

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний економічний університет

На правах рукопису

Савка Надія Ярославівна

УДК 519.876.5: 616.2

**Методи ідентифікації інтервальних моделей
характеристик середовища моніторингу зворотного
гортанного нерва**

01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Науковий керівник
Дивак Микола Петрович
доктор технічних наук,
професор

Тернопіль – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРЕДОВИЩА МОНІТОРИНГУ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА ТА ЇХ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ.....	13
1.1. Середовище моніторингу зворотного гортанного нерва та його характеристики.....	15
1.2. Аналіз математичних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва.....	22
1.3. Обґрунтування вибору засобів математичного моделювання для моніторингу зворотного гортанного нерва	27
1.3.1. Аналіз методів ідентифікації математичних моделей за умов інтервального представлення їх вихідних характеристик.....	27
1.3.2. Аналіз математичних моделей з радіально-базисними функціями.....	31
1.4 Постановка задач дисертаційного дослідження.....	35
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	38
РОЗДІЛ 2 ІНТЕРВАЛЬНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕДОВИЩА МОНІТОРИНГУ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА.....	40
2.1. Організація експерименту для формування вхідних даних для задачі моніторингу зворотного гортанного.....	41
2.2. Інтервальна модель первинних характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва	47
2.3 Алгоритм формування характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва в інтервальному вигляді.....	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	62

РОЗДІЛ 3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ СТРУКТУРНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ У ВИГЛЯДІ РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИХ ФУНКЦІЙ.....	63
3.1. Метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями.....	64
3.2. Алгоритм ідентифікації математичних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій на основі аналізу інтервальних даних.....	71
3.3. Програмне забезпечення для реалізації алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями.....	79
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	92
РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИМИ ФУНКЦІЯМИ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ МОНІТОРИНГУ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА.....	93
4.1. Удосконалена інформаційна технологія для моніторингу зворотного гортанного нерва.....	94
4.2. Інтервальна модель з радіально-базисними функціями в задачі моніторингу зворотного гортанного нерва.....	103
4.3. Експериментальні дослідження ефективності інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва.....	112
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	119
ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	123
ДОДАТКИ.....	140

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗГН	зворотний гортанний нерв
РБФ	радіально-базисні функції
ІС	інформаційний сигнал
ІСЛАР	інтервальна система лінійних алгебричних рівнянь

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних технічних засобах оперативної хірургії на щитоподібній залозі з метою моніторингу зворотного гортанного нерва (ЗГН) використовують програмно реалізовані компоненти на основі математичних моделей характеристик середовища хірургічного втручання. Зазначені програмні компоненти є складовими універсальних нейромоніторів, які описано у працях Riddell V, Galivan J, Basmajian J, Davis WE.

Останнім часом для моніторингу ЗГН також використовують спеціалізовані засоби, функціонування яких ґрунтується на подразненні тканин хірургічної рани змінним струмом, оцінюванні результатів подразнення за інтенсивністю скорочення голосових зв'язок і на цій основі встановлення місця розміщення ЗГН. У зазначеному випадку математичними моделями характеристик середовища хірургічного втручання є спектральні та автокореляційні характеристики звукових сигналів, що опосередковано відображають скорочення голосових зв'язок внаслідок подразнення тканин хірургічної рани. Однак такий підхід дає можливість розв'язати тільки задачу класифікації тканин хірургічної рани. В той же час для скорочення часу моніторингу ЗГН в цілому важливим є визначення відстані від точок подразнення тканин до ЗГН.

За цих умов важливою є розробка математичних моделей середовища хірургічного втручання, спільних для групи пацієнтів, що відображали б місце розміщення ЗГН залежно від точок подразнення тканин хірургічної рани. Унаслідок специфіки гортані кожного пацієнта, вибірка експериментальних даних для структурної та параметричної ідентифікації такої моделі є неоднорідною, тому їх доцільно представити в інтервальному вигляді.

Існуючі методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних, зокрема такі, як

редукції, «нaroщування» структури математичної моделі, методи на основі генетичних алгоритмів чи поведінкових моделей колонії медоносних бджіл, які описано в у працях Karaboga D., Sean L., Дивака М.П., Порплиці Н.П., відзначаються високою обчислювальною складністю реалізації і до того ж формують складні структури моделей, які не придатні для моделювання характеристик середовища хірургічного втручання і моніторингу ЗГН.

У працях Nelles O., Park J., Sunil E., Бодянського Є.В. розглянуто достатньо прості структури математичних моделей з радіально-базисними функціями (РБФ), що побудовані за аналогією до штучних нейронних мереж. У процесі структурної ідентифікації таких моделей потрібно здійснити лише налаштування параметрів рецепторного поля радіально-базисних функцій. Однак задачі ідентифікації для цього класу моделей із використанням інтервальних даних не досліджено.

Зважаючи на вищезазначене, актуальною є науково-прикладна задача розробки методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей із радіально-базисними функціями в умовах інтервальної невизначеності та застосування цих моделей для моделювання характеристик середовища моніторингу ЗГН. Розв'язок зазначеної науково-прикладної задачі забезпечить зниження ризику пошкодження ЗГН і одночасно зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі за рахунок скорочення часу моніторингу ЗГН.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до координаційного плану науково-дослідних робіт і науково-технічних програм Міністерства освіти і науки України, зокрема в межах пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки «Інформаційні та комунікаційні технології», визначеного Законом України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» (№ 2623-III від 11.07.2001 р. в редакції від 16.01.2016 р.) та пов'язана із науково-дослідною роботою Тернопільського національного економічного

університету. Основні результати дисертаційної роботи отримано в межах виконання таких тем:

- держбюджетна прикладна розробка “Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотнього гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі” (номер державної реєстрації 0112U000078), де автором розроблено інтервальні моделі (ІМ) характеристик середовища хірургічного втручання для моніторингу ЗГН;

- комплексне держбюджетне прикладне дослідження “Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об’єктів” (номер державної реєстрації 0114U000569), у якому автором розроблено методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями в умовах інтервальної невизначеності;

- кафедральна науково-дослідна робота “Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних” (державний реєстраційний номер 0111U010356), у якій автором розроблено алгоритмічне забезпечення структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей на основі радіально-базисних функцій та наведено приклади застосування цих моделей для задач моніторингу ЗГН.

Усі вищезгадані роботи виконувалися за безпосередньої участі автора.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є зниження ризику пошкодження ЗГН і одночасно скорочення часу проведення операції на щитоподібній залозі шляхом розробки методів, алгоритмів та програмного забезпечення для ідентифікації математичних моделей з радіально-базисними функціями в умовах інтервальної невизначеності та застосування цих моделей для моделювання характеристик середовища моніторингу ЗГН.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі основні задачі:

- провести аналіз існуючих математичних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва під час проведення операції на щитоподібній залозі;
- проаналізувати методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних;
- розробити методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей з радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних;
- розробити інтервальні моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН;
- розробити програмний комплекс для реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей із радіально-базисними функціями;
- удосконалити інформаційну технологію виявлення ЗГН із застосуванням розроблених інтервальних моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу ЗГН на основі аналізу електрофізіологічних властивостей тканин хірургічної рани щитоподібної залози.

