

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
(інститут)

Факультет інформаційних технологій
(факультет)

Кафедра Програмного забезпечення комп'ютерних систем
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня
магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

студента Журавльова Віталія Вікторовича
(ПІБ)

академічної групи 122М-20-1
(шифр)

спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(код і назва спеціальності)

освітньої програми «122 Комп'ютерні науки»
(назва освітньої програми)

на тему: Інформаційна технологія формування інформативних
ознак цифрових сигналів з використанням адаптивних
матричних спектральних операторів

В.В. Журавльов

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинг овою	інституційною	
розділів кваліфікаційної роботи				
спеціальний	Проф. Алексєєв М.О.			
економічний	Доц. Касьяненко Л.В.			

Рецензент	Проф. Корнієнко В.І.			
-----------	----------------------	--	--	--

Нормоконтролер	Доц. Реута О.В.			
----------------	-----------------	--	--	--

Дніпро
2022

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

ЗАТВЕРДЖЕНО:

Завідувач кафедри
 Програмного забезпечення комп'ютерних систем

 (повна назва)

_____ І.М. Удовик
 (підпис) (прізвище, ініціали)

« » _____ 20 21 року

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи

спеціальності _____ 122 Комп'ютерні науки
 (код і назва спеціальності)

студенту _____ 122м-20-1 _____ Журавльову Віталію Вікторовичу
 (група) (прізвище та ініціали)

Тема кваліфікаційної роботи _____ Інформаційна технологія формування
інформативних ознак цифрових сигналів з використанням
адаптивних матричних спектральних операторів

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 10.12.2021 р. № 1036 -с

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Об'єкт досліджень – спектральні ортогональні базиси.

Предмет досліджень – автоматизований синтез адаптивних матричних спектральних операторів.

Мета НДР – підвищення ефективності процесу синтезу ортогональних базисів шляхом використання алгоритмів з швидкими перетвореннями.

Вихідні дані для проведення роботи – теоретико-математичні дослідження, основи синтезу ортогональних базисів при вирішенні задач контролю поточного стану об'єктів управління.

3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна запропонованих рішень полягає у:

- реалізації ефективного алгоритму синтезу базисних систем;
- обґрунтуванні вибору алгоритму синтезу.

Практична цінність результатів полягає у розробці програми, яка реалізує процес синтезу ортогонального базису, що в значній мірі забезпечує економію часу та ресурсів.

4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Результати досліджень мають бути подані у вигляді, що дозволяє безпосереднє використання методики формування класифікаційних ознак інформаційних процесів управління при їх класифікації з метою оцінки функціонального стану об'єкту. В результаті роботи повинен бути розроблений програмний комплекс для вирішення задачі процесу синтезу ортогонального базису.

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок – кінець)
Розробка концепції синтезу базисних систем з перебудованими функціями	12.09.2021-20.10.2021
Розробка алгоритму синтезу базисних систем з перебудованими функціями з використанням ортогональних перетворень	21.10.2021-30.10.2021
Розробка програмного забезпечення на основі обраної концепції та алгоритму з тестуванням	01.11.2021-25.12.2021

6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним завдяки скорочення затрат при оцінці функціонального стану складних об'єктів керування.

Соціальний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним завдяки удосконаленню метода ідентифікаційної експертизи, що дозволяє запропонованому методу формування інформативних ознак процесів, що супроводжують функціонування складних об'єктів управління, підвищити достовірність процедури контролю та діагностики об'єкта.

Завдання видав

_____ (підпис)

Алексєєв М.О.

_____ (прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

Журавльов В.В.

_____ (прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 12.09.2021 р.

Термін подання кваліфікаційної роботи до ЕК 19.01.2022

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 стор., 6 рис., 3 додатки, 29 джерел.

Об'єкт дослідження: спектральні ортогональні базиси.

Предмет дослідження: автоматизований синтез адаптивних матричних спектральних операторів.

Мета роботи: підвищення ефективності процесу синтезу ортогональних базисів з алгоритмами швидких перетворень.

Методи дослідження. При рішенні задач, які поставлені, виконано аналіз та наукове узагальнення літературних джерел по вихідним посиланням досліджень, використовувались методи спектрально-кореляційного аналізу, апарат матричної алгебри. У процесі досліджень виконувалось імітаційне моделювання на ПЕОМ.

Новизна отриманих результатів полягає у розробці методики побудови перетворень, що керуються параметрично.

Практична цінність результатів полягає у розробці алгоритму формування діагностичних ознак на підставі перетворень, що керуються параметрично, та програмного забезпечення, яке реалізує розроблену методику побудови перетворень, що керуються параметрично.

Область застосування. Розроблений метод формування інформативних ознак процесів, що супроводжують функціонування складних об'єктів управління, може застосовуватися для вирішення контролю поточного стану об'єктів різної фізичної природи та їх діагностики.

Значення роботи та висновки. Розроблений метод формування інформативних ознак процесів дозволяє підвищити достовірність результатів процедури контролю стану об'єкта управління із зменшенням часових та матеріальних витрат.

Прогнози щодо розвитку досліджень. Покращити метод формування, додавши процедуру формування ознак, інваріантних до часового зрушення, з метою зменшення відсотка похибки під час контролю стану об'єкта управління або його діагностики.

У розділі «Економіка» проведено розрахунки трудомісткості розробки програмного забезпечення, витрат на створення ПЗ і тривалості його розробки, а також проведено маркетингові дослідження ринку збуту результатів роботи та визначено соціальний ефект.

Список ключових слів: спектральні перетворення, одномірні сигнали, стиснення сигналів, класифікація, програмне забезпечення.

ABSTRACT

Explanatory note: 70 pages, 6 figures, 3 applications, 29 sources.

Object of research: spectral orthogonal bases.

Subject of research: automated synthesis of adaptive matrix spectral operators.

Purpose of Master's thesis: increasing the efficiency of the process of orthogonal bases synthesis with algorithms for fast transformations.

Research methods. While solving assigned problems, the analysis and scientific research of literature sources are carried out according to the original research references. Methods of spectral correlation analysis, apparatus of matrix algebra were used. During the process, the simulation modeling on a PC was performed.

Originality of research: development of methods for constructing parametrically controlled transformations.

Practical value of the results is to develop an algorithm of the formation of diagnostic signs based on parametrically controlled transformations, and software that implements the developed method of constructing transformations that are controlled parametrically.

Scope of application. The developed method of forming informative signs of processes that accompany the functioning of complex plants can be applied to the solution of current condition monitoring of objects of different physical nature and their diagnosis.

The value of the work and conclusions. The developed method of forming informative signs of processes make it possible to increase the reliability results of condition monitoring of a plant and to reduce time and material costs.

Research forecast and development. To improve the formation method by adding a procedure for the formation of time-invariant signs, in order to reduce the error percentage during monitoring the condition of a plant or its diagnosis.

In the "Economics" section calculations of the complexity of software development, the cost of creating software and the duration of its development were carried out, as well as marketing research of the sales market, the social effect was determined.

Keywords: spectral transformation, one-dimensional signals, signal compression, classification, software.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БС – базисна система;

ОУ –об'єкт управління;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;

СП – спектральне перетворення;

ШП – швидке перетворення;

РС – personal computer.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ. ВЛАСТИВОСТІ ФУНКЦІЙ БАЗИСНИХ СИСТЕМ.....	11
1.1. Фундаментальні властивості базисів	11
1.2. Оптимальні властивості базисів	14
1.3. Додаткові властивості базисних систем	16
1.4. Висновки до першого розділу.....	18
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ БАЗИСНИХ СИСТЕМ З ФУНКЦІЯМИ, ЩО ПЕРЕБУДОВУЮТЬСЯ	20
2.1. Багатозначність поняття «узагальнення» в теорії ортогональних перетворень	20
2.2. Матрично-ядерна форма подання ортогональних базисів	21
2.3. Геометрична модель узагальненого спектрального ядра	30
2.4. Формування ортогональних базисів з функціями, що перебудовуються	32
2.5. Висновки до другого розділу	34
РОЗДІЛ 3. ОРТОГОНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ЗАВДАННЯХ СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА ВИДІЛІННЯ ОЗНАК	35
3.1. Стиснення інформації та синтез пристосованих базисів	35
3.2. Експериментальне дослідження	42
3.2.1. Опис програми.....	42
3.2.2. Результат роботи програми	43
3.3. Висновки до третього розділу	47
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІКА.....	49
4.1. Визначення трудомісткості та вартості розробки програмного продукту	49
4.2. Витрати на створення програмного забезпечення.....	53

4.3. Маркетингові дослідження ринку збуту розробленого програмного продукту	55
4.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробленого програмного забезпечення.....	56
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59
Додаток А. КОД ПРОГРАМИ.....	62
Додаток Б. ВІДГУК КЕРІВНИКА ЕКОНОМІЧНОГО РОЗДІЛУ.....	69
Додаток В. ПЕРЕЛІК ФАЙЛІВ НА ДИСКУ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Традиційні схеми управління промисловими об'єктами та технологічними процесами не задовольняють збільшеним вимогам до якості та надійності функціонування складних, слабоструктурованих промислових об'єктів. При цьому одна з основних проблем полягає в оцінці поточного стану об'єкта. Визначення стану динамічних об'єктів та характеру його зміни з часом є основною проблемою діагностування об'єктів.

Вирішення проблем діагностики об'єктів у багатьох випадках пов'язане з розпізнаванням (класифікацією) часових сигналів. Найважливішим у своїй області є формування мінімально необхідного числа класифікаційних (інформативних) ознак і побудова ефективного вирішального правила, тобто вирішення проблеми стиснення інформаційних процесів управління.

Квазіперіодичність інформаційних процесів управління енергетичних об'єктів спричинила те, що для їхнього аналізу переважно використовувався традиційний базис Фур'є. Розвитку спектральних методів сприяла розробка алгоритмів ШП на базисах Фур'є, Уолша, Хаара. Висока обчислювальна ефективність є перевагою зазначених базисів. Проте для більшості сигналів ці базиси не забезпечують достатньої швидкості збіжності рядів розкладання. Спектральні ознаки вихідних сигналів у таких базисах зазвичай мають складний вигляд для безпосередньої інтерпретації. Ця обставина значною мірою ускладнює їхнє використання для оцінки ситуації на об'єкті управління.

Для подолання цієї проблеми запропоновано підхід, заснований на формуванні адаптивних матричних спектральних операторів. Особливість цього підходу полягає в одночасному забезпеченні як пристосованості до вихідних даних у вигляді класу ритмічних сигналів, так і в простоті формування базисних функцій, що мають за своїм принципом побудови алгоритм швидкого перетворення. Це дозволяє використовувати їх для аналізу сигналів у режимі реального часу.

Тому розробка такої методики формування діагностичних ознак випадкових процесів, що супроводжують функціонування різних об'єктів, при якій можливе формування ознак на основі адаптивних ортогональних перетворень, є актуальною.

Об'єкт досліджень: спектральні ортогональні базиси.

Предмет досліджень: автоматизований синтез адаптивних матричних спектральних операторів.

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу синтезу ортогональних базисів з алгоритмами швидких перетворень.

Методи дослідження. При рішенні задач, які поставленні, виконано аналіз та наукове узагальнення літературних джерел по вихідним посиланням досліджень, використовувались методи спектрально-кореляційного аналізу, апарат матричної алгебри. У процесі досліджень виконувалось імітаційне моделювання на ПЕОМ.

Новизна запропонованих рішень полягає у розробленні методики побудови перетворень, що керуються параметрично.

Практичне значення роботи полягає у розробці алгоритму формування діагностичних ознак на підставі перетворень, що керуються параметрично, та у розробці програмного забезпечення, яке реалізує розроблену методику побудови перетворень, що керуються параметрично.

Особистий внесок автора полягає в розробці теоретичної частини магістерської роботи, в дослідженні і систематизації знань про існуючі методики, розробці методів досліджень і технології реалізації, в оцінці отриманих результатів.

Структура та обсяг дипломної роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів і висновків. Містить 70 сторінок друкованого тексту, в тому числі 46 сторінок тексту основної частини, 6 рисунків, перелік використаних джерел, 3 додатки на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ.

ВЛАСТИВОСТІ ФУНКЦІЙ БАЗИСНИХ СИСТЕМ

1.1. Фундаментальні властивості базисів

Поняття базису нерозривно пов'язане з поняттям повноти простору, що визначається наступним чином: якщо кожна послідовність, що збігається $\{f_n\}$, має границю у просторі, то цей простір L з інтегрованими за абсолютним значенням функціями буде повним, тобто:

$$\lim_{l,m \rightarrow \infty} |f_l - f_m| = 0. \quad (1.1)$$

Під ортогональними функціями маються на увазі функції скінченної чи нескінченної системи, для яких скалярний добуток будь-якої пари задовольняє рівності:

$$(\psi_i, \psi_j^*) = \int_T \psi_i(t) \psi_j^*(t) dt = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}. \quad (1.2)$$

При цьому область інтегрування може бути як скінченною, так і нескінченною.

Система функцій називається повною, чи базисною, якщо немає жодної іншої, крім нульової функції, яка ортогональна всім іншим, тобто у базисі $\{\psi_i\}$ скалярний добуток $(\psi_i, g) = 0$.

Для розкладів в ортогональних базисах характерні такі характеристики:

- 1) високий ступінь декореляції компонентів у спектральній області;
- 2) однозначність обчислення спектральних коефіцієнтів при будь-якій довжині та будь-якому усіченні ряду розкладання;

3) найкраще середньоквадратичне наближення ряду розкладання до вихідної функції при її відновленні за спектром із заданим усіченням;

4) можливість необмеженого збільшення точності відновлення функції шляхом додавання компонентів з усіченої області.

Завдяки цим властивостям досягається суттєва економія часу та підвищена точність обчислення рядів розкладання.

Поняття інваріантності зазвичай пов'язується з оператором перетворення K одного сигналу на інший. Наприклад, для динамічної системи під K може розумітися зв'язок між вхідним та вихідним сигналами системи:

$$y(t) = K\{x(t)\} . \quad (1.3)$$

При цьому для лінійних систем співвідношення набуває вигляду:

$$K\left\{\sum_{i=1}^I a_i x_i(t)\right\} = \sum_{i=1}^I a_i K\{x_i(t)\} . \quad (1.4)$$

Для стаціонарних чи інваріантних систем у часі оператор K є функцією різниці аргументів у часі і залежить від початку відліку.

Перетворення Фур'є забезпечує інваріантність амплітудного спектра до зсуву вихідного сигналу:

$$|X(j\omega)| = |X(j\omega) \exp(j\omega\tau)| . \quad (1.5)$$

Властивість інваріантності перетворення Фур'є широко використовується в аналізі систем управління, при обробці сигналів, розпізнаванні образів, у діагностиці механізмів, там, де часто потрібно усунення фактору випадковості вихідної фази.

Суттєва властивість перетворення Фур'є – інваріантність до зсуву, яка виділяє його з класу ортогональних перетворень і робить найпоширенішим при вирішенні зазначених завдань. Перетворення з інших систем функцій, зокрема у базисах Уолша і Хаара, забезпечують інваріантні властивості лише в окремих випадках.

