, як це властиво двійковому адитивному методу, а здійснюються тільки їх додавання із знаками \pm відповідно до результатів порівняння на попередніх ітераціях.

Кожна з ітерацій перетворення передбачає визначення різниці: $\Delta_y = z - S_y$ та значення коефіцієнта a_y . На кожному y -му ітераційному кроку здійснюється формування значення суми S_{y+1} шляхом додавання відповідних значень розрядних ваг w_p до значення суми S_y , або віднімання відповідних значень ваг w_r від значення суми S_y , в залежності від значення різниці Δ_y . Значення коефіцієнта a_y не підлягає зміні одразу в наступній $y+1$ -й ітерації при додаванні, проте може змінюватись при відніманні. На поточній y -й ітерації першого ітераційного циклу збільшення значення суми S_y здійснюється шляхом додавання ваг $w_i=3^i$ від молодших значень $w_1=3^1$ до старших значень $w_{n-1}=3^{n-1}$ по стороні протизваги із формуванням суми S_{y+1} за умови $\Delta_y \geq 1$ та формуванням значень коефіцієнтів $a_{y+1} = +1$.

За умови $\Delta_y < -1$ здійснюється знімання зі сторони протизваги ваг w_r в порядку від молодших значень $w_1=3^1$ до старших $w_y=3^y$ із перетворенням стану рівноваги проміжного перекладання поточної ваги w_r як чергового стану ітераційного врівноваження та формуванням значення коефіцієнтів внаслідок зміни $a_r = +1$ на $a_r = 0$ та обнулення значення ваги w_r в сумі S_y і, за умови $\Delta_{y+1} < -1$, додавання її по стороні значення перетворення z , що проявляється в наступній $y+1$ -й ітерації від'ємним знаком значень $a_r = -1$ позиційної ваги w_r та її відніманням від значення сформованої суми S_y . Тобто, значення коефіцієнта a_{y+1} визначається одноразово на кожній з ітерацій додавання зі знаком «+» та не підлягає зміні одразу в наступних $y+1$ -их ітераціях. Проте, значенням коефіцієнтів a_r молодших ваг при зніманні можуть бути повернені значення «0» та «-1». При ітераційному зменшенні значення сформованої суми S_y та отриманні різниці $\Delta_y \geq 1$ можливе додавання ваг w_p знову ж від молодших значень w_1 до поточних для наступної $y+k$ -ї ітерації старших значень розрядів ваг w_{k-1} . В залежності від отриманого результату одного з чотирьох можливих альтернативних значень різниць Δ_y на довільному y -му ітераційному кроку коефіцієнти a_{y+1} набувають значень

$$a_{y+1} = \begin{cases} -1, & \text{якщо } \Delta_y < -1 \\ 0, & \text{якщо } 0 \leq \Delta_y < 1 \\ 1, & \text{якщо } \Delta_y \geq 1 \end{cases},$$

або ж за умови $-1 \leq \Delta_y < 0$ обчислюють значення величини перетворення z

$$z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0] - 1.$$

Якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$, то значення z попадає в діапазони квантів перетворення, суміжні значенню точки врівноваження S_y :

$$z \in \begin{cases} [S_y - 1; S_y), & \text{якщо } -1 \leq \Delta_y < 0 \\ [S_y; S_y + 1), & \text{якщо } 0 \leq \Delta_y < 1 \end{cases}, \quad (3) \text{ внаслідок чого визначається}$$

їх код перетворення, а процес перетворення завершується. Інакше ітераційно визначається наступне значення суми S_{y+1} :

$$S_{y+1} = \begin{cases} S_y - w_r, & \text{якщо } \Delta_y < -1 \\ S_y + w_p, & \text{якщо } \Delta_y \geq 1 \end{cases},$$

виконується наступна ітерація врівноваження до виконання умови попадання значення z в діапазони $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$ та завершення процесу перетворення.

При цьому автором вперше встановлена та досліджена властивість одночасного паралельного перетворення значень аналогових величин в околах двох квантів, суміжних до точки ітераційного порівняння S_y . Запропонований метод дозволяє з докладністю одного кванта сумістити напіввідкриті півоколи суміжних точок порівняння на суміжних $y-1$ -й та y -й ітераціях.

Виходячи з того, що в трійковому численні $S_y = S_{y-1} + 3$, або ж $S_{y-1} = S_y - 3$, то діапазон $[S_{y-1} + 1; \dots)$ можна представити як $[S_y - 3 + 1; \dots) = [S_y - 2; \dots)$, аналогічно діапазон $[\dots, S_y - 1)$ можна представити як $[\dots, S_{y-1} + 3 - 1) = [\dots, S_{y-1} + 2)$. Тому той самий діапазон перетворення для двох ітерацій суміжних діапазонів від $[S_{y-1} + 1; \dots)$ до $[\dots, S_{y-1} + 2)$, так і від $[S_y - 2; \dots)$ до $[\dots, S_y - 1)$, можна представити в суміщеній формі як $[S_{y-1} + 1; S_{y-1} + 2)$ і $[S_y - 2; S_y - 1)$, що, фактично, є то само. Аналітично області суміщення $y-1$ -ї та y -ї ітерацій можна представити так:

якщо $\Delta_{y-1} < -1$, то $z \in [\dots, S_{y-1} - 1)$,

якщо $-1 \leq \Delta_{y-1} < 0$, то $z \in [S_{y-1} - 1; S_{y-1})$, код $(S_{y-1} - 1)$ - декрементований код перетворення,

якщо $0 \leq \Delta_{y-1} < 1$, то $z \in [S_{y-1}; S_{y-1} + 1)$, код S_{y-1} - отриманий код перетворення,
якщо $\Delta_{y-1} \geq 1, \Delta_y < -1$, то $z \in [S_{y-1} + 1; S_{y-1} + 2), [S_y - 2; S_y - 1)$, код $(S_{y-1} + 1) = (S_y - 2)$,
якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$, то $z \in [S_y - 1; S_y)$, код $(S_y - 1)$ - декрементований код перетворення,
якщо $0 \leq \Delta_y < 1$, то $z \in [S_y; S_y + 1)$, код S_y - отриманий код перетворення,
якщо $\Delta_y \geq 1$, то $z \in [S_y + 1; \dots)$.

Значення z попадає в діапазони квантів перетворення, суміжні значенням точок порівняння S_{y-1} та S_y , тому за умови $S_{y-1} < S_y$:

$$z \in \begin{cases} [\dots; S_{y-1} - 1), & \text{якщо } \Delta_{y-1} < -1 \\ [S_{y-1} - 1; S_{y-1}), & \text{якщо } -1 \leq \Delta_{y-1} < 0 \\ [S_{y-1}; S_{y-1} + 1), & \text{якщо } 0 \leq \Delta_{y-1} < 1 \\ [S_{y-1} + 1; S_{y-1} + 2) = [S_y - 2; S_y - 1), & \text{якщо } \Delta_{y-1} \geq 1, \Delta_y < -1, \\ [S_y - 1; S_y), & \text{якщо } -1 \leq \Delta_y < 0 \\ [S_y; S_y + 1), & \text{якщо } 0 \leq \Delta_y < 1 \\ [S_y + 1; \dots), & \text{якщо } \Delta_y \geq 1 \end{cases}$$

Таким чином для двох суміжних $y-1$ та y діапазонів перетворення:

якщо $-1 \leq \Delta_{y-1} < 0$, то цифровий код декрементованого значення сформованої суми $S_{y-1} - 1$ є вихідним кодом перетворення значення z ;

якщо $0 \leq \Delta_{y-1} < 1$, то цифровий код сформованої суми S_{y-1} є вихідним кодом перетворення значення z ;

якщо $\Delta_{y-1} \geq 1$ і одночасно $\Delta_y < -1$, то цифровий код інкрементованого значення сформованої суми $S_{y-1} + 1$ та, що є те саме, двічі декрементованого значення сформованої суми $S_y - 2$ є вихідним кодом перетворення значення z ;

якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$, то цифровий код декрементованого значення сформованої суми $S_y - 1$ є вихідним кодом перетворення значення z ;

якщо $0 \leq \Delta_y < 1$, то цифровий код сформованої суми S_y є вихідним кодом перетворення значення z .

Узагальнено y -й ітераційний цикл порівняння можна представити так:

якщо $\Delta_y < -1$,	то $S_{y+1} = S_y - w_r$,	$a_r = -1$;
якщо $\Delta_y < -1$ і $\Delta_{y-1} \geq 1$,	то $z \in [S_y - 2; S_y - 1)$,	$a_y = 0, z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0] - 2$;
якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$,	то $z \in [S_y - 1; S_y)$,	$a_y = 0, z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0] - 1$;
якщо $0 \leq \Delta_y < 1$,	то $z \in [S_y; S_y + 1)$,	$a_y = 0, z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0]$;
якщо $\Delta_y \geq 1$,	то $S_{y+1} = S_y + w_p$,	$a_p = +1$.

Блок-схема алгоритму процесу врівноваження зображена на рис. 2. Відмінність запропонованого методу від відомих методів порозрядного врівноваження полягає у тому, що вперше використано алфавіт $\{-1; 0; 1\}$ та здійснено додаткове порівняння $\Delta_y = z - S_y$ з 0, 1 та -1 з метою пришвидшеного завершення процесу врівноваження.

Порівняльні оцінки методів ПФІ

Для порівняльної оцінки методів перетворення необхідно здійснити обчислення сумарної кількості кроків для різних піддіапазонів у порівнянні з класичним методом двійкового порозрядного врівноваження. Результати оцінки кількості операцій врівноваження наведено в таблицях 1 і 2.

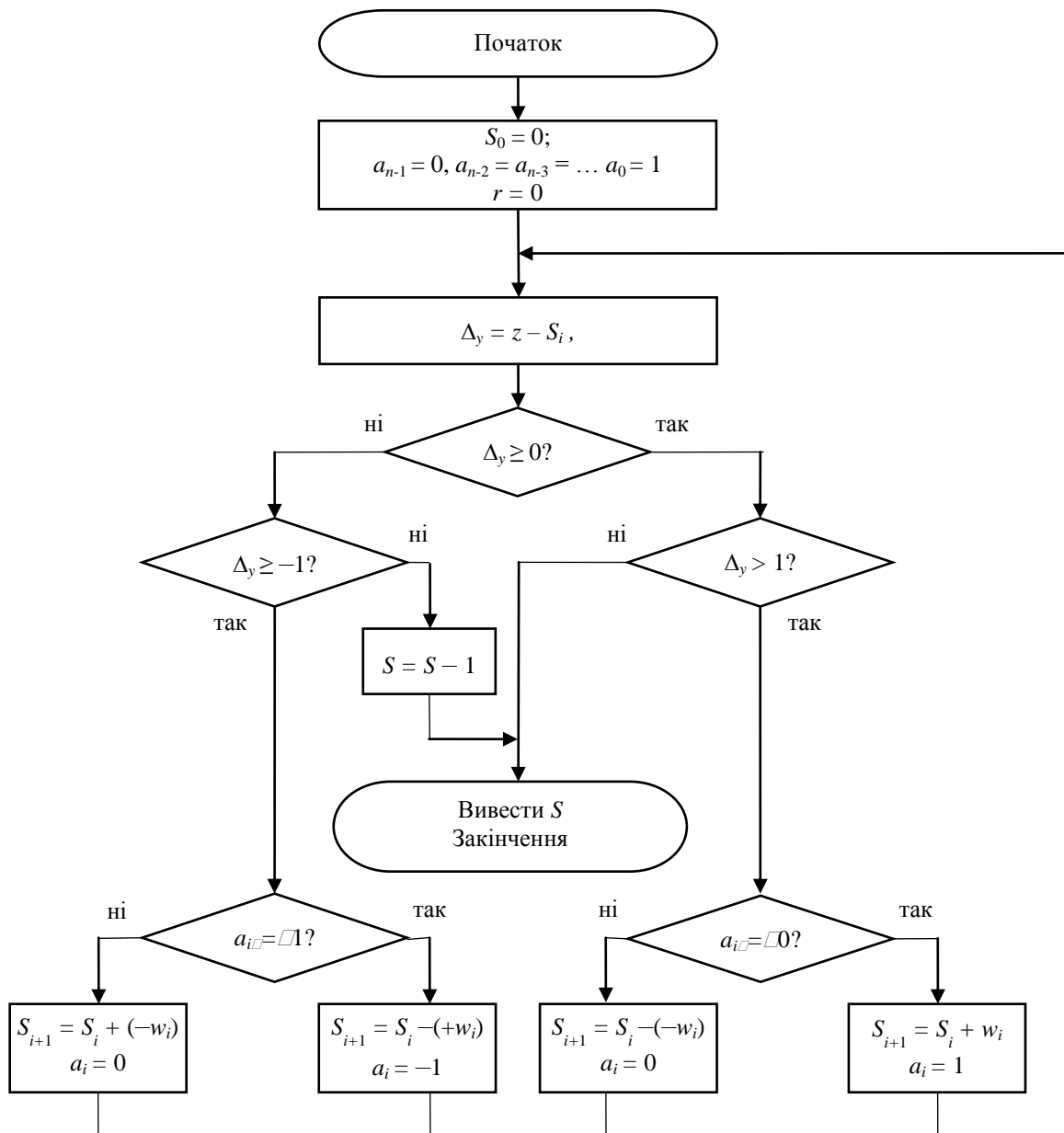


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму врівноваження за субтрактивно-адитивним методом.

Таблиця 1 - Сумарна кількість кроків врівноваження для перетворення за адитивним методом.

Діапазон значень перетворення	[0; 10)	[0; 20)	[0; 30)	[0; 40)	[0; 50)	[0; 60)	[0; 70)	[0; 80)	[0; 90)
Сумарна кількість кроків	36	112	203	323	471	582	700	889	1117

Таблиця 2 - Сумарна кількість кроків врівноваження для перетворення за субтрактивно-адитивним методом.

Діапазон значень перетворення	[0; 10)	[0; 20)	[0; 30)	[0; 40)	[0; 50)	[0; 60)	[0; 70)	[0; 80)	[0; 90)
Сумарна кількість кроків	28	104	198	307	463	571	688	861	1075

Побудовано графіки (рис. 3 та 4) залежності сумарної кількості кроків від діапазону перетворюваних значень для запропонованих методів у порівнянні з класичним методом врівноваження двійкових еталонів.

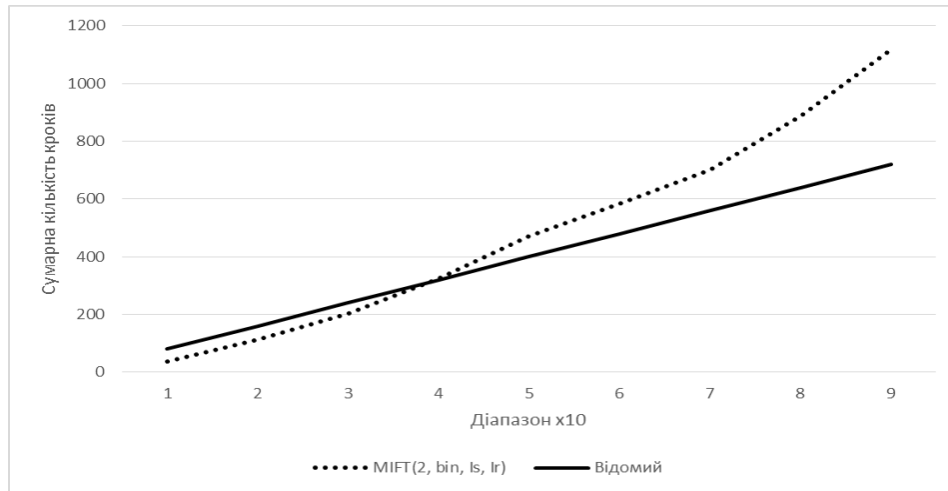


Рисунок 3- Графік залежності сумарної кількості кроків врівноваження для різних діапазонів перетворення за адитивним методом.

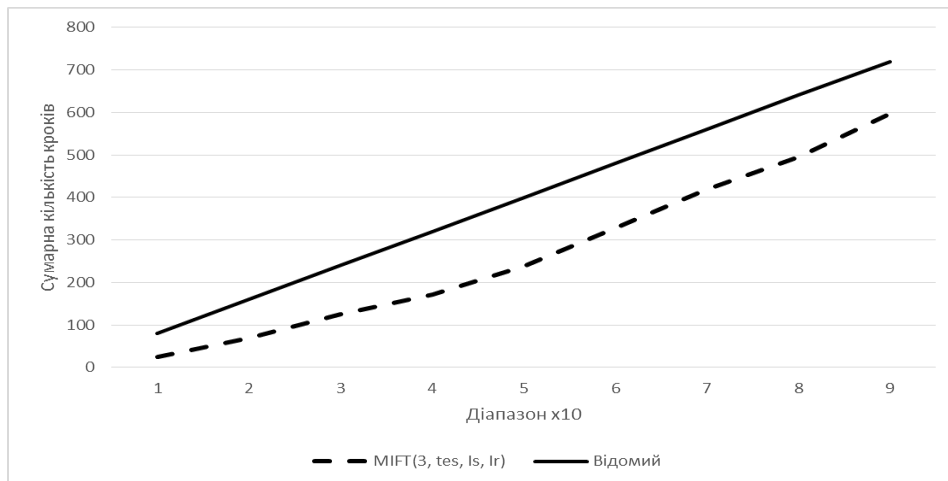


Рисунок 4 - Графік залежності сумарної кількості кроків врівноваження для різних діапазонів перетворення за субтрактивно-адитивним методом.

Аналіз отриманих графічних залежностей, зображених на рис. 3 та 4 дозволяє підсумувати, що для певних діапазонів запропоновані методи забезпечують меншу сумарну кількість кроків врівноваження порівняно з відомим метод порозрядного врівноваження із застосуванням двійкових еталонних мір.

Структурні схеми АЦП порозрядного врівноваження

Структурна схема адитивного АЦП

Структурну схему АЦП, що реалізує адитивний метод врівноваження, починаючи від значень молодших розрядів a_0 до старших a_{n-1} та зворотним (реверсним) перетворенням від значень молодших розрядів a_0 до старших a_{n-1} , наведено на рис. 5. Структурна схема АЦП, побудована за запропонованим методом врівноваження відрізняється від відомих схем наявністю трьох компараторів, які здійснюють порівняння величини перетворення зі значеннями 1, 0 та -1 молодшого кванту перетворення.

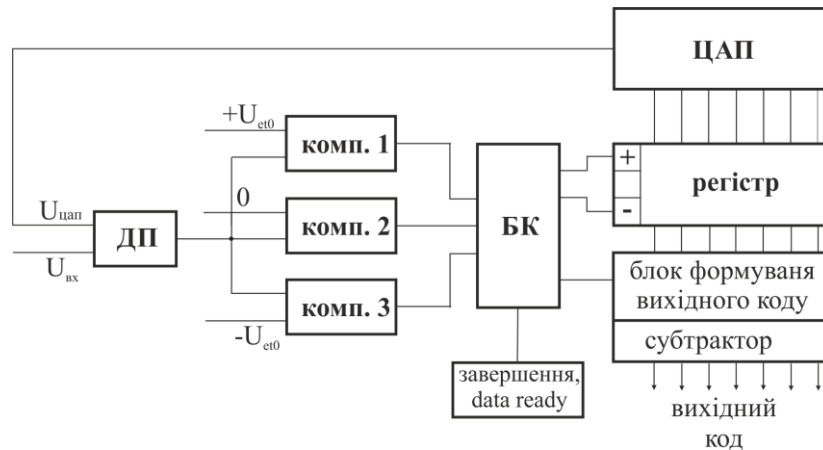


Рисунок 5 – Структурна схема АЦП, що реалізує адитивний метод перетворення.

АЦП, що реалізує адитивний метод перетворення від молодших значень розрядних мір до старших та зворотним врівноваженням від молодших значень розрядних мір до старших складається із диференціального підсилювача (ДП), трьох компараторів (комп.), блоку керування БК, регістра, блоку формування вихідного коду (БФВК) та субтрактора, та цифро-аналогового перетворювача ЦАП.

АЦП функціонує таким чином:

Крок 1. ДП здійснює визначення різниці $\Delta U = U_{вх} - U_{цан}$.

Крок 2. Різниця ΔU з ДП подається на три компаратори. Компаратор 1 здійснює значення порівняння різниці ΔU з $+U_{ет0}$, компаратор 2 здійснює порівняння значення ΔU зі значенням нуля, компаратор 3 здійснює порівняння значення ΔU із $-U_{ет0}$. За результатом порівняння на виходах компараторів можливе формування системи вихідних значень $\{0; 1\}$, наведених в таблиці 3.

Таблиця 3 - Система вихідних значень компараторів за результатами порівняння.