Предмет дослідження – методи ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій, що описують характеристики середовища хірургічного втручання для моніторингу зворотного гортанного нерва.

Методи дослідження. Дослідження, виконані під час роботи ґрунтуються на теорії ідентифікації моделей систем, методах теоретико-множинного (інтервального) підходу, які є основними для досягнення мети дисертаційної роботи. Для розробки методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей на основі радіально-базисних функцій використано методи теорії ідентифікації, кластерного та інтервального аналізу даних і лінійної алгебри. Для ідентифікації математичних моделей

характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва використано методи інтервального аналізу та лінійного програмування. Для дослідження ефективності розроблених методів структурної та параметричної ідентифікації застосовано комп'ютерне моделювання. Для проектування програмного комплексу реалізації алгоритмів ідентифікації інтервальних моделей із радіально-базисними функціями використано структурно-функціональний підхід, а для його реалізації – компілятор Matlab.

Наукова новизна одержаних результатів. У межах дисертаційної роботи *вперше*:

- розроблено метод ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій, в якому поєднано процедури формування центрів рецепторного поля радіально-базисних функцій та аналізу інтервальних даних, що забезпечує одночасне налаштування структури моделі та одержання гарантованих оцінок її параметрів;
- розроблено інтервальну модель характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва на основі радіально-базисних функцій, яка, на відміну від існуючих, забезпечує оцінку відстані від точки подразнення до зворотного гортанного нерва та уможливорює одночасне зниження ризику пошкодження зворотного гортанного нерва та зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі;
- за допомогою субтрактивного алгоритму кластеризації та аналізу інтервальних даних розроблено інтервальну модель характеристик середовища моніторингу ЗГН за умов неоднорідності вибірки даних у вигляді множини первинних ознак тканин хірургічної рани та відповідних інтервальних оцінок відстаней від точки подразнення до ЗГН, що, на відміну від існуючих, забезпечує побудову єдиної математичної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи пацієнтів.
- *Удосконалено* інформаційну технологію виявлення зворотного гортанного нерва, яка, на відміну від існуючих, ґрунтується на математичних

моделях з радіально-базисними функціями та забезпечує одночасне зниження ризику пошкодження ЗГН та зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розроблених методів ідентифікації інтервальних моделей характеристик середовища хірургічного втручання, в основі яких радіально-базисні функції, з використанням компілятора Matlab розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення.

Побудовані інтервальні моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН реалізовано на мові C# у вигляді програмного модуля обчислення інтервальної оцінки відстані від точки подразнення на хірургічній рані до ЗГН і використано в удосконаленій технології для виявлення ЗГН під час операції на щитоподібній залозі.

Розроблену інтервальну модель характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва та удосконалену інформаційну технологію впроваджено у Тернопільській міській комунальній лікарні швидкої допомоги для зниження ризику пошкодження ЗГН та одночасного скорочення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

Розроблені методи, алгоритми та програмне забезпечення, в основі яких математичні моделі з радіально-базисними функціями, впроваджено в Тернопільському національному економічному університеті на кафедрі комп'ютерних наук для виконання держбюджетних науково-дослідних робіт, створення методичного та програмного забезпечення для викладання дисциплін “Інтервальні обчислення” та “Інтелектуальний аналіз даних”. Використання результатів дисертаційного дослідження підтверджено відповідними актами про впровадження.

Особистий внесок здобувача. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі результати: [143] – розроблено математичну модель на основі радіально-базисних функцій, яка уможливило класифікацію тканин хірургічної рани; [76]– розроблено метод ідентифікації

інтервальних моделей з радіально-базисними функціями, який поєднує процедури визначення структури моделі вказаного типу та параметрів на основі аналізу інтервальних даних; [28] – розроблено метод параметричної ідентифікації математичних моделей з радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних; [83] – проаналізовано особливості математичних моделей із РБФ, охарактеризовано основні їх переваги, сформульовано задачі досліджень; [86]– розроблено алгоритм ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій; [145]– розроблено алгоритм ідентифікації параметрів математичних моделей радіального типу в межах інтервального підходу; [144] - розроблено алгоритм класифікації тканин середовища хірургічного втручання на основі характеристик сигналів – реакції на подразнення тканин хірургічної рани різних пацієнтів; [115] – розроблено алгоритм визначення параметрів інтервальної моделі на основі радіально-базисних функцій; [116] – проаналізовано задачі, розв’язок яких вимагає побудови математичних моделей з радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких міжнародних науково-практичних конференціях та всеукраїнських школах-семінарах: XI, XII Міжнародній науково-технічній конференції “Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці CADSM’2011, 2013” (Львів – Поляна, 2011, 2013); XI, XII Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії: TCSET’ 2012, 2014 (Львів – Славсько, 2012, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції «Найкращі актуальні дослідження в сучасній науці» (Дубаї, 2015); I Міжнародній науково-технічній конференції “Обчислювальний інтелект” (Черкаси, 2011); III Міжнародній науково-практичній конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці.

2013)I, II, III IV Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології», 2011, 2012, 2013, 2014 (ТНЕУ, Тернопіль, 2011-2014); XI Міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)” (Вінниця, 2012); VII, IX Міжнародній школі–семінарі для молодих науковців «Індуктивне моделювання: теорія і застосування» (с. Жукин, Київська обл., 2014, 2016); на наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2010-2016).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 21 друкованій праці, загальним обсягом 95 сторінок, зокрема 1 стаття в іноземному періодичному науковому виданні [143], 6 статей у фахових наукових виданнях України [28, 72, 76, 77, 81, 83], одна з яких входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus [72], 14 публікацій у матеріалах конференцій [71, 73, 74, 78, 79, 80, 82, 84, 85, 86, 115, 116, 144, 145], 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus [116,145].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 152 найменувань та п'ятьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 146 сторінок машинописного тексту, з них 120 сторінок основного тексту. Робота містить 48 рисунків і 10 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРЕДОВИЩА МОНІТОРИНГУ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА ТА ЇХ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ

Останнім часом в Україні особливу увагу привертають захворювання щитоподібної залози. Це насамперед пов'язано з тим, що саме щитоподібна залоза активно реагує на стан довкілля із подальшим виникненням тих чи інших її захворювань. З іншого боку у сучасних умовах населення стикається із несприятливим впливом навколишнього середовища, оскільки світовий досвід у боротьбі із йодним дефіцитом в Україні не впроваджено.