У практиці спектрального аналізу при генеруванні базисних функцій важливу роль відіграє властивість мультиплікативності, що виражається у виконанні одночасно трьох умов:

1) разом із функціями $\psi_n(t)$ і $\psi_m(t)$ система містить і їх добуток за будь-яких n і m , тобто $\psi_l(t) = \psi_n(t)\psi_m(t)$;

2) разом із кожною функцією система містить і зворотну їй функцію:

$$\psi_s(t) = 1/\psi_n(t) = [\psi_n(t)]^{-1}; \quad (1.6)$$

3) для всіх моментів t :

$$|\psi_n(t)| \equiv 1. \quad (1.7)$$

З якісної точки зору властивість мультиплікативності означає, що будь-яка функція мультиплікативного базису утворюється з пари інших функцій тієї ж системи. Інакше висловлюючись, у мультиплікативний базис не можуть увійти чужі функції.

У зв'язку з широким використанням обчислювальних засобів підвищилися вимоги до спектральної обробки сигналів у реальному часі.

Відкриття алгоритмів ШП в базисі дискретних експоненційних функцій Фур'є, а потім і в базисах Хаара та Уолша та цілого ряду інших базисів, дозволило знайти загальну закономірність їх формування, а саме можливість розкладання матриці ортогонального перетворення Ψ на факторизовані безнадмірні матриці G_r . Властивість факторизації

$$\Psi_n = G_n G_{n-1} \dots G_1 = \prod_{r=1}^n G_r, \quad n = \log_2 N \quad (1.8)$$

дозволяє значно підвищити обчислювальну ефективність перетворень. При безпосередньому обчисленні коефіцієнтів розкладання за формулою матричного добутку потрібно N^2 арифметичних операцій множення-складання:

$$c = \frac{1}{\sqrt{N}} \Psi_n x. \quad (1.9)$$

При виконанні властивості факторизації і обчисленні тих же коефіцієнтів потрібно тільки $\log_2 N$ число дій, що дозволяє прискорити обчислення.

Властивість факторизації лежить в основі теорії ортогональних перетворень і дозволяє формувати не тільки відомі базиси, а й нові базиси, а також обирати найбільш придатні для вирішення конкретної задачі.

1.2. Оптимальні властивості базисів

Базис власних функцій є у певному сенсі пристосованою системою ортогональних функцій, оскільки забезпечується оптимальна властивість розкладання: квадрат середньоквадратичної помилки наближення при кінцевому числі розкладів є найменшим серед інших можливих наближень, тобто:

$$\varepsilon_N^2 = M \left\{ x(t) - \sum_{k=1}^N c_k \psi_k(t) \right\} = \min, \quad (1.10)$$

де коефіцієнти $c_k = \int_a^b x(t) \psi_k(t) dt$.

Необхідно підкреслити, що оптимальна властивість означає мінімальність у статистичному сенсі, а в конкретній обраній реалізації вона може не виконуватися.

Розташування власних значень у порядку зменшення забезпечує ще одну оптимальну властивість розкладання – мінімум ентропії коефіцієнтів (або максимум інформативності) за умови їх попереднього нормування на власні дисперсії:

$$E_{\min} = -\sum_{k=1}^{\infty} M \left\{ \frac{c_k^2}{D_k} \right\} \ln M \left\{ \frac{c_k^2}{D_k} \right\} . \quad (1.11)$$

Властивість дозволяє використовувати ті N коефіцієнтів, які несуть у собі найбільшу інформативність про процес.

Система власних функцій, отриманих в такий спосіб, називається системою оптимального базису Карунена-Лоева [14, 16]. У цьому базисі коефіцієнти розкладання некорельовані між собою, тобто:

$$M \{c_k c_m\} = \delta_{km} = \begin{cases} 1 & \text{при } k = m \\ 0 & \text{при } k \neq m \end{cases} . \quad (1.12)$$

Використання цієї властивості дозволяє усунути надмірність, обумовлену кореляційними взаємозв'язками коефіцієнтів. Крім того, кожен з коефіцієнтів може розглядатися незалежно один від одного, що спрощує процедуру виділення ознак з вихідних даних.

Отже, виконання оптимального розкладання Карунена-Лоева, у якому система функцій визначається з матричного рівняння

$$\Psi * R \Psi = \Lambda , \quad (1.13)$$

дозволяє пристосуватися в середньому сенсі до вихідних даних у вигляді матриці коваріації R , а також забезпечити найбільш високий ступінь зосередження інформації при заданому числі коефіцієнтів розкладання серед інших ортогональних розкладів.

На жаль, значні обчислювальні труднощі суттєво гальмують використання методу розкладання Карунена-Лоева. Тому використовують так звані квазіоптимальні базиси.

За критерієм середнього часу і ансамблю квадрата помилки розкладання Карунена-Лоева буде оптимальним у сенсі мінімізації числа коефіцієнтів ряду за заданої точності наближення [16]. Однак, якщо апріорі відомі кореляційна функція випадкового процесу R і його математичне очікування, то по одній реалізації $x_i(t)$ може бути визначена тимчасова функція зв'язку, до якої наближається справжня кореляційна функція. Тому таке розкладання називається квазіоптимальним.

1.3. Додаткові властивості базисних систем

Раніше було встановлено, що властивості повноти, ортогональності, замкнутості є фундаментальними властивостями БС; властивості інваріантності, мультиплікативності, факторизації, оптимальності та квазіоптимальності відносяться до більш приватних і використовуються при вирішенні конкретних завдань аналізу та обробки сигналів. Існує й безліч інших властивостей БС функцій, які можна умовно назвати додатковими.

До них належать такі властивості:

1) періодичність базисних функцій на інтервалі визначення; як правило, ортогональні базиси складаються з періодичних функцій, а ортогональні поліноми – не періодичних;

2) кількість рівнів базисних функцій на інтервалі визначення; зокрема, для діагонального базису функції мають значення 1 і 0, для базису Уолша-Адамара та базису Хаара: $\pm\sqrt{2^n}, 0$;

3) дійсність базисних функцій; прикладами комплексно-значущих базисів є комплексні експоненційні функції Фур'є та дискретні експоненційні функції;

4) цілісність, яка характеризує наявність кінцевого числа цілих значень відліків базисних функцій;

5) середнє значення базисних функцій на інтервалі визначення характеризує усунення ортогональних функцій по осі ординат;

6) симетричність та косиметричність функцій базисної системи, що характеризують відповідно симетричну та асиметричну поведінку функцій на інтервалі визначення; так косинусоїдальні функції є симетричними щодо початку координат; система Хаара займає проміжне положення між симетричною та несиметричною системами функцій;

7) рівномірність чергування позитивних і негативних напівхвиль функцій базису, що характеризує собою рівномірне розташування нульових точок базисних функцій; серед відомих систем таку властивість мають тригонометричні функції та функції Радемахера;

8) симетрія матриці ортогонального перетворення щодо головної діагоналі; базиси Фур'є, Уолша, діагональний базис мають симетричні матриці, що не вимагає їхнього транспонування при виконанні зворотного перетворення;

9) розривність та гладкість базисних функцій, що характеризують структурні властивості ортогональних базисів, а також наявність можливості отримання зворотних функцій;

10) диференційованість, що характеризує можливість отримання безперервних похідних функцій базису; безперервні функції базису Фур'є та їм споріднені мають безперервні похідні; функції Хаара повинні визначатися в точках розриву для забезпечення якості диференційованості;

11) модуль функції, що характеризує максимальне значення тієї чи іншої функції базису; базиси Уолша, Фур'є містять функції з модулем рівним 1;

12) упорядкованість базисних функцій, що характеризує собою зовнішню ознаку швидкості збіжності ряду розкладання; залежно від упорядкування базисних функцій поведінка коефіцієнтів розкладання може мати різний характер [12]; упорядкованість базисних функцій за певним параметром дозволяє пов'язати з ним той чи інший фізичний зміст, наприклад, з номером гармоніки Фур'є – її частоту; властивість упорядкованості дозволяє зіставляти різні базиси за швидкістю збіжності рядів розкладання; відомо, що ранжування власних функцій за спадаючим власним значенням оптимального розкладання Карунена-Лоева веде до найвищої швидкості збіжності рядів розкладання в порівнянні з іншими ортогональними базисами;

13) ступінь складності реалізації базисних функцій; існують базиси кусково-постійних, кусково-лінійних, дискретних та безперервних функцій; Найбільш легко реалізуються базисні функції з мінімальним числом цілих значень.

Врахування властивостей базисних систем дозволяє здійснювати цілеспрямований та обґрунтований вибір відповідного базису за умовами конкретного завдання.

1.4. Висновки до першого розділу

1. У процесі експлуатації технологічних об'єктів управління під впливом численних факторів змінюються параметри об'єктів, що відповідають їхньому функціональному стану.

2. Вирішення проблеми контролю параметрів досліджуваних об'єктів у багатьох випадках пов'язано з класифікацією сигналів, які адекватно характеризують стан контрольованого об'єкта. Формування інформативних ознак, розмірність яких буде меншою за розмірність вихідних даних, дозволяє спростити процедуру функціонального контролю, підвищити оперативність її

проведення, що є вирішальним фактором при проведенні функціонального контролю технологічних об'єктів управління.

Ритмічний характер процесів, що супроводжують функціонування об'єктів управління, призвів до того, що для класифікації сигналів використовуються традиційні базиси Фур'є, Уолша та Хаара, що мають алгоритми швидкого перетворення. Однак спектральні ознаки сигналів у таких базисах зазвичай мають складний вигляд для використання при класифікації. Це ускладнює їхнє використання для контролю параметрів об'єктів управління.

3. Під час контролю параметрів об'єктів управління перспективним є метод скорочення розмірності інформаційних процесів управління з використанням параметрично керованих спектральних методів, що забезпечують оперативне формування інформативних ознак для контролю об'єкта управління.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ БАЗИСНИХ СИСТЕМ З ФУНКЦІЯМИ, ЩО ПЕРЕБУДОВУЮТЬСЯ

2.1. Багатозначність поняття «узагальнення» в теорії ортогональних перетворень

На етапі розвитку узагальненої теорії ортогональних перетворень можна назвати такі питання, що мають загальний характер: синтез нових повних ортонормованих функцій, пошук та аналіз взаємозв'язків відомих базисів і взаємних ортогональних перетворень, обґрунтований вибір, і практична реалізація базису розкладання, адекватного вимогам розв'язуваної задачі.

Дослідження проводяться у двох основних напрямках:

- 1) винахідницькому, коли пошук та реалізація базису призводять до вирішення конкретної задачі;
- 2) конструктивному, коли пошук та реалізація засновані на спеціально розробленому математичному апараті.

Прикладами базисів першого напрямку можуть бути система витягнутих сфероїдальних функцій [20], деякі з матриць Адамара [13]. Базиси другого напрямку мають більш високий ступінь спільності, але їх практична реалізація часто ускладнена або не забезпечує інтерпретованість результатів.

Наприклад, базиси, отримані ортогоналізацією лінійно-незалежних функцій методом Грама-Шміда, і навіть базиси, сформовані з урахуванням рішення диференціальних чи інтегральних рівнянь, не мають алгоритмів швидкого перетворення. Базиси теоретико-числового перетворення [12] характеризуються складною інтерпретацією.

Доцільним є такий підхід до синтезу базисів, який забезпечував би як пристосування до умов конкретної задачі, так і простоту формування.

У зв'язку з цим поняття «узагальнення» стало багатозначним:

- 1) поширення на систему числення з довільною основою p або на позиційну систему числення з різними p_i при тій чи іншій упорядкованості базисних функцій [12];
- 2) поширення на алгоритмічний взаємозв'язок між різними базисами [14];
- 3) поширення на ортогональні базиси з не одиничною вагою [13];
- 4) поширення на багатовимірну спектральну обробку [15].

У цьому далеко не повному переліку смислових значень поняття деякі з них не пов'язані між собою. Разом з тим слід підкреслити, що такі базиси можуть бути сформовані практично з усіх значень поняття.

У розвитку викладених питань було сформульовано основні тези щодо синтезу узагальнених спектральних операторів з урахуванням концепції їх ядерного представлення. При цьому отримано узагальнену форму матрично-ядерного спектрального оператора, знайдено значення кутів-параметрів матричних ядер для базисів Фур'є, Уолша, Хаара та виявлено взаємозв'язки між ними. Крім того, отримані вирази для нових систем, що перебудовуються, базисних функцій з алгоритмом швидкого перетворення, що мають як одноядерну, так і багатоядерну структури.

Концепція ядерного представлення спектральних операторів як спрощує процедуру їх синтезу, так і дозволяє проводити обґрунтований за комплексом критеріїв оптимальності вибір базисів.

2.2. Матрично-ядерна форма подання ортогональних базисів

Введення правила узагальненої форми прямого добутку матриць A_r з мінімальною розмірністю та використання результатів теореми узагальненої факторизації дозволяють встановити однозначний взаємозв'язок елементів матриці A_r ($r = \overline{1, n}$) та деякого матричного базису C_n . Звідси випливає

можливість конструювання (або синтезу) довільних матричних базисів C_n з елементарних мікроструктур матриці A_r , які будуть називатися матрицями-ядрами. Це твердження і становить сутність концепції ядерного представлення матричних базисів, оскільки

$$\prod_{r=1}^n A_r = \begin{bmatrix} A_{1,1} \\ A_{1,2} \\ \dots \\ A_{1,N/2} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} A_{2,1} \\ A_{2,2} \\ \dots \\ A_{2,N/2} \end{bmatrix} \otimes \dots \otimes \begin{bmatrix} A_{n,1} \\ A_{n,2} \\ \dots \\ A_{n,N/2} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

З цього запису випливає важлива можливість формування результуючого матричного базису C_n за заданими значеннями елементів матриць-ядер A_r .

Знайдемо зв'язок елементів матриці $c(z,u)$ з елементами $\tilde{a}_r(z_r, u_r)$ матриць-ядер A_r . Введення сукупності деяких параметрів $\{p_r(q)\}$ у матрицю-ядро A_r дозволяє наочно представити як одноядерні матриці C_n , так і багатоядерні матриці C_n з різними параметрами $\{p_r(q)\}$. Звідси стає зрозумілим використання параметричного запису елементів ядра літери (q): її поява відображає різноманітність значень деякого параметра (наприклад, кута повороту) в матриці-ядрі, та в відповідній факторизованій матриці.