Результат	Комп. 1	Комп. 2	Комп. 3	Діапазони
1	1	1	0	$\Delta U > 1$
2	0	1	0	$\Delta U \in [0; 1)$
3	0	0	1	$\Delta U \in [-1; 0)$
4	0	0	0	$\Delta U \leq -1$

Крок 3. Блок керування БК виконує одну з чотирьох операцій в залежності від отриманих результатів порівняння з виходів компараторів 1÷3, а саме:

за результатом 1 здійснюється формування високого рівня сигналу (лог. 1) на вхід регістра (u), при цьому здійснюється встановлення $a_i = 1$;

за результатом 2 здійснюється формування високого рівня сигналу (лог. 1) про завершення процесу ПФІ, код отриманої суми $S = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0]$ є вихідним кодом перетворення;

за результатом 3 здійснюється формування високого рівня сигналу (лог. 1) про завершення процесу ПФІ, здійснюється інкрементування коду отриманої суми $S = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_y, \dots, a_1, a_0] - 1$, що є вихідним кодом перетворення;

за результатом 4 здійснюється формування високого рівня сигналу (лог. 1) на вхід (d) регістра, при цьому встановлюється значення $a_i = 0$.

Крок 4. Код, значення якого сформовано в регістрі в процесі порівняння, подається на ЦАП для його перетворення в аналоговий еквівалент цифрового коду та для визначення різниці врівноваження на ДП. В наступному можливе повторення кроків 1÷4, до виконання умови завершення перетворення (2).

Структурна схема субтрактивно-адитивного АЦП

Структурна схема АЦП, що реалізує субтрактивно-адитивний метод перетворення, наведена на рис. 6. АЦП, що реалізує субтрактивно-адитивний метод перетворення із порядком врівноваження від значень молодших розрядних мір до старших, та зворотним врівноваженням від значень молодших розрядних мір до старших, складається із аналогового суматора Σ , диференціального підсилювача ДП, трьох компараторів, блоку керування БК, регістрів 1 та 2, ЦАП^{“+”} та ЦАП^{“-”}. Особливістю структури АЦП є наявність двох регістрів та двох ЦАП, одна пара регістр-ЦАП^{“+”} з яких формує значення суми врівноваження зі знаком (+) а інша пара регістр-ЦАП^{“-”} - зі знаком (-). Результуючі коди з регістрів 1 та 2 поступають на блок формування вихідного коду та субтрактора, який формує кінцевий результат перетворення з врахування сигналу отриманим з блоку керування. Визначення вхідного значення $U_{вх}$ здійснюється шляхом порівняння різниці ΔU з виходу ДП трьома компараторами.

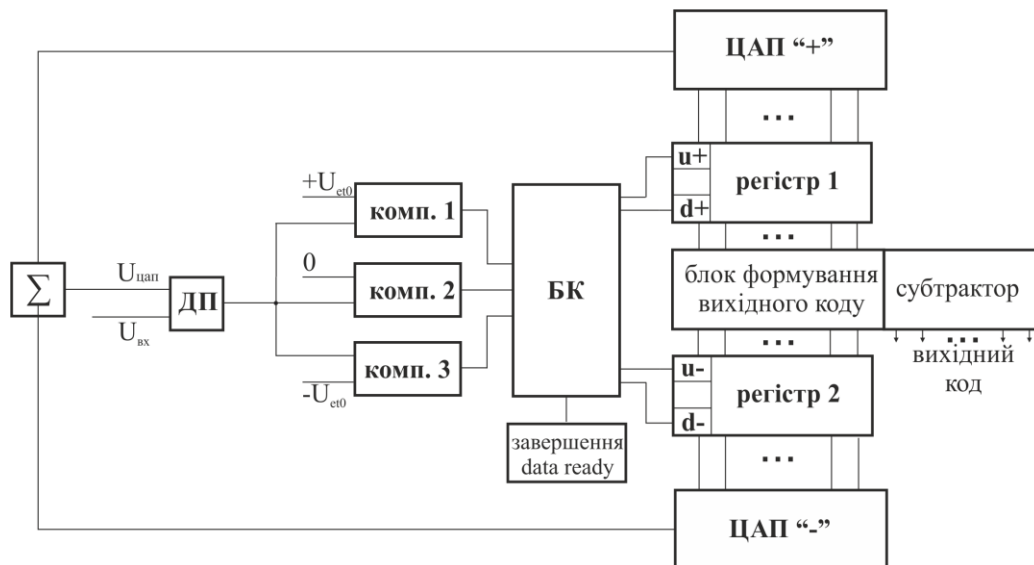


Рисунок 6 – Структурна схема АЦП, що реалізує субтрактивно-адитивний метод перетворення. АЦП функціонує таким чином:

Крок 1. Суматор здійснює додавання аналогових значень величин-еквівалентів цифрових кодів двох знаків, отриманих під час врівноваження з виходів ЦАП”+” та ЦАП”-”.

Крок 2. ДП здійснює визначення різниці $\Delta U = U_{\text{вх}} - U_{\Sigma}$.

Крок 3. Значення отриманої різниці ΔU компаратором 1 порівнюються із величиною $+U_{\text{ет0}}$, компаратором 2 - із значенням нуля, компаратором 3 - із $-U_{\text{ет0}}$. За результатом порівняння на виходах компараторів можливе формування системи вихідних значень $\{0; 1\}$, наведених в таблиці 4.

Таблиця 4 - Система вихідних значень компараторів за результатами порівняння.

Результат	Комп. 1	Комп. 2	Комп. 3	Діапазони	Результат ЦАП”+”	Результат ЦАП”-”
1	0	1	0	$\Delta U \in [0; 1)$	-	-
2	0	0	1	$\Delta U \in [-1; 0)$	-	-
3	1	1	0	$\Delta U > 1$	0	0
4	1	1	0	$\Delta U > 1$	0	1
5	0	0	0	$\Delta U \leq -1$	1	0
6	0	0	0	$\Delta U \leq -1$	0	0

Крок 4. БК здійснює контроль станів виходів схеми порівняння та модифікує вміст регістрів 1 та 2 за аналогією із попереднім методом для кожної пари регістр-ЦАП. Завершення процесу перетворення здійснюється за отриманим результатом з блоку завершення (data ready).

Крок 5. Цифрові значення ”+” та ”-” складових коду перетворення, сформовані з виходів регістрів 1 та 2 подають на входи ЦАП”+” та ЦАП”-” для визначення аналогового еквіваленту цифрового коду та для визначення їх суми на суматорі Σ .

В процесі перетворення можливе повторення кроків врівноваження 1÷5, до виконання умови (3) завершення процесу перетворення.

Висновки

1. В роботі запропоновано математичні моделі ПФІ на основі методів адитивного та субтрактивно-адитивного врівноваження в порядку від молодших значень позиційних еталонних мір до старших, та зворотним врівноваженням від молодших значень еталонних мір до старших, побудовано блок-схеми алгоритмів врівноваження для кожного із запропонованих методів.

2. Визначено сумарну кількість операцій врівноваження, необхідних для завершення процесу перетворення в межах діапазонів від $[0, 10)$ до $[0, 90)$. За отриманими результатами здійснено порівняння запропонованих методів ПФІ з класичним двійковим методом порозрядного врівноваження та побудовано графічні залежності, за якими можна ствердити, що запропоновані методи дозволяють пришвидшити процеси врівноваження в вузьких діапазонах перетворення вхідних величин.

3. Розроблено структурні схеми АЦП на основі методів адитивного врівноваження з алфавітом $\{0, 1\}$ та субтрактивно-адитивного врівноваження з алфавітом $\{-1, 0, 1\}$, проаналізовано їх структури та процеси функціонування.

Список літератури

1. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники. / Г. П. Богданов, В. А. Кузнецов, М. А. Лотонов и др.; Под ред. В. А. Кузнецова.— М.: Радио и связь, 1990. — 240 с.
2. Атомная энергетика сегодня и завтра. / Т. Х. Маргулова, Л. П. Кабанов, В. И. Плутинский, В. Д. Байбаков; Под ред. Т. Х. Маргуловой. — М.: Высш. шк., 1989. — 168 с.
3. Основы метрологии и организации метрологического контроля. / Д. А. Иванников, Е. Н. Фомичев. Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2001. — 116 с.
4. Баннов П. Г. Процессы переработки нефти. Ч.1. Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 2000. - 224 с.
5. Походенко Н. Т., Брондэ Е. И. Получение и обработка нефтяного кокса. - М.: Химия, 1986. - 312 с.
6. <http://dssp.petrus.ru/~ivash/ims/t18/teho.htm>
7. Мичуда З. Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього. – Львів: Прос-тір, 2002. – 242 с.
8. Мичуда З. Р. Логарифмічний АЦП з проміжним перетворенням напруга-струм // Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 1998. – Вип. 324. – С. 101–106.
9. Матецька Л.А., Мичуда З.Р. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з накопиченням заряду на послідовно включених конденсаторах // Зб. наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”. – Л.: Українська академія друкарства, 2000, № 5. – С. 36–43.
10. У.С. Антонів, З.Р.Мичуда Логарифмічні ацп із накопиченням заряду. сучасний стан і перспективи// Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 164–168.
11. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260 с.
12. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю : моногр. / О. Д. Азаров. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 232 с.
13. Азаров, О. Д. Методи та засоби високоточного слідкувального аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Дудник. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 120 с.

Відомості про авторів

Петришин Михайло Любомирович – аспірант кафедри інформатики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Ровінський Віктор Анатолійович – к. т. н., доцент кафедри інформатики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

УДК 004.932.2

Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, М. Г. Тарновський, Д. О. Шаромов

РЕАЛІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО КОРЕЛЯТОРА

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. В статті розглянуто варіант оптоелектронного матричного корелятора, базовим вузлом якого є блок кореляції. В структурі корелятора вхідний масив бінарних даних представлено матрицею оптичних сигналів, а кореляційна обробка виконується у цифровому вигляді. Результуюча матриця виводиться в оптичному вигляді для візуалізації максимумів кореляційного рельєфу. Запропоновано дві реалізаційні моделі блока кореляції. Перша модель містить АЦП, кореляційну матрицю та матрицю світлодіодів. Друга модель містить матрицю ВВЛ, матрицю мікролінз та матрицю смарт-пікселів. Виконано узгодження основних параметрів вузлів для обох варіантів.

Ключові слова: оптоелектронний корелятор, бінарне зображення, тороїдальна топологія зв'язків, взамокореляційна функція.

Анотация. В статье рассмотрен вариант оптоэлектронного матричного коррелятора, базовым узлом которого является блок корреляции. В структуре коррелятора входной массив бинарных данных представлен матрицей оптических сигналов, а корреляционная обработка выполняется в цифровом виде. Результирующая матрица выводится в оптическом виде для визуализации максимумов корреляционного рельефа. Предложено две реализационные модели блока корреляции. Первая модель содержит АЦП, корреляционную матрицу и матрицу светодиодов. Вторая модель содержит матрицу ВВЛ, матрицу микролинз и матрицу смарт-пикселей. Выполнено согласование основных параметров узлов для обоих вариантов.

Ключевые слова: оптоэлектронный коррелятор, бинарное изображение, тороидальная топология связей, взаимокорреляционная функция.

Abstract. In the article the variant of the optoelectronic matrix correlator, whose basic node is the correlation unit, is considered. In the correlator structure, the input array of binary data is represented by an optical signal matrix, and the correlation processing is performed in a digital form. The resultant matrix is displayed in an optical form for visualizing the maxima of the correlation relief. Two realization models of the correlation unit are proposed. The first model contains an ADC, a correlation matrix, and a matrix of LEDs. The second model contains the matrix of VLL, the matrix of microlenses and the matrix of smart pixels. The coordination of the main parameters of the nodes for both variants is accomplished.

Key words: Optoelectronic correlator, binary image, toroidal topology of links, cross-correlation function.

Вступ

Необхідність обробки зображення в реальному часі потребує потужних паралельних обчислювальних засобів [1, 2]. Зокрема це стосується кореляційного аналізу зображень, де необхідно визначити параметри рельєфу кореляційної функції [3, 4]. При цьому найбільш прийнятними є матричні обчислювачі (корелятори), оскільки вони натуральним чином відповідають природі двовимірних зображень [1, 2].

Актуальність

Для ефективності процесу кореляційної обробки зображень у матричному кореляторі необхідно, в першу чергу, дотримуватись просторового паралелізму обчислень по всьому полю зображення, в подруге, мати можливість паралельного введення матриці даних і візуалізації результатів обробки, тобто визначених максимумів кореляційного рельєфу [5, 6]. Все це відкриває широкі можливості для реалізації таких складних алгоритмів, як кореляція двовимірних зображень із використанням оптоелектронної елементної бази [7 – 9]. Значний ефект при цьому можна досягти за рахунок суміщення електронної (цифрової) обробки інформації у матрицях і дво- та тривимірною оптичного зв'язку між цими матрицями [10].

Мета

Метою даної роботи є аналіз та вдосконалення реалізаційних моделей оптоелектронного корелятора.

Постановка задачі

В якості базової моделі оптоелектронного корелятора обрано його матричний варіант [11, 12]. При цьому у схемі корелятора враховано, що вхідний масив бінарних даних у вигляді матриці вводиться оптично, кореляційна обробка виконується у цифровому вигляді, а результуюча матриця виводиться для візуалізації максимумів кореляційного рельєфу в оптичному вигляді.

Базовим вузлом оптоелектронного корелятора є матриця обчислювальних комірок $1.i.j$ (де $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, M$), яка зображена на рис. 1, а структуру обчислювальної комірки $1.i.j$ показано на рис. 2.

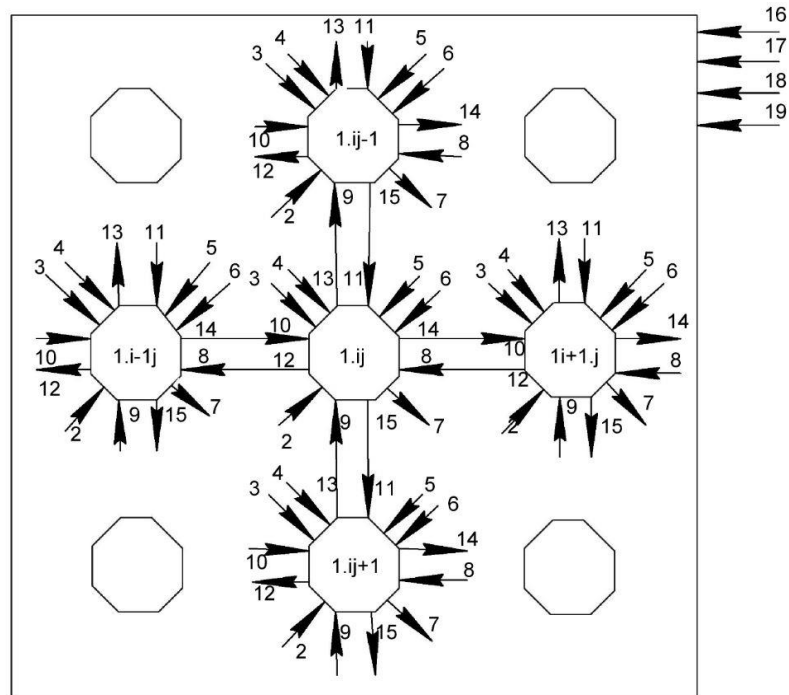


Рисунок 1 – Структурна схема кореляційної матриці

Кожна з обчислювальних комірок $1.i,j$ (рис.1, 2) містить адресні входи 2, синхровхід 3, вхід 4 початкового встановлення, вхід 5 еталонного сигналу, оптичний вхід 6, оптичний вихід 7, інформаційні входи 8 – 11, інформаційні виходи 12 – 15, а кореляційна матриця містить керуючі шини 16 – 18, вхід 19 еталонного сигналу [11, 12]. Використання матриці обчислювальних комірок $1.i,j$ для визначення кореляційних коефіцієнтів дозволяє знайти координати центра еталонного зображення на полі поточного зображення. Крім того, оптичні виходи 7 комірок $1.i,j$ матриці дозволяють отримати візуалізацію результатів кореляційної обробки [5, 6].

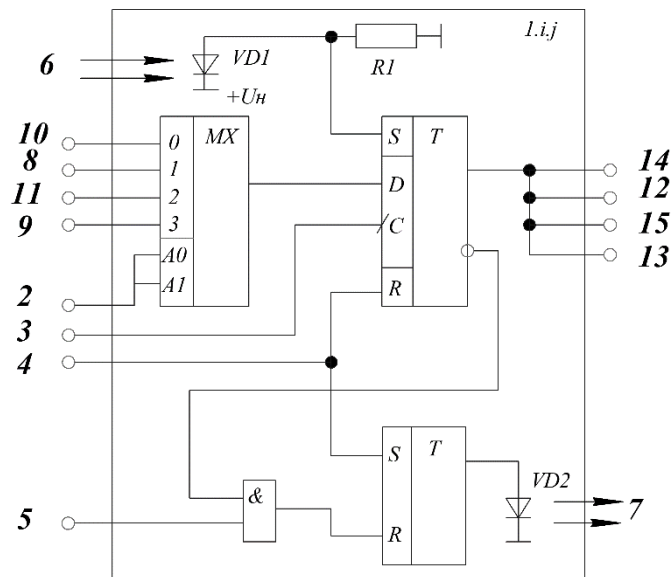


Рисунок 2 – Схема обчислювальної комірки

Кожна обчислювальна комірка (рис. 2) складається із RS- і D-тригерів, мультиплексора MX, логічного елемента І, резистора R1, фотодіода VD1 і світлодіода VD2.

У роботі [8] наведено приклад реалізації кореляційної матриці з чотирьох обчислювальних комірок (2x2) на мікросхемах КМОП-технології серії K561, які сумісні з напівпровідниковими оптоелек-

тронними приладами [13, 14]. В результаті було отримано такі параметри: час обробки вхідного сигналу однією коміркою – 1840 нс; час зсуву сигналу через комірку – 550 нс; потужність споживання схеми з 4-х комірок – 1,36 Вт; розміри друкованої плати схеми розміром 2x2 комірки – 8,3 x 9,2 см² [8]. Аналізуючи ці дані, можна відмітити, що реалізована кореляційна матриця за схемою (рис. 2) має такі незадовільні параметри, як великий розмір та малу роздільну здатність.

Варіанти реалізації блока кореляційної обробки у складі оптикоелектронного корелятора

На рис. 3 наведено структуру оптикоелектронного корелятора, що містить кореляційну матрицю 1, блок керування 2, пам'ять еталонів 3, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) 4, матрицю світлодіодів 5. Сигнал у вигляді оптичного поточного зображення 6 потрапляє на вхід АЦП 4, де відбувається перетворення у бінарне зображення 9, яке поступає на вхід кореляційної матриці 1, де порівнюється із еталонним зображенням 7, формуючи матрицю кореляційного рельєфу 10. В результаті обробки масиву даних формується оптичний двовимірний кореляційний рельєф 8 взаємно-кореляційної функції (ВКФ), де одиничні значення ВКФ вказують на місцезнаходження центрів еталона G на поточному бінарному зображенні F через використання нормалізації кореляційного рельєфу [5].

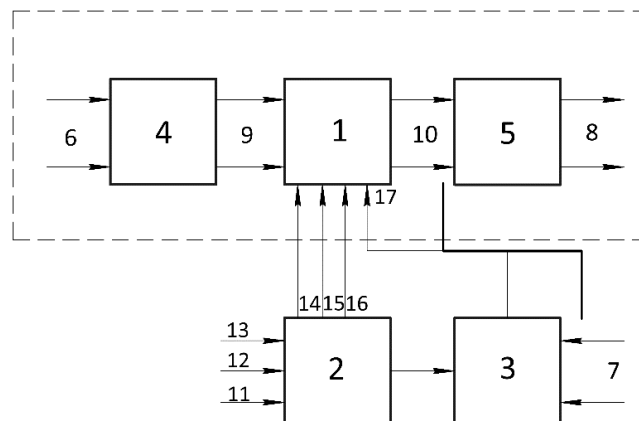


Рисунок 3 – Оптикоелектронний корелятор

Блок керування має синхровхід 11, адресний вхід 12, вхід початкового встановлення 13, керуючі шини 14-16, а кореляційна матриця 1 має вхід еталонного сигналу 17 з виходу пам'яті еталонів 3. Базовим блоком оптикоелектронного корелятора є блок кореляції, виділений пунктиром на рис. 3, що містить АЦП 4, кореляційну матрицю 1 та матрицю світлодіодів 5.

Розглянемо перший варіант реалізації блока кореляції (рис. 4), який містить АЦП, що отримує на вхід оптичне зображення та після обробки передає цифрове зображення на кореляційну цифрову матрицю, в якій відбувається порівняння двох масивів зображень для визначення максимумів і результатом обробки є бінарна матриця, що поступає на матрицю світлодіодів для візуалізації результату. Таким чином, зі складу обчислювальної комірки (рис. 2) видалено фотодіод VD1 і світлодіод VD2, а функціонально обчислювальна комірка виконує цифрову обробку бінарних сигналів. При цьому можна виділити дві функціонально незалежні частини у складі обчислювальної комірки (рис. 2): а) транзитну частину з мультиплексором МХ і D-тригером; б) обчислювальну частину з RS-тригером та логічним елементом І.