В організмі людини щитовидна залоза є однією з найважливіших залоз внутрішньої секреції. Наявність і відповідне віковим нормам функціонування цього органу сприяє нормальному і злагодженому функціонуванню людського організму. Щитоподібна залоза відповідає за зберігання в організмі людини йоду і за вироблення йодовмісних гормонів.

Вузол щитоподібної залози – це пухлиноподібне утворення в залозі, що діагностується пальпаторно чи при ультразвуковому дослідженні. У формі такого вузла може бути кістка або тканина щитоподібної залози, змінена в результаті хронічного запального процесу. Згідно із статистичними даними, випадків патології щитоподібної залози в Україні за останній рік суттєво збільшилося, із них 3% – рак [92].

Більшість методів лікування таких захворювань зводиться до хірургічного втручання. Операції на щитоподібній залозі в Україні відносяться до технічно складних хірургічних втручань, які виконуються близько 10-12 тис. за рік й пов'язані з ризиком виникнення післяопераційних ускладнень [105].

Основною проблемою при проведенні операції на щитоподібній залозі є моніторинг ЗГН, пошкодження якого призводить до негативних наслідків, пов'язаних із функціонуванням дихальної системи людини, зокрема до втрати пацієнтом голосу. Ідентифікація ЗГН на хірургічній рані вимагає

застосування технічних засобів та засобів математичного моделювання. Математичною моделлю моніторингу зворотного гортанного нерва на хірургічній рані є алгебричне рівняння, яке описує взаємозв'язок між первинними характеристиками середовища хірургічного втручання під час проведення операції на щитовидній залозі.

Останнім часом для моніторингу ЗГН використовують спеціалізовані засоби, функціонування яких ґрунтується на подразненні тканин хірургічної рани змінним струмом, оцінюванні результатів подразнення за інтенсивністю скорочення голосових зв'язок і на цій основі встановлення місця розміщення ЗГН. У зазначеному випадку математичними моделями характеристик середовища хірургічного втручання є спектральні та автокореляційні характеристики звукових сигналів, що опосередковано відображають скорочення голосових зв'язок внаслідок подразнення тканин хірургічної рани.

Зазначений підхід дає можливість розв'язати тільки задачу класифікації тканин хірургічної рани. В той же час згідно із результатами досліджень для скорочення часу моніторингу ЗГН в цілому важливим є визначення відстані від точок подразнення тканин хірургічної рани до ЗГН. Зважаючи на анатомічні особливості будови щитоподібної залози та індивідуальні особливості гортані кожного пацієнта первинні характеристики середовища моніторингу ЗГН не є точними. Аналіз існуючих методів ідентифікації математичних моделей показав, що задача їх структурної ідентифікації вимагає складних обчислювальних процедур за рахунок перебору структур моделей із різними структурними елементами.

За таких умов впливає, що для задачі моніторингу ЗГН нерва на хірургічній рані найдоцільніше застосовувати математичні моделі із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій. Такі моделі здатні моделювати та прогнозувати нестационарні процеси, а задача їх структурної ідентифікації суттєво спрощується за рахунок РБФ.

Матеріали, що висвітлені у першому розділі та обґрунтовують постановку задач дисертаційного дослідження, опубліковані у працях [71, 73, 75, 80, 83, 116, 145].

1.1. Середовище моніторингу зворотного гортанного нерва та його характеристики

Операції на щитоподібній залозі належать до складних хірургічних втручань, що зумовлено анатомічним взаємовідношенням зобнозміненої щитоподібної залози із органами шиї, де проходять численні кровоносні та лімфатичні судини, нерви. В той же час сама щитоподібна залоза має складну анатомічну будову.

Стандартними ситуаціями в хірургії щитоподібної залози є збереження неушкодженими нервів гортані і прищитоподібних залоз, проте сьогодні вони залишаються ахіллесовою п'ятою хірургії цього органа [105]. Ризик пошкодження зворотного гортанного нерва особливо високий при повторних операціях на щитоподібній залозі і становить близько 62 % [92]. Досить часто пошкодження ЗГН відбувається через особливості анатомічних варіантів розміщення щитоподібних залоз на шиї пацієнта, нераціональний вибір місця початку пошуку, економії часу на моніторинг, незначний досвід хірурга. Профілактика пошкоджень зворотних гортанних нервів в основному полягає в суворому дотриманні методики субфасціальної резекції щитоподібної залози, проте успішність проведення операції у великій мірі залежить від досвіду хірурга [60].

Моніторинг зворотнього гортанного нерва, тобто правильне визначення його місця розміщення суттєво впливає на час проведення операції на щитоподібній залозі. Щоб уникнути ускладнень і зменшити час проведення операції, хірургу доцільно володіти інформацією про відстань від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН. В такому випадку зникає

проблема нераціональності місця пошуку зворотного гортанного нерва й хірург може впевненіше робити розтин тканин операційної рани.

Розглянемо коротко анатомічні особливості будови щитоподібної залози. Непарна залоза внутрішньої секреції розташована в передній області шиї по обидва боки трахеї, нижче щитовидного хряща, у зоні, багатій на важливі анатомічні утворення – судини, нерви і т.п. Вона має підковоподібну форму, складається з двох неоднакових за величиною бічних частин, права з яких більша. Ліва і права частини з'єднані перешийком. При відсутності перешийка частини щільно прилягають одна до одної. На рисунку 1.1 проілюстровано анатомію щитоподібної залози.

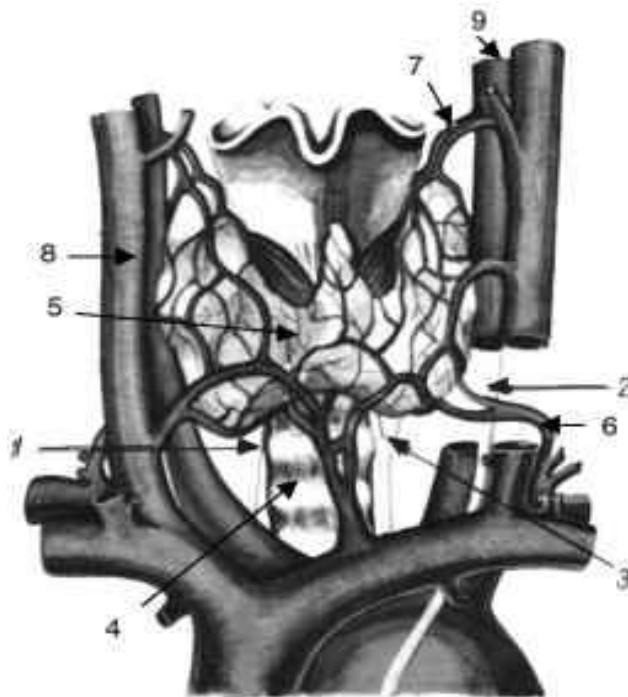


Рис. 1.1. Анатомія щитоподібної залози [108]

Згідно рисунка 1.1: 1 - правий зворотний нерв; 2 - блукаючий нерв; 3 - лівий зворотний нерв; 4 - трахея; 5 - щитоподібна залоза; 6 - нижня щитоподібна артерія; 7 - верхня щитоподібна артерія; 8 - внутрішня яремна вена; 9 - загальна сонна артерія [108].