Механізм синтезу матричних базисів полягає у перемноженні матриць-ядер згідно з узагальненою формою прямого добутку (або факторизованих матриць згідно з звичайним матричним перемноженням). У цьому фактично перемножуються між собою відповідні ненульові елементи, тобто:

$$[(z_n, z_{n-1}, \dots, z_1; u_n, u_{n-1}, \dots, u_1) \{p_r(q)\}] = \prod_{r=1}^n \tilde{a}_r[z_r, u_r; \{p_r(q)\}], \quad (2.2)$$

причому

$$\begin{aligned}
p_1(q) &= p_1(z_n, \dots, z_2) \text{ при } r = 1, \\
p_2(q) &= p_2(u_1, z_n, \dots, z_3) \text{ при } r = 2, \\
p_n(q) &= p_n(u_{n-1}, u_{n-2}, \dots, u_1) \text{ при } r = n.
\end{aligned}$$

Наприклад, при $n = 3$ маємо

$$\begin{aligned}
&= c[z_3, z_2, z_1; u_3, u_2, u_1; \{p_1(z_1), p_2(u_1, z_3), p_3(u_2)\}] = \\
&= \tilde{a}_1[(z_1, u_1) p_1(z_3, u_2)] \tilde{a}_2[(z_2, u_2) p_1(z_3, u_1)] a_1[z_3, u_2]. \quad (2.3)
\end{aligned}$$

З наведених вище виразів випливає висновок, що інформація, яка міститься на «ядерному» рівні, повністю і однозначно переходить в інформацію про елементи c .

Складному, здавалося б, виду співвідношення (2.3) можна дати таку матричну інтерпретацію:

$$\begin{aligned}
&[p_3(q_1) p_3(q_2) p_3(q_3) p_3(q_4)] \otimes [p_2(q_1) p_2(q_2) p_2(q_3) p_2(q_4)] \otimes \\
&\otimes [p_1(q_1) p_1(q_2) p_1(q_3) p_1(q_4)]. \quad (2.4)
\end{aligned}$$

У факторизованих матрицях наявні ділянки відповідають ненульовим елементам, значення яких визначаються відповідними параметрами $p_r(q_r)$. Умовний запис може бути представлений у більш конкретному вигляді: через елементи $\tilde{a}_{rl} (r = \overline{1,3}, l = \overline{1,4})$:

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{cc} & \begin{array}{c} a_{31} \\ c_{31} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{32} \\ c_{32} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{33} \\ c_{33} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{34} \\ c_{34} \end{array} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{cc} & \begin{array}{c} b_{31} \\ d_{31} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{32} \\ d_{32} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{33} \\ d_{33} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{34} \\ d_{34} \end{array} \end{array} \right] \times \\
& \times \left[\begin{array}{cc} & \begin{array}{c} a_{21} \\ c_{21} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{22} \\ c_{22} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{23} \\ c_{23} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{24} \\ c_{24} \end{array} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{cc} & \begin{array}{c} b_{21} \\ d_{21} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{22} \\ d_{22} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{23} \\ d_{23} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{24} \\ d_{24} \end{array} \end{array} \right] \times \\
& \times \left[\begin{array}{cc} & \begin{array}{c} a_{11} \\ c_{11} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{12} \\ c_{12} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{13} \\ c_{13} \end{array} \\ & \begin{array}{c} a_{14} \\ c_{14} \end{array} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{cc} & \begin{array}{c} b_{11} \\ d_{11} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{12} \\ d_{12} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{13} \\ d_{13} \end{array} \\ & \begin{array}{c} b_{14} \\ d_{14} \end{array} \end{array} \right] = \\
& = \left[\begin{array}{cc} a_{11} & b_{11} \\ c_{11} & d_{11} \\ a_{12} & b_{12} \\ c_{12} & d_{12} \\ a_{13} & b_{13} \\ c_{13} & d_{13} \\ a_{14} & b_{14} \\ c_{14} & d_{14} \end{array} \right] \otimes \left[\begin{array}{cc} a_{21} & b_{21} \\ c_{21} & d_{21} \\ a_{22} & b_{22} \\ c_{22} & d_{22} \\ a_{23} & b_{23} \\ c_{23} & d_{23} \\ a_{24} & b_{24} \\ c_{24} & d_{24} \end{array} \right] \otimes \left[\begin{array}{cc} a_{31} & b_{31} \\ c_{31} & d_{31} \\ a_{32} & b_{32} \\ c_{32} & d_{32} \\ a_{33} & b_{33} \\ c_{33} & d_{33} \\ a_{34} & b_{34} \\ c_{34} & d_{34} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc} a_{31} a_{21} a_{11} & \dots & b_{31} b_{21} b_{11} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{31} c_{21} c_{11} & \dots & d_{31} d_{21} d_{11} \end{array} \right]
\end{aligned}$$

(2.5)

Необхідно підкреслити, що в загальному випадку кількість параметрів, що містяться в матриці C_n , дорівнює $4n \cdot N/2 = n2^{n+1}$ і визначає потужність класу факторизованих матриць C_n . Різноманітність матриць C_n тим вища, чим більше n . Параметри p_r можуть набувати різних значень. Якщо на p_r не накладаються обмеження як на рівняння зв'язку, то матриці C_n утворюють клас лінійних матричних операторів із властивістю факторизації і, отже, мають алгоритм швидкого перетворення.

Важливою підмножиною цього класу є ортогональні матричні оператори, які можуть бути синтезовані за певних обмежень на значення елементів p_r , тобто на \tilde{a}_r . Введемо, щоб уникнути плутанини, такі позначення: з класу матричних лінійних базисів C_n виділимо сімейство ортогональних матричних базисів ψ_n (або узагальнених спектральних операторів), а з класу матричних ядер A_r – сімейство ортогональних матриць-ядер V_r (або узагальнених спектральних ядер).

З теореми узагальненої факторизації випливає, що формування ортогональних матричних базисів ψ_n може бути виконано зміною значень елементів матриць-ядер V_r , тобто опис макроструктури узагальненого спектрального оператора може бути зведено до його представлення на мікроструктурному (ядерному) рівні.

Використовуючи надмірність спектральних операторів ψ_n , обумовлену повнотою і ортогональністю їх функцій, і ψ_n у вигляді добутку факторизованих матриць G_r (безнадмірних відносно ψ_n , але надмірних відносно матриць-ядер V_r), виконаємо усунення надмірності за такою схемою: $\psi_n \rightarrow G_r \rightarrow V_r$. Подібне «стиснення» форми запису дозволяє говорити про те, що властивості та особливості будь-якого оператора ψ_n визначаються в основному властивостями та особливостями матриць-ядер V_r .

Фундаментальними властивостями спектральних операторів є повнота та ортогональність системи базисних функцій, математичне формулювання яких ідентичне та має симетричний відносно z і u вигляд:

$$\begin{aligned} \psi(z, u'), \psi'(z, u'') &= \sum_0^{N-1} \psi(z, u'), \psi'(z, u'') = \begin{cases} 1 & \text{при } u' = u'' \\ 0 & \text{при } u' \neq u'' \end{cases} \\ \psi(z', u), \psi'(z'', u) &= \sum_0^{N-1} \psi(z', u), \psi'(z'', u) = \begin{cases} 1 & \text{при } u' = u'' \\ 0 & \text{при } u' \neq u'' \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Оскільки елементи матриці ψ_n та матриці V_r пов'язані між собою рівністю

$$[\psi(z, u)] = \prod_{r=1}^n (z_r, u_r), \quad (2.7)$$

то підстановка її в одне з рівнянь (2.6) призводить до виразу

$$\sum_{z=0}^{N-1} \left\{ \prod_{r=1}^n v_r(z_r, u'_r) v_r(z_r, u''_r) \right\} = \begin{cases} 1 & \text{при } u'_r = u''_r \\ 0 & \text{при } u'_r \neq u''_r \end{cases}, \quad (2.8)$$

а в порозрядному записі до

$$\sum_{z_1=0}^1 \sum_{z_2=0}^1 \dots \sum_{z_n=0}^1 \left\{ \prod_{r=1}^n v_r(z_r, u'_r) v_r(u''_r) \right\} = \begin{cases} 1 & \text{при } u'_r = u''_r \\ 0 & \text{при } u'_r \neq u''_r \end{cases}. \quad (2.9)$$

З урахуванням того, що елементи $v_r(z_r, u_r)$ є функціями від незалежних змінних (z_r, u_r) , вираз (2.9) можна привести до вигляду:

$$\begin{aligned}
& \left[\sum_{z_1=0}^1 v_1(z_1, u'_1) v_1'(z_1, u''_1) \right] \left[\sum_{z_2=0}^1 v_2(z_2, u'_2) v_2'(z_2, u''_2) \right] \dots \\
& \left[\sum_{z_n=0}^1 v_n(z_n, u'_n) v_n'(z_n, u''_n) \right] \\
\rightarrow \prod_{r=1}^n [v_1(z_1, u'_1)] &= \prod_{r=1}^n \{v_r(0, u_r) v_r(0, u'_r) + v_r(1, u_r) v_r(u''_r)\} = \\
&= \begin{cases} 1 & \text{при } u'_r = u_r \\ 0 & \text{при } u'_r \neq u''_r \end{cases} . \tag{2.10}
\end{aligned}$$

Проаналізуємо вираз (2.10). Спочатку запишемо ненульові елементи v_r (загалом комплексні) матриць-ядер V_{rl} за допомогою наступної матриці:

$$V_{rl} = \begin{bmatrix} a_{00}^{(ji)} & a_{01}^{(r,l)} \\ a_{10}^{(ji)} & a_{11}^{(r,l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{rl} & n_{rl} e^{j02} \\ p_{rl} & q_{rl} e^{j04} \end{bmatrix} . \tag{2.11}$$

Внаслідок незалежності значень $\alpha_{ji}^{r,l}$ для різних матриць-ядер V_{rl} вираз (2.10) може бути перетворений до більш простого вигляду:

$$\prod_{r=1}^n \{ [\alpha_{0,u_r}^{(r,l)}] [\alpha_{0,u''_r}^{(r,l)}]' + [\alpha_{1,u_r}^{(r,l)}] [\alpha_{1,u''_r}^{(r,l)}]' \} = \delta_{u'_r u''_r} . \tag{2.12}$$

Так як

$$\{ [\alpha_{0,u_r}^{(r,l)}] [\alpha_{0,u''_r}^{(r,l)}]' + [\alpha_{1,u_r}^{(r,l)}] [\alpha_{1,u''_r}^{(r,l)}]' \} = \delta_{u'_r u''_r} , \tag{2.13}$$

то звідси випливають два можливі випадки: при $u'_r = u''_r = 0$ і $u'_r = u''_r = 1$ виходять рівності:

$$\begin{aligned} & \left(\left[\alpha_{0,0}^{(r,l)} \right]^2 + \left[\alpha_{0,1}^{(r,l)} \right]^2 \right) = 1, \\ & \left(\left[\alpha_{1,0}^{(r,l)} \right]^2 + \left[\alpha_{1,1}^{(r,l)} \right]^2 \right) = 1 \\ & \text{або } \begin{cases} m_{rl}^2 + p_{rl}^2 = 1, \\ n_{rl}^2 + q_{rl}^2 = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Друга умова ($u'_r \neq u''_r$ хоча в одному розряді r) шляхом аналогічних викладок призводить до рівняння зв'язку між елементами:

$$\left[\alpha_{0,0}^{(r,l)} \right] \left[\alpha_{0,1}^{(r,l)} \right]' + \left[\alpha_{1,0}^{(r,l)} \right] \left[\alpha_{1,1}^{(r,l)} \right]' = 0, \quad (2.15)$$

$$\text{або } m_{rl} n_{rl} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} + p_{rl} q_{rl} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} = 0.$$

Вирішуючи спільно вище вказані рівняння, отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} m^2 + p^2 &= 1 \\ p^2 + q^2 &= 1, \\ mn &= -rq \exp j(\theta_2 - \theta_4 - \theta_2 + \theta_3), \\ (\theta_2 - \theta_4) &= (\theta_1 - \theta_3) = \text{const}, \quad \theta_2 = \theta_4, \quad \theta_1 = \theta_3. \end{aligned} \quad (2.16)$$

З урахуванням цієї системи отримаємо такі вирази для m , n , p , q :

$$\begin{aligned} 1) m_{rl} &= \cos \varphi_{rl}; \quad n_{rl} = \sin \varphi_{rl}; \quad p_{rl} = \sin \varphi_{rl}; \quad q_{rl} = -\cos \varphi_{rl}; \\ 2) m_{rl} &= \cos \varphi_{rl}; \quad n_{rl} = -\sin \varphi_{rl}; \quad p_{rl} = \sin \varphi_{rl}; \quad q_{rl} = \cos \varphi_{rl}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
3) m_{rl} &= \cos \varphi_{rl} ; n_{rl} = \sin \varphi_{rl} ; p_{rl} = -\sin \varphi_{rl} ; q_{rl} = \cos \varphi_{rl} ; \\
4) m_{rl} &= -\cos \varphi_{rl} ; n_{rl} = \sin \varphi_{rl} ; p_{rl} = \sin \varphi_{rl} ; q_{rl} = \cos \varphi_{rl} .
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Чотири наведені рішення відповідають чотирьом різним положенням знака «мінус» в матриці-ядрі V_{rl} :

$$V_1 = \begin{bmatrix} + & + \\ + & - \end{bmatrix} ; V_2 = \begin{bmatrix} + & - \\ + & + \end{bmatrix} ; V_3 = \begin{bmatrix} + & + \\ - & + \end{bmatrix} ; V_4 = \begin{bmatrix} - & + \\ + & + \end{bmatrix} . \tag{2.18}$$

Надалі використовуватимемо перший варіант розташування знака «мінус», коли він знаходиться в четвертому квадранті.

З урахуванням комплексно-значущого запису елементи матриці-ядра набудуть наступного остаточного вигляду:

$$\begin{aligned}
V_{0,0}^{(rl)} &= m_{rl} = \cos \varphi_{rl} ; \\
V_{0,1}^{(rl)} &= n_{rl} e^{j\theta_{rl}} = e^{j\theta_{rl}} \sin \varphi_{rl} ; \\
V_{1,0}^{(rl)} &= p_{rl} = \sin \varphi_{rl} ; \\
V_{1,1}^{(rl)} &= q_{rl} e^{j\theta_{rl}} = -e^{j\theta_{rl}} \cos \varphi_{rl}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Отримані значення дозволяють записати узагальнене спектральне ядро V_{rl} в матричному вигляді:

$$V_{rl} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{rl} & e^{j\theta_{rl}} \sin \varphi_{rl} \\ \sin \varphi_{rl} & -e^{j\theta_{rl}} \cos \varphi_{rl} \end{bmatrix} , \tag{2.20}$$

де параметрами, що змінюються (або ступенями свободи) є кути $\varphi_{rl} \in [0, 2\pi]$ – в дійсній площині, $\theta_{rl} \in [0, 2\pi]$ – в комплексній площині.

Для синтезу спектрального оператора ψ_n необхідно відповідно до узагальненої форми прямого добутку (або на основі перемноження факторизованих матриць) виконати перемноження матриць-ядер (2.20). При цьому елементи оператора ψ_n будуть такими:

$$\begin{aligned} \{ \psi_n [z_n, z_{n-1}, \dots, z_1, u_n, \dots, u_1; \{\varphi_{rl}\}, \{\theta_{rl}\}] = \\ = \prod_{r=1}^n a_{rl} [z_r, u_r, \varphi_r, \theta_r] \}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.3. Геометрична модель узагальненого спектрального ядра

Сутність геометричного трактування узагальненого спектрального ядра полягає в тому, що складний характер обертання та поворотів багатовимірної системи ортонормованих векторів можна замінити сукупністю простих обертань на ядерному рівні.