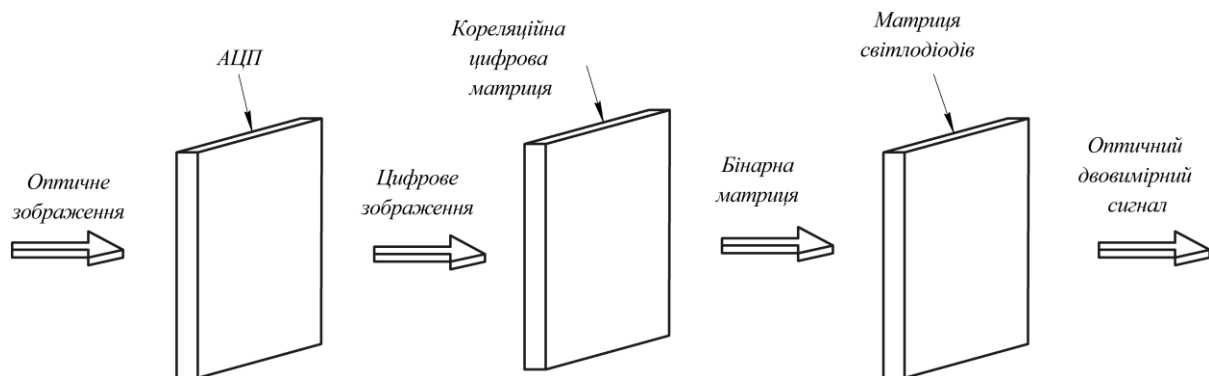


Рисунок 4 – Блок кореляції із використанням матриці світлодіодів

Другим варіантом є реалізація блока кореляції на основі матриці смарт-пікселів (рис. 5) [10]. Окремий смарт-піксель представляє собою фрагмент інтегральної схеми (ІС), в якій об'єднані пристрої введення/виведення оптичної інформації та електронна схема, необхідна для обробки цієї інформації. Складність електронної схеми може у значній мірі змінюватися – від одного або двох транзисторів у простих схемах, що забезпечують формування та підсилення сигналу, до декількох тисяч транзисторів в пристроях, які виконують складну обробку інформації, наприклад, обробку в системах із асинхронною передачею даних [10].

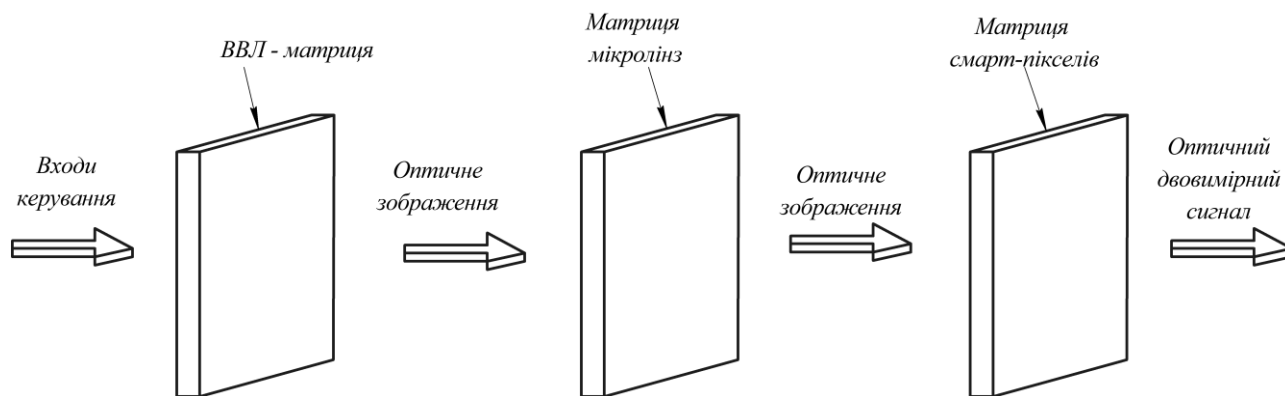


Рисунок 5 – Блок кореляції із використанням матриці смарт-пікселів

Для реалізації другого варіанту можна вибрати такі узгоджені оптоелектронні вузли, як матрицю вертикально-випромінюючих лазерів (ВВЛ), що передає оптичний сигнал на матрицю мікролінз, яка, у свою чергу, фокусує оптичний сигнал для подання його на матрицю смарт-пікселів (рис. 5).

Рекомендації з реалізації блока кореляції

Основною проблемою при узгодженні параметрів кореляційної матриці та матриці світлодіодів у першому варіанті реалізації блока кореляції (рис. 4) є необхідність паралельного виведення виходів всіх розміщених у кореляційній матриці комірок для з'єднання з входами елементів матриці світлодіодів. Отже, в разі використання мікросхеми ПЛІС необхідно, в першу чергу, узгодити кількість з'єднань між цими двома матрицями. Враховуючи незначну складність обчислювальних комірок (рис. 2), було обрано мікросхеми ПЛІС серії FLEX10K фірми Altera [15], основні параметри яких наведено у табл. 1. Кількість виведення цієї мікросхеми обумовлює використання кореляційної матриці розмірністю 8x8 комірок і відповідну розмірність матриці світлодіодів (табл. 2) [16].

Для узгодження базових матриць блока кореляції за другим варіантом реалізації (рис. 5) було обрано матрицю ВВЛ розмірністю 8x8 (табл. 3) [17], матрицю мікролінз розмірністю 12x12 мм² (табл. 4) [17] та матрицю смарт-піксель розмірністю 8x8 (табл. 5) [18].

Таблиця 1 – Основні параметри ПЛІС

Параметри	Сімейство					
	Classic	MAX5000	MAX7000	MAX9000	FLEX8000A	FLEX10K
Логічна ємність	300-900	600-3750	600-5000	6000-12000	2500-16000	10000-100000
Наявність внутрішньої пам'ять	-	-	-	-	-	6-24 Кбіт
Кількість виведень користувача	22-64	24-84	36-164	59-216	68-208	59-406
Технологія	EPROM	EPROM	EEPROM	EEPROM	SRAM	SRAM

Таблиця 2 – Основні параметри матриць світлодіодів

Розмірність матриці	Прямий струм I_F (мА)	Робоча напруга V_R (В)	Розсіювальна потужність P_D (мВт)	Робоча температура T_{opr} (°С)	Довжина хвилі λ (нм)
5x10	35	–	6,8	-45 ~ +85	YAG:Ce 530-580
8x8	25	1,8-2,5	6	-45 ~ +60	589
16x16	30	3-3,6	~8	-45 ~ +85	620-625

Таблиця 3 – Основні параметри лазерних матриць

Кількість лазерів в матриці	Спосіб адресації	Пороговий струм I_{th} (мА)	Порогова напруга U_{th} (В)	Потужність P_{max} (мВт)	Квантова ефективність η (%)	Довжина хвилі λ (нм)	Технологія
10x10	IA	14.0±2.3	–	~2.1	–	984.1-978.5	МВЕ
32x32	МА	6.8±1.2	4.4±0.6	–	8±2.4	3 КЯ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$	МВЕ
10x10	МА	3.72±0.22	3.26±1.1	~4.08	–	~850	МВЕ
8x8	IA	6±2	-	~7	8±2	3 КЯ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$	МВЕ
8X8	IA	3.39±0.11	~2.5	~1.1	~14	850.93±0.28	МОСVD
8X8	IA	1.6±0.3	2.3	~4.2	~22	855	МОСVD

Примітка: IA – індивідуальна адресація; МА – матрична адресація; КЯ – квантові ями; МВЕ – молекулярно-пучкова епітаксія; МОСVD – металоорганічний хімічний осад з газової фази.

Таблиця 4 – Основні параметри матриць мікролінз

Ефективна фокусна відстань (мм) 248 nm, 532 nm, 1064 nm,	Крок (мм)	Розмір (мм ²)	Показник заломлення 248 nm, 532 nm, 1064 nm,	Числова апертура 248 nm, 532 nm, 1064 nm,
4.23 ± 0.13 – 61.6 ± 1.8, 4.67 ± 0.14 – 67.9 ± 2.0, 4.78 ± 0.14 – 69.6 ± 2.1	0.5	12x12	1.509, 1.461, 1.449	0.0591 – 0.0041, 0.0535 – 0.0037, 0.0523 – 0.0036
8.55 ± 0.26 – 206.5 ± 6.2, 9.44 ± 0.28 – 227.9 ± 6.8, 9.67 ± 0.29 – 233.5 ± 7.0	0.8	20x20	1.509, 1.461, 1.449	0.0468 – 0.0019, 0.0424 – 0.0018, 0.0414 – 0.0017

5.88 ± 0.18 – (-)98.3 ± 2.9, 6.49 ± 0.19 – (-)108.5 ± 3.3, 6.65 ± 0.20 – (-)11.2 ± 3.3	1.3	35x35	1.509, 1.461, 1.449	0.1105 – 0.0066, 0.1002 – 0.0060, 0.0977 – 0.0059
--	-----	-------	---------------------------	---

Таблиця 5 – Основні параметри матриць смарт-пікселів

Швидкість передачі (Мбіт/с)	Діапазон передачі	Тип освітлення	Приймач діафрагми	Кут падіння світла	Розмірність (мм)	Оптичний шум (dB)	Піковий струм (nA)
5	3 км	Сонячний	15 мм	45 °	16x16	34	9.7
1	500 км	Сонячний	20 см	5 °	16x16	24	2.7
5	10 м	Офісний	10 мм	90 °	8x8	23	3.1
100	10 м	Офісний	10 мм	90 °	8x8	24	49

Крім розмірності ці матриці узгоджуються за такими параметрами, як кут падіння променя на фотоелемент смарт-пікселя, швидкість передачі даних, фокусна відстань матриці мікролінз та потужність матриці ВВЛ.

Висновки

1. Обґрунтовано вибір для дослідження оптикоелектронного матричного корелятора, оскільки він по своїй структурі, по-перше, відповідає природі двовимірних зображень, по-друге, забезпечує паралельну обробку пікселів зображення, по-третє, дає можливість візуально відобразити результат кореляційної обробки зображень.

2. Вдосконалено схему обчислювальних комірок кореляційної матриці та запропоновано два варіанти реалізації блока кореляції з врахуванням цифрової обробки та подальшого паралельного виведення результату обробки в оптичному вигляді.

3. Вибір та узгодження основних параметрів базових матриць для першого та другого варіантів реалізації блока кореляції у складі оптикоелектронного корелятора дозволяє розробити макети з їх подальшим дослідженням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Очин В. Е. Вычислительные системы обработки изображений / В. Е. Очин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 163 с. – ISBN5-283-04394-0.
2. Кун С. Матричные процессоры на СБИС / С. Кун: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 672 с. – ISBN 5-03-001857-3.
3. Прэрт У. Цифровая обработка изображений / У. Прэрт: пер. с англ. – Кн. 2. – М.: Мир, 1982. – 480 с.
4. Алтатов Б. А. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алтатов, П. В. Бабаян, О. Е. Балашов, А. И. Степашкин. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
5. Мартинюк Т. Б. Нормалізована кореляційна обробка двовимірних зображень / Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, І. Ю. Видмиш, Д. О. Шаромов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2016. – №2. – С. 44-50 – ISSN 1999 – 9941.
6. Мартинюк Т. Б. Реалізація кореляційної обробки на матричних структурах / Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, М. А. Хомчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – №3. – С. 33-37. – ISSN 1997 – 9266.
7. Козик В. И. Обработка изображений с использованием видеопроцессора и светодиодного коррелятора / В. И. Козик, Е. С. Нежевенко, Ю. А. Попов, О. И. Потатуркин, В. Г. Сутягин // Автометрия. – 1985. - №3. – С. 53-58.
8. Мартинюк Т. Б. Особливості реалізації оптикоелектронного матричного корелятора / Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко, А. В. Кожем'яко, М. І. Громадський // Наука і освіта 2004: VII Міжнар. науково-практ. конф., матеріали. Т. 72. Сучасні інформаційні технології. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 14-17.
9. Martyniuk T. B., Kozhemiako A. V., Kobzarenko R. L. Gromadsky M. I. Optoelectronic matrix correlator // 6-th International Young Scientists Conference. Problems and Optics and High Technology Material Science SPO 2005. Scientific works. Kyiv, 2005, p. 174.

10. Захаров С. М. Оптоэлектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров / С. М. Захаров, В. Б. Фёдоров, В. В. Цветков // Квантовая электроника. – 1999. – №3. – С. 189-206.
11. А.с. 1674154 СССР. МКИ⁵ G06F 15/336. Коррелятор / В. П. Кожемяко, В. Б. Гайда, Ю. Ф. Кутаев, Т. Б. Мартынюк (СССР). – №4709817/24; заявл. 26.06.89; опубл. 30.08.91, Бюл. №32.
12. А.с. 1730640 СССР. МКИ⁵ G06F 15/336. Коррелятор / В. П. Кожемяко, Ю. Ф. Кутаев, В. Б. Гайда, Т. Б. Мартынюк (СССР). – №4829498/24; заявл. 28.05.90; опубл. 30.04.92, Бюл. №16.
13. Иванов В.И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин. – М.: Энергоиздат, 1983. – 235с.
14. Ушаков Н.В. Фотоэлектрические полупроводниковые приёмники излучения и фотоприёмные устройства / Н.В. Ушаков. – М.: Энергоиздат, 1991. – 100с.
15. Антонов А.П. Обзор элементной базы фирмы ALTERA / А.П. Антонов, В.Ф. Мелехин, А.С. Филиппов. – С.-Пб.: Издательский дом «Файнстрит», 1997. – 143 с. – ISBN 5-900953-04-1.
16. Матриця світлодіодів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uaeducation.com/4-79057-matrixa-svitlodiodiv.html>
17. Решётки микролинз [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.limo.de/ru/products-and-solutions/mikrooptik/mikrolinsenarrays>
18. Smart-pixels array [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.scribd.com/document/259757510/Smart-pixel-arrays-pdf>

Відомості про авторів

Мартинюк Тетяна Борисівна – д.т.н., професор, професор кафедри ОТ, службовий тел. 24-50

Кожем'яко Андрій Вікторович – к.т.н., доцент, доцент кафедри ЛОТ, службовий тел. 21-25

Тарновський Микола Геннадійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри ЛОТ, службовий тел. 21-25

Шаромов Дмитро Олександрович – студент 5-го курсу факультету КСА

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛОВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 519.6:544.431.11:[502.521]

А. П. Власюк¹, В. В. Жуковський², Н. А. Жуковська²

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЕРТИКАЛЬНОЇ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ У КАТАЛІТИЧНОМУ ПОРИСТОМУ СЕРЕДОВИЩІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

¹ Національний університет «Острозька академія», Острог

² Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

Анотація. У статті проведено комп'ютерне моделювання процесу вертикальної міграції забруднюючих речовин у каталітичному пористому середовищі. Математична модель враховує мікро-, мезо- та макромасштаби процесу масоперенесення. Отримано чисельний розв'язок відповідної одновимірної крайової задачі методом скінченних різниць. Програмна реалізація здійснена з використанням паралельних обчислень для систем із спільною пам'яттю. Чисельні експерименти комп'ютерного моделювання виконані за допомогою власноствореного програмного комплексу NanoSurface. Встановлена алгоритмічна складність методів прогонки та час виконання паралельних обчислень. Взято до уваги специфікації компілятора C99.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, паралельні обчислення, OpenMP, крайова задача, масоперенос, наночастинки, очищення.

Аннотация. В статье произведено компьютерное моделирование процесса вертикальной миграции загрязняющих веществ в каталитической пористой среде. Математическая модель учитывает микро-, мезо- и макромасштабах процесса массопереноса. Получено численное решение соответствующей одномерной краевой задачи методом конечных разностей. Программная реализация осуществлена с использованием параллельных вычислений для систем с общей памятью. Численные эксперименты компьютерного моделирования выполнены с помощью программного комплекса NanoSurface. Выведена алгоритмическая сложность методов прогонки и время выполнения параллельных вычислений. Принято во внимание спецификации компилятора C99.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, параллельные вычисления, OpenMP, краевая задача, массоперенос, наночастицы, очистка.

Abstract. In the paper the results of an application of computer modeling of vertical migration process of the pollutants in the catalytic porous media with filter traps are presented. The mathematical model takes into account micro and meso/macro scales factor of mass transfer process. It was obtained the numerical solution of respective one dimensional boundary value problem by the method of finite differences. Software implementation was done using multi-platform shared-memory parallel programming. All computer modeling experiments have been made using NanoSurface tool. Introduced algorithmic complexity of the sweep methods and calculated execution time for parallel calculation. C99 compiler specification took into account.

Key words: computer modeling, parallel computing, OpenMP, boundary-value problem, mass transfer, nanoparticle, refinement.

Вступ

Сучасна технологічна діяльність людини призводить до того, що ґрунти стають забрудненими великою кількістю розчинних речовин, в тому числі і радіонуклідами. Сільське господарство в свою чергу використовує широкий асортимент пестицидів, добрив та фумігантів, що є додатковими джерелами забруднень. Враховуючи це, постає питання створення ефективних механізмів управління та прогнозування поширення забруднень в поверхневих шарах ґрунту (кореневій зоні) та запобігання їх міграції в докволишні поверхневі та підземні води. Зокрема, на сьогодні широкий спектр фізико-хімічних і біологічних методів досліджено для видалення органічних і/або неорганічних забруднень (коагуляція-флокуляція, мембранні процеси, адсорбція, тощо). Найбільш ефективним і недорогим процесом для видалення колоїдів та органічних речовин є використання адсорбційних мікро- та наночастинок, що представляє собою каталітичне пористе середовище [1]. Разом з тим, складність натурних експериментів змушує використовувати апарат математичного і комп'ютерного моделювання. Математичні моделі, що враховують низку факторів (наприклад, гетеродифузний перенос радіонуклідів у поверхневих шарах ґрунту [2], в середовищі з пастками [3], процеси десорбції в нанопористому середовищі [4]), дозволяють спрогнозувати концентрацію забруднених речовин протягом часу. А необхідність швидкого обрахунку і можливості оперативного втручання в ситуацію з метою її корекції призводить до використання паралельних обчислень.

Актуальність

Тривалий час спостерігається стрімкий розвиток комп'ютерної та обчислювальної техніки, що завжди підтверджується законом Мура [5]. У зв'язку з цим зростає необхідність оптимального використання всіх обчислювальних потужностей сучасної техніки для проведення чисельних експериментів. Протягом останніх років виробники процесорів віддають перевагу багатоядерній архітектурі замість збільшення тактової частоти та забезпечення паралелізму на рівні інструкцій. Тому для отримання макси-

А. П. Власюк, В. В. Жуковський, Н. А. Жуковська, 2017

мального ефекту від збільшеної продуктивності програмний код повинен бути адаптований під багатоядерне використання. Це досягається завдяки паралельним обчисленням.

На відміну від розподілених обчислень, паралельні обчислення для систем із спільною пам'яттю не набули широкого розповсюдження. Однак даний підхід до обчислень вже знаходить своє місце в роботах вчених, що займаються математичним моделюванням. Зокрема, в роботах [6–8] розглядаються задачі оптимізації обчислювальних процесів за допомогою кластерів при розв'язуванні складних задач математичного моделювання (процес електрокінетичної очистки ґрунту, динаміки ґрунтового масиву, тощо). Програмний комплекс Nadra-3D, що призначений для комп'ютерного моделювання процесів фільтрації, дифузії і зміни напружено-деформованого стану в багатокомпонентних тривимірних об'єктах, які можуть містити тонкі включення, так само успішно використовує паралельні обчислення при розв'язуванні системи алгебраїчних рівнянь методом скінченних елементів [9]. Однак кожний випадок застосування паралельних обчислень потребує індивідуального підходу та аналізу при розв'язуванні задач математичної фізики.

Постановка та мета задачі

Розглянемо задачу вертикальної міграції забруднених речовин (наприклад, радіонуклідів) у шарі ґрунту (рис. 1).

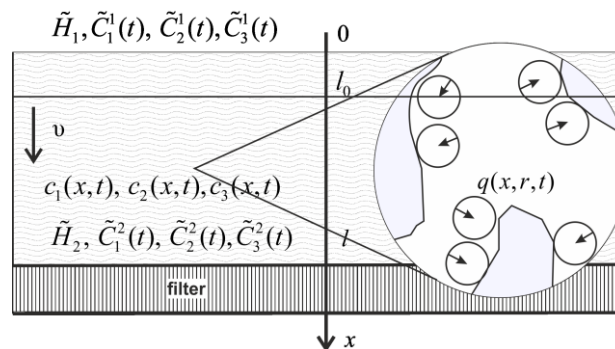


Рисунок 1 – Процес міграції радіонуклідів в одновимірному випадку в каталітичному пористому середовищі

На глибині l в ґрунті розміщений фільтр-вловлювач, наповнений сорбуючим елементом (наприклад, базальтовим туфом). Відомі п'єзометричні напори на верхній та нижній (підстилаючій) поверхнях ґрунту \tilde{H}_1 та \tilde{H}_2 ($\tilde{H}_1 > \tilde{H}_2$) відповідно. Також відомий розподіл концентрацій радіонуклідів (мігранту) в початковий момент часу $t = 0$: $\tilde{C}_1^0(x)$ (для частинок, що знаходяться в конвективно рухомому поровому розчині), $\tilde{C}_2^0(x)$ (для частинок, що знаходяться у зв'язаній зі скелетом ґрунту воді), $\tilde{C}_3^0(x)$ (для частинок в скелеті ґрунту) та $\tilde{Q}^0(x, r)$. На верхній поверхні ґрунту відомі концентрації $\tilde{C}_1^1(t)$, $\tilde{C}_2^1(t)$ та $\tilde{C}_3^1(t)$, а на фільтрі-вловлювачі задаються концентрації $\tilde{C}_1^2(t)$, $\tilde{C}_2^2(t)$, $\tilde{C}_3^2(t)$ або концентрації потоків відповідно $\left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, i = 1, 3$.