Зворотний гортанний нерв - це одна з гілочок блукаючого нерва, що постачає рухові та чутливі волокна до гортані та інервує голосові зв'язки. Нерв називається зворотним внаслідок специфічного анатомічного

розгалуження: гілочка зворотного нерва відходить від блукаючого нерва на рівні нижньої третини трахеї в безпосередній близькості до підвішуючої зв'язки щитоподібної залози, звідки піднімається назад до гортані. Зворотні (нижні гортанні) нерви проходять біля задньої поверхні щитоподібної залози, найчастіше безпосередньо біля її капсули, та прямують з грудної клітки до голосових складок. Товщина нервів 2-5 мм, нерідко нерв проходить не одним, а декількома тонкими стовбурами.

Зворотні гортанні нерви проходять у кожного пацієнта по-різному [61], в цьому й полягає складність їх моніторингу під час операції на щитоподібній залозі. Зазвичай, лівий гортанний нерв відходить від блукаючого нерва на рівні його перетину з дугою аорти, огинає дугу аорти ззаду і піднімається спереду від неї в борозні між трахеєю і виступаючим з-під неї стравоходом. Правий гортанний нерв відходить від блукаючого нерва на рівні його перетину з підключичною артерією, огинає її ззаду і піднімається спереду від неї по боковій поверхні трахеї. Далі нерви кожен зі свого боку перетинаються з нижньою щитоподібною артерією і підступають до гортані як нижні гортанні нерви. Може варіюватися кількість і діаметр гілок ЗГН, тому хірург, що оперує, повинен добре володіти інформацією про можливі анатомічні способи положення нервів, а також мати досвід їхньої ідентифікації під час операції на щитоподібній залозі з метою уникнення пошкодження.

Описані вище анатомічні особливості щитоподібної залози зумовлюють високу складність операції на цьому органі. Моніторинг зворотного гортанного нерва на хірургічній рані є складним процесом і включає процедуру його виявлення та оцінки розташування на області хірургічного втручання. Ще в 1938 році відомий американський хірург F. H. Lahey довів, що шляхом систематичного пошуку, візуалізації та виділення гортанних нервів можна зменшити рівень їх пошкодження та частоту парезів гортані до 0,3% [95].

Виявлення гортанного нерва під контролем ока на протязі – це найпростіший метод моніторингу, який потребує високого рівня майстерності та досвіду хірурга [68]. Як допоміжний метод для ідентифікації ЗГН застосовують забарвлення нервової тканини розчином метиленового синього, ґрунтуючись на тропності нервової тканини до зазначеного барвника. Проте такий метод не підтверджує цілісності ЗГН та вимагає попереднього хірургічного розтину для введення розчину барвника [68, 125, 149].

Зважаючи на вищезазначене, моніторинг ЗГН на хірургічній рані неможливий без застосування технічних засобів. Розглянемо особливості існуючих технічних засобів виявлення ЗГН на хірургічній рані.

На сьогодні існує чимало технічних засобів та способів виявлення ЗГН, що ґрунтуються на застосуванні змінного струму певної частоти [68, 111, 131]. Опосередкованим способом верифікації гортанних нервів є реєстрація електромагнітного поля скорочених м'язів гортані у відповідь на електростимуляцію [68, 114, 138, 141]. Однак застосування зазначеного методу вимагає спеціального обладнання й можливе лише після закінчення певного етапу проведення операції, що характеризує його низьку точність.

Найпростіший метод нейромоніторингу – інтраопераційна пальпація гортані із стимуляцією ЗГН. При цьому пальцем відчуваються скорочення м'язів глотки після подразнення зворотного гортанного нерва. На основі електро-функціонального нейромоніторингу гортанних нервів електричний струм подразнює голосові зв'язки та м'язи гортані [60, 134]. Цей метод достатньо чутливий і ефективний особливо під час повторної операції на щитоподібній залозі, проте його застосування обмежене випадками, коли не можливо дослідити гортань пацієнта під час операції.

Інший спосіб моніторингу ЗГН ґрунтується на застосуванні балона, тиск в якому змінюється при скороченні зв'язок, що реєструється спеціальним пристроєм [60]. Зазначений метод малопоширений, оскільки вимагає застосування спеціального складного обладнання. Також показники

тиску часто неточні, оскільки залежать від положення балона, особливостей стінок гортані пацієнта.

У 1962 році Басмаян (Basmajian) розробив метод моніторингу ЗГН за допомогою внутрішньом'язових електродів [124, 147]. Такий метод характеризується суттєвими недоліками, зокрема, складністю точного розміщення електродів, можливістю їх зсуву, ризиком пошкодження гортані.

Щоб усунути недоліки вищерозглянутих методик, у 1979 році Девіс (Devis) вперше застосував метод неінвазивного моніторингу ЗГН. Суть цього методу полягає у контролі за ЗГН під час операції шляхом реєстрації скорочення голосових зв'язок, що виникають у відповідь на спеціальні електроди, розміщені на ендотрахеальній трубці [20]. Проте скорочення голосових зв'язок значно ускладнюється внаслідок проходження ендотрахеальної трубки між ними. Зазначений метод технічно складний і його застосування для ідентифікації ЗГН вимагає залучення додаткового медичного персоналу під час операції на щитоподібній залозі.

У працях [93, 112] описано пристрої – універсальні хірургічні нейромонітори. Нейромонітори забезпечують чітку інтерпретацію м'язової активності, яка реєструється за допомогою голчастих електродів, розташованих в релевантних м'язах, що контролюються нервами, моніторинг яких і здійснює нейромонітор. М'язова стимуляція проводиться лише тоді, коли нервово-м'язова блокада відсутня чи обмежена. Згідно із цим, нейромонітори не можна застосовувати, якщо пацієнт паралізований. Як відомо, м'язи, які контролює ЗГН, знаходяться всередині гортанні, тому для ідентифікації ЗГН нейромонітори застосовувати складно.

В результаті аналізу вищеописаних засобів моніторингу ЗГН серед інших тканин хірургічної рани впливає, що всі засоби базуються на подразненні постійним електричним струмом середовища хірургічного втручання і оцінюванні результатів цього подразнення на голосових зв'язках. Якщо точка подразнення належить гортанному нерву, то відбувається скорочення голосових зв'язок, а якщо подразнення здійснено на м'язовій

тканині, то реакція на це подразнення буде незначною. Проте охарактеризовані технічні засоби виявлення ЗГН не містять засобів візуалізації розміщення гортанного нерва, а також встановлення сенсорів, що фіксують реакцію голосових зв'язок на сигнал стимуляції ЗГН вимагає переведення пацієнта в 3 стадію анестезії, яка є небезпечною для його життя.