Якщо уявити конкретне ядро $\varphi_{rl} = \varphi; \exp(j^{\theta_{rl}}) = \omega$ для заданих параметрів у вигляді

$$V_{rl} = V = \begin{bmatrix} \cos \varphi & (\sin \varphi) \omega \\ \sin \varphi & (-\cos \varphi) \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s \\ s & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \omega \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

то можна помітити, що ліва матриця є матрицею обертання і відповідає повороту декартової системи координат навколо своєї осі. Отже, результуючий поворот призводить до отримання нової системи координат, розташованої поза площиною.

Наведене трактування узагальненого спектрального ядра дозволяє на елементарному рівні уявити базисну систему векторів як сукупність ортогональних векторів, що обертаються у векторному просторі.

Під сукупністю поворотів елементарної системи координат розуміється не проста сума окремих поворотів, яких деяка безліч, обумовлене ще й способом формування спектрального оператора Ψ . Деякий узагальнений поворот дорівнює сукупності окремих поворотів і визначається порядком їхнього напрямку в факторизованих матрицях G_r . Все це дозволяє зробити висновок про параметричну залежність функцій базису Ψ від значень елементарних кутів-поворотів матриць-ядер.

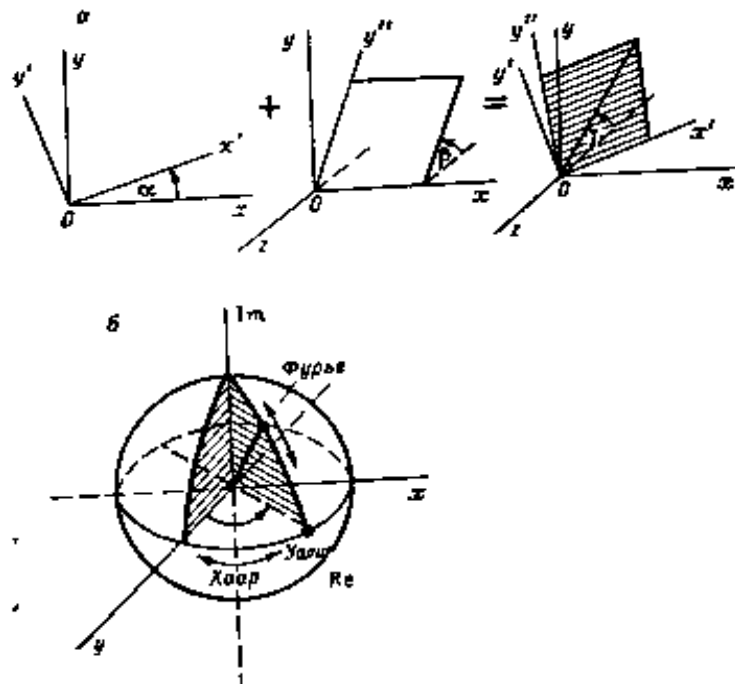


Рис. 2.1. Елементарні ядерні повороти

Вигляд елементів узагальненого спектрального ядра показує, що їх параметрами, що змінюються, є кути, які виконують роль ступенів свободи конкретного ядра.

Геометрична модель узагальненого спектрального ядра як сфери дозволяє дати наочне пояснення елементам матриці-ядра.

Геометрична модель ядра є наочним математичним уявленням при синтезі різноманіття БС зі швидким перетворенням виборі їх найбільш

відповідного. Ця модель залишається постійною за будь-якого $N=2^n$, але кількість ядер для конкретних базисів буде змінюватися.

Так, якщо базис Уолша типовий представник одноядерних базисів, то базиси Хаара та Фур'є – багатоядерні, причому із цілком певним порядком розміщення відповідних ядер у факторизованих матрицях. Зміна порядку розміщення ядер призводить до формування нових базисів, і тому при формуванні матричних спектральних операторів необхідно враховувати значення елементів ядра і правило розташування ядер в матрицях.

Перевагою одноядерних базисів є простота формування їх функцій. Однак обмежена кількість ступенів свободи не дозволяє в деяких завданнях виконувати коригування або параметричну перебудову ряду функцій базисної системи.

Багатоядерні базиси мають значні можливості щодо перебудови як окремих функцій, так і всього базису в цілому.

2.4. Формування ортогональних базисів з функціями, що перебудовуються

З розділу 2.3 випливає можливість параметричного впливу елементів матриць-ядер на елементи базових функцій (векторів). Очевидно, що чим більше кутів-параметрів бере участь у формуванні матриці Ψ_n , тим вище ступінь її змінності, і навпаки. При цьому в багатоядерних базисах зміною будь-якого параметра можна перебудувати або два рядки, або два стовпці, або блок (підматрицю Ψ_n), тобто здійснити локальну перебудову. У одноядерних матрицях зміна одного параметра веде до зміни всього базису незалежно від розташування ядра факторизованих матриць, що дозволяє здійснити глобальну перебудову.

Сформулюємо правила, відповідно до яких залежно від розташування спектрального ядра у факторизованій матриці проявляється його локальний вплив на функції базису:

1) принадлежність ядра до крайньої лівої факторизованої матриці (або до крайнього правого кронекерівського множника в узагальненій формі прямого добутку) призводить до зміни відповідної пари рядків оператора Ψ_n ;

2) принадлежність ядра до крайньої правої факторизованої матриці (або до крайнього лівого кронекерівського множника в узагальненій формі прямого добутку) призводить до зміни відповідної пари стовпців оператора Ψ_n ;

3) принадлежність ядра до деякої проміжної факторизованої матриці призводить до зміни елементів у відповідних блоках Ψ_n .

Наведені правила можна наочно проілюструвати на прикладі матриці Ψ_3 , записавши її у вигляді добутку трьох факторизованих матриць (тут для простоти запису використано дійсний випадок):

$$\Psi_3 = \left[\begin{array}{cccc} [\varphi_{31}] & & & \\ & [\varphi_{32}] & & \\ & & [\varphi_{33}] & \\ & & & [\varphi_{34}] \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} [\varphi_{21}] & & & \\ & [\varphi_{22}] & & \\ & & [\varphi_{23}] & \\ & & & [\varphi_{24}] \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} [\varphi_{11}] & & & \\ & [\varphi_{12}] & & \\ & & [\varphi_{13}] & \\ & & & [\varphi_{14}] \end{array} \right]$$

$$=$$

(2.23)

Тут стрілками та позначеннями параметрів показані області впливу на елементи Ψ_n .

Аналогічно на основі матрично-ядерного підходу можуть бути побудовані різновиди матриць Адамара, матриць похилого перетворення Хаара, а також базиси теоретико-числового перетворення, базиси з ядрами двійкової розмірності, деякі поліноміальні функції тощо.

2.5. Висновки до другого розділу

1. Зростання рівня вимог до контролю параметрів об'єктів управління на основі спектральних методів обумовлюють необхідність застосування досить універсальних, ефективних, відносно нескладних у реалізації методів, здатних перебудовуватися у відповідності до апіорних відомостей про об'єкт управління. Використання спеціальних систем функцій у ряді окремих випадків не забезпечує вищезгаданих вимог. Відомі підходи вимагають або великого обсягу обчислень, або не забезпечують вимог до формування мінімальної кількості інформативних ознак. Тому великого значення набуває використання спектральних методів, які могли б перебудовуватися з урахуванням особливостей об'єкта управління, мали б алгоритм швидкого перетворення та забезпечували високі показники стиснення даних, співставні з оптимальними базисами Карунена-Лоева.

2. Для вдосконалення методів контролю параметрів об'єктів управління використані матричні спектральні оператори, що перебудовуються, за еталонним представником класу сигналів, який дозволяє отримати спектральні параметри, що представляють інформаційні сигнали управління.

3. Запропонований підхід з використанням базисів, що перебудовуються, дозволяє в рамках єдиного підходу поєднати переваги спектрального аналізу сигналів, що супроводжують функціонування ОУ при оперативному контролі їх параметрів.

РОЗДІЛ 3

ОРТОГОНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ЗАВДАННЯХ СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА ВИДІЛІННЯ ОЗНАК

Безпосередньою метою ортогонального перетворення при обробці інформації є отримання спектральних компонент, що мають різко нерівномірний перерозподіл дисперсій порівняно з розподілом дисперсій відліків даних, що перетворюються. Виконання цього завдання створює передумови усунення малозначимих і, зазвичай, надмірних компонент спектра. Ця центральна ідея використання ортогональних перетворень загальна під час вирішення різних завдань теорії зв'язку, управління та обробки інформації. Зокрема, вона застосовується для усунення надмірності та стиснення даних; для декореляції компонент розкладання та виявлення інформативних ознак; для ущільнення каналів зв'язку та підвищення завадостійкості передачі інформації; для скорочення пам'яті обчислювальних пристроїв; для виділення інваріантних характеристик із одновимірних та просторових сигналів; для побудови моделей динамічних систем управління, що налаштовуються, і т. д. [20].

Підхід до побудови різноманіття БС функцій зі швидким перетворенням дозволяє широко використовувати як відомі базиси, так й формувати спеціальні, пристосовані до умов розв'язуваної завдання системи функцій.

3.1. Стиснення інформації та синтез пристосованих базисів

Сутність стиснення полягає в усуненні надмірності оброблюваних даних і, отже, скорочення розмірності простору вихідного опису. Оскільки оброблювані дані мають зазвичай випадковий характер, то стиснення випадкових процесів чи полів здійснюється або за рахунок підвищення інформативності даних, або скороченням трудомісткості і часу обробки наступних етапів аналізу інформації.

Спектральні методи стиснення – одні з найбільш перспективних при вирішенні завдань стиснення інформації з подальшим її відновленням або без нього в силу лінійності та ортогональності СП, їх гарних властивостей, що згладжують, простоти виду базисних функцій традиційних систем Фур'є, Уолша і Хаара і наявності для цих базисів алгоритмів швидких перетворень, а також завдяки можливості використання малих апріорних відомостей.

У зв'язку з вимогами до підвищення інформативності, швидкості збіжності рядів розкладання та ефективності обчислювальних процедур стає актуальною розробка загального підходу до стиснення випадкових процесів на основі СП у традиційних та нових базисах. Серед різних систем базисних функцій, що вирішують завдання стиснення даних, найбільший інтерес представляють з них ті, які забезпечують виконання умови $\varepsilon_M^2 \leq \varepsilon_{\max}$ при мінімально можливому числі M . Такі базиси прийнято називати оптимальними для цілком певного і суворо обмеженого класу випадкових процесів.

Але пошук оптимального базису за відсутності апріорних відомостей про клас випадкових процесів стає не тільки складним, а й проблематичним. Тому порівняння та вибір відповідного базису зазвичай проводять серед базисів, що допускають відносно нескладну технічну та алгоритмічну реалізацію. Якщо ж апріорних відомостей достатньо для пошуку оптимального базису, але реалізація його важко здійсненна, необхідно розглядати цілий комплекс питань, пов'язаних з кінцевою метою та ефективністю системи спектрального стиснення даних. На підставі зіставлення за таким комплексом питань для оптимального та неоптимального базису приймається рішення про перевагу тієї чи іншої системи функцій під час вирішення конкретної задачі. Після того як вибрано систему базисних функцій, виконується фільтрація сигналів. Зазвичай фільтр включає аналізатор (він робить відображення простору вихідних даних в спектральну область), виборчу систему (вона забезпечує усунення надмірності за допомогою встановленого порогового рівня або рівнів у відповідних спектральних областях за вибраним критерієм

оцінювання або наближення) і синтезатор (він виконує зворотне перетворення вихідної області залишених компонентів перетворення). Якщо критерієм використовується заглушення компонент вищих порядків, то цим вирішується завдання фільтрації нижніх узагальнених частот; якщо використовується заглушення заданих компонентів, то фільтрація смуги частот; якщо, нарешті, виконується заглушення найменших по амплітуді компонент при заданому обмеженні похибки відновлення – це, по суті, стиснення даних (з можливістю їхнього подальшого відновлення).

Ефективність системи стиснення даних визначається тим, що при заданій похибці наближення число коефіцієнтів розкладання менше числа вихідних відліків (або частин кускової апроксимації). При необхідності похибка наближення може бути зменшена, по-перше, збільшенням числа коефіцієнтів розкладання (тобто зниженням порогового рівня), причому в цьому випадку попередні коефіцієнти узагальненого ряду Фур'є не змінюються; по-друге, збільшенням числа вихідних відліків, але в цьому випадку особливо важливого значення набуває критерій наближення. Так, якщо використовується критерій найкращого середньоквадратичного наближення, то кількість вихідних відліків може бути скорочено шляхом збільшення числа використовуваних базисних функцій, тобто коефіцієнтів розкладання без зміни всіх раніше обчислених коефіцієнтів. Якщо ж використовується критерій найкращого рівномірного наближення, то збільшення числа вихідних відліків тягне за собою необхідність перерахунку всіх коефіцієнтів розкладання узагальненого ряду Фур'є, що зумовлено чутливістю цього критерію до знаку відліків вихідних даних i , отже, знижує його обчислювальну ефективність; цей критерій використовують у тих випадках, коли відомі оцінки законів одномірної та двовимірної щільності розподілу, а також оцінки границь зміни сигналу та його похідних (якщо всі вони рівноймовірні).

Критерій мінімальної середньоквадратичної похибки використовують за апіорі відомої другої моментної функції випадкового процесу.

Синтез базисів, пристосованих до випадкових ритмічних процесів. До них відносяться випадкові процеси з періодичним повторенням статистичних характеристик (математичне очікування, дисперсії, автокореляційної функції). Подібні процеси широко поширені у природі. Надалі як приклад ритмічного випадкового процесу буде використана електрокардіограма (ЕКГ) людини.

Основна ідея стиснення біоінформації (зокрема, ЕКГ) полягає у порівнянні аналізованих даних із заздалегідь відомим еталоном (або еталонами), у подальшому виявленні відмінностей вихідних даних від еталона та їх належної інтерпретації. Обробка ЕКГ на основі СП у традиційних базисах Фур'є, Уолша, Хаара не забезпечує чіткого поділу в спектральній області еталона та аналізованого сигналу, оскільки вони «розмиваються» по всьому спектру. Тому необхідний такий спектральний підхід, який дозволяв би чітко виявляти відмінність еталона і сигналу в спектральній області незалежно від характеру спотворень.

Розглянемо формування пристосованих базисів, що забезпечують стиснення вихідних даних (з їх подальшим відновленням) за наявності апріорних відомостей про клас процесів у вигляді обчисленого математичне очікування $m_x(t)$. Якщо знехтувати корелювання вихідних реалізацій ЕКГ (рис. 3.1, а, б) і вважати незначними відхилення конкретних реалізацій від еталона (тобто вважати, що безліч аналізованих реалізацій ЕКГ знаходиться всередині вузького коридору $\Delta = \Delta(t)$, показано на рис. 3.1), то можна запропонувати наступний підхід до формування пристосованих базисів у ядерних уявленнях.