Потрібно розрахувати розподіли концентрацій $c_1(x, t)$, $c_2(x, t)$, $c_3(x, t)$ та $q(x, r, t)$ по області фільтрації з часом, що дасть можливість зробити прогноз щодо ступеня очищення ґрунтів та їх подальшого використання. Провести чисельні експерименти та здійснити їхній аналіз.

Також метою є підвищення ефективності обчислень шляхом функціональної декомпозиції алгоритму розв'язування задачі математичного моделювання. Оцінку ефективності застосування паралельних обчислень доцільно провести з використанням критерію швидкодії програми або її продуктивності. Ряд факторів формують критерій продуктивності програми: архітектура обчислювальної системи, апаратна платформа (швидкість процесора, оперативної пам'яті тощо), операційна система (методи управління ресурсами, час створення потоків, загальна завантаженість), ефективність паралельного алгоритму та вибраної технології його реалізації, мова програмування та ефективність компілятора.

Практичним результатом роботи, згідно поставленого завдання, буде проектування та розробка нової версії кросплатформенного програмного комплексу NanoSurface.

Математична модель задачі

Математичну модель сформульованої вище задачі у лінійній постановці при наявності так званих пасток [3] в одновимірному випадку можна описати наступною крайовою задачею [10–12]:

$$\sigma_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_1}{\partial x} - \gamma_1 c_1 + \gamma_2 c_2, \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + \gamma_1 c_1 - \gamma_2 c_2 + \gamma_3 c_3 - \chi(l_0) \theta \frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_3}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 c_3}{\partial x^2} + \gamma_2 c_2 - \gamma_3 c_3, \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_0 \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$v = -k(c_1) \frac{dh}{dx} + v_c \frac{\partial c_1}{\partial x}, \quad \text{div} \vec{v} + \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial q(x, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (6)$$

$$q(x, r, t) \Big|_{r=R} = k_e \cdot c_2(x, t), \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (7)$$

$$l_1 c_1(0, t) = \tilde{C}_1^1(t), \quad l_2 c_1(l, t) = \tilde{C}_1^2(t), \quad (8)$$

$$l_3 c_2(0, t) = \tilde{C}_2^1(t), \quad l_4 c_2(l, t) = \tilde{C}_2^2(t), \quad (9)$$

$$l_5 c_3(0, t) = \tilde{C}_3^1(t), \quad l_6 c_3(l, t) = \tilde{C}_3^2(t), \quad (10)$$

$$h(0) = \tilde{H}_1, \quad h(l) = \tilde{H}_2, \quad (11)$$

$$c_1(x, 0) = \tilde{C}_1^0(x), \quad c_2(x, 0) = \tilde{C}_2^0(x), \quad (12)$$

$$c_3(x, 0) = \tilde{C}_3^0(x), \quad q(x, r, 0) = \tilde{Q}^0(x, r). \quad (13)$$

Тут: $c_1(x, t)$, D_1 – концентрація та коефіцієнт конвективної дифузії радіонуклідів, що знаходяться у фільтраційному потоці, $кг/м^3$ та $м^2/доба$ відповідно; $c_2(x, t)$, D_2 – концентрація та коефіцієнт молекулярної дифузії радіонуклідів, що знаходяться у воді, яка зв'язана зі скелетом ґрунту, $кг/м^3$ та $м^2/доба$ відповідно; $c_3(x, t)$, D_3 – концентрація і коефіцієнт дифузії радіонуклідів в скелеті ґрунту, ця дифузія є такою малою, що скелет ґрунту можна вважати так званою "пасткою" для цих частинок [3], $кг/м^3$ та $м^2/доба$ відповідно; $q(x, r, t)$, D_0 – концентрація та коефіцієнт дифузії радіонуклідів у частинках радіусу R , що знаходяться у скелеті ґрунту $кг/м^3$ та $м^2/доба$ відповідно; k_e – коефіцієнт впливу внутрішньочастинкового масопереносу на масоперенос у скелеті ґрунту; v – швидкість фільтрації, $м/доба$; k – коефіцієнт фільтрації води з мігрантами, $м/доба$; γ_1 , γ_2 , γ_3 – коефіцієнти масообміну, $доба^{-1}$; σ_1 – пористість ґрунту; x , $x \in [0; l]$ – вертикальна координата, напрямлена вертикально вниз, $м$; l_i , $i = \overline{1, 4}$ – диференціальні оператори, що задають граничні умови відповідно при $x = 0$ та $x = l$; t , $0 < t < t_1$ – час, $доба$; r , $0 < r < R$ – радіус (радіальна, горизонтальна змінна), $м$.

Рівняння (1) описує процес міграції радіонуклідів з концентрацією $c_1(x, t)$ шляхом конвективної дифузії у фільтраційному потоці (конвективно рухомому поровому розчині); (2) описує процес міграції радіонуклідів, що знаходяться у зв'язаній зі скелетом ґрунту воді; (3) описує міграцію радіонуклідів в скелеті ґрунту (з пастками); (4) описує внутрішньочастинковий масоперенос радіонуклідів з поточною концентрацією $q(x, r, t)$, що зв'язана із концентрацією $c_2(x, t)$ умовою (7); (5) описує фільтрацію в каталітичному пористому середовищі. Крайові умови для концентрацій $c_1(x, t)$, $c_2(x, t)$, $c_3(x, t)$, $q(x, r, t)$ та напору $h(x)$ мають вигляд (8)-(13).

В результаті різниці напорів відбувається міграція розчинених у воді речовин (радіонуклідів) у скелеті ґрунту (з пастками) фільтраційним потоком. При цьому процеси фільтрації та масоперенесення розчинених у воді речовин підлягають законам Дарсі та Фіка.

Чисельний розв'язок крайової задачі

Введемо різницеву сітку $\omega_{h_1 h_2 \tau}$ з кроками h_1, h_2 і τ по осях Ox, Or та Ot для змінних x, r, t відповідно

$$\omega_{h_1 h_2 \tau} = \left\{ (x_i, r_j, t_k) \left| \begin{array}{l} x_i = ih_1, r_j = jh_2, t_k = k\tau, \\ i = \overline{0, n_1}, j = \overline{0, n_2}, k = \overline{0, n_3}, \\ h_1 n_1 = l, r n_2 = R, \tau n_3 = T, \end{array} \right. \right\} \quad (14)$$

де n_1, n_2, n_3 – кількість кроків по просторових змінних та часу відповідно.

Для знаходження чисельного розв'язку крайової задачі (1)-(13) використано метод скінченних різниць. Зокрема, для рівнянь (1) та (4) використано монотонну різницеву схему, а для (2) та (3) – неявну різницеву схему.

Скінченнорізницеві аналоги (1)-(5), а також їх розв'язок та знаходження невідомих значень методом звичайної прогонки детально описано в [12; 13]. В даній статті, для прикладу, наведено алгоритм знаходження концентрації $c_1(x, t)$ згідно рівняння (1) та показано використання методів правої, лівої та блочної прогонки. Для апроксимації рівняння (1) використано монотонну різницеву схему О. А. Самарського [14] або уточнену монотонну різницеву схему, що побудована в роботі [15]. Тоді скінченнорізницевий аналог диференціального рівняння (1) та відповідних крайових умов матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma'_1 \frac{c_{1,i}^{(k+1)} - c_{1,i}^{(k)}}{\tau} &= \chi_i^{(k)} \frac{c_{1,i+1}^{(k+1)} - 2c_{1,i}^{(k+1)} + c_{1,i-1}^{(k+1)}}{h_1^2} + \\ &+ \frac{(r^+)_i^{(k)} c_{1,i+1}^{(k+1)} - c_{1,i}^{(k+1)}}{D_1 h_1} + \frac{(r^-)_i^{(k)} c_{1,i}^{(k+1)} - c_{1,i-1}^{(k+1)}}{D_1 h_1} - \\ &- \gamma'_1 c_{1,i}^{(k+1)} + \gamma'_2 c_{2,i}^{(k+1)}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$c_{1,i}^{(0)} = \tilde{C}_1^0(x_i), c_{1,0}^{(k)} = \tilde{C}_1^1(t_k), c_{1,n_1}^{(k)} = \tilde{C}_1^2(t_k), \quad (16)$$

де $i = \overline{1, n_1 - 1}, k = \overline{0, n_3}$.

Тут введені наступні позначення:

$$\chi_i^{(k)} = \frac{1}{1 + \frac{h_1 |r_i^{(k)}|}{2D_1}} = 1 - \frac{h_1 |r_i^{(k)}|}{2D_1} + O(h_1^2), \quad \sigma'_1 = \frac{\sigma_1}{D_1}, \quad \gamma'_1 = \frac{\gamma_1}{D_1}, \quad \gamma'_2 = \frac{\gamma_2}{D_1}, \quad r_i^{(k)} = (r^+)_i^{(k)} + (r^-)_i^{(k)},$$

$$(r^+)_i^{(k)} = \frac{-v_i^{(k)} + |v_i^{(k)}|}{2} \geq 0, \quad (r^-)_i^{(k)} = \frac{-v_i^{(k)} - |v_i^{(k)}|}{2} \leq 0.$$

Для знаходження концентрації солей $c_1(x, t)$ з різницевого рівняння (15) використано метод прогонки. Для цього представимо (15) у вигляді

$$\begin{cases} a_i^1 c_{1,i-1}^{(k+1)} - \bar{c}_i^1 c_{1,i}^{(k+1)} + b_i^1 c_{1,i+1}^{(k+1)} = -c_{1,i}^{(k)} - f_i^{1,(k+1)}, \\ c_{1,0}^{(k+1)} = \mu_1^1 c_{1,1}^{(k+1)} + \mu_2^1, \\ c_{1,n_1}^{(k+1)} = \mu_3^1 c_{1,n_1-1}^{(k+1)} + \mu_4^1, \end{cases} \quad (17)$$

де

$$a_i^1 = \frac{\tau}{\sigma_1'} \left(\frac{\chi_i^{(k)}}{h_1^2} - \frac{(r^-)^{(k)}}{h_1 D_1} \right), \quad b_i^1 = \frac{\tau}{\sigma_1'} \left(\frac{\chi_i^{(k)}}{h_1^2} + \frac{(r^+)^{(k)}}{h_1 D_1} \right), \quad \bar{c}_i^1 = 1 + \frac{\tau}{\sigma_1'} \left(\frac{2\chi_i^{(k)}}{h_1^2} + \frac{1}{h_1 D_1} \left((r^+)^{(k)} - (r^-)^{(k)} \right) + \gamma_1' \right),$$

$$f_i^{1,(k+1)} = \frac{\tau}{\sigma_1'} \gamma_2' c_{2,i}^{(k+1)}, \quad \mu_1^1 \equiv 0, \quad \mu_3^1 \equiv 0, \quad \mu_2^1 = \tilde{C}_1^1, \quad \mu_4^1 \equiv \tilde{C}_1^2.$$

Значення концентрації $c_1(x, t)$ на часовому шарі $(k+1)$ знайдено методом правої прогонки, використовуючи співвідношення

$$c_{1,i}^{(k+1)} = \alpha_{i+1}^1 c_{1,i+1}^{(k+1)} + \beta_{i+1}^1, \quad (18)$$

$$\alpha_{i+1}^1 = \frac{b_i^1}{\bar{c}_i^1 - \alpha_i^1 a_i^1}, \quad \beta_{i+1}^1 = \frac{a_i^1 \beta_i^1 + c_{1,i}^{(k)} + f_i^{1,(k+1)}}{\bar{c}_i^1 - \alpha_i^1 a_i^1}, \quad (19)$$

$$i = \overline{1, n_1 - 1}, \quad k = \overline{1, n_3}, \quad \alpha_1^1 = \mu_1^1 \equiv 0, \quad \beta_1^1 = \mu_2^1 \equiv \tilde{C}_1^1,$$

або методом лівої прогонки, використовуючи наступну залежність

$$c_{1,i+1}^{(k+1)} = \xi_{i+1}^1 c_{1,i}^{(k+1)} + \eta_{i+1}^1, \quad (20)$$

$$\xi_i^1 = \frac{a_i^1}{\bar{c}_i^1 - \xi_{i+1}^1 b_i^1}, \quad \eta_i^1 = \frac{\eta_{i+1}^1 \beta_i^1 + c_{1,i}^{(k)} + f_i^{1,(k+1)}}{\bar{c}_i^1 - \xi_{i+1}^1 b_i^1}, \quad (21)$$

$$i = \overline{n_1 - 1, 1}, \quad k = \overline{1, n_3}, \quad \eta_n^1 = \mu_3^1 \equiv 0, \quad \eta_1^1 = \mu_4^1 \equiv \tilde{C}_1^2.$$

Можна показати, що умови стійкості прогонки $|\bar{c}_i^1| > |a_i^1| + |b_i^1|$ виконуються.

Чисельні експерименти

Проведено чисельні експерименти з використанням розробленого програмного забезпечення [12] з наступними вхідними даними:

$$l = 10 \text{ м}, \quad \dot{H}_1 = 1 \text{ м}, \quad \dot{H}_2 = 0 \text{ м}, \quad \sigma_1 = 0,25, \quad \tau = 30 \text{ діб}, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0,0065, \quad R = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м},$$

$$D_1 = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{добу}}, \quad D_2 = 1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{доба}}, \quad D_3 = 1 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^2}{\text{доба}}, \quad D_0 = 1 \cdot 10^{-18} \frac{\text{м}^2}{\text{доба}}, \quad \tilde{C}_1^1(t) = 5 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3},$$

$$\tilde{C}_1^2(t) = 0 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{C}_1^3(t) = 0 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{C}_2^1(t) = 5 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{C}_2^2(t) = 0 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{C}_2^3(t) = 0 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{C}_1^0(x) = 5 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3},$$

$$\tilde{C}_2^0(x) = 5 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{C}_3^0(x) = 0 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad \tilde{Q}^0(t) = 0 \frac{\text{кЗ}}{\text{м}^3}, \quad l_0 = 0 \text{ м}.$$

Після проведення серії чисельних експериментів отримано графіки та таблиці розподілів концентрацій та швидкості фільтрації. На рис. 2 наведено 3D графіки розподілів концентрацій $c_1(x, t)$, $c_2(x, t)$ та $c_3(x, t)$ на глибині x шару ґрунту в часі.

Провівши чисельні експерименти та проаналізувавши отримані графіки, стає очевидним вплив дифузії в скелеті ґрунту. Як видно з рис. 2, концентрація $c_3(x, t)$ розподіляється повільніше за концентрацію $c_2(x, t)$ на часовому кроці №5 (30 місяців). В той час, коли концентрації $c_1(x, t)$ та $c_2(x, t)$ спадають, концентрація радіонуклідів $c_3(x, t)$ залишається присутньою в кристалічній решітці скелету ґрунту (потрапляє в так звані «пастки»). Дану особливість потрібно враховувати при прогнозуванні очищення ґрунту за допомогою спецзасобів.

Ефективність паралельних обчислень

Програмна реалізація чисельного розв'язку математичної моделі (1)-(13) є нетривіальною задачею. Це впливає із взаємозв'язків між шуканими концентраціями $c_1(x, t)$, $c_2(x, t)$, $c_3(x, t)$, $q(x, r, t)$ та швидкістю фільтрації U . Тому кожна математична модель повинна розглядатися комплексно і універсального рішення для використання паралельних обчислень не існує. Враховуючи це, обчислювальний алгоритм у нашому випадку можна розпаралелити тільки для задання початкових та граничних умов першого роду (8)-(13), а далі послідовно знаходити швидкість фільтрації U , концентрації $q(x, r, t)$,

$c_3(x, t)$, $c_2(x, t)$ та $c_1(x, t)$. Однак, незважаючи на послідовність деяких обчислень їх можна розпаралелити на нижчому рівні – зокрема на етапі роботи методу прогонки.

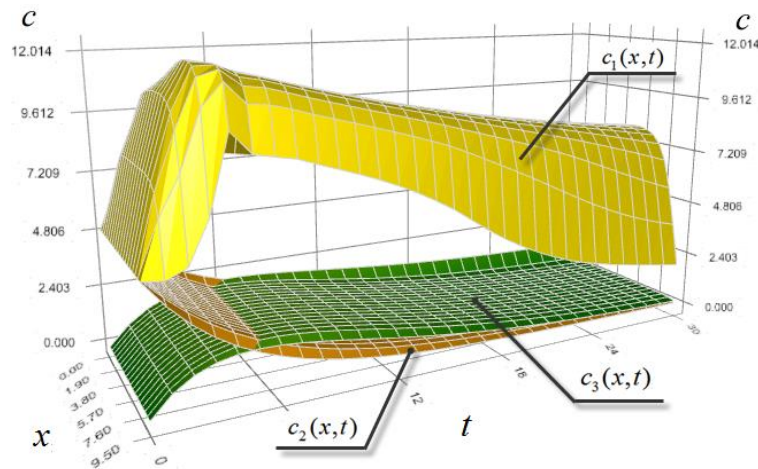


Рисунок 2 – Час роботи обчислювального алгоритму при розпаралеленні різних частин коду для 8 потоків

В даній роботі виведені прогоночні коефіцієнти для методу прогонки, що зазвичай виконується в однопоточному режимі. Для роботи в двох потоках на системах із спільною пам'яттю використовують комбінацію правої та лівої прогонки, так звану зустрічну прогонку.

Оцінимо складність алгоритму методу правої прогонки. При виконанні прямого ходу за формулами (19) потрібно $8(N-2)+2$ операцій. Для виконання зворотнього ходу за формулою (18) потрібно $2(N-1)+5$ операцій. Таким чином, загальне число операцій можна оцінити величиною

$$T_1 = 10n + O(1), \quad (22)$$

а час розв'язку системи методом прогонки при великих N буде визначатися як $T = 10n\tau$, де τ – час виконання однієї операції. Неважко помітити, що алгоритмічна складність лівої прогонки (20), (21) становить також $10n + O(1)$.

Комбінація методів лівої і правої прогонки дає метод зустрічної прогонки, який допускає розпаралелення процесу обчислень на два потоки. Розділимо систему між двома потоками - перший буде оперувати рівняннями з номерами $1 \leq i \leq p$, другий – рівняннями $p \leq i \leq n$, де $p = \lfloor n/2 \rfloor$.

При паралельному розв'язку в першому потоці за формулами (19) обчислюються прогоночні коефіцієнти α_i and β_i при $1 \leq i \leq p$, а в другому потоці за формулами (21) знаходяться ξ_i і η_i при $p \leq i \leq n$. При $i = p$ проводиться спряження рішень у формі (18) і (20), тобто знаходимо значення x_p з системи рівнянь:

$$\begin{cases} x_p = \alpha_{p+1}x_{p+1} + \beta_{p+1} \\ x_{p+1} = \xi_{p+1}x_p + \eta_{p+1} \end{cases} \quad (23)$$

Знайшовши вказане значення, в першому потоці за формулою (18) можна знайти всі x_i при $1 \leq i \leq p$, а в другому, за формулою (20) – всі x_i при $p \leq i \leq n$.

Час виконання методу зустрічної прогонки можна оцінити як $T_2 = 5n\tau + \delta$, де δ – час, необхідний на організацію та закриття паралельної секції. Варто зазначити, що розрахунки і при прямому, і при зворотньому ходах здійснюються незалежно, тому теоретичне прискорення дорівнює двом.

У системах, де можна задіяти більше двох ядер процесорів для обчислень, використовують блочну прогонку [16].

Оцінимо складність алгоритму паралельного варіанту методу прогонки [16]. Відповідно до введених раніше позначень n є порядок системи лінійних рівнянь (кількість кроків по змінній x), а p ,

$p < n$, визначає число потоків. Тим чином, матриця коефіцієнтів $a_i^1, b_i^1, \bar{c}_i^1, f_i^{1,(k)}$ має розмір $n \times n$ і, відповідно, $m = n/p$ є розмір смуги матриці на кожному процесорі.

При виконанні прямого ходу алгоритму на кожній ітерації кожен процесор повинен здійснити виключення у межах своєї смуги піддіагональних елементів (що вимагає $8(m-1)$ операцій) і наддіагональних елементів (що вимагає $7m$ операцій).

Потім варто провести збірку допоміжної тридіагональної системи рівнянь в одному потоці і здійснити її розв'язок методом прогонки. Відповідно до оцінки (22) витрати на виконання цього послідовного етапу обчислень складуть близько $10p$ операцій.