У праці [63] описано пристрій для ідентифікації ЗГН на хірургічній рані, який побудовано з метою підвищення діагностичних можливостей, точності ідентифікації та візуалізації місця розміщення ЗГН. Пристрій складається із генератора змінного струму, ширококутового мікрофона, як сенсора звукових коливань, перетворювача електричних сигналів, який функціонально сполучений із блоком відображення і опрацювання інформації. Такий пристрій забезпечує вищий рівень ефективності та діагностичної інформативності щодо ідентифікації ЗГН під час операцій на щитоподібній залозі. Розглянутий пристрій сьогодні використовується при виконанні оперативних втручань в області шиї у Тернопільській міській лікарні швидкої допомоги.

Спосіб ідентифікації зворотного гортанного нерва під час операції на щитоподібній залозі, що описаний авторами у праці [64], ґрунтується на амплітуді інформаційних сигналів (ІС) пацієнтів. Інформаційний сигнал – результат подразнення області хірургічного втручання, що характеризує наближеність до зворотного гортанного нерва і вказує чи точка подразнення хірургічної рани належить ЗГН чи м'язовій тканині.

Структурну схему одержання інформаційного сигналу пацієнта для ідентифікації ЗГН під час проведення операції на щитоподібній залозі зображено на рисунку 1.2.

У дихальну трубку – 1, що розміщена у гортані пацієнта – 2, встановлено сенсор звукових коливань – 3, розміщений над голосовими зв'язками – 4. За допомогою щупа – 5 зондують тканини у хірургічній рані – 6. Щуп – 5 з'єднаний з генератором змінного струму – 7 силою від 0,5 – 2 мА та фіксованою частотою. Стимуляція зворотного гортанного нерва

призводить до скорочення м'язів гортані та натягу голосових зв'язок. Потік повітря, що проходить через дихальну трубку -1, зумовлює звукові коливання, що фіксуються звуковим сенсором – 3, перетворюються у електричний сигнал, підсилюються підсилювачем – 8 та подаються на аудіовхід звукової картки комп'ютера, де відбувається їх опрацювання і у результаті на екрані монітору виводиться інформаційний сигнал – 9.

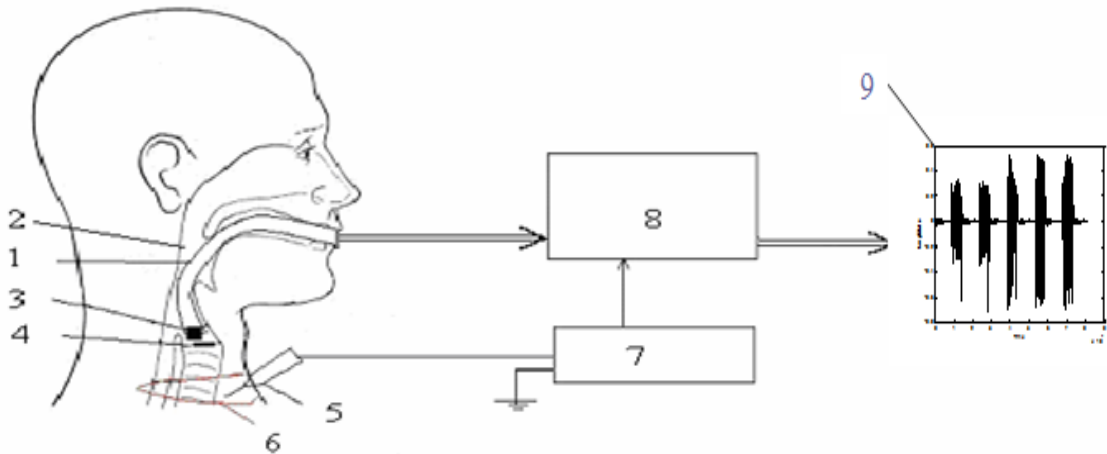


Рис. 1.2. Схема отримання ІС для ідентифікації ЗГН [64]

На рисунку 1.3. проілюстровано приклад одержаного ІС – реакції на подразнення тканин хірургічного втручання. По осі абсцис, відкладено час, який вимірюється у 1 секунді поділений на частоту дискретизації (44100 Гц), тобто кількість відліків; по осі ординат – амплітуду сигналу.

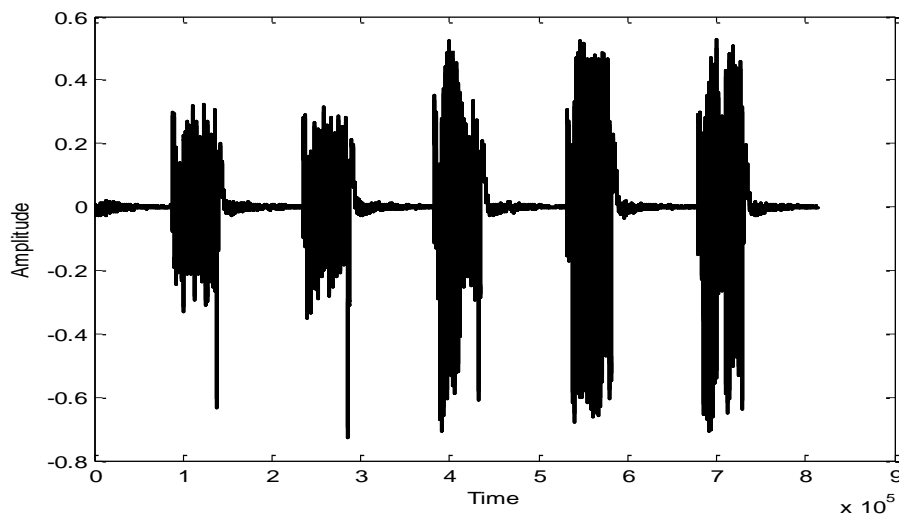


Рис. 1.3. Інформаційний сигнал – реакція на подразнення тканин хірургічної рани

Варто зазначити, що первинними характеристиками типу тканини хірургічні рани крім амплітуди інформаційного сигналу також є автокореляційні та спектральні характеристики ІС.

Зважаючи на це, доцільно детально розглянути особливості існуючих математичних моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН у наступному підрозділі.

1.2. Аналіз математичних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва

Існуючі математичні моделі моніторингу зворотного гортанного нерва серед інших тканин хірургічної рани базуються на опрацюванні ІС пацієнтів. При цьому опрацювання інформаційних сигналів проводять в три етапи:

- зчитування та запис сигналу;
- фільтрація сигналу на частоті подразнення;
- виділення інформативних характеристик сигналу.