Для заданої множини сигналів $\{X\} = \{x_{in}\}, i = \overline{1, J}, n = \overline{0, N-1}$ знаходиться вектор математичного очікування: $M\{x_{in}\} = m_x = [z_n]^T = [z_0, z_1, \dots, z_{N-1}]^T$, який ми використовуємо як зразок, причому у спектральній області зіставимо лише один коефіцієнт, відмінний від нуля. При цьому відхилення реалізацій від зразка $z = z_n$ у часовій області будуть, очевидно, призводити до появи нових коефіцієнтів у спектральній

області. Врахування останніх при виборі порогових значень у відповідній метриці дозволяє досягти заданої помилки наближення.

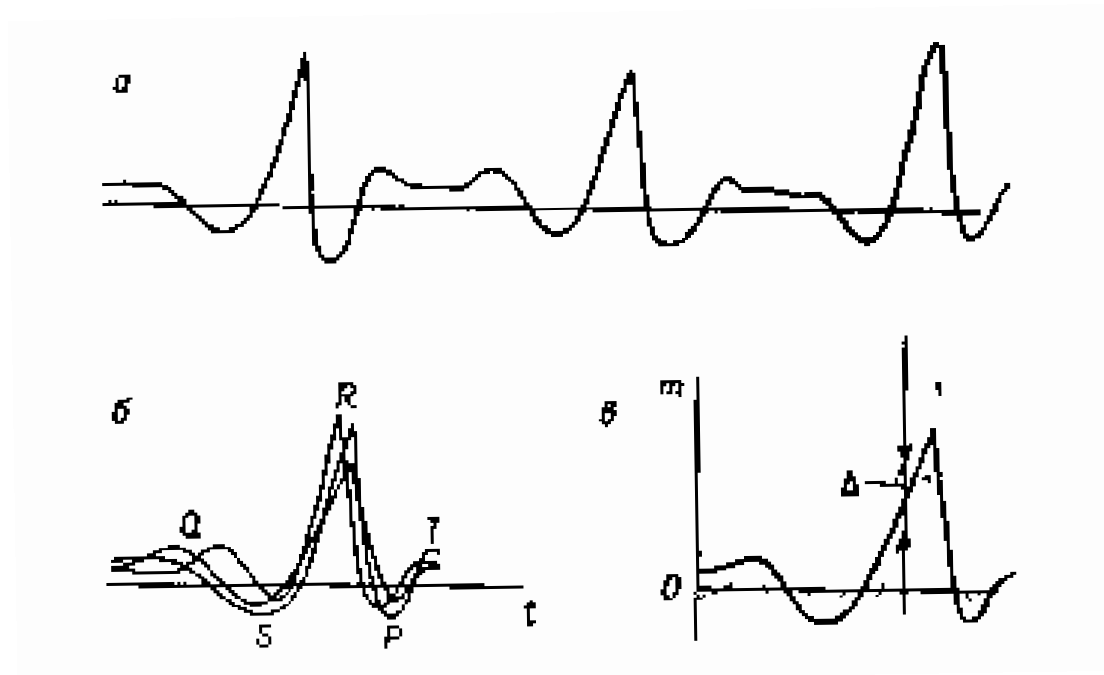


Рис. 3.1. Приклад сигналу як ЕКГ

Запишемо матричне рівняння для визначення необхідних кутів-параметрів $\{\varphi_n\}$ за заданим математичним очікуванням $[z_n]$ та одним ненульовим спектральним коефіцієнтом a_1 , що дорівнює, відповідно до рівності Парсеваля, сумі квадратів значень відліків:

$$z_n = [a] = [a_1, 0, \dots, 0]^T = \left[\sum_{n=0}^{N-1} z_n^2, 0, \dots, 0 \right]^T . \quad (3.1)$$

За умови, що існує зворотне перетворення, знаходимо шукане матричне рівняння у разі дійсного базису $[\Psi]$:

$$[z_n] = \sqrt{N}[\Psi]^{-1}[a] = \sqrt{N}[\Psi]^T[a] = \sqrt{N}[\Psi]_1[a] . \quad (3.2)$$

Виразимо матрицю через узагальнене спектральне ядро:

$$[V_{rl}] = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{rl} & \sin \varphi_{rl} \\ \sin \varphi_{rl} & -\cos \varphi_{rl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{rl} & s_{rl} \\ s_{rl} & -c_{rl} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Для наочності викладів і без втрати загальності розглядатимемо випадок $N \times N = 8 \times 8$:

$$\begin{aligned} [\Psi_1] = [V_{11}] \otimes [V_{21}] \otimes [V_{31}] &= [G_3][G_2][G_1] = \begin{bmatrix} c_{31} & & & & & & & s_{31} \\ s_{31} & & & & & & & -c_{31} \\ & c_{32} & & & & & & s_{32} \\ & s_{32} & & & & & & -c_{32} \\ & & c_{33} & & & & & s_{33} \\ & & s_{33} & & & & & -c_{33} \\ & & & c_{34} & & & & s_{34} \\ & & & s_{34} & & & & -c_{34} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c_{21} & & & & s_{21} & & & & \\ s_{21} & & & & -c_{21} & & & & \\ & c_{22} & & & s_{22} & & & & \\ & s_{22} & & & -c_{22} & & & & \\ & & c_{23} & & s_{23} & & & & \\ & & s_{23} & & -c_{23} & & & & \\ & & & c_{24} & & & & & s_{24} \\ & & & s_{24} & & & & & -c_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & & & & s_{11} & & & & \\ s_{11} & & & & -c_{11} & & & & \\ & c_{12} & & & s_{12} & & & & \\ & s_{12} & & & -c_{12} & & & & \\ & & c_{13} & & s_{13} & & & & \\ & & s_{13} & & -c_{13} & & & & \\ & & & c_{14} & & & & & s_{14} \\ & & & s_{14} & & & & & -c_{14} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Тут завдяки умові $[a] = [a_1, 0, \dots, 0]^T$ $z_n = [a] = [a_1, 0, \dots, 0]^T$ з усієї матриці Ψ_1 в утворенні вектора $[z_n]$ беруть участь тільки елементи першого стовпця; у загальному вигляді їх можна отримати перемноженням факторизованих матриць відповідно до (3.4) або у формі узагальненого прямого добутку. З урахуванням зроблених зауважень вираз (3.4) набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \dots \\ z_7 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{8}} \begin{bmatrix} a_1 & c_{31} & c_{21} & c_{11} \\ a_1 & s_{31} & c_{21} & c_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & s_{33} & s_{21} & s_{11} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

В результаті рішення рівняння (3.5) отримаємо такі вирази для кутів-параметрів, що знаходяться:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{31} &= \frac{z_1}{z_0}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{32} = \frac{z_3}{z_2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{33} = \frac{z_5}{z_4}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{34} = \frac{z_7}{z_6}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{21} &= \sqrt{\left(\frac{z_2^2 + z_3^2}{z_0^2 + z_1^2} \right)}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{22} = \sqrt{\left(\frac{z_6^2 + z_7^2}{z_4^2 + z_5^2} \right)}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{11} &= \sqrt{\left(\frac{z_4^2 + z_5^2 + z_6^2 + z_7^2}{z_0^2 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2} \right)}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

У випадку $N=2^n$ справедливі такі співвідношення для кутів параметрів:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{nk} &= \frac{z_{2k-1}}{z_{2k-2}}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{(n-1)k} &= \sqrt{\left(\frac{z_{4k-2}^2 + z_{4k-1}^2}{z_{4k-4}^2 + z_{4k-3}^2} \right)}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{1k} &= \frac{\sqrt{\sum_{i=N/2}^{N/2-1} z_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} z_i^2}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Розташування ядер у факторизованих матрицях має такий вигляд:

$$\left[\begin{array}{cccc} [\varphi_{31}] & & & \\ & [\varphi_{32}] & & \\ & & [\varphi_{33}] & \\ & & & [\varphi_{34}] \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc} [\varphi_{21}] & & \\ & [\varphi_{21}] & \\ & & [\varphi_{23}] \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc} [\varphi_{11}] & & \\ & [\varphi_{11}] & \\ & & [\varphi_{11}] \end{array} \right] \quad (3.8)$$

$[]$ – позначені ядра, параметри яких визначено виходячи з (3.7). Ці ядра визначають ступені свободи, що залишилися ($n \cdot N/2 - N$) і дозволяють проводити подальшу оптимізацію базису відповідно до заданих умов (зменшення обсягу пам'яті ЕОМ, підвищення швидкості збіжності рядів). Зокрема, для економії пам'яті доцільно прийняти:

$$\varphi_{11} = \varphi_{12} = \varphi_{13} = \varphi_{14} \cdot \quad (3.9)$$

Базис з параметрами (3.9) називатимемо пристосованим базисом 1-го типу. Використання такої розстановки ядер у факторизованих матрицях значно спрощує процедуру знаходження кутів-параметрів для уточнення розкладання зі збільшенням розмірності вихідного вектора.

Причому раніше обчислені значення кутів залишаються без зміни, а розрахунок нових кутів-параметрів проводиться тільки для матриць, що додаються (G_r).

3.2. Експериментальне дослідження

3.2.1. Опис програми

Загальні відомості. Розроблена програма може використовуватися при синтезі базисних систем з функціями, що перебудовуються, пристосованих до еталону класу сигналів.

Функціональне призначення: ця програма дозволяє синтезувати ортонормований базис з наочним інтерфейсом та можливість зворотного відновлення сигналу.

Призначення продукту – мінімізація зусиль користувача при використанні математичного апарату та скорочення часу необхідного для синтезу ортогонального базису та отримання необхідного результату.

Опис логічної структури. Логічно ця програма є алгоритмом синтезу ортогонального базису, тобто певною послідовністю дій, які потрібно виконати користувачеві.

Програма складається з трьох модулів, один з яких є базовим для двох інших.

Головний модуль відповідає за реалізацію алгоритму синтезу ортогонального базису, другий модуль виконує графічне відображення результатів виконання алгоритму, а третій є модулем для перевірки результатів.

Використовувані технічні засоби. Для функціонування програмного забезпечення необхідна наявність таких технічних засобів:

- центральний процесор класу Intel або AMD не менш 1600 МГц;
- SVGA монітор;
- щонайменше 2048 мегабайтів оперативної пам'яті;
- 1 гігабайт вільного місця на жорсткому диску;
- клавіатура та маніпулятор «миша».

Наведені вище системні характеристики є рекомендованими.

Вхідні дані. Вхідними даними програми є цифровий сигнал, який можна отримати від зовнішніх джерел у формі дійсних значень.

Вихідні дані. Вихідними даними є ортогональний базис, який буде отримано в результаті виконання програми.

3.2.2. Результат роботи програми

Для роботи з програмою необхідно здійснити наступні дії.

У вікні програми натиснути на кнопку «Генерувати», щоб отримати вихідні дані (як показано на рис. 3.2), які будуть у текстовому полі.

Далі необхідно натиснути кнопку «Обчислити значення кутів», яку можна побачити на рис. 3.2. Ця дія передбачає визначення кутів-параметрів повороту для факторизованих матриць.

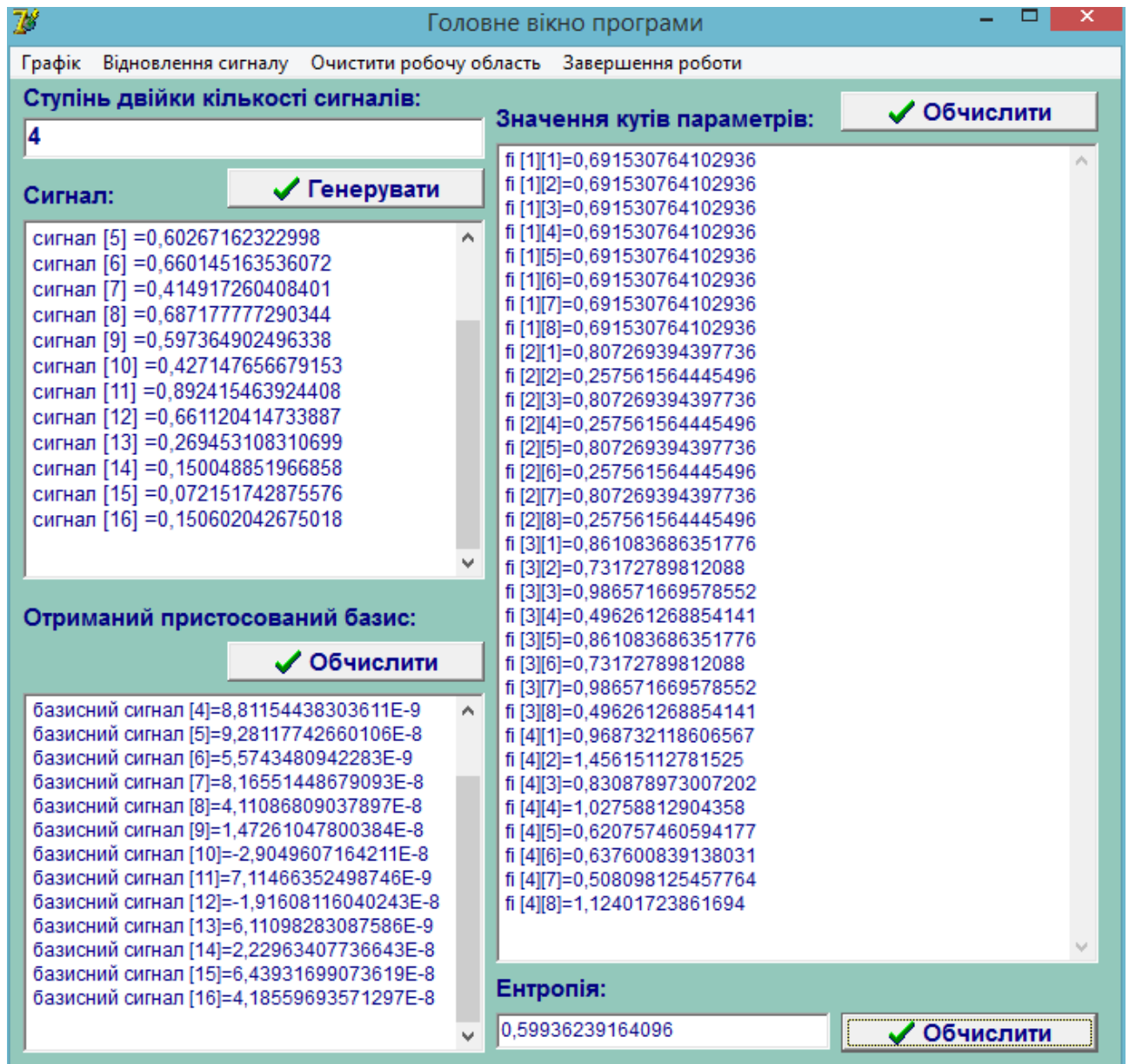


Рис. 3.2. Виконання команди «Генерувати», обчислення базису, значення кутів параметрів

Наступний етап дій полягає у синтезі ортогонального базису. Для цього необхідно натиснути кнопку «Обчислити», яка зображена на рис. 3.2.