На наступному етапі алгоритму кожен процесор виконує зворотний хід алгоритму, який вимагатиме $5(m-1)$ операцій. Таким чином, загальну складність паралельного методу прогонки можна оцінити як

$$T_p = 20m + 10p, \quad (24)$$

За результатами виконаного аналізу ми можемо знайти показники прискорення та ефективності паралельного варіанту методу прогонки [17]. Прискорення (speedup) являє собою відношення послідовного часу виконання задачі до паралельного алгоритму:

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} = \frac{10n}{20\frac{n}{p} + 10p} = p \frac{10n}{20n + p^2}. \quad (25)$$

Ефективність (efficiency) використання паралельним алгоритмом процесорів (потоків) при розв'язку блочної прогонки визначається наступним співвідношенням:

$$E_p = \frac{S_p}{p} = \frac{10n}{20n + p^2}. \quad (26)$$

Ідеальний випадок досягається при $S_p = p$ та $E_p = 1$, тобто кожний новий процесор збільшує швидкість виконання задачі при 100% їх використанні. Однак спроби підвищення одного показника (прискорення чи ефективності) можуть привести до погіршення ситуації по іншому показнику. З наведених вище співвідношень видно, що у нашому випадку компроміс між даними показниками досягається при розв'язанні системи рівнянь з великою кількістю невідомих, при якому $p \ll n$ і показники прискорення та ефективності визначаються як

$$S_p \approx \frac{p}{2}, \quad E_p \approx \frac{1}{2}. \quad (27)$$

Особливості реалізації паралельних обчислень та їх аналіз

Реалізація паралельних обчислень здійснена за допомогою технології OpenMP [18]. Стандарт, що описує дану технологію, надає опис директив компілятора, бібліотечних процедур і змінних оточення, які призначені для програмування багатопотокових додатків на багатопроцесорних системах із спільною пам'яттю.

Було реалізовано методи зустрічної та блочної прогонки із різними ступенями розпаралелення. В основному використовувались синтаксичні директиви *for* для циклів і початкової ініціалізації; *sections* в зустрічній прогонці; *if (умова)* як певна умова використання розпаралелення.

Дослідження ефективності паралельних обчислень проводились на комп'ютері з наступними характеристиками:

- Процесор: Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz (8 CPUs)
- Оперативна пам'ять: 8192MB RAM
- Відеокарта: NVIDIA GeForce GT 650M x2
- Операційна система: Windows 10 Pro 64-bit
- Компілятор: MinGW 32/64bits (gcc 5.3.0)

На рис. 3 зображено порівняння графіків часу обчислення для алгоритму без використання паралельних обчислень, з додаванням розпаралелення початкової ініціалізації всіх змінних, з додаванням розпаралелення ініціалізації прогоночних коефіцієнтів a_i, b_i, \bar{c}_i, f_i , з додаванням розпаралелення швидкості фільтрації і з додаванням розпаралелення концентрації $q(x, r, t)$. З даних графіків видно, що найбільший ефект розпаралелення дає механізм ініціалізації прогоночних коефіцієнтів і обчислення концентрації $q(x, r, t)$.

Також з рис. 3 можна побачити, що розпаралелення програми дає хороші результати. Наприклад, для 120000 кроків розбиття по змінній x , час обчислення звичайного коду від паралельного відрізняється в 3.5 разів (при 8 потоках). Це свідчить про достатню оптимізацію коду, а зі збільшенням кількості потоків, швидкість обчислення буде тільки зростати.

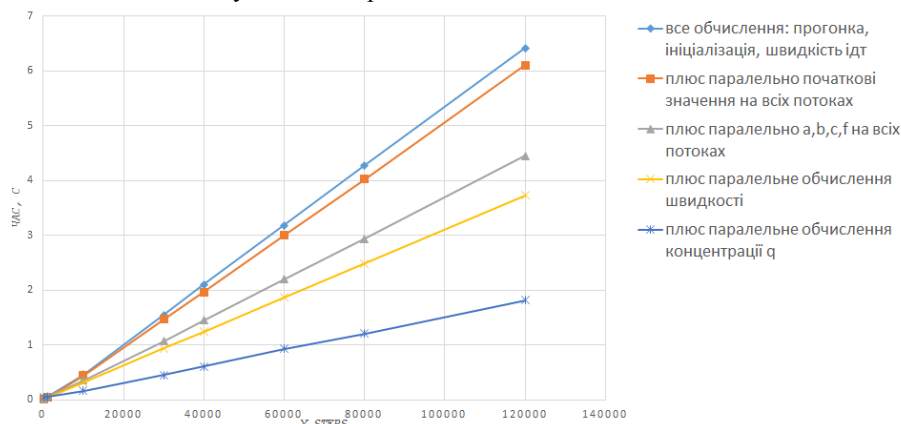


Рисунок 3 – Час роботи обчислювального алгоритму при розпаралеленні різних частин коду для 8 потоків

Під час написання програми була виявлена певна особливість компілятора: при заданні змінної типу `double` з використанням оператора `new` (наприклад, `double * value = new double[r_steps + 1]`) при паралельному обчисленні концентрації $q(x, r, t)$, різниці в часі виконання майже немає, а коли використовуємо форму задання змінної типу `double` без використання оператора `new` (наприклад, `double value[r_steps + 1]`), то час виконання при 80000 кроках стає в 6 разів менший (рис. 4). Тобто, оголошення масиву змінної довжини (Variable length arrays), що стало можливим згідно стандарту C99 [19], дає суттєвий приріст швидкодії.

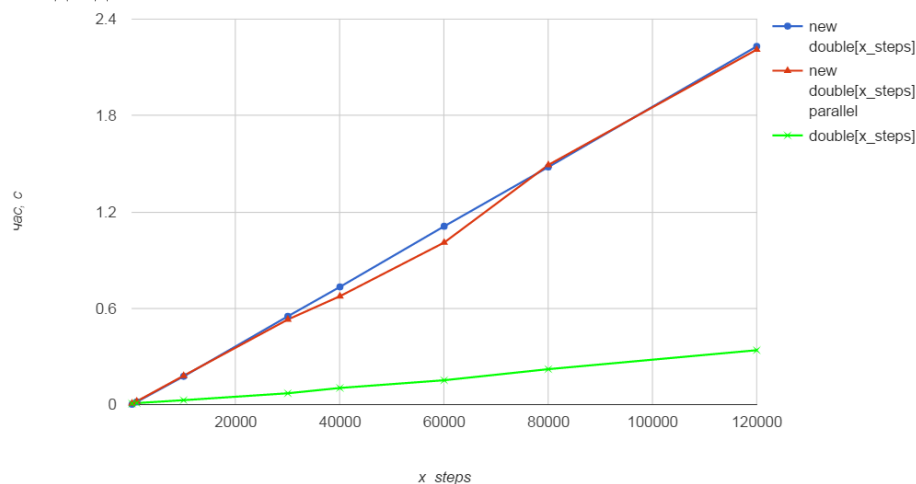


Рисунок 4 – Порівняння швидкості обчислення при різних способах оголошення масивів

Подібні ситуації можуть виникнути під час оголошення та роботи з динамічними двовимірними масивами (коли розмір масиву визначається в процесі виконання програми). Оголошення `double a[n][n]` та `std::array<std::array<double, n>, n>` не працюють, оскільки `new` може приймати тільки перше динамічне значення n під час виконання виразу. Для вирішення даної проблеми можна написати наступний код:

```
// Array of size n of pointers to double
double **a = new double *[n];
for (int i = 0; i != n; ++i)
{
    a[i] = new double[n];
}
```

У цьому випадку ми можемо просто отримати доступ до необхідного елемента масиву за допомогою `a[i][j]`. Але цей масив a є одновимірним масивом вказівників, а не одним безперервним блоком даних

із швидким доступом, що виділяються в пам'яті. Тому доступ до i -го j -го елемента буде повільнішим, ніж це було б, якщо дані були поміщені в один двовимірний масив.

Висновки

В роботі сформульовано постановку та побудовано математичну модель процесу вертикальної міграції радіонуклідів у горизонтальному шарі ґрунту великої протяжності. Шар ґрунту містить мікро- та наночастинки пористої структури і представляє собою каталітичне пористе середовище при наявності фільтрів-вловлювачів. Чисельний розв'язок поставленої крайової задачі знайдено методом скінченних різниць. Для проведення чисельних експериментів розроблено програмний комплекс NanoSurface [12]. В результаті проведення чисельних експериментів та аналізу отриманих графіків, стає очевидним ефективний вплив мікрочастинок на швидкість міграції радіонуклідів та необхідність врахування дифузії в скелеті ґрунту. Даний факт потрібно враховувати при подальших дослідженнях.

Встановлено алгоритмічну складність алгоритмів правої, лівої, зустрічної та блочної прогонки. На основі цих даних проведено чисельні експерименти з метою виявлення часових затрат та аналізу ефективності паралельних обчислень. Реалізація обчислювальних методів за допомогою засобів паралельного програмування дає суттєвий приріст ефективності. Зокрема, як показано на рис. 3 для 120000 кроків розбиття по змінній x , час виконання звичайного коду від паралельного алгоритму обчислення відрізняється в 3,5 рази (при 8 потоках). Рис. 4 наочно демонструє зменшення швидкості обчислень у 6 разів для 80000 ітерацій при використанні Variable length arrays замість динамічного задання масиву за допомогою оператора new. Однак, дана можливість доступна в компіляторах із підтримкою стандарту C99 або вище. Тому необхідно звертати увагу на вибір правильного інструментарію розробника та форми оголошення масивів.

Стаття написана і опублікована за підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень України, проект № Ф76/93-2017 від 08.09.17 р. «Інформаційне забезпечення розвитку конкурентоспроможного органічного сільського господарства України в умовах євроінтеграції».

Список літератури

1. *Auffan M. Nanomaterials as adsorbents / M. Auffan, H. J. Shipley, S. Yean, A.T. Kan, M. Tomson, J. Rose, J.-Y. Bottero // Environmental Nanotechnology: Applications and Impacts of Nanomaterials, McGraw-Hill, New York. – 2007. – С.371–392.*
2. *Бурак Я.Й. Вихідні положення математичної моделі гетеродифузного переносу радіонуклідів у приповерхневих шарах Землі / Я.Й. Бурак, Є.Я. Чапля // Доп. НАН України. – 1993. – Т.10. – С.59–63.*
3. *Чапля Є.Я. Моделювання процесів стаціонарної гетеро дифузії розпадної речовини у середовищі з пастками / Є.Я. Чапля, О.Ю. Чернуха, Гончарук, В. Є., Паби́рівський, В. В. // Моделювання та інформаційні технології. – 2013. – Т.70. – С.96–108.*
4. *Петрик М.Р. Математичне моделювання двокомпонентної десорбції в нанопористому середовищі / М.Р. Петрик, Д.М. Михалик, О.Ю. Петрик, М.І. Шинкарик // Вісник ХНТУ „Математичне моделювання фізичних і технологічних процесів і технічних систем“. – 2016. – №3 (58). – С.384–387.*
5. *No exponential is forever: but " Forever" can be delayed! [semiconductor industry] / ред. G. E. Moore: IEEE, 2003. – 20-23.*
6. *Богаєнко В.А. Об оптимизации вычислительного процесса математического моделирования сложных задач / В.А. Богаєнко // Управляющие системы и машины. – 2010. – №6. – С.9–24.*
7. *Богаєнко В.О. Паралельні алгоритми моделювання процесу фільтраційної консолідації під дією двокомпонентного розчину / В.О. Богаєнко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки. – 2011. – .*
8. *Богаєнко В.А. Методика численного моделирования процесса электрокинетической очистки грунтов в неизотермических условиях / В.А. Богаєнко // Управляющие системы и машины. – 2013. – №1. – С.3–10.*
9. *Белоус М.В. Использование программного комплекса НАДРА-3D для моделирования регионального режима фильтрации воды / М.В. Белоус, В.С. Дейнека // Компьютерная математика. – 2010. – №1. – С.35–42.*
10. *Власюк А.П. Математичне моделювання переносу сольових розчинів при фільтрації підземних вод у ґрунтових масивах / А.П. Власюк, О.П. Остапчук. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2015. – 214 с.*
11. *Diffusion Fundamentals / ed. J. Kärgler. – Leipzig: Leipziger Universitätsverlag, 2005. – 615 S.*
12. *Власюк А.П. Математичне моделювання вертикальної міграції радіонуклідів в каталітичному пористому середовищі / А.П. Власюк, В.В. Жуковський // Вісник Київського національного університету. Сер. фіз.-мат. наук. – 2015. – Т.1. – С.89–95.*

13. *Vlasyuk A.P. Mathematical Modelling of Vertical Migration of Radionuclides in Catalytic Porous Media with Traps in Linear Case / A.P. Vlasyuk, V.V. Zhukovsky, M.M. Bondarchuk // Theoretical and Applied Aspects of Cybernetics. Proceedings of the 5th International Scientific Conference of Students and Young Scientists. – 2015. – P.208–219.*
14. *Самарский А.А. Теория разностных схем: Учеб. пособие для вузов по спец. "Прикл. математика" / А.А. Самарский. – Москва: Наука, 1989. – 616 с.*
15. *Власюк А.П. Монотонна різницева схема для нелінійного одновимірного рівняння параболічного типу, що містить першу похідну / А.П. Власюк, О.П. Остапчук, О.М. Степанченко // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. наук. – 2005. – Т.Вип. 2. – С.188.*
16. Баркалов К.А. Методы параллельных вычислений / Баркалов К.А., 2011. – 124 с.
17. *Гергель В. Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем: [учебник для вузов] / В. Гергель: Физматлит, 2010.*
18. OpenMP.org. – <http://openmp.org/wp/>.
19. ISO/IEC 9899:1999 - Programming languages - C. – http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=29237.

Відомості про авторів

Власюк Анатолій Павлович – професор, академік Академії наук вищої школи України, доктор технічних наук, професор Національного університету «Острозька академія», Україна.

Жуковський Віктор Володимирович – старший викладач кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування, Україна.

Жуковська Наталія Анатоліївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування, Україна.

УДК519.876.5

М. П. Дивак, І. С. Олійник

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль

Анотація. У праці розглянута задача моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних та запропоновано архітектуру програмної системи для розв'язування цієї задачі. Для обґрунтування архітектури обрано найефективніший за критеріями точності прогнозування, обчислювальних витрат, забезпечення аналітичності функціональних меж коридору моделей та обчислювальної складності метод оцінювання параметрів математичної моделі статичної системи. Особливістю створеної архітектури є наявність модуля формування оптимального «насыщеного блоку» та модуля конструювання структури моделі. Для візуалізації результатів в архітектуру інтегровано модулі, скомпільовані з використанням середовища Matlab. Наведено приклад застосування для моделювання характеристик малої гідроелектростанції.

Ключові слова: математична модель, аналіз інтервальних даних, інтервальна система лінійних алгебричних рівнянь, діаграма прецедентів, архітектура програмної системи.

Аннотация. В работе рассмотрена задача моделирования статических систем на основе анализа интервальных данных и предложена архитектура программной системы для решения этой задачи. Для обоснования архитектуры выбран наиболее эффективный по критериям точности прогнозирования, вычислительных затрат, обеспечения аналитичности функциональных границ коридора моделей и вычислительной сложности метод оценивания параметров математической модели статической системы. Особенностью созданной архитектуры является наличие модуля формирования оптимального «насыщенного блока» и модуля конструирования структуры модели. Для визуализации результатов в архитектуру интегрированы модули, скомпилированные с использованием среды Matlab. Приведен пример применения для моделирования характеристик малой гидроэлектростанции.

Ключевые слова: математическая модель, анализ интервальных данных, интервальная система линейных алгебраических уравнений, диаграмма прецедентов, архитектура программной системы.

Abstract. The task of modeling of static systems based on the analysis of interval data and the architecture of software system to solve this task are considered in the paper. To justify the architecture chosen a sthemosteffective according to the criteria of predictive accuracy, computational costs, ensure the analyticity of the functional boundaries of the corridor of models and computational complexity method of estimating the parameters of a mathematical model of the static system. A feature of the architecture is the module of formation of the optimal "saturated block" and module designing the model structure. To visualize the results in the architecture of integrated modules, compiled using Matlab. The example of application for modeling characteristics of a small hydropowerplant.

Keywords: mathematical model, interval data analysis, interval system of line aralgebraice quations, usecase diagram, architecture of software system.

Вступ

В технічних застосуваннях, в екології, в медицині, при управлінні технологічними процесами часто доводиться використовувати математичні моделі статичних систем. Під статичними системами розуміємо безінерційні системи, у яких реакція на вхідні змінні відбувається миттєво, тобто без урахування перехідних процесів. Такі системи описують алгебричними рівняннями у вигляді залежностей між вихідними та вхідними змінними. В теорії ідентифікації таких систем розроблено велику кількість методів, які ґрунтуються на критеріях мінімізації середньоквадратичного відхилення або на максимізації функції правдоподібності [1-4]. В цих випадках передбачається, що виміряні значення вхідних і вихідних змінних безпомилкові або з випадковими похибками. Разом з тим, достатньо часто неможливо похибки в експериментальних даних, які використовують для ідентифікації моделі, вважати випадковими. Зокрема, у випадках, коли похибки обмежені за значенням, або коли відомі допуски на вихідні чи вхідні змінні.

Приклади таких задач, описані у працях [5-6], присвячених моделюванню задачі де виміряні значення з обмеженими за значенням похибки концентрації шкідливих виходів чи у випадку моделювання технологічного процесу виготовлення гіпсокартону, де задані допуски на вологість на поверхні листа гіпсокартону. У цих випадках для побудови моделі використовують інтервальні дані [1-6], а ідентифікацію моделі проводять із застосуванням методів аналізу інтервальних даних [1-6]. У працях наведені як теоретичні основи застосування таких методів для розв'язування задач ідентифікації, так і прикладні аспекти, зокрема, вказано, що основною математичною задачею, яка пов'язана з ідентифікацією параметрів моделі, є задача розв'язування ІСЛАР, яка, як відомо, має множину розв'язків.

При застосуванні методів аналізу інтервальних даних важливим є вибір форми для оцінювання множини параметрів моделі, тобто розв'язків ІСЛАР. Найбільш поширеним способом опису оцінок параметрів моделі є інтервальний (області у формі прямокутних паралелепіпедів), многогранниками або багатомірними еліпсоїдами.

М. П. Дивак, І. С. Олійник, 2017

Останнім часом у ряді праць [7-12] для розв'язування прикладних задач моделювання на основі аналізу інтервальних даних використовують оцінки області чи множини параметрів у вигляді паралелотопів.

Такі оцінки отримують шляхом вибору найбільш «інформативних» інтервальних рівнянь із ІСЛАР, кількість яких дорівнює кількості невідомих параметрів. Зазначену процедуру називають формуванням оптимального «насиченого блоку» ІСЛАР. Такий спосіб оцінювання області розв'язків ІСЛАР має ряд переваг у порівнянні з іншими. Зокрема, відзначається високою точністю наближення області параметрів моделі, низькою обчислювальною складністю та можливістю переходу до еліпсоїдних оцінок області із використанням аналітичних виразів. Проте, застосування зазначеного методу у прикладних дослідженнях обмежується відсутністю відповідного програмного забезпечення.

Метою праці є створення архітектури та на її основі програмного комплексу для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. Обов'язковою компонентою архітектури є модуль виділення оптимального «насиченого блоку», який забезпечує підвищення прогностичних властивостей інтервальної моделі за рахунок незначного підвищення обчислювальної складності.

Постановка задачі

Нехай залежність між «виходом» та «входами» для деякої статичної системи має вигляд алгебричного рівняння:

$$y_0 = \beta_1 \cdot \varphi_1(\vec{x}) + \dots + \beta_m \cdot \varphi_m(\vec{x}), \quad (1)$$

де y_0 - істинне невідоме значення «виходу» системи; $\vec{x} \in R^m$ - вектор вхідних змінних; $\vec{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$ - вектор невідомих параметрів, $\vec{\varphi}^T(\vec{x}) = (\varphi_1(\vec{x}), \dots, \varphi_m(\vec{x}))^T$ - вектор відомих базисних функцій.

Результати спостережень за «входами» та «виходами» представляють у вигляді матриці значень вхідних змінних X та вектора інтервалів значень для вихідної змінної $[\vec{Y}]$:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{in} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{Nn} \end{pmatrix}; [\vec{Y}] = \begin{pmatrix} [y_1^-; y_1^+] \\ \vdots \\ [y_i^-; y_i^+] \\ \vdots \\ [y_N^-; y_N^+] \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для кожного із N спостережень істинне невідоме значення виходу y_0 знаходиться в інтервалах:

$$y_i^- \leq y_0 \leq y_i^+, i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

На основі виразів (1-3) для оцінювання вектора невідомих параметрів $\vec{\beta}$ отримуємо ІСЛАР:

$$\begin{cases} y_1^- \leq b_1 \varphi_1(\vec{x}_1) + \dots + b_m \varphi_m(\vec{x}_1) \leq y_1^+ \\ \vdots \\ y_i^- \leq b_1 \varphi_1(\vec{x}_i) + \dots + b_m \varphi_m(\vec{x}_i) \leq y_i^+ \\ \vdots \\ y_N^- \leq b_1 \varphi_1(\vec{x}_N) + \dots + b_m \varphi_m(\vec{x}_N) \leq y_N^+ \end{cases}. \quad (4)$$

Розв'язком ІСЛАР (4) є множина Ω :

$$\Omega = \left\{ \vec{b} \in R^m \mid \vec{Y}^- \leq F \cdot \vec{b} \leq \vec{Y}^+ \right\}, \quad (5)$$

де $F = \{ \vec{\varphi}_j^T(\vec{x}_i), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, m \}$ - відома матриця значень базисних функцій,

$\vec{Y}^- = \{ y_i^-, i = 1, \dots, N \}$ та $\vec{Y}^+ = \{ y_i^+, i = 1, \dots, N \}$ - вектори, сформовані з верхніх та нижніх меж інтервалів $[y_i^-, y_i^+]$.