Для опрацювання ІС застосовують відповідні засоби, що детально описані у праці [64]. На рисунку 1.4 проілюстровано структурну схему засобів опрацювання інформаційних сигналів.

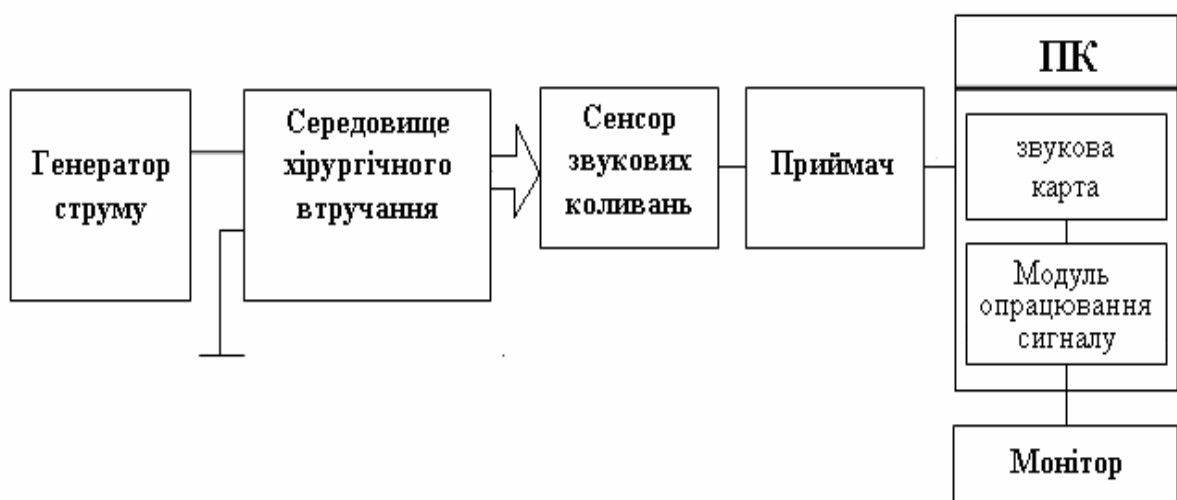


Рис. 1.4. Структурна схема засобів опрацювання ІС пацієнтів [64]

У праці [41] описано математичну модель для ідентифікації ЗГН, в основі якої амплітуда ІС – реакції на подразнення тканин середовища хірургічного втручання. Відомо, що максимальна амплітуда інформаційного сигналу – реакції на подразнення ЗГН приблизно у 5,35 разів вища, ніж максимальна амплітуда ІС, отриманого внаслідок подразнення м'язової тканини.

При цьому модель розподілу максимальної амплітуди на хірургічній рані, яку описано у праці [41] має вигляд:

$$\hat{U}_{\max}(x, y) = b_0 + b_1 \cdot \sin^2\left(x \cdot y \cdot \frac{\pi}{36}\right) + b_2 \cdot y + b_3 \cdot y^2.$$

Зазначена модель відображає залежність максимальної амплітуди ІС від координат на хірургічній рані й уможлиблює одержати допускову область хірургічного втручання.

Проте, слід зазначити, що амплітуда ІС достатньо велика при подразненні ЗГН і різко зменшується при незначному віддаленні від нього, що суттєво знижує точність зазначеної моделі для моніторингу ЗГН та збільшує ризик його пошкодження. В той же час із вищезазначеного випливає, що характеристики ІС суттєвим чином залежать від відстані розміщення щупа на хірургічній рані до ЗГН.

Інший метод моніторингу гортанного нерва ґрунтується на аналізі спектральних характеристик інформаційних сигналів [121]. Спектр сигналу, як відомо, одержують при розкладі сигналу у ряд Фур'є [52]:

$$|G_{u_i}(f)|^2 = \Phi[B_{u_i}(\tau)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_{u_i}(\tau) \cdot \cos(2\pi f\tau) d\tau.$$

На рисунку 1.5 зображено спектри фрагментів інформаційного сигналу, що відповідають реакції на подразнення м'язової та нервової тканин.

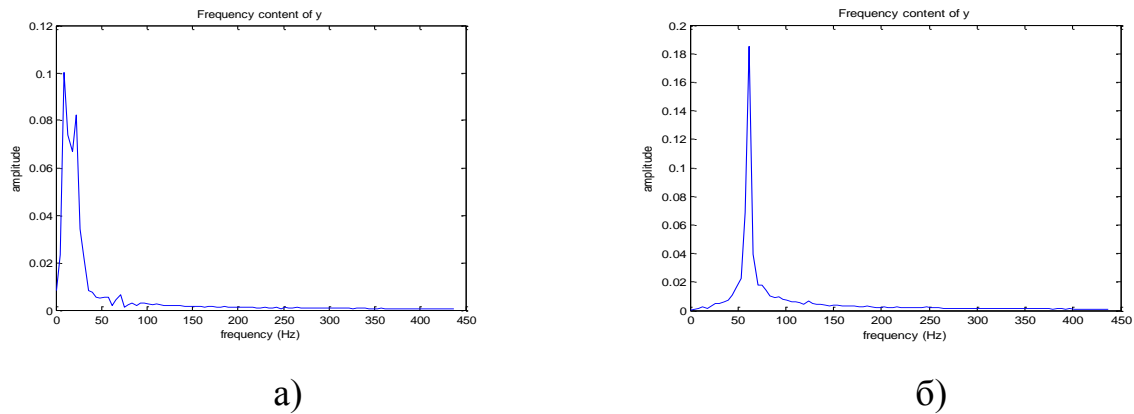


Рис. 1.5. Спектри фрагментів ІС, що відповідають реакції на подразнення а) м'язової тканини, б) зворотного гортанного нерва [121]

Спектри ІС пацієнтів, що характеризують різні типи тканин середовища хірургічного втручання відрізняються, що й підтверджено на рисунку 1.5, проте через особливості гортані пацієнтів спектральні характеристики ІС часто є неточними, а також залежать від відстані точок подразнення хірургічної рани до ЗГН. В зв'язку із цим, моніторинг ЗГН в процесі проведення операції на щитоподібній залозі із застосуванням спектральних характеристик ІС суттєво ускладнюється, а це збільшує час проведення операції на щитоподібній залозі.

У праці [119] розглянуто метод моніторингу ЗГН на області хірургічного втручання, що базується на автокореляційній функції інформаційних сигналів пацієнта. Автокореляційна функція характеризує ступінь зв'язку (кореляції) між сигналом $u(t)$ та зсунутою в часі його копією $u(t-\tau)$, де τ – величина часового зсуву сигналу:

$$B_i(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u_i(t) \cdot u_i(t - \tau) dt, \quad i=1, \dots, m,$$

де m – кількість фрагментів інформаційного сигналу.