За необхідності визначення значення ентропії як невизначеності сигналу (інформації) потрібно натиснути на відповідну кнопку.

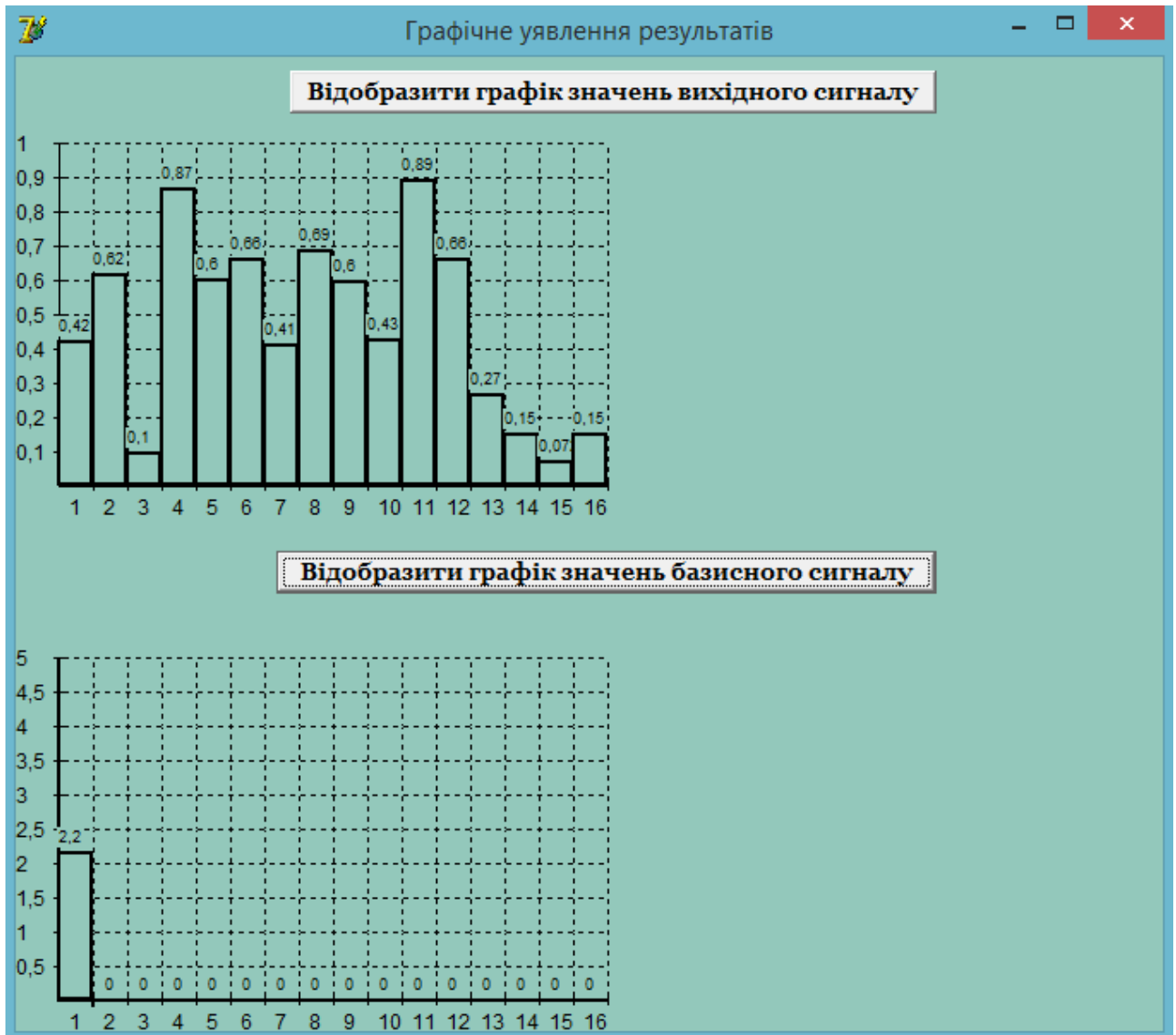


Рис. 3.3. Графік значень вихідного сигналу, відображення графіку значень базисного сигналу

Для наочного подання реалізації алгоритму необхідно обирати відповідні пункти підменю «Графік» (як показано на рис. 3.3 та рис. 3.4).

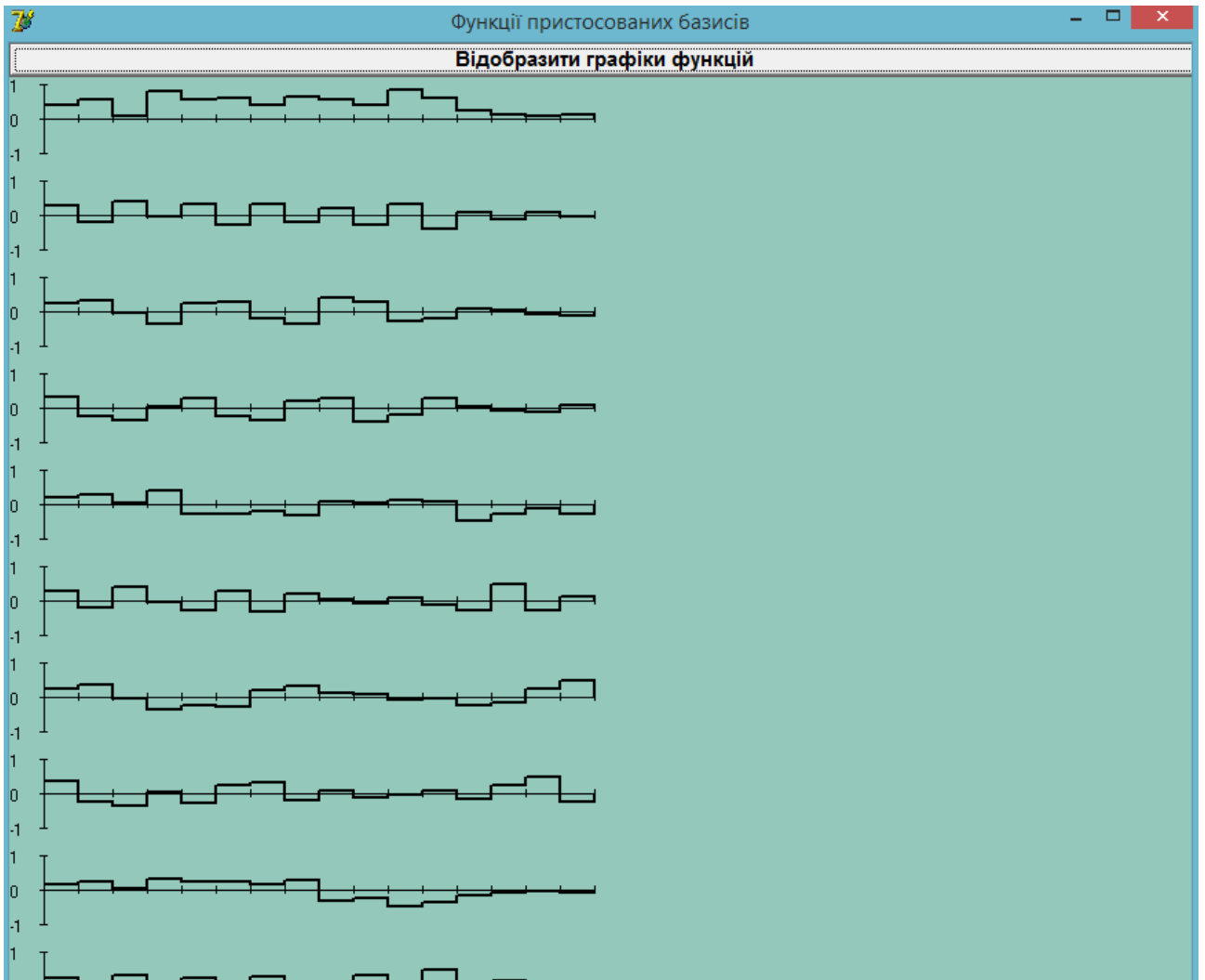


Рис. 3.4. Графік функції пристосованих базисів

Як бачимо, даний розділ програми відображає вихідний сигнал у результат виконання алгоритму, тобто синтезований ортогональний базис.

Вибравши підменю "Відновлення сигналу" можна побачити реалізацію зворотного перетворення з використанням вихідних даних (рис. 3.5).

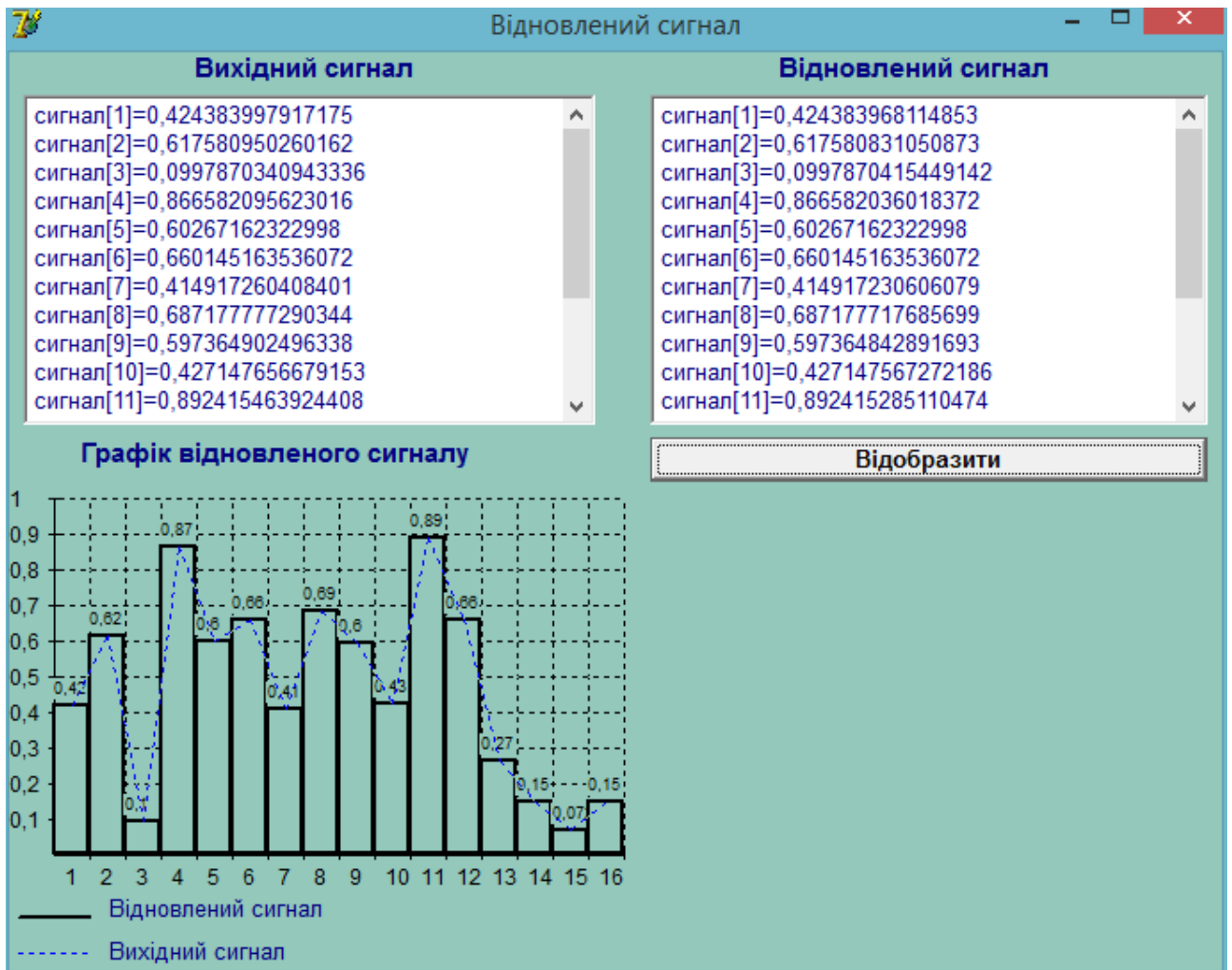


Рис. 3.5. Вікно зіставлення вихідного та відновленого сигналів

3.3. Висновки до третього розділу

1. Проведено експериментальне дослідження розроблених методів контролю параметрів об'єктів управління, заснованих на формуванні інформативних ознак інформаційних процесів управління з використанням базисів, що перебудовуються.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок про ефективність запропонованих методів контролю параметрів об'єктів управління, заснованих на формуванні інформативних ознак з використанням базисів, що перебудовуються, і перспективності їх застосування.

2. Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для контролю параметрів об'єктів управління.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІКА

4.1. Визначення трудомісткості та вартості розробки програмного продукту

Для розрахунків застосуємо наступні початкові дані:

1. передбачуване число операторів програми – 645;
2. коефіцієнт складності програми – 1,7;
3. коефіцієнт корекції програми в ході її розробки – 0,07;
4. годинна заробітна плата програміста – 80 грн/год;
5. коефіцієнт збільшення витрат праці внаслідок недостатнього опису задачі – 1,2;
6. коефіцієнт кваліфікації програміста, обумовлений від стажу роботи з даної спеціальності – 0,8;
7. вартість машино-години ЕОМ – 15 грн/год.

Нормування праці в процесі створення ПЗ істотно ускладнено в силу творчого характеру праці програміста. Тому трудомісткість розробки ПЗ може бути розрахована на основі системи моделей з різною точністю оцінки.

Трудомісткість розробки ПЗ можна розрахувати за формулою:

$$t = t_o + t_u + t_a + t_n + t_{oml} + t_\phi, \text{ людино-годин,} \quad (4.1)$$

де t_o – витрати праці на підготовку й опис поставленої задачі (приймається 50 людино-годин);

t_u – витрати праці на дослідження алгоритму рішення задачі;

t_a – витрати праці на розробку блок-схеми алгоритму;

t_n – витрати праці на програмування по готовій блок-схемі;

t_{oml} – витрати праці на налагодження програми на ЕОМ;

t_0 – витрати праці на підготовку документації.

Складові витрати праці визначаються через умовне число операторів у програмному забезпеченні, яке розробляється.

Умовне число операторів (підпрограм):

$$Q = q \cdot C \cdot (1 + p) , \quad (4.2)$$

де q – передбачуване число операторів (645);

C – коефіцієнт складності програми (1,7);

p – коефіцієнт корекції програми в ході її розробки (0,07).

Звідси умовне число операторів в програмі:

$$Q = 645 \cdot 1,7 \cdot (1 + 0,07) = 1173,26.$$

Витрати праці на вивчення опису задачі t_u визначається з урахуванням уточнення опису і кваліфікації програміста:

$$t_u = \frac{Q \cdot B}{(75..85) \cdot k} , \text{ людино-годин,} \quad (4.3)$$

де B – коефіцієнт збільшення витрат праці внаслідок недостатнього опису задачі;

k – коефіцієнт кваліфікації програміста, обумовлений від стажу роботи з даної спеціальності. При стажі роботи до 2 років він складає 0,8.