Обравши будь-який вектор $\vec{b} \in \Omega$, отримуємо математичну модель статичної системи у вигляді:

$$\hat{y}(\vec{x}) = \vec{\varphi}^T(\vec{x}) \cdot \vec{b} \quad (6)$$

Усі розв'язки з множини Ω породжують множину рівнозначних моделей, яку в інтервальному аналізі називають інтервальними моделями. При цьому всі інтервальні моделі статичної системи належать такій множині (коридору) [3]:

$$[\hat{y}(x)] = [\hat{y}^-(x); \hat{y}^+(x)], \quad (7)$$

де $\hat{y}^-(\bar{x}) = \min_{b \in \Omega} (\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b})$, $\hat{y}^+(\bar{x}) = \max_{b \in \Omega} (\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b})$ - нижня та верхня межі функціонального

коридору, відповідно.

Як відомо [3,7-12], розв'язками цієї задачі є множина оцінок параметрів статичної системи, або її деяка наближена гарантована локалізаційна оцінка.

Обґрунтування вибору методу оцінювання параметрів математичної моделі статичної системи

Отже, як було показано вище, основною задачею для побудови моделі статичної системи на основі аналізу інтервальних даних є задача оцінювання розв'язків ІСЛАР (4). Методи оцінювання параметрів формують як властивості області параметрів моделі так і прогностичні властивості цих моделей. У працях пов'язаних з інтервальним аналізом розглядають чотири методи оцінювання розв'язків: метод знаходження точних розв'язків, коли область розв'язків представляють у вигляді многогранної області (рис.1); інтервальне оцінювання параметрів моделі, коли область розв'язків ІСЛАР представляють у вигляді прямокутного паралелепіпеда (рис.2); еліпсоїдне оцінювання з використанням багатовимірних еліпсоїдів (рис.2); з виділенням «насиченого блоку», коли область розв'язків представляють у вигляді у певний спосіб вибраних m рівнянь із використанням ітераційної процедури додавання інших рівнянь із ІСЛАР (рис.3).

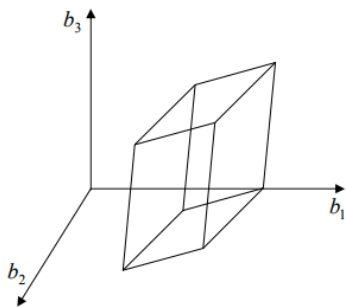


Рисунок 1 – Локалізація області розв'язків ІСЛАР многогранником Ω_m ($m=3$)

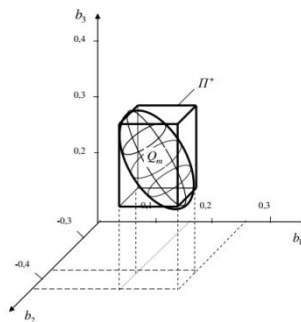


Рисунок 2 – Локалізація області розв'язків ІСЛАР прямокутним паралелепіпедом Π^+ та еліпсоїдом Q_m ($m=3$)

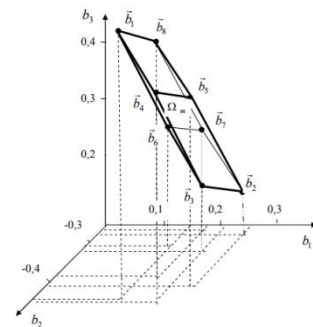


Рисунок 3 – Локалізація області розв'язків паралелотопом Ω_m ($m=3$)

У таблиці 1 систематизовано переваги і недоліки розглянутих методів оцінювання параметрів. Оцінювання методів проводять за такими критеріями: точність прогнозування із застосуванням побудованої моделі, обчислювальні витрати для визначення точності прогнозування, забезпечення аналітичності функціональних меж коридору моделей та обчислювальна складність методу.

Таблиця 1 – Аналіз властивостей методів множинного оцінювання параметрів при побудові інтервальних моделей статичних систем

Методи оцінювання параметрів	Точність прогнозування	Обчислювальні витрати для визначення точності прогнозування	Забезпечення аналітичності функціональних меж коридору моделей	Обчислювальна складність методу
Загальний випадок ("Точні" – многогранниками)	Дуже висока	Дуже високі		Дуже висока
Виділення «насиченого блоку», коли область розв'язків представляють у вигляді у певний спосіб вибраних m рівнянь із ІСЛАР	Висока	Не високі	Так	Не висока

Інтервальна локалізація у вигляді прямокутного паралелепіпеда	Дуже низька	Мінімальні (визначаються застосуванням інтервальної арифметики)		Висока (2m задач лінійного програмування)
Еліпсоїдні (у вигляді багатомірних еліпсоїдів)	Висока	Не високі (залежать від розмірності матриці конфігурації)	Так	Дуже висока (знаходження матриці конфігурації, нелінійна оптимізація з m^2 змінних)

Аналіз табл. 1 показує, що найбільш придатним за вищенаведеними критеріями є методом з виділенням «насиченого блоку», оскільки він характеризується у порівнянні з іншими помірною обчислювальною складністю оцінювання області параметрів, високою точністю прогнозування моделі, мінімальними витратами на визначення точності прогнозування і забезпечує аналітичність функціональних меж коридору так як єдиний метод еліпсоїдного оцінювання.

Спираючись на вищезазначене, одним із модулів програмної системи буде модуль множинного оцінювання розв'язків ІСЛАР для побудови інтервальної моделі у вигляді виділення «насиченого блоку». Розглянемо детально алгоритм реалізації зазначеного методу оцінювання розв'язків ІСЛАР.

Алгоритм методу локалізації області розв'язків ІСЛАР із виділенням «насиченого блоку»

Серед існуючих методів локалізації ІСЛАР виділяють метод, що передбачає вибір із ІСЛАР з m невідомими – m інтервальних рівнянь, тобто «насиченого блоку», які називають базовими. На основі вибраних базових рівнянь конструюють локалізаційну область розв'язків усієї ІСЛАР [7-12]. Запропонований метод ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі, з критерієм мінімізації максимальної похибки прогнозування для інтервальних моделей, область оцінок параметрів яких локалізована областю розв'язків ІСЛАР у вигляді «насиченого блоку».

Властивості області розв'язків ІСЛАР чи їх локалізації визначають властивості функціонального коридору (7) інтервальних моделей. Зокрема, відомо, якщо використати локалізацію області розв'язків ІСЛАР (4) у вигляді «насиченого блоку», то вона матиме вигляд паралелотопа, який, як відомо, є геометричною фігурою з $2m$ вершинами і m -попарно паралельними гранями [3].

У праці [13] описано алгоритм, коли область розв'язків «насиченого блоку» описують паралелотопом, вершини якого обчислюють за формулою:

$$\vec{b}_s = F_m^{-1} \cdot \vec{Y}_s \quad (8)$$

де \vec{Y}_s - вектор, складений з межових значень інтервалів $[y_i^-, y_i^+]$.

Центр симетрії паралелотопа $\vec{\bar{b}}$ визначають за формулою:

$$\vec{\bar{b}} = \frac{1}{2^m} \sum_{s=1}^{2^m} \vec{b}_s = F_m^{-1} \cdot \vec{\bar{Y}}, \quad (9)$$

де $\vec{\bar{Y}}$ - вектор є середнім арифметичним усіх векторів складених з межових значень, а його компоненти - середні інтервальні значення $\bar{y}_i = (y_i^+ + y_i^-) / 2, i = 1, \dots, m$, тобто

$$\vec{\bar{Y}} = \frac{1}{2^m} \cdot \left(\sum_{s=1}^{2^m} \vec{Y}_s \right) = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_m)^T. \quad (10)$$

3. Об'єм отриманого паралелотопа обчислюють за формулою:

$$V_{\Omega_m} = 4^m \cdot \left(\prod_{i=1}^m (y_i^+ - y_i^-)^2 \right) \cdot \det(F_m \cdot F_m^T)^{-1} \quad (11)$$

Отже, основною математичною задачею при побудові інтервальних моделей є задача оцінювання множини розв'язків ІСЛАР.

Удосконалений алгоритм методу локалізації розв'язків ІСЛАР на основі її «насиченого блоку» описаний у праці [14], де пропонується для реалізації методу виконати таку послідовність обчислень:

1. Вибираємо із ІСЛАР (4) m рівнянь, що утворюють сумісну систему, тобто формуємо матрицю F_m . Розв'язком цієї системи є область Ω_m , яка геометрично має вигляд паралелотопа з вершинами (8).

2. Розраховуємо функції $L_s(k)(L'_s(k))$ для усіх вершин паралелотопа на підставі формул:

$$L_s(k) = y_{k+1}^- - \bar{\varphi}^T(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{b}_s(k), \quad (12)$$

$$L'_s(k) = \bar{\varphi}^T(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{b}_s(k) - y_{k+1}^+ = -L_s(k) - \Delta_{k+1}, \quad (13)$$

де \bar{x}_{k+1} – вектор вхідних значень у $k+1$ спостереженні, що визначає $k+1$ рівняння у системі (4); y_{k+1}^- , y_{k+1}^+ – нижня та верхня межі інтервалів „виходу” у $k+1$ спостереженні; $\Delta_{k+1} = y_{k+1}^+ - y_{k+1}^-$.

3. Обчислюємо $\delta_i^-(k+1)$ та $\delta_i^+(k+1)$, відповідно, за формулами:

$$\delta_i^-(k+1) = \begin{cases} \min_{s=1, \dots, 2^{m-1}} \{L_s(k) / |\bar{\varphi}^T(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{f}_i|\}, \\ \text{якщо } (L_s(k) > 0, s = 1, \dots, 2^{m-1}) \wedge (\bar{\varphi}^T(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{f}_i \neq 0) \wedge (\exists L_s(k) < 0, s = 1, \dots, 2^m) \\ 0, \text{ якщо } L_s(k) \leq 0 \\ \text{"розв'язок ІСЛАР відсутній"} \text{ якщо } (L_s(k) > 0, \forall s = 1, \dots, 2^m) \end{cases} \quad (14)$$

$$\delta_i^+(k+1) = \begin{cases} \min_{s=1, \dots, 2^{m-1}} \{L'_s(k) / |\bar{\varphi}^T(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{f}_i|\}, \\ \text{якщо } (L'_s(k) > 0, s = 1, \dots, 2^{m-1}) \wedge (\bar{\varphi}^T(\bar{x}_{k+1}) \cdot \bar{f}_i \neq 0) \wedge (\exists L'_s(k) < 0, s = 1, \dots, 2^m) \\ 0, \text{ якщо } L'_s(k) \leq 0 \\ \text{"розв'язок ІСЛАР відсутній"} \text{ якщо } (L'_s(k) > 0, \forall s = 1, \dots, 2^m) \end{cases} \quad (15)$$

4. Обчислюємо межі інтервалу $[y_i^-(k+1); y_i^+(k+1)]$ за формулою:

$$y_i^-(k+1) = y_i^-(k) + \delta_i^-(k+1), y_i^+(k+1) = y_i^+(k) - \delta_i^+(k+1), i = 1, \dots, m. \quad (16)$$

5. Якщо $k \leq N - m$, то перехід на крок 2. У протилежному випадку завершення процедури.

Отримавши задовільну структуру моделі, з метою підвищення точності прогнозування у праці [13] пропонується оцінити параметри моделі еліпсоїдними методами локалізації. Задача допустимого еліпсоїдного оцінювання передбачає вписування в область Ω багатовимірного еліпсоїда з максимальним об'ємом.

Його еліпсоїдальна оцінка матиме такий вигляд:

$$Q_m(k+1) = \left\{ \bar{b} \in R^m \mid (\bar{b} - \bar{b}(k+1))^T \cdot F^T \cdot E^{-2}(k+1) \cdot F \cdot (\bar{b} - \bar{b}(k+1)) = 1 \right\}, \quad (17)$$

де $\bar{b}(k+1) = F_m^{-1} \cdot ((y_1^+(k+1) - y_1^-(k+1)), \dots, (y_m^+(k+1) - y_m^-(k+1)))^T$ – вектор, який задає центр еліпсоїда; $E(k+1) = \text{diag}(y_1^+(k+1) - y_1^-(k+1), \dots, y_i^+(k+1) - y_i^-(k+1), \dots, y_m^+(k+1) - y_m^-(k+1))$ – діагональна матриця результуючих інтервальних похибок.

Ширина коридору прогнозування еліпсоїда:

$$[\bar{y}(\bar{x})]_{\bar{b} \in Q_m} = \left[\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b} - \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\bar{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m}; \bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b} + \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\bar{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} \right], \quad (18)$$

де $\Delta_{\bar{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m}$ – похибка прогнозування, що обчислюється за формулою:

$$\Delta_{\bar{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} = \sqrt{\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot (F_m^T \cdot E \cdot F_m)^{-1} \cdot \bar{\varphi}(\bar{x})} \quad (19)$$

В розглянутому методі локалізації області розв'язків ІСЛАР, дуже складним є перший крок формування «насиченого блоку».

Зважаючи на зазначене вище, у праці [15] теоретично обґрунтовано необхідність розробки такого методу формування початкового «насиченого блоку» (набору з m базових рівнянь) з ІСЛАР, який би забезпечував високу точність параметрів інтервальної моделі та її задовільні прогностичні властивості. У праці [15] описано метод формування набору базових рівнянь у задачі локалізації розв'язків інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь (ІСЛАР), який ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі, де за критерій обрано мінімізацію максимальної похибки прогнозування інтервальними моделями, параметри яких належать області локалізації розв'язків ІСЛАР. Зазначений метод здійснює напрямлений, а не повний, перебір «насичених блоків», складених із загальної ІСЛАР із N інтервальних рівнянь. Суть методу полягає: у виборі деякого «насиченого блоку»: отриманні коридору інтервальних моделей; аналізі прогностичних властивостей цих моделей і на цій основі планування способу формування наступного «насиченого блоку».

Отже, нехай структура математичної моделі статичної системи визначена виразом (1) з невідомими параметрами, задано інтервальні дані (2) та сформовано ІСЛАР у вигляді (4).

Із ІСЛАР (4) довільним чином обирають «насичений блок», обчислюють його область розв'язків та будують коридор прогнозування інтервальними моделями:

$$[\hat{y}(\bar{x})] = [\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b} - \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\hat{y}(\bar{x})}; \bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b} + \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\hat{y}(\bar{x})}]. \quad (20)$$

По аналогії з процедурою послідовного I_G -оптимального планування, серед $\bar{x}_i, i=1, \dots, N$ точок експерименту, для яких складена ІСЛАР (4), обчислюють вектор \bar{x}^{\max} , для якого є максимальна похибка прогнозування:

$$\bar{x}^{\max} = \arg \max_{\bar{x}_i=1, \dots, N} \left\{ 2 \cdot \sum_{j=1}^m |\alpha_j(\bar{x}_i) \cdot \Delta_j|, \bar{x}_i, i=1, \dots, N \right\}, \quad (21)$$

$$\bar{\alpha}^T(\bar{x}_i) = \bar{\varphi}^T(\bar{x}_i) \cdot F_m^{-1}$$

Отриманий за виразом (21) вектор є вектором значень вхідних змінних, який визначає певне інтервальне рівняння в ІСЛАР (4). Згідно з процедурою послідовного IG-оптимального планування саме у цій точці необхідно провести наступне вимірювання. Якщо вектор \bar{x}^{\max} співпадає з вектором значень вхідних змінних одного із інтервальних рівнянь «насиченого блоку» ІСЛАР, то він задає точку з мінімальним значенням похибки прогнозування.

В поточному «насиченому блоці» одне з інтервальних рівнянь замінюють на інтервальне рівняння ІСЛАР з вектором значень вхідних змінних \bar{x}^{\max} , визначеного за формулою (21). Таким чином, «імітують» процедуру додаткового вимірювання у точці \bar{x}^{\max} з максимальною похибкою прогнозування інтервальної моделі. Зазначену процедуру проводять для кожного інтервального рівняння «насиченого блоку». Отримують p ($p=1, \dots, m$) нових «насичених блоків». Для кожного з m «насичених блоків» отримують m значень максимальних похибок для відповідних інтервальних моделей:

$$\Delta_{\max}^p = \max_{\bar{x}_i, i=1, \dots, N} \left\{ 2 \cdot \sum_{j=1}^m |\alpha_{jp}(\bar{x}_i) \cdot \Delta_j| \right\}, \quad (22)$$

$$\bar{\alpha}_p^T(\bar{x}_i) = \bar{\varphi}^T(\bar{x}_i) \cdot F_m^{-1}(p), p=1, \dots, m$$

де p - індекс, який означає номер «насиченого блоку», $F_m(p)$ - матриця значень базових функцій для p -го блоку, $\alpha_{jp}(\bar{x}_i)$ - i -та компонента вектора $\bar{\alpha}$, обчислена для p -го «насиченого блоку». Для вибору оптимального «насиченого блоку» вибирають з m «насичених блоків» той, який забезпечує найменше значення послідовності (22), тобто:

$$F_m^{opt} = \arg \min_{p=1, \dots, m} \left\{ \Delta_{\max}^p, p=1, \dots, m \right\}, \quad (23)$$

Отримують \bar{x}^{\max} - вектор, де досягається максимальна похибка прогнозу для інтервальної моделі, область параметрів якої обчислено із обраного у вищеописаний спосіб «насиченого блоку». Ітерації продовжуються до тих пір, поки не буде отримано такий «насичений блок», заміна рівнянь якого не призводить до зменшення максимальної похибки прогнозування інтервальними моделями.

Алгоритм методу реалізації наведено на рис. 2.

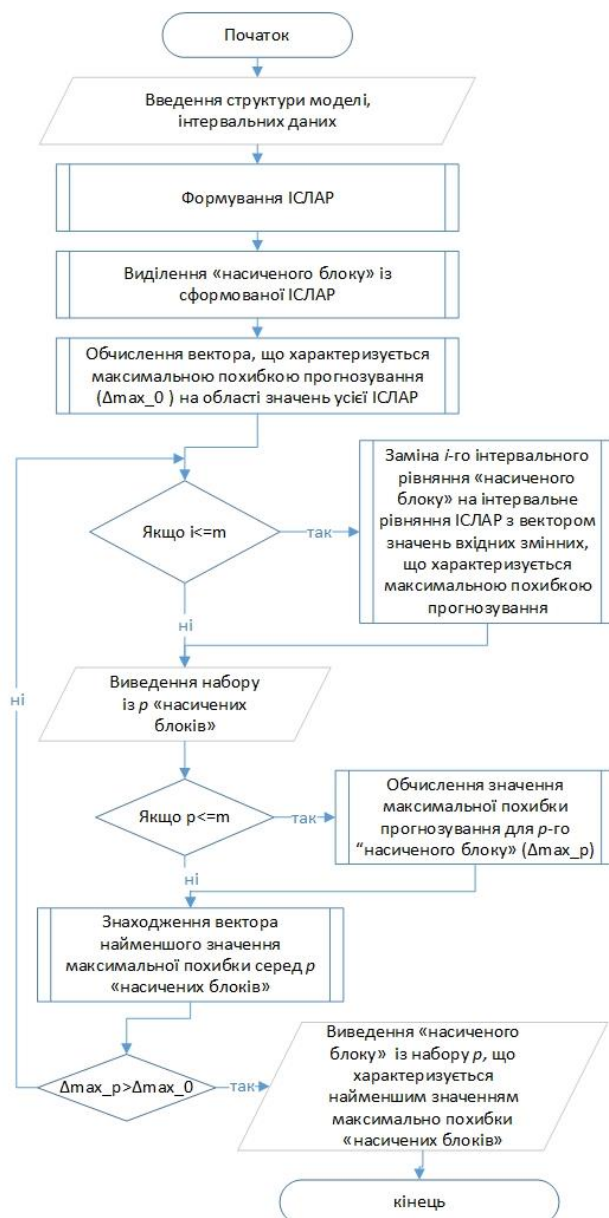


Рисунок 2 – Блок-схемаметоду формування оптимального «насиченого блоку» у задачі локалізації розв’язків інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь

Архітектура програмної системи для моделювання статичних систем на основі інтервальних даних

В основі проекту архітектури програмної системи є функціональні вимоги. Традиційно, для узагальнення функціональних вимог використовують use case діаграми. На рис. 3 зображено модель прецедентів програмної системи для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних.