На рисунку 1.6 наведено графіки автокореляційних функцій інформаційних сигналів пацієнтів, які характеризують реакцію на подразнення а) м'язової тканини, б) зворотного гортанного нерва.

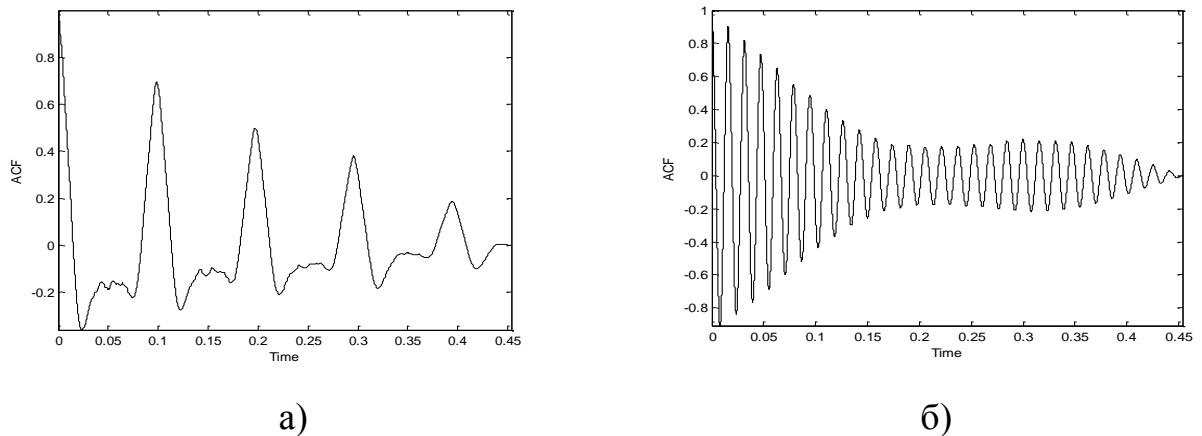


Рис. 1.6. Автокореляційні функції ІС $u(t)$ – реакції на подразнення а) м'язової тканини, б) зворотного гортанного нерва [119]

При цьому встановлено, що частини інформаційного сигналу $u(t)$, які відповідають за реакцію на подразнення зворотного гортанного нерва, мають подібну структуру (вигляд) автокореляційної функції і суттєво відрізняються від характеру автокореляційної функції на м'язовій тканині, що й проілюстровано на рисунку 1.6. Проте особливості гортані кожного пацієнта є індивідуальними, а це, в свою чергу, впливає на точність ідентифікації ЗГН за автокореляційними характеристиками інформаційного сигналу й збільшує ризик його пошкодження.

Особливості моніторингу зворотного гортанного нерва з поміж тканин хірургічної рани, що базується на енергії інформаційних сигналів, розглянуто авторами у праці [29]. Метод передбачає сегментацію інформаційних сигналів пацієнтів та оцінку енергії сегментів ІС:

$$E_i = \frac{1}{\pi} \int_{f_1}^{f_2} |\dot{G}_i(f)|^2 df, \quad i=1, \dots, m.$$

Такий метод забезпечує класифікацію тканин хірургічної рани із високою точністю. Зважаючи на це, у праці [62] авторами розроблено інформаційну технологію для виявлення зворотнього гортанного нерва, яка базується на інтервальній оцінці енергії інформаційного сигналу у точці

подразнення, а її застосування призводить до безпомилкової класифікації тканин середовища хірургічного втручання.

В той же час в процесі досліджень встановлено, що характеристики інформаційних сигналів суттєво залежать від відстані активного електрода на області хірургічного втручання до зворотного гортанного нерва [68]. Досвідчений хірург із застосуванням стерильної сітки, розміщеної на хірургічній рані, може визначити відстань від точки подразнення до ЗГН у деякому інтервалі (8-10 мм, 4-6 мм, 1-3 мм) [68]. Встановлення місця розміщення ЗГН на хірургічній рані знижує час проведення операції на щитоподібній залозі.

Зважаючи на вищесказане, зниження ризику пошкодження зворотного гортанного нерва пов'язане не стільки із його ідентифікацією, а й із постійним контролем відстані від точки подразнення тканин хірургічної рани до ЗГН, яка є важливою інтегрованою характеристикою середовища хірургічного втручання. У праці [118] авторами запропоновано інтервальну модель для ідентифікації відстані до зворотного гортанного нерва під час операції на щитоподібній залозі:

$$\hat{d}(U_{\max}) = b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot U_{\max}^2}$$

Така модель описує залежність відстані до ЗГН на хірургічній рані від максимальної амплітуди інформаційного сигналу. Проте, як зазначено вище, амплітуда інформаційного сигналу не є повним індикатором тканин хірургічної рани, що знижує точність прогнозування розробленої моделі. Разом з тим суттєвим недоліком запропоновані моделі є одержання різних інтервальних моделей в залежності від пацієнтів, що є неприйнятним для задачі моніторингу зворотного гортанного нерва.

Таким чином, із аналізу існуючих математичних моделей моніторингу ЗГН на основі опрацювання ІС важливою є розробка математичних моделей характеристик середовища хірургічного втручання, спільних для групи

пацієнтів, що відображали б місце розміщення ЗГН залежно від точок подразнення тканин хірургічної рани. Це уможливить знизити ризик пошкодження ЗГН та зменшити час проведення операції на щитоподібній залозі за рахунок зменшення часу на моніторинг ЗГН.

Унаслідок специфіки гортані кожного пацієнта вибірка експериментальних даних для структурної та параметричної ідентифікації такої моделі є неоднорідною. Таку невизначеність доцільно описати деяким інтервалом, а моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН представити в інтервальному вигляді.

1.3. Обґрунтування вибору засобів математичного моделювання для моніторингу зворотного гортанного нерва

Із підсумків підрозділу 1.2 випливає, що моніторинг ЗГН на хірургічній рані включає не лише встановлення типу тканини хірургічної рани, а й у визначенні відстані від точки подразнення до ЗГН, що забезпечить зниження ризику пошкодження ЗГН та одночасне зменшення часу на моніторинг ЗГН при проведенні операції на щитоподібній залозі. Це вимагає застосування такого математичного апарату, який би за умов неоднорідної вибірки даних уможливив не тільки встановити тип тканини хірургічної рани, а й оцінити відстань від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН. Побудова будь-яких математичних моделей вимагає застосування методів ідентифікації з врахуванням специфіки поставленої задачі.