Прийmemo збільшення витрат праці внаслідок недостатнього опису завдання не більше 50% ($B = 1,2$). З урахуванням коефіцієнта кваліфікації $k = 0,8$, отримуємо витрати праці на вивчення опису завдання:

$$t_u = \frac{1173,26 \cdot 1,2}{75 \cdot 0,8} = 23,47 \text{ людино-години.}$$

Витрати праці на розробку алгоритму рішення задачі визначаються за формулою:

$$t_a = \frac{Q}{(20..25) \cdot k}, \text{ людино-годин,} \quad (4.4)$$

де Q – умовне число операторів програми;

k – коефіцієнт кваліфікації програміста.

Підставивши відповідні значення в формулу (4.4), отримуємо:

$$t_a = \frac{1173,26}{20 \cdot 0,8} = 73,33 \text{ людино-години.}$$

Витрати на складання програми по готовій схемі:

$$t_n = \frac{Q}{(20..25) \cdot k}, \text{ людино-годин,} \quad (4.5)$$

$$t_n = \frac{1173,26}{20 \cdot 0,8} = 73,33 \text{ людино-години.}$$

Витрати праці на налагодження програми на ЕОМ:

– за умови автономного налагодження одного завдання:

$$t_{oml} = \frac{Q}{(4..5) \cdot k}, \text{ людино-годин,} \quad (4.6)$$

$$t_{oml} = \frac{1173,26}{5 \cdot 0,8} = 293,32 \text{ людино-годин};$$

– за умови комплексного налагодження завдання:

$$t_{oml}^k = 1,5 \cdot t_{oml}, \text{ людино-годин}, \quad (4.7)$$

$$t_{oml}^k = 1,5 \cdot 293,32 = 439,98 \text{ людино-годин}.$$

Витрати праці на підготовку документації визначаються за формулою:

$$t_{\partial} = t_{\partial p} + t_{\partial o}, \text{ людино-годин}, \quad (4.8)$$

де $t_{\partial p}$ – трудомісткість підготовки матеріалів і рукопису:

$$t_{\partial p} = \frac{Q}{(15..20) \cdot k}, \text{ людино-годин}; \quad (4.9)$$

$t_{\partial o}$ – трудомісткість редагування, печатки й оформлення документації:

$$t_{\partial o} = 0,75 \cdot t_{\partial p}, \text{ людино-годин}. \quad (4.10)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо:

$$t_{\partial p} = \frac{1173,26}{18 \cdot 0,8} = 81,48 \text{ людино-година}.$$

$$t_{\partial o} = 0,75 \cdot 81,48 = 61,11 \text{ людино-година}.$$

$$t_o = 81,48 + 61,11 = 142,59 \text{ людино-години.}$$

Повертаючись до формули (4.1), отримаємо повну оцінку трудомісткості розробки програмного забезпечення:

$$t = 50 + 23,47 + 73,33 + 73,33 + 293,32 + 142,59 = 656,04 \text{ людино-годин.}$$

4.2. Витрати на створення програмного забезпечення

Витрати на створення ПЗ $K_{ПО}$ включають витрати на заробітну плату виконавця програми $Z_{ЗП}$ і витрат машинного часу, необхідного на налагодження програми на ЕОМ:

$$K_{ПО} = Z_{ЗП} + Z_{МВ}, \text{ грн.} \quad (4.11)$$

Заробітна плата виконавців визначається за формулою:

$$Z_{ЗП} = t \cdot C_{ПП}, \text{ грн,} \quad (4.12)$$

де t – загальна трудомісткість, людино-годин;

$C_{ПП}$ – середня годинна заробітна плата програміста, грн/година.

З урахуванням того, що середня годинна зарплата програміста становить 80 грн / год, отримуємо:

$$Z_{ЗП} = 656,04 \cdot 80 = 52483,2 \text{ грн.}$$

Вартість машинного часу, необхідного для налагодження програми на ЕОМ, визначається за формулою:

$$Z_{MB} = t_{oml} \cdot C_{MЧ}, \text{ грн}, \quad (4.13)$$

де t_{oml} – трудомісткість налагодження програми на ЕОМ, год;

$C_{MЧ}$ – вартість машино-години ЕОМ, грн/год (15 грн/год).

Підставивши в формулу (4.13) відповідні значення, визначимо вартість необхідного для налагодження машинного часу:

$$Z_{MB} = 293,32 \cdot 15 = 4399,8 \text{ грн.}$$

Звідси витрати на створення програмного продукту:

$$K_{ПО} = 52483,2 + 4399,8 = 56883 \text{ грн.}$$

Очікуваний період створення ПЗ:

$$T = \frac{t}{B_k \cdot F_p}, \text{ міс}, \quad (4.14)$$

де B_k – число виконавців (дорівнює 1);

F_p – місячний фонд робочого часу (при 40 годинному робочому тижні $F_p = 176$ годин).

Звідси витрати на створення програмного продукту:

$$T = \frac{656,04}{1 \cdot 176} = 3,73 \text{ місяці.}$$

4.3. Маркетингові дослідження ринку збуту розробленого програмного продукту

Традиційні схеми управління промисловими об'єктами та технологічними процесами не задовольняють збільшеним вимогам до якості та надійності функціонування складних, слабоструктурованих промислових об'єктів. Визначення стану динамічних об'єктів та характеру його зміни з часом є основною проблемою діагностування об'єктів.

Вирішення проблем діагностики об'єктів у багатьох випадках пов'язане з розпізнаванням (класифікацією) часових сигналів. Найважливішим у своїй області є формування мінімально необхідного числа класифікаційних (інформативних) ознак і побудова ефективного вирішального правила, тобто вирішення проблеми стиснення інформаційних процесів управління.

Практична цінність роботи полягає у розробці алгоритму формування діагностичних ознак на підставі перетворень, що керуються параметрично, та у розробці програмного забезпечення, яке реалізує розроблену методику побудови перетворень, що керуються параметрично.

Розроблене програмне забезпечення відноситься до складної програмної продукції, яка потребує спеціального налагодження та використання прямого маркетингу між виробником і споживачем. Даний програмний продукт може мати широкий спектр можливих споживачів, які шукають можливість скорочення затрат на контроль поточного стану різноманітних об'єктів та їх діагностику. У випадку замовлення споживачем програмного продукту може передбачатися можливість випуску нових версій, у разі потреби його доопрацювання та обслуговування.

4.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробленого програмного забезпечення

Оскільки в даній кваліфікаційній роботі був розроблений алгоритм формування діагностичних ознак на підставі перетворень, що керуються параметрично, та створено програмне забезпечення загального виду, але не для конкретної області використання, розрахунок точного економічного ефекту, який складається з витрат до впровадження ПЗ і після нього, неможливий. Ці розрахунки залежать від конкретного випадку, в якому використовуються ці методи та алгоритми.

Тому розглянемо економічний та соціальний ефект від використання даних алгоритмів.

Економічний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним завдяки зменшенню витрат при проведенні процедури функціонального контролю стану об'єкту.

Розроблена методика дозволяє скоротити час формування класифікаційних ознак при проведенні процедури функціонального контролю стану об'єкта. Методика формування діагностичних ознак може бути використана при розробці систем класифікації випадкових сигналів.

Соціальний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним завдяки вдосконаленню метода ідентифікаційної експертизи, що дозволяє розглянутому методу формування інформативних ознак процесів, що супроводжують функціонування складних об'єктів управління, підвищити достовірність процесу контролю та діагностики об'єкта.

Висновок: Трудомісткість розробки програмного забезпечення 656,04 людино-годин, його вартість становить 56883 грн. з можливими додатковими витратами при розробці проекту, за бажанням замовника випустити оновлену версію програми через деякий час. Очікуваний час розробки – 3,73 місяці. Цей термін пов'язаний зі значною кількістю операторів і включає в себе час для дослідження та розробки алгоритму розв'язання задачі, розробки інтерфейсу,

створення додатку та підготовку документації. Маркетингові дослідження показали, що даний продукт потребує прямого маркетингу між виробником і споживачем, може мати широкий спектр можливих споживачів. Також було проведено оцінку економічного та соціального ефекту від реалізації результатів проведеної роботи.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналітичний огляд властивостей базисів і базисних систем, які можуть вплинути на вибір оптимального розкладання для реалізації конкретного виду завдань.

2. В результаті аналізу теоретичного матеріалу було визначено основні вимоги як до апаратно-технічної бази, так і до математичного апарату. Проаналізовано методики синтезу базисних систем, їх основні особливості, способи реалізації, недоліки та переваги.

3. Розроблено алгоритм, який дозволяє синтезувати ортогональний базис із використанням швидких перетворень, які дозволяють виконувати побудову зі значною економією часу, а також із зменшенням вимогливості до технічної бази.

4. Обґрунтовано необхідність використання даного алгоритму, а також проаналізовано всі можливі труднощі, які можуть виникнути при реалізації алгоритму, знайдено шляхи вирішення цих проблем.

5. Проведено реалізацію даного алгоритму із застосуванням сучасних інформаційних технологій, які дозволяють оптимізувати та прискорити отримання необхідного результату, а також спростити синтез базисів для користувачів.

6. Виконано аналіз результатів на основі програмної реалізації алгоритму, а також визначено можливі шляхи для проведення подальших досліджень. Результати показують ефективність використання обраного алгоритму та практичний економічний та соціальний ефект.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jakobson D. Geometric and spectral analysis / Dmitry Jakobson, Pierre Albin, Frédéric Rochon. – Providence, Rhode Island : American Mathematical Society, 2014. – 366 p.
2. Kharkevich A. A. Spectra and analysis : monogr. / A. A. Kharkevich. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 228 p.
3. Методичні вказівки з виконання економічного розділу в дипломних проектах студентів спеціальності “Комп’ютерні системи” / уклад.: О. Г Вагонова, О. Б. Нікітіна, Н. Н. Романюк. – Дніпропетровськ : НГУ, 2013. – 11 с.
4. Therrien C. W. Discrete random signals and statistical signal processing / Charles W. Therrien. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1992. – 727 p.
5. Gonzalez R. C. Digital image processing using MATLAB / Rafael C. Gonzalez. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2004. – 609 p.
6. Лавер В. О. Обробка зображень : навч.-метод. посіб. / В. О. Лавер, О. М. Левчук. – Ужгород : ПП «АУТДОР-ШАРК», 2021. – 51 с.
7. Miller G. K. Probability: modeling and applications to random processes / Gregory K. Miller. – New York : John Wiley & Sons, 2006. – 488 p.
8. Sansone G. Orthogonal functions / Giovanni Sansone. – New York : Dover Publications, 2012. – 411 p.
9. Jenkins G. M. Spectral analysis and its applications / G. M. Jenkins, D. G. Watts. – San Francisco : Holden-Day, 1968. – 525 p.
10. Теорія систем керування : підручник / В. І. Корнієнко, О. Ю. Гусєв, О. В. Герасіна, В. П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 497 с.
11. Cecconi J. Spectral analysis / Jaures Cecconi. – Berlin : Springer-Verlag, 2011. – 253 p.
12. Proakis J. G. Digital signal processing: principles, algorithms and

applications / John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis. – 3rd ed. – Lebanon, Indiana : Prentice Hall, 1995. – 1016 p.

13. Konheim A. G. Cryptography: a primer / Alan G. Konheim. – New York : John Wiley & Sons, 1981. – 432 p.

14. Ahmed N. Orthogonal transforms for digital signal processing / N. Ahmed, K. R. Rao. – Berlin : Springer-Verlag, 1975. – 263 p.

15. Wasserman P. D. Neural computing: theory and practice / Philip D. Wasserman. – New York : Van Nostrand Reinhold, 1989. – 230 p.

16. Preston K. A comparison of analog and digital techniques for pattern recognition / K. Preston // Proceedings of the IEEE. – 1972. – Vol. 60, no. 10. – P. 1216–1231.

17. Goodman J. W. Introduction to Fourier optics / Joseph W. Goodman. – 3rd ed. – Englewood, Colorado : Roberts & Company Publishers, 2005. – 491 p.

18. Symeonidis P. Matrix and tensor factorization techniques for recommender systems / Panagiotis Symeonidis, Andreas Zioupos. – Berlin : Springer, 2017. – 108 p.

19. Bai Z. Spectral analysis of large dimensional random matrices / Zhidong Bai. – 2nd ed. – New York : Springer, 2010. – 551 p.

20. Дьяконов В. П. Вейвлеты. от теории к практике / В. П. Дьяконов. – М : СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.

21. Lyons R. G. Understanding digital signal processing / Richard G. Lyons. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2011. – 954 p.

22. Конончук Г. Л. Вступ до Фур'є-оптики : навч. посіб. / Г. Л. Конончук, В. М. Прокопець, В. В. Стукаленко. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2009. – 320 с.

23. Перелигін Б. В. Спектрально-часовий аналіз даних моніторинга : навч. посіб. / Б. В. Перелигін, Т. Б. Ткач, С. А. Гор'єв. – Одеса : ТЕС, 2017. – 124 с.

24. Сазанов В. М. Цифровая обработка сигналов: прошлое и настоящее. Часть 1. Прошлое [Электронный ресурс] / В. М. Сазанов, Н. С. Парфенов. –

Режим доступа : <https://www.computer-museum.ru/histussr/dsp.htm>

25. Рибальченко М. О. Цифрова обробка сигналів : навч. посіб. / М. О. Рибальченко, О. П. Єгоров, В. Б. Зворикін. – Дніпро : НМетАУ, 2018. – 79 с.

26. Brigham E. O. Fast Fourier transform and its applications / E. Oran Brigham. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1988. – 448 p.

27. Aoki S. Markov bases in algebraic statistics / Satoshi Aoki, Hisayuki Nara, Akimichi Takemura. – Berlin : Springer, 2012. – 312 p.

28. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційних робіт здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 122 «Комп'ютерні науки» / Б. І. Мороз, О. В. Іванченко, О. В. Реута, О. С. Шевцова; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 54 с.

29. ДСТУ ГОСТ 7.1-2006. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання : чинний з 2007-07-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 47 с.