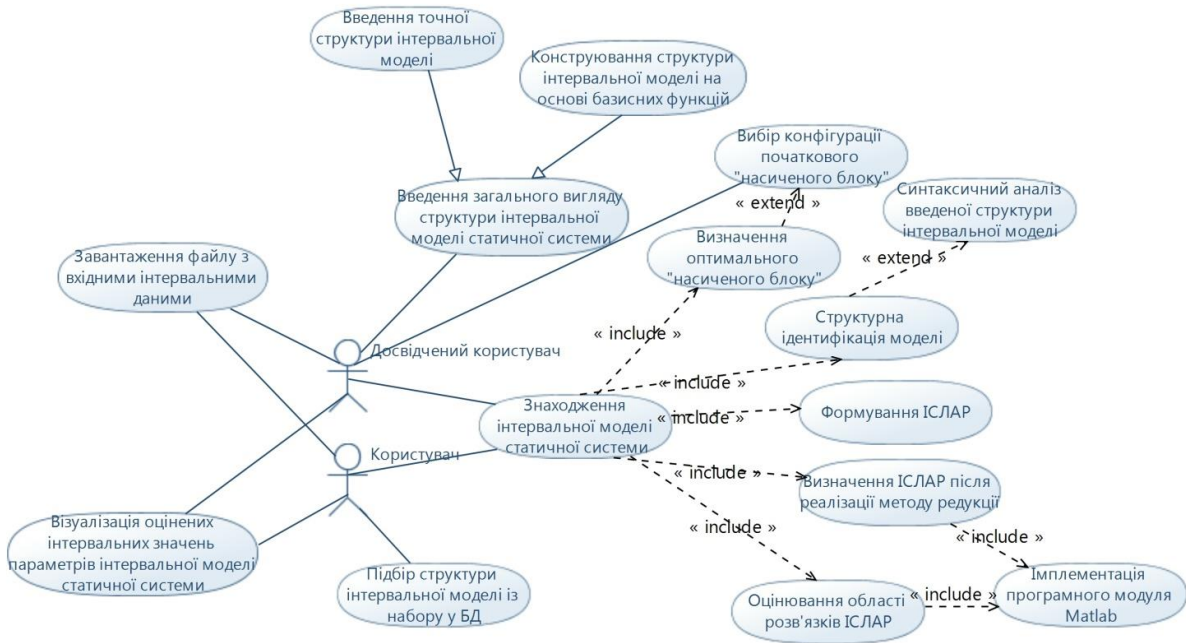


Рисунок 3 – Діаграма варіантів використання програмної системи для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних

У залежності від компетентності користувача у системі виділено два рівні доступу до сервісів, які проєктуються. Отже, користувач, який знайомий з особливостями математичного опису програмної системи, має можливість використовувати сервіси введення початкових даних та візуалізації результатів, а також сервіси, пов'язані із налаштуванням алгоритмів як обчислення області параметрів моделі так і формування структури моделі та її параметричної ідентифікації. Зокрема, вибір конфігурації початкового «насиченого блоку», використання конструктора формування структури інтервальної моделі на основі базисних функцій.

Для користувача, який не знайомий з особливостями математичного опису розв'язування ІСЛАР та структурної і параметричної ідентифікації моделі запропоновано спрощений інтерфейс і обмежений набір сервісів. Зокрема, доступні функції введення інтервальних даних, візуалізації розв'язків та вибір структури із наявного у базі даних набору структур.

Програмна система повинна забезпечувати користувачу зручний інтерфейс введення початкових даних, якісну візуалізацію та високу швидкодію обчислень.

Функція «Завантаження файлу з вхідними інтервальними даними» є доступною для користувачів усіх рівнів доступу та забезпечує можливість завантаження .txt файлу з вхідними даними у заданому форматі.

Функція «Введення загального вигляду структури інтервальної моделі статичної системи» узагальнює підфункції «Введення точної структури інтервальної моделі» та «Конструювання структури інтервальної моделі на основі базисних функцій». Така функція призначена для досвідченого користувача.

Підфункція «Введення точної структури інтервальної моделі» використовується у випадку, коли структура інтервальної моделі статичної системи відома досвідченому користувачу заздалегідь.

Реалізація підфункції «Конструювання структури інтервальної моделі на основі базисних функцій» передбачає, що досвідчений користувач, розуміючи природу модельованого процесу, може сконструювати структуру інтервальної моделі на основі набору базисних функцій.

Функція «Підбір структури інтервальної моделі із набору у БД» доступна лише для рівня доступу «користувач» і передбачає, що користувач не володіє знаннями про особливості структури досліджуваної системи, тому така структура автоматично формується із набору структур, збережених у базі даних.

Функція «Візуалізація оцінених інтервальних значень параметрів інтервальної моделі статичної системи» є доступною для користувачів усіх рівнів доступу і дозволяє графічно відобразити оцінки інтервальних значень параметрів статичної системи та вивести вигляд знайденої інтервальної моделі.

Функція «Знаходження інтервальної моделі статичної системи» включає підфункції «Структурна ідентифікація моделі», «Формування ІСЛАР», «Визначення ІСЛАР після реалізації методу редукції», «Оцінювання області розв'язків ІСЛАР» і «Визначення оптимального «насиченого блоку»».

Підфункція «Структурна ідентифікація моделі» реалізує структурну ідентифікацію інтервальної моделі або на основі введеної структури, або реалізуючи підфункцію «Синтаксичний аналіз введеної структури інтервальної моделі».

Підфункція «Синтаксичний аналіз введеної структури інтервальної моделі» реалізується із застосуванням складного механізму взаємодії вказівників на символи в стрічці та перетворення таких символів у відповідні змінні. Результатом опрацювання введеної в процесі реалізації підфункції «Введення точної структури моделі» структури моделі у вигляді стрічки є структура, подана у зрозумілому для системи вигляді.

Підфункція «Формування ІСЛАР» є доступною для усіх користувачів і на основі опрацювання файлу вхідних даних та знайденої чи заданої структури інтервальної моделі формує інтервальну систему лінійних алгебричних рівнянь.

Підфункція «Пошук оптимального «насиченого блоку»» реалізує описану у цій праці процедуру вибору оптимального «насиченого блоку» і є доступною для усіх рівнів користувачів. В межах цієї підфункції доступна також підфункція «Вибір конфігурації початкового «насиченого блоку»», в межах якої досвідчений користувач може задати номери відповідних рівнянь із ІСЛАР, які утворюватимуть початковий «насичений блок», необхідний для запуску процедури пошуку оптимального «насиченого блоку».

Підфункція «Визначення ІСЛАР після реалізації методу редукції» забезпечує реалізацію методу редукції ІСЛАР на основі виділення «насиченого блоку» з врахуванням результатів виконання процедури вибору оптимального «насиченого блоку». В межах реалізації функції є підфункція «Імплементация програмного модуля Matlab».

Функція «Оцінювання області розв'язків ІСЛАР» дозволяє розв'язати ІСЛАР, визначену методом редукції та отримати інтервальні оцінки параметрів інтервальної моделі статичної системи. В межах реалізації функції передбачено підфункцію «Імплементация програмного модуля Matlab».

Підфункція «Імплементация програмного модуля Matlab» дозволяє підключити до програми модуль, реалізований у середовищі Matlab. У механізм реалізації такого модуля вбудовані алгоритми методу редукції ІСЛАР на основі виділення «насиченого блоку» та методу локалізації розв'язків ІСЛАР еліпсоїдом.

Проектування архітектури програмної системи, як відомо, здійснюється шляхом розподілу функцій системи за окремими модулями, а також встановлення взаємозв'язку між цими модулями.

Архітектуру програмної системи відображаємо в контексті рівня представлення даних. В межах такого підходу архітектура ПС є трьохрівневою [16]. Зокрема, на найвищому рівні представлення (Presentation layer) відображають модулі, що відповідають за взаємодію між користувачем, системою і компонентами. На другому рівні бізнес-логіки (Business layer) реалізується логіка роботи додатку. На нижньому рівні – рівні даних (Data layer) відбувається доступ до даних, які зберігаються системою, і до даних, доступ до яких надається іншими системами. На рівні управління даними виконуються всі операції з даними. Трьохрівневу архітектуру розробленої програмної системи представлено на рисунку 4.

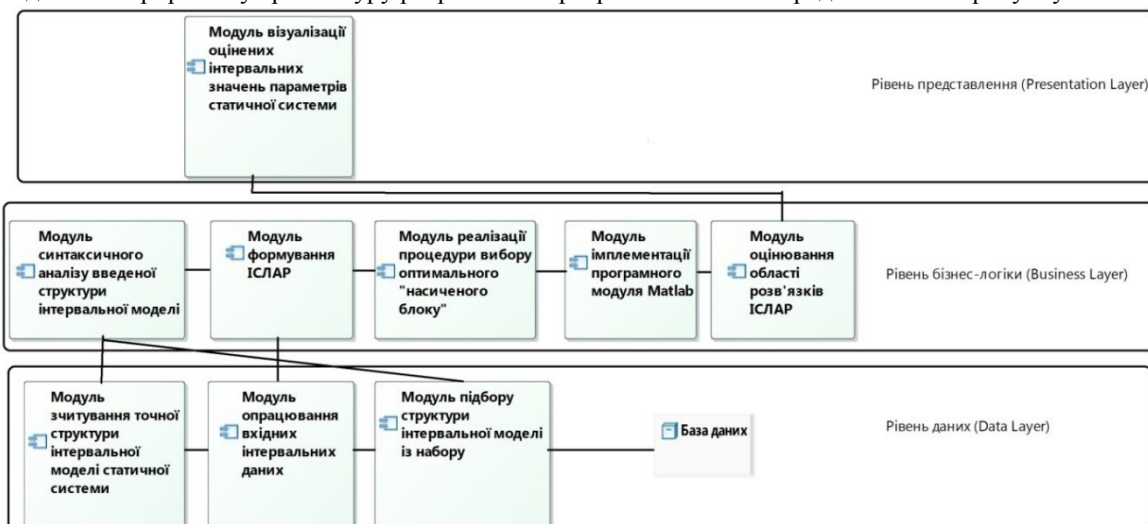


Рисунок 4 – Архітектура програмної системи для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних

Приклад застосування програмної системи

У праці [17] наведено приклад побудови макромоделі генерованої електроенергії малою гідроелектростанцією. В результаті аналізу поточного функціонування МГЕС виділяють основні фактори впливу

на кількість згенерованої електроенергії МГЕС. Зокрема: реактивна та активна потужності турбіни, напір води на турбіну, розхід води МГЕС, рівень води на гідропості, різниця верхнього та нижнього б'єфу.

Залежність між кількістю генерованої електроенергії та зовнішніми факторами впливу представлено в такому вигляді [17]:

$$y(\vec{x}) = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_1 x_3 + b_3 \cdot \sin(x_3) + b_4 \cdot x_1 \cdot x_2^2, \quad (24)$$

де $y(\vec{x})$ - згенерована електроенергія, x_1 - реактивна потужність, x_2 - напір на МГЕС, x_3 - рівень води на гідропості.

Експериментальні дані, що отримані на МГЕС, представлено в інтервальному вигляді:

$$X = (x_{i1} \dots x_{i3}); [\vec{Y}] = ([y_i^-; y_i^+]), i = 1, \dots, 30 \quad (25)$$

де X - матриця значень вхідних змінних, \vec{Y} - вектор інтервальних значень вихідної змінної.

Експериментальні дані формуємо у txt-файл та завантажуюмо у систему. У відповідне поле екранної форми вводимо структуру інтервальної моделі. Копія екрану роботи програми відображена на рис. 5.

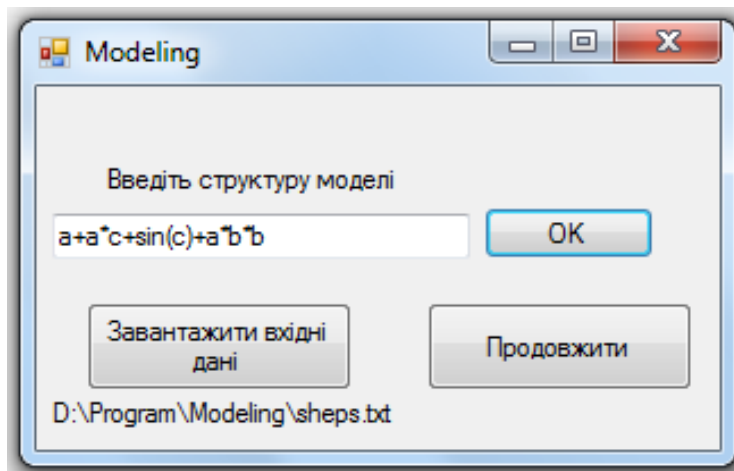


Рисунок 5 – Формадля введення вхідних даних

На одному із етапів обчислень користувачу (із повним доступом до функціоналу) пропонують самостійно обрати номери рівнянь стартового «насиченого блоку», з якого розпочнеться реалізація процедури пошуку оптимального «насиченого блоку», яка є основним модулем у запропонованій програмній системі (рис. 6). Зауважимо, що у цьому вікні кількість позицій для введення номерів рівнянь формується динамічно, залежно від кількості невідомих параметрів у інтервальній моделі. Величина списку номерів цих рівнянь також формується автоматично, залежно від кількості інтервальних рівнянь у загальній ІСЛАР.

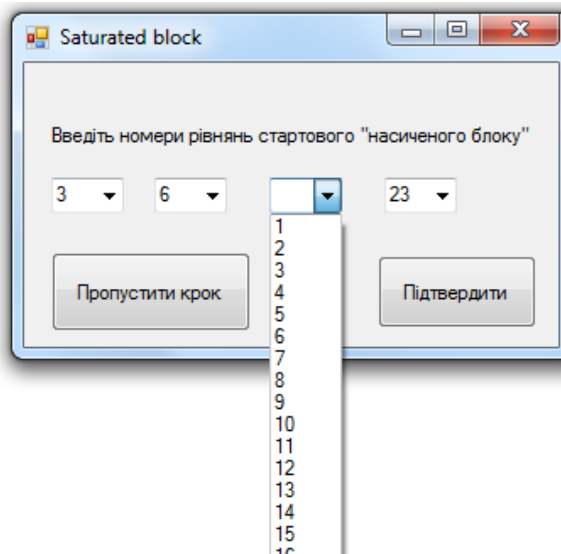


Рисунок 6 – Формавибору рівнянь стартового «насиченого блоку» для процедури пошуку оптимального «насиченого блоку»

На рис. 7 наведено один із варіантів візуалізації результатів роботи програмної системи. По осі абсцис означено дні спостережень, а по осі ординат - прогнозована та виміряна кількість генерованої електроенергії. Інші варіанти візуалізації передбачають виведення дво- або тривимірної моделі, яка відображає залежність між вихідною характеристикою та однією змінною із множини (у двовимірному випадку) або двома вибраними із множини змінними (у тривимірному випадку).

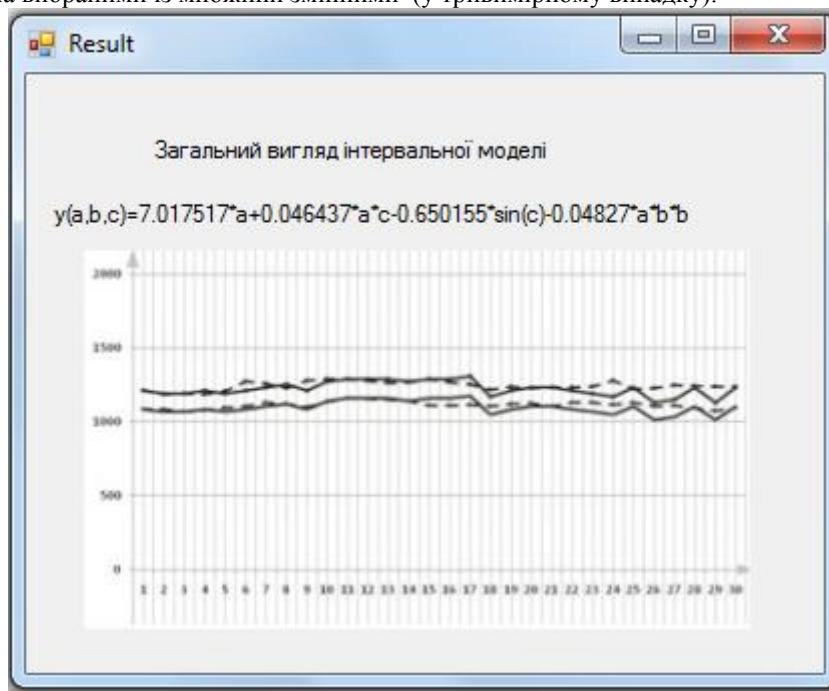


Рисунок 7 – Варіант візуалізації результатів роботи програмної системи

Висновки

1. У статті обґрунтовано вибір архітектури програмної системи для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. Для обґрунтування архітектури програмної системи, у свою чергу, обґрунтовано найефективніший за критеріями точності прогнозування із застосуванням побудованої моделі, обчислювальних витрат для визначення точності прогнозування, забезпечення аналітичності функціональних меж коридору моделей та обчислювальної складності метод оцінювання параметрів математичної моделі статичної системи із застосуванням аналізу інтервальних даних.

2. Особливістю створеної архітектури є наявність в її складі модуля формування оптимального «навиченого блоку», а також модуля для конструювання структури моделі. Для візуалізації результатів як побудови математичної моделі так і результатів її застосування в архітектуру інтегровано модулі візуалізації, скомпільовані з використанням середовища Matlab.

3. Також у праці наведено приклад застосування програмної системи до задачі моделювання характеристик малої гідроелектростанції. Запропонована програмна система апробована для розв'язування ряду задач моделювання статичних систем на основі інтервальних даних. Зокрема, екологічних, технічних, технологічних та біомедичних.

Список літератури

1. 3. Götz Alefeld and Jürgen Herzberger. Introduction to interval computations, Computer Science and Applied Mathematics // Academic Press, Inc. [Harcourt Brace Jovanovich, Publishers], New York, 1983.
2. Shary S.P. Algebraic Approach to the Interval Linear Static Identification, Tolerance, and Control Problems, or One More Application of Kaucher Arithmetic. // Reliable Computing 2(1) (1996), p. 3–33.
3. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія // Тернопіль: Економічна думка, 2011. – 216 с.
4. Куржанский А.Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – с. 3–26.
5. Кушнір О. К. Інтервальне оцінювання збитків навколишньому середовищу внаслідок діяльності автотранспорту / О. К. Кушнір, М. П. Дивак, Л. І. Гончар // Моделювання та інформаційні системи в економіці. — 2011. — № 83. — С. 92-106.

6. Дивак, М. П. Моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виробництву гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини / М. П. Дивак, С. Я. Крепич, Т. М. Дивак, В. І. Манжула // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2015. – Вип. 3 (52). – С. 186-193.
7. Дивак М.П. Використання насиченого експерименту для оцінювання параметрів інтервальної моделі при аналізі інтервальних даних // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 1999. – № 2. – с.33–36.
8. Дивак М.П. Метод локалізації гарантованих оцінок в задачах параметричної ідентифікації // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. №4. - с.12-17.
9. Дивак М.П. Реалізація методу локалізації параметрів інтервальних моделей з виділенням насиченого блоку експерименту на паралельних обчислювальних графах /М.П. Дивак, П.Г. Стахів // Электроника и связь. – 2001. №12. – с. 120-124.
10. Кунцевич В.Получение гарантированных оценок в задачах параметрической идентификации/ Кунцевич В., Лычак М. // Автоматика. – 1982. – № 4. – с. 49-59.
11. Dyvak M. New method tolerance estimation of the parameters set of interval model based on saturated block of ISLAE/ Dyvak M., Manzhula V., Kozak O. // Proceeding of the IX–th International Conference CADSM'2007. – Lviv–Polyana, 2007. – p. 376-379.
12. Dyvak M. Tolerance estimation of parameters set of models created on experimental data/ Dyvak M., Pukas A. and Kozak O. //Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» 2008 Proceedings of International Conference on, Lviv-Slavsko, 2008, p. 24-26.
13. Дивак М.П. Метод формування допускової еліпсоїдної оцінки параметрів інтервальних моделей на основі виділення із інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь основних активних обмежень/ Дивак М.П., Козак О.Л.// Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2009. – Т. 11, №2. – с. 25-36.
14. Дивак, М. П. Особливості комп'ютерної реалізації методу локалізації параметрів інтервальних моделей із виділенням «насиченого блоку» / М. П. Дивак, А. В. Пукас, І. С. Олійник // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2014. – № 2. – С. 59-71.
15. Дивак М.П. Метод формування оптимального «насиченого блоку» у задачі локалізації розв'язків інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь / М.П. Дивак, І.С. Олійник // Збірник наукових праць «Індуктивне моделювання складних систем». Міжнар. наук.-навч. центр інформ. технологій та систем НАН та МОН України. Київ, 2016. – Вип. 8, с. 79-99.
16. Fielding Roy. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. — University of California, Irvine, 2000.
17. Дивак, М. П. Інтервальна модель для прогнозування потужності малої гідроелектростанції «Топольки» / М. П. Дивак, В. І. Манжула, Ю. П. Франко // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 11 (303). – С. 21-29.

Відомості про авторів

Дивак Микола Петрович – доктор технічних наук, професор декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету.

Олійник Ірина Степанівна – аспірант, викладач кафедри комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету.

УДК 004.921

Р. Н. Кветний, А. В. Олесенко

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА КЛАСИФІКАЦІЯ СЕГМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Розроблено узагальнену математичну модель класифікації сегментів зображення у відповідності до методів їх компресії. Проаналізовано існуючі популярні методи компресії й обрано ті, які покривають більшу частину типів зображень. Розроблено критерії віднесення сегментів до того чи іншого методу стиснення на основі аналізу характерних особливостей цих методів з метою підвищення коефіцієнту стиснення вихідного зображення. Надано можливість встановлення порогового значення для оцінки відповідності тому чи іншому критерію. Запропоновано алгоритм стиснення зображень з врахуванням багатокритеріальної класифікації їх сегментів. Впроваджено паралельні обчислення з метою підвищення швидкодії роботи методу.

Ключові слова: математична модель, зображення, класифікація зображень, стиснення зображень.