1.3.1. Аналіз методів ідентифікації математичних моделей за умов інтервального представлення їх вихідних характеристик

Розглянемо задачу ідентифікації математичної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН в процесі операції на щитоподібній залозі у вигляді лінійно-параметричного рівняння:

$$y = \vec{f}^T(\vec{x}) \cdot \vec{b}, \quad (1.1)$$

де $\vec{x} \in R^n$ – вектор характеристик тканин хірургічної рани;

$\vec{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$ – вектор невідомих параметрів;

$\vec{f}^T(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), \dots, f_m(\vec{x}))^T$ вектор невідомих базисних функцій.

y – відстань від точки подразнення до зворотного гортанного нерва.

Результати експериментальних досліджень представляємо у вигляді вектора вхідних характеристик тканин хірургічної рани і відповідних інтервальних значень відстані від точки подразнення до зворотного гортанного нерва:

$$\vec{x} = (x_{i_1}, \dots, x_{i_n}); [y_i^-, y_i^+]. \quad (1.2)$$

Задача ідентифікації математичної моделі моніторингу ЗГН означає, що невідомими є і структура і параметри моделі. Вектор оцінок параметрів \vec{b} та базисних функцій $\vec{f}^T(x)$ отримуємо, зазвичай, за умов точності математичної моделі моніторингу зворотного гортанного нерва у визначеному інтервалі відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН. При цьому задача параметричної ідентифікації є одним із етапів налаштування структури моделі.

За умов, коли вихідні експериментальні дані представлені в інтервальному вигляді (1.2), задача параметричної ідентифікації полягає у знаходженні невідомих параметрів математичної моделі шляхом розв'язування інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь (ІСЛАР) для деякого відомого вектора базисних функцій:

$$\begin{aligned} y_1^- &\leq b_1 f_1(\vec{x}_1) + \dots + b_m f_m(\vec{x}_1) \leq y_1^+ \\ y_2^- &\leq b_1 f_1(\vec{x}_2) + \dots + b_m f_m(\vec{x}_2) \leq y_2^+ \\ &\vdots \\ y_N^- &\leq b_1 f_1(\vec{x}_N) + \dots + b_m f_m(\vec{x}_N) \leq y_N^+ \end{aligned} \quad (1.3)$$

Методи розв'язку ІСЛАР достатньо досліджені у працях [1, 11, 14, 23, 38, 51, 99, 102, 106]. Відомо, що за умов сумісності системи (1.3) її розв'язком є множина Ω параметрів математичної моделі (1.1), яка в просторі параметрів утворює опуклий многогранник [22, 25, 26, 38, 100, 137, 152].

Визначення структури математичної моделі (1.1) за умов інтервального представлення її вихідних характеристик (1.2) полягає у визначенні відповідного набору структурних елементів. Саме й в цьому полягає складність синтезу структури математичної моделі для задачі моніторингу зворотного гортання через нечіткий зв'язок між вхідними та вихідними експериментальними даними.

Методам структурної ідентифікації математичних моделей за умов інтервального представлення їх вихідних характеристик присвячено велику кількість праць. Серед них варто відзначити методи редукції, “нарощування” структури математичної моделі, методи, що ґрунтуються на генетичних алгоритмах та алгоритмах поведінки колонії медоносних бджіл.

Метод редукції структури математичної моделі передбачає задання початкової структури моделі і поступове вилучення незначущих елементів з моделі [25, 32]. Загальний вигляд математичної моделі записують на основі аналізу експериментальних даних, спираючись на фізичні міркування. Далі спрощують одержану математичну модель шляхом вилучення із неї незначущих структурних елементів, тобто елементів, вилучення яких призведе до зменшення значення функції мети [25]. Зазначений метод характеризується недоліками, зокрема - не відомий порядок та степінь полінома, які необхідні для задання початкової структури моделі, що суттєво збільшує обчислювальну складність зазначеного методу; вилучення структурних елементів математичної моделі може призвести до втрати значущих елементів оптимальної математичної моделі.

Метод “нарощування” структури математичної моделі вимагає задання початкової структури математичної моделі у простому вигляді [25].

Далі ускладнюють структуру шляхом введення нових структурних елементів та проводять параметричну ідентифікацію. Процедуру ускладнення структури проводять доти, поки не буде досягнуто критерію верифікації моделі. Зазначений метод характеризується високою обчислювальною складністю, оскільки виконання таких процедур може призвести до переускладнення моделі.

Методи структурної ідентифікації математичних моделей, що ґрунтуються на *генетичних алгоритмах* спочатку формують набір структурних елементів – компонентів вектора базисних функцій $\vec{f}^T(x)$ і вважають, що сформований набір структурних елементів включає всі елементи шуканої структури математичної моделі. Потім випадковим чином формують структури моделі, що задають початкову множину моделей-претендентів і проводять схрещування відібраних структур моделей. Після цього проводять селекцію найкращих структур математичних моделей [14]. Зазначений метод має суттєві недоліки, зокрема – випадкове формування початкової множини структур моделей, які містять весь набір структурних елементів, призводить до збільшення кількості структур, а це, в свою чергу, збільшує обчислювальну складність реалізації методу.

Методи, що ґрунтуються на *алгоритмі поведінки бджолоїної колонії* це методи, що побудовані на принципах ройового інтелекту [66 130, 148]. Зазначені методи вимагають ініціалізації початкових структур моделей-претендентів випадковим чином, проте вони не використовують генетичних операторів, а особини популяції взаємодіють локально та змінюють швидкість, мають пам'ять [66]. Це забезпечує виявлення локальних екстремумів та швидше знаходження глобального екстремуму функції мети. Зазначений метод характеризується нижчою обчислювальною складністю, оскільки алгоритм бджолоїної колонії містить меншу кількість параметрів, однак вимагає початкового задання структури математичної моделі із відповідним набором структурних елементів.

Результати аналізу основних методів структурної ідентифікації математичних моделей показали, що вони вимагають початкового задання структур моделей із певним набором структурних елементів і до того ж формують складні структури моделей, які не придатні для моделювання характеристик середовища хірургічного втручання і моніторингу ЗГН.

Останнім часом для розв'язування різних задач використовують достатньо прості структури математичних моделей з радіально-базисними функціями, що побудовані за аналогією до штучних нейронних мереж [7, 126, 128, 139]. Зазначені моделі, характеризуються суттєвими перевагами, зокрема: простою узагальненою структурою; здатністю моделювати довільну нелінійну функцію за допомогою двох параметрів рецепторного поля радіально-базисних функцій – центрів та радіусів; можливістю будувати моделі нестационарних процесів; мають високі прогностичні властивості; можливістю навчатися на неоднорідній вибірці даних. Зважаючи на це, доцільно проаналізувати ці математичні моделі з метою виявлення можливості застосування їх для розв'язування задачі ідентифікації моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН.

1.3.2. Особливості математичних моделей з радіально-базисними функціями

Математичну основу моделі з радіально-базисними функціями становить метод потенціальних функцій, що дозволяє подати деяку функцію $y(x)$ у вигляді суперпозиції