ДОДАТОК А

КОД ПРОГРАМИ

```

FirstUnit.pas //головний модуль FirstUnit
unit FirstUnit;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Menus, Math;

type
  TMainForm1 = class(TForm)
    MainMenu1: TMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    N3: TMenuItem;
    SignalCount: TLabel;
    SignalMemo: TMemo;
    Label1: TLabel;
    Generation: TBitBtn;
    AngleMemo: TMemo;
    Label2: TLabel;
    ValueAng: TBitBtn;
    Label3: TLabel;
    RezButton: TBitBtn;
    RezMemo: TMemo;
    EntButton: TBitBtn;
    Label4: TLabel;
    EntEdit: TEdit;
    N4: TMenuItem;
    N5: TMenuItem;
    N6: TMenuItem;
    procedure GenerationClick(Sender: TObject);
    procedure ValueAngClick(Sender: TObject);
    procedure RezButtonClick(Sender: TObject);
    procedure N4Click(Sender: TObject);
    procedure N3Click(Sender: TObject);
    procedure EntButtonClick(Sender: TObject);
    procedure N2Click(Sender: TObject);
    procedure N5Click(Sender: TObject);
    procedure N6Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  MainForm1: TMainForm1;
  i,j,k: integer;
  CountSignal: integer; //Кількість сигналів
  StepSignal: integer;
  signal: array of single; //Сигнал
  bazsignal: array of single; //Базисний сигнал
  angVal: array of array of single; //Значення кутів
  Matr: array of array of array of single; //Факторизовані матриці
  MultMatr, SumMultMatr: array of array of single;
implementation

uses RestoreUnit, GraphUnit, OrtNormUnitUnit;

{$R *.dfm}
//Процедура генерації сигналу
procedure TMainForm1.GenerationClick(Sender: TObject);
var
  bool:boolean;
  st:string[1];
begin
  //Перевіряємо, що введено значення - ціле число
  bool:=true;
  if SignalCount.Text='' then
    bool:=false
  else

```

```

for i:=1 to length(SignalCount.Text) do
begin
st:=copy(SignalCount.Text,i,1);
if (ord(st[1])<48) or (ord(st[1])>57) then
bool:=false;
end;
if bool=true then
begin
StepSignal:=StrToInt(SignalCount.Text);
CountSignal:=Round(Power(2,StrToInt(SignalCount.Text)));
SetLength(Signal,CountSignal);
randomize;
for i:=0 to CountSignal-1 do
begin
Signal[i]:=random;
SignalMemo.Lines.Add('сигнал ['+inttostr(i+1)+']='+floattostr(Signal[i]));
end;
end
else
MessageDlg('Введіть кількість сигналів!',MtError,[mbOk],0);
end;

//Процедура обчислення кутів параметрів
procedure TMainForm1.ValueAngClick(Sender: TObject);
var
sum1,sum2:single;
k,n:integer;
begin
if SignalCount.Text<>' ' then
begin
n:=0;
SetLength(angVal, StrToInt(SignalCount.Text));
for i := Low(angVal) to High(angVal) do
begin
SetLength(angVal[i], round(CountSignal/2));
for j := Low(angVal[i]) to High(angVal[i]) do
begin
sum1:=0;
sum2:=0;
for k:=0 to round(countsignal/power(2,i+1))-1 do
begin
sum1:=sum1+sqrt(signal[k+n*round(countsignal/power(2,i))]);
sum2:=sum2+sqrt(signal[k+n*round(countsignal/power(2,i))+round(countsignal/power(2,i+1))]);
end;
n:=n+1;
if n=power(2,i) then n:=0;
angVal[i,j]:=arctan(sqrt(sum2)/sqrt(sum1));
angleMemo.Lines.Add('fi
['+inttostr(i+1)+']['+inttostr(j+1)+']='+floattostr(angVal[i,j]));
end;
end;
end
else
MessageDlg('Спочатку введіть кількість сигналів!',MtError,[mbOk],0);
end;

procedure TMainForm1.RezButtonClick(Sender: TObject);
var
sum:extended;
l:integer;
begin
//Обчислення факторизованих матриць
//
SetLength(Matr,stepSignal);
for i:=Low(Matr) to High(Matr) do
begin
SetLength(Matr[i],CountSignal);
for j:=Low(Matr[i]) to High(Matr[i]) do
begin
SetLength(Matr[i,j],CountSignal);
for k:=Low(Matr[i,j]) to High(Matr[i,j]) do
begin
if (k=j div 2) then
begin
if (j mod 2=0) then
Matr[i,j,k]:=cos(angVal[i,j div 2]);
if (j mod 2=1) then
Matr[i,j,k]:=sin(angVal[i,j div 2]);

```

```

        end;
        if (k=(CountSignal/2)+j div 2) then
        begin
            if (j mod 2=0) then
                Matr[i,j,k]:=sin(angVal[i,j div 2]);
            if (j mod 2=1) then
                Matr[i,j,k]:=-cos(angVal[i,j div 2]);
            end;
        end;
    end;
end;
//
sum:=0;
SetLength(MultMatr,CountSignal);
for i:=Low(MultMatr) to High(MultMatr) do
begin
    SetLength(MultMatr[i],CountSignal);
    for j:=Low(MultMatr[i]) to High(MultMatr[i]) do
        MultMatr[i,j]:=Matr[StepSignal-1,i,j];
    end;
SetLength(SumMultMatr,CountSignal);
for i:=Low(SumMultMatr) to High(SumMultMatr) do
begin
    SetLength(SumMultMatr[i],CountSignal);
    for j:=Low(SumMultMatr[i]) to High(SumMultMatr[i]) do
        SumMultMatr[i,j]:=0;
    end;
for l:=StepSignal-2 downto 0 do
begin
    for i:=0 to CountSignal-1 do
    begin
        for j:=0 to CountSignal-1 do
        begin
            for k:=0 to CountSignal-1 do
            begin
                sum:=sum+MultMatr[i,k]*Matr[l,k,j];
            end;
            SumMultMatr[i,j]:=sum;
            sum:=0;
        end;
    end;
    for i:=0 to CountSignal-1 do
        for j:=0 to CountSignal-1 do
            MultMatr[i,j]:=SumMultMatr[i,j];
        end;
//Транспонування матриці
    for i:=0 to CountSignal-1 do
        for j:=0 to CountSignal-1 do
            SumMultMatr[i,j]:=MultMatr[j,i];
        end;
//Отримання шуканого вектора
    SetLength(bazsignal,CountSignal);
    for i:=Low(bazsignal) to High(bazsignal) do
        bazsignal[i]:=0;
    for i:=0 to CountSignal-1 do
    begin
        sum:=0;
        for j:=0 to CountSignal-1 do
        begin
            sum:=sum+SumMultMatr[i,j]*signal[j];
        end;
        bazsignal[i]:=sum;
        RezМемо.Lines.Add('Базисний сигнал ['+IntToStr(i+1)+']='+FloatToStr(bazSignal[i]));
    end;
end;

//Процедура очищення робочої області
procedure TMainForm1.N4Click(Sender: TObject);
begin
    SignalMemo.Lines.Clear;
    RezМемо.Lines.Clear;
    AngleMemo.Lines.Clear;
    SignalCount.Text:='';
    EntEdit.Text:='';
end;

//Процедура закриття головного вікна програми
procedure TMainForm1.N3Click(Sender: TObject);
begin
    MainForm1.Close;
end;

```



```

end;

//Обчислення ентропії
procedure TMainForm1.EntButtonClick(Sender: TObject);
var
  Ent:extended;
begin
  Ent:=0;
  i:=0;
  while i<=CountSignal-1 do
    begin
      if bazsignal[i]>0 then
        ent:=ent+bazsignal[i]*log2(bazsignal[i])/log2(countsignal);
        i:=i+1;
      end;
    EntEdit.Text:=FloatToStr(ent);
  end;

procedure TMainForm1.N2Click(Sender: TObject);
begin
  RestoreForm.Show;
end;

procedure TMainForm1.N5Click(Sender: TObject);
begin
  GraphForm.Show;
end;

procedure TMainForm1.N6Click(Sender: TObject);
begin
  OrtNormForm.Show;
end;

end.

OrtNormUnitUnit.pas //модуль функцій пристосованих базисів
unit OrtNormUnitUnit;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls;

type
  TOrtNormForm = class(TForm)
    Button1: TButton;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  OrtNormForm: TOrtNormForm;

implementation

Uses FirstUnit;
{$R *.dfm}

procedure TOrtNormForm.Button1Click(Sender: TObject);
var
  i,j,k,count: integer;
  x0,y0:integer; //координати початку координатних осей
  h,w:integer; //висота та ширина області виведення координатної сітки
  x,y:integer;
begin
  if CountSignal<16 then
    count:=CountSignal
  else
    count:=10;
  for i:=1 to count do
    begin
      //Відображення графіка
      x0:=25; y0:=80+(i-1)*70;

```

```

h:=50;
w:=25*CountSignal;
with OrtNormForm.Canvas do begin
  Pen.Style:=psSolid;
  Pen.Width:=1;
  MoveTo(x0,y0); LineTo(x0,y0-h); //вісь X
  MoveTo(x0,y0-25); LineTo(x0+w, y0-25); //вісь Y
//засічки по осі X
  for j:=1 to CountSignal do
    begin
      x:=x0+j*25;
      MoveTo(x,y0-28);LineTo(x,y0-22); //засічка
    end;
//засічки та оцифровка по осі Y
  for j:=1 to 3 do
    begin
      Pen.Style:=psSolid;
      y:=y0-(j-1)*25;
      MoveTo(x0-3,y);LineTo(x0+3,y); //засічка
      TextOut(x0-25,y-5,FloatToStr(j-2)); //оцифровка
    end;
  Pen.Style:=psSolid;
  Pen.Width:=2;
  if i=1 then k:=stepsignal-2 else k:=1;
  y:=y0-Round((1+k*SumMultMatr[i-1,0])/(1/25));
  for j:=0 to CountSignal-1 do
    begin
      MoveTo(x0+j*25,y);LineTo(x0+j*25+25,y);
      y:=y0-Round((1+k*SumMultMatr[i-1,j+1])/(1/25));
      LineTo(x0+j*25+25,y);
    end;
  end;
end;
end.

RestoreUnit.pas //модуль порівняння відновленого сигналу
unit RestoreUnit;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls;

type
  TRestoreForm = class(TForm)
    Memo1: TMemo;
    Memo2: TMemo;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    GraphButton: TButton;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    procedure FormShow(Sender: TObject);
    procedure GraphButtonClick(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  RestoreForm: TRestoreForm;
  i,j: integer;
  restsignal: array of single;
implementation

Uses FirstUnit;
{$R *.dfm}

procedure TRestoreForm.FormShow(Sender: TObject);
var
  sum: single;
begin
//Виведення на екран вихідного та відновленого сигналів
  memo1.Lines.Clear;

```

```

memo2.Lines.Clear;
SetLength(restsignal, CountSignal);
for i:=Low(restsignal) to High(bazsignal) do
  restsignal[i]:=0;
for i:=0 to CountSignal-1 do
  begin
    sum:=0;
    for j:=0 to CountSignal-1 do
      begin
        sum:=sum+MultMatr[i,j]*bazsignal[j];
      end;
    restsignal[i]:=sum;
    Memo2.Lines.Add('сигнал['+IntToStr(i+1)+']='+FloatToStr(restsignal[i]));
    Memo1.Lines.Add('сигнал['+IntToStr(i+1)+']='+FloatToStr(signal[i]));
  end;
end;

procedure TRestoreForm.GraphButtonClick(Sender: TObject);
var
  x0,y0:integer; //координати початку координатних осей
  dx,dy:integer; //крок координатної сітки (у пікселях)
  h,w:integer; //висота та ширина області виведення координатної сітки
  x,y:integer;
  lx,ly:real; //мітки (оцифрування) ліній сітки по X та Y
  dlx,dly:real; //крок міток (оцифрування) ліній сітки по X та Y
  cross:integer; //лічильник неоцифрованих ліній сітки
  dcross:integer; //кількість неоцифрованих ліній між оцифрованими
begin
  //Відображення графіка
  x0:=25; y0:=450; //осі починаються в точці (25,350)
  dx:=20; dy:=20; //шар координатної сітки 40 пікселів
  dcross:=1; // помічати лінії сітки X: 1 – кожна;
  dlx:=1; //крок міток осі X
  dly:=0.1; //крок міток осі Y
  h:=200;
  w:=CountSignal*20;
  with RestoreForm.Canvas do begin
    cross:=dcross;
    MoveTo(x0,y0); LineTo(x0,y0-h); //вісь X
    MoveTo(x0,y0); LineTo(x0+w, y0); //вісь Y
    //засічки, сітка та оцифровка по осі X
    x:=x0+dx;
    lx:=dlx;
    repeat
      MoveTo(x,y0-3);LineTo(x,y0+3); //засічка
      cross:=cross-1;
      if cross = 0 then //оцифровка
        begin
          Font.Size:=9;
          TextOut(x-14,y0+5,FloatToStr(lx));
          cross:=dcross ;
        end;
      Pen.Style:=psDot;
      Pen.Width:=1;
      MoveTo(x,y0-3);LineTo(x,y0-h); //лінія сітки
      Pen.Style:=psSolid;
      lx:=lx+dlx;
      x:=x+dx;
    until (x>x0+w);
    //засічки, сітка та оцифровка по осі Y
    y:=y0-dy;
    ly:=dly;
    repeat
      MoveTo(x0-3,y);LineTo(x0+3,y); //засічка
      TextOut(x0-25,y-7,FloatToStr(ly)); //оцифровка
      Pen.Style:=psDot;
      MoveTo(x0+3,y); LineTo(x0+w,y); //лінія сітки
      Pen.Style:=psSolid;
      y:=y-dy;
      ly:=ly+dly;
    until (y<y0-h);
    Pen.style:=psSolid;
    Pen.Width:=2;
    for i:=0 to CountSignal-1 do
      begin
        Rectangle(x0+i*20,y0-trunc(restsignal[i]/(0.1/20)),x0+(i+1)*20,y0);
        Font.Size:=7;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```
        TextOut(x0+i*20,y0-trunc(restsignal[i]/(0.1/20))-
15,FloatToStrF(restsignal[i],ffGeneral,2,1));
        end;
        MoveTo(5,485); LineTo(45,485);
        Pen.Color:=clBlue;
        Pen.Width:=1;
        Pen.Style:=psDot;
        for i:=1 to CountSignal-1 do
            begin
                MoveTo(x0+(i-1)*20+10,y0-trunc(signal[i-1]/(0.1/20)));
                LineTo(x0+i*20+10,y0-trunc(signal[i]/(0.1/20)));
            end;
        MoveTo(5,505); LineTo(45,505);
        Label4.Visible:=true;
        Label5.Visible:=true;
    end;
end;

end.
```

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Факультет інформаційних технологій
Кафедра програмного забезпечення комп'ютерних систем**

ВІДГУК

Керівника
економічної
частини

Касьяненко Л.В., к.е.н., доцента каф. ПЕП та ПУ
(прізвище, ім'я, по батькові, вчене звання, посада, місце роботи)

На кваліфікаційну роботу

студента _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

курсу II групи _____
спеціальності _____

на тему _____

« ____ » _____ 2022 р.

(підпис)

ДОДАТОК В

ПЕРЕЛІК ФАЙЛІВ НА ДИСКУ

Ім'я файлу	Опис
Пояснювальні документи	
Кваліфікаційна_робота_Журавльов_Віталій_Вікторович.doc	Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи. Документ Word.
Кваліфікаційна_робота_Журавльов_Віталій_Вікторович.pdf	Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи в форматі PDF.
Програма	
Program.zip	Архів. Містить код програми і відкомпільовану програму.
Презентація	
Презентація_Журавльов_Віталій_Вікторович.ppt	Презентація кваліфікаційної роботи.