Аннотация. Разработано обобщенную математическую модель классификации сегментов изображения в соответствии с методами их компрессии. Проанализировано существующие популярные методы компрессии и сделан выбор в пользу тех, которые покрывают большую часть типов изображений. Разработано критерии сопоставления сегментов тому или другому методу сжатия на основе анализа характерных особенностей этих методов с целью повышения коэффициента сжатия исходного изображения. Предоставлено возможность установки порогового значения для оценки соответствия тому или другому критерию. Предложено алгоритм сжатия изображений с учетом многокритериальной классификации их сегментов. Внедрено параллельные вычисления с целью повышения быстродействия работы метода.

Ключевые слова: математическая модель, изображение, классификация изображений, сжатие изображений.

Abstract. The generalized mathematical model of image segment classification according to the methods of compression has been developed. The existing popular methods of compression have been analyzed and those methods that cover most of the types of images have been selected. The criteria of segments referring to the compression methods by analyzing the characteristics of these methods in order to increase the compression ratio of the original image have been developed. The possibility of establishing a threshold for assessing compliance with a given criterion has been provided. The algorithm of image compression considering the multicriterion classification of their segments has been proposed. It was necessary to use parallel computations in order to improve the performance of the method.

Key words: mathematical model, image, image classification, image compression.

Вступ

У наш час зображення є невід'ємною складовою мультимедійної інформації, яка в свою чергу накопичується і зберігається на цифрових носіях і передається за допомогою каналів зв'язку. Напевно неможливо уявити собі навіть дня без роботи зі зображеннями. Вони є одним з основних носіїв інформації фактично у будь-якій сфері людської діяльності. Зокрема такі галузі, як медична, освітня, аерокосмічна, наукова й телевізійна взагалі не можуть функціонувати без мультимедійної й наочної інформації. Також ми не можемо обійтись без графічної інформації навіть у нашому повсякденному житті, дізнаючись новини, роблячи фотознімки чи сидючи в соцмережах.

Таким чином, зображення відіграють величезну роль в житті як спеціаліста певної галузі, так і пересічної людини.

Актуальність

Компресія графічних файлів має велике значення, оскільки забезпечує підвищення швидкості передачі інформації по мережі й зменшує обсяг пам'яті, необхідний для її зберігання. Тому проблема підвищення ефективності стиснення зображень не втрачає своєї актуальності протягом останніх десятиліть і, скоріш за все, не втратить у майбутньому.

Звісно ж, на сьогоднішній день існує чимало алгоритмів компресії зображень. Є методи стиснення з втратами, а є й без втрат [1-3]. Усе залежить від того, яка задача ставиться, тобто чи допустимо в результаті компресії втратити певну несуттєву інформацію, чи не можна нехтувати нічим, як наприклад у медичній сфері на етапі проведення досліджень й постановки діагнозу. Проблема в тому, що не зважаючи на велику різноманітність методів, усі вони є по суті вузькоспеціалізованими, так як орієнтовані на певний клас зображень, для якого вони дають хороші результати, але водночас застосування їх до іншого класу може привести до негативних наслідків. Зокрема такий метод стиснення без втрат як RLE чудово працює для зображень з великими областями одного кольору, але застосувавши його до графічного файлу з різкими перепадами кольорів, отримаємо навпаки збільшення розміру вихідного зображення. Що стосується такого відомого алгоритму компресії фотореалістичних зображень як JPEG, він дає хороші результати, але в той же час, якщо на зображенні присутня велика кількість самоподібних елементів, застосування фрактального алгоритму дасть набагато вищий коефіцієнт стиснення. Хоча обидва цих алгоритми працюють з втратами, але помітна суттєва різниця в степені компресії.

Зрозуміло, що універсального алгоритму для стиснення зображень не існує і розробити його вкрай важко. Але можна спробувати розробити метод, який би добре працював не для одного, а для декількох

класів зображень і це значно спростило б життя багатьом фахівцям. Таким чином, постає необхідність розбивати зображення на сегменти й класифікувати їх відповідно до найпоширеніших методів стиснення. З цією метою пропонується розробити критерії класифікації, відповідно до яких сегменти зображення будуть віднесені до того чи іншого методу їх обробки, що й ляже в основу класифікатора.

Мета

Метою роботи є розробити математичну модель класифікації сегментів зображення, яка ляже в основу узагальненого методу стиснення, який міститиме в своїй основі дещо модифіковані існуючі алгоритми компресії.

Мета дослідження поляє в підвищенні коефіцієнту стиснення зображень при збереженні допустимої якості за рахунок використання методів текстурної сегментації та багатокритеріальної класифікації по відомих алгоритмах стиснення.

Задачі

Відповідно до мети досліджень формулюються такі задачі:

1. Визначення критеріїв класифікації сегментів зображення у відповідності до обраних методів компресії.
2. Розробка математичної моделі класифікації сегментів зображення.
3. Розробка узагальненого алгоритму стиснення зображень з використанням отриманої моделі класифікації.

Розв'язання задач

З метою коректної оцінки коефіцієнта стиснення, необхідно розглянути поняття класу зображень. Клас зображень - це сукупність зображень, застосування до яких алгоритму компресії дає однакові результати з точки зору якості. Наприклад, для одного класу алгоритм дає дуже високий коефіцієнт стиснення, для іншого – майже не стискає, для третього – збільшує розмір файлу.

Існують наступні приклади неформального визначення класів зображень:

- Зображення з невеликою кількістю кольорів (4-16) і великими ділянками одного кольору. Приклади: ділова графіка - гістограми, діаграми, графіки тощо.
- Зображення з використанням плавних переходів, побудовані на комп'ютері. Приклади: графіка презентацій, ескізи моделі, зображення побудовані по методу зафарбовування Гуро.
- Фотореалістичні зображення. Приклад: відскановані фотографії.
- Фотореалістичні зображення з накладанням ділової графіки.

В якості окремих класів можна виділити неякісно відскановані в 256 градациях сірого сторінки журналів або растрові зображення топографічних карт. Окремі класи можуть бути сформовані і зовсім специфічними зображеннями: рентгенівські знімки або фотографії в профіль з електронного досьє.

Саме тому достатньо складною й цікавою задачею є пошук найкращого алгоритму для конкретного класу, а у нашому випадку для конкретного сегмента вихідного зображення.

Для того, щоб правильно оцінювати напрямок зміни алгоритмів, недостатньо самого визначення класу зображень. Потрібно задати й визначені критерії оцінки алгоритмів:

- 1) Найгірший, середній і найкращий коефіцієнти стиснення. Іншими словами це частка, на яку збільшиться розмір зображення, якщо початкові дані будуть найгіршими; деякий середньостатистичний коефіцієнт для того класу зображень, на який орієнтований алгоритм; і, відповідно, найкращий коефіцієнт. Останній необхідний лише з точки зору теорії, оскільки показує ступінь стиснення найкращого (звичай, абсолютно чорного) зображення фіксованого розміру.
- 2) Клас зображень, на який орієнтований алгоритм. Іноді також зазначається чому на інших класах зображень отримуються гірші результати.

3) Симетричність. Характеризує швидкодію й вимоги по ресурсах процесів кодування і декодування. Найбільш важливими є 2 коефіцієнти: відношення часу кодування до часу декодування й вимоги на обсяг пам'яті.

4) Чи є втрати якості? І якщо є, то за рахунок чого змінюється коефіцієнт компресії? У більшості алгоритмів стиснення з втратами існує можливість зміни коефіцієнта стиснення.

5) Характерні особливості алгоритму і зображень, до яких його застосовують [4].

Проаналізувавши існуючі методи компресії зображень з точки зору описаних вище критеріїв, для даної роботи було вирішено обрати такі три з них: RLE (Run Length Encoding), JPEG [5] і фрактальний алгоритм [6].

Run Length Encoding (RLE) – один з найстаріших і найпростіших алгоритмів архівації графіки без втрат. Зображення в ньому витягується в ланцюжок байт по рядках растру. Стиснення в RLE здійснюється за рахунок того, що у зображенні зустрічаються ланцюжки однакових байт. Вони замінюються на пари "лічильник, значення", що зменшує надлишковість даних. Найкращий, середній і найгірший коефіцієнти стиснення - 1/32, 1/2, 2/1. Причому ситуація, коли файл збільшується вдвічі, для цього простого у

реалізації алгоритму є досить поширеною. Її можна спостерігати, застосовуючи групове кодування до оброблених кольорових фотографій.

Перевагами алгоритму є лише те, що він не потребує додаткової пам'яті при роботі і швидко виконується. Алгоритм орієнтований на зображення з невеликою кількістю кольорів: ділову і наукову графіку. Лежить в основі форматів PCX, TIFF, BMP.

JPEG – один з відносно нових і досить потужних алгоритмів стиснення з втратами. Він є стандартом де-факто для повноколірних зображень. Алгоритм оперує областями 8×8 , на яких яскравість і колір змінюються порівняно плавно. В результаті цього, при розкладанні матриці такої області у подвійний ряд по косинусах значущими виявляються лише перші коефіцієнти. Таким чином, стиснення в JPEG відбувається за рахунок малої величини значень амплітуд високих частот в реальних зображеннях.

Коефіцієнт стиснення в JPEG може варіюватись в межах від 2 до 200 разів. Проте JPEG має свої особливості. Найбільш відомими є "ефект Гібса" і розбиття зображення на квадрати 8×8 . Перша особливість проявляється біля різких границь предметів, утворюючи так званий "ореол". Розбиття на квадрати відбувається, коли встановлюється дуже високий коефіцієнт стиснення для даного конкретного зображення.

JPEG реалізований у таких форматах як JPG і TIFF.

Група алгоритмів фрактального кодування на даний момент є найбільш перспективною і продовжує розвиватись. Перші результати на практиці були отримані відносно недавно - у 1992 році – і спричинили справжній фурор. Коефіцієнт стиснення у фрактальних алгоритмів коливається у межах 2-2000. Причому великі коефіцієнти досягаються на реальних зображеннях, що є досить нетиповим для попередніх алгоритмів. Крім того, при розархівуванні зображення можна масштабувати. Збільшене зображення не ділиться на квадрати. У фрактальному стисненні все базується на принципово новій ідеї – не на подібності кольорів у локальній області, а на подібності різних за розміром ділянок зображення. Алгоритм орієнтований на повноколірні зображення і на зображення в градаціях сірого.

Проте алгоритм потребує величезних обчислювальних витрат при компресії. При цьому декомпресія потребує менше обчислень, ніж у JPEG. Фактично, це перший суттєво несиметричний алгоритм. Коефіцієнт симетричності фрактального алгоритму коливається в діапазоні 1000-10000. Внаслідок цього велика увага приділяється розпаралеленню його обчислень з метою підвищення швидкодії. Фрактальне стиснення є основою формату FIF.

Отримання математичної моделі класифікації сегментів зображення

На основі описаних вище характеристик трьох, обраних для використання у роботі, алгоритмів було сформовано критерії віднесення сегментів зображення до того чи іншого методу компресії. Процес розбиття зображення на сегменти описано у роботі [7].

Так як RLE працює з ланцюжками пікселів, однаковими за значеннями, необхідно перевірити чи є у сегменті такі групи і чи розташовані вони послідовно (в протилежному випадку отримаємо навпаки збільшення розміру сегмента). В процесі пошуку подібних за значеннями пікселів, кожний піксель порівнюється з сусіднім і якщо різниця задовольняє пороговому значенню (приблизно 5%, що відповідає ± 10 значенням з діапазону 0...255), то приймаємо пікселі за подібні. Інакше, коли отримуємо перевищення порогового значення, формується нова послідовність з іншими значеннями пікселів і процес повторюється. Таким чином, алгоритм RLE дещо модифікується і перетворюється на алгоритм стиснення з втратами, оскільки ми працюємо не з послідовностями повністю ідентичних елементів, а з подібними за значеннями елементами. Перетворення класичного алгоритму RLE на алгоритм з втратами було необхідним для того, щоб розширити кількість класів зображень, до яких можна буде застосовувати результуючий алгоритм компресії. Зрозуміло, що на практиці дуже рідко зустрічаються зображення чи їх складові, які відповідають особливостям алгоритму RLE, в результаті чого він переважно не використовується як самостійний алгоритм, а входить до складу більш складних алгоритмів компресії. Модифікація алгоритму дала змогу зробити його самостійнішим і при цьому не зробила його обчислювально складним. Для модифікованого алгоритму при кодуванні у вигляді пар [кількість повторів, значення], було прийнято рішення обраховувати значення пікселів послідовності як усереднене з-поміж значень пікселів, які входять до цієї послідовності. Критерій застосування алгоритму RLE до певного сегменту - відношення кількості отриманих послідовностей подібних елементів до загальної кількості пікселів в сегменті не перевищує поріг (в найгіршому випадку 50%).

У випадку, якщо RLE не є ефективним для даного сегменту, відбувається перевірка на відповідність фрактальному алгоритму. Сегмент розбивається на доменні і рангові блоки. Для кожного рангового блоку шукається подібний доменний, як і у класичному алгоритмі фрактального кодування. Критерій віднесення сегменту до фрактального алгоритму - відношення кількості знайдених підходящих доменних блоків до кількості рангових, які покривають весь сегмент зображення, не перевищує встановлений поріг (наприклад, 30%).

Залишається останній третій алгоритм стиснення JPEG. Так як у ньому важко виділити конкретну особливість, на основі якої можна було б побудувати критерій класифікації, було вирішено відносити до нього усі ті сегменти, які не потрапили до двох інших методів через невідповідність попереднім критеріям.

Таким чином, математична модель класифікації сегментів зображення має вигляд:

$$Classification = \begin{cases} \{RLE | RLE \in Set_of_alg, \text{ if } \exists segm, \text{ that } \forall a_i, i = 1..n, a_{i+1} - a_i \leq 5\% \ \& \ \frac{Num_of_PixelSets}{n} \leq 40\% \}; \\ \{Fractal | Fractal \in Set_of_alg, \text{ if } \exists segm, \text{ that } \frac{Num_of_Domain}{Num_of_Rank} \leq 30\% \ \& \ segm \notin RLE \}; \\ \{JPEG | JPEG \in Set_of_alg, \text{ if } \forall segm \rightarrow segm \notin RLE \ \& \ segm \notin Fractal \}, \end{cases} \quad (1)$$

де RLE, Fractal, JPEG – методи компресії, Set_of_alg – набір алгоритмів компресії, які використовуються у роботі, segm – сегмент зображення, a_i – i -ий піксель сегмента, Num_of_PixelSets – кількість сформованих послідовностей подібних за значенням пікселів, n – кількість пікселів у сегменті, Num_of_Domain – кількість доменних блоків, Num_of_Rank – кількість рангових блоків.

Використовуючи запропоновану модель класифікації, було розроблено узагальнений алгоритм компресії зображень, блок-схема якого наведена на рис. 1.

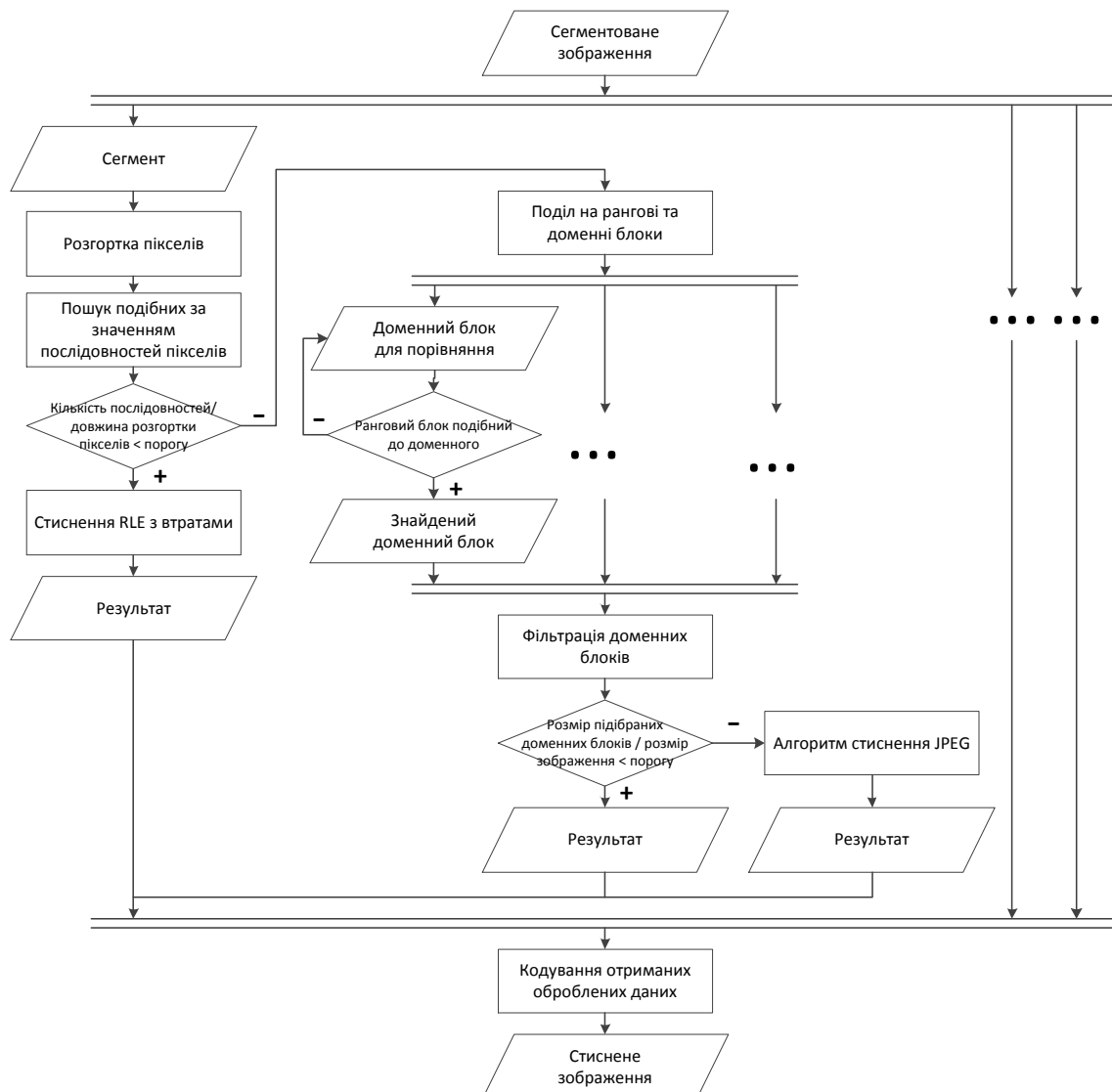


Рисунок 1 – Алгоритм компресії зображення на основі багатокритеріальної класифікації його сегментів

З метою підвищення швидкодії роботи методу було введено паралельні обчислення. Розпаралелення відбувається по сегментах і по рангових блоках у процесі виконання фрактального алгоритму.

Таким чином, запропонована багатокритеріальна модель класифікації зображень, яка дозволяє ефективно розподіляти сегменти зображення між окремими методами компресії з метою досягнення кращих результатів з точки зору коефіцієнта стиснення.

Висновки

1. Запропоновано критерії класифікації сегментів зображення у відповідності до обраних методів компресії, що дало можливість обирати для кожного сегмента найбільш доцільний з точки зору ефективності стиснення метод компресії.

2. Розроблено математичну модель класифікації сегментів зображення, яку було покладено в основу розробки нового алгоритму стиснення.

3. Розроблено узагальнений алгоритм стиснення зображень на основі запропонованої моделі класифікації сегментів, в результаті чого з'являється можливість ефективно стискати багатокomпонентне зображення з об'єктами різних типів.

4. Запропоновано впровадження паралельних обчислень, в результаті чого досягається підвищення швидкодії роботи алгоритму.

Список літератури

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс ; пер. с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа. – М: Техносфера, 2012. – 1104 с. – ISBN 978-5-94836-331-8.

2. Ватолин Д. С. Тенденции развития алгоритмов архивации графики / Д. С. Ватолин. // Открытые системы. – 2010. – № 2. – С. 15-24.

3. Претт Уильям. Цифровая обработка изображений / Уильям Претт ; пер. с англ. Д. С. Лебедева. – М.: Мир, 2002. – 792 с. – ISBN 978-5-9221-0841-6.

4. Тенденции развития алгоритмов сжатия статических растровых изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.osp.ru/os/1995/04/178685/>. – Назва з екрану.

5. Софина О.Ю. Метод стиснення зображень на основі паралельного алгоритму JPEG /О.Ю. Софина, А.В. Лозун // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2014, № 3. – ст.52-56.

6. Kvyetnyy R.N. Modification of fractal coding algorithm by a combination of modern technologies and parallel computations / R.N. Kvyetnyy, O.Y. Sofina, A.V. Lozun. // Proceedings of SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015. – Lublin – Nałęczów, Poland, 22–25 September 2015. – DOI: 10.1117/12.2229009.

7. Кветний Р.Н. Дослідження впливу відкидання певних етапів методу сегментації з використанням характеристик Лавса на її результат /Р.Н. Кветний, А.В. Олесенко // Наукові праці ВНТУ. – 2016, № 4. – ст.1-7.

Відомості про авторів

Кветний Роман Наумович — член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, д. т. н., професор, завідувач кафедри АІВТ, Вінницький національний технічний університет.

Олесенко Алла Василівна — аспірант, асистент кафедри автоматичної та інформаційно-виміральної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Найновіші правила оформлення і подання статей знаходяться на сайті журналу <http://itce.vntu.edu.ua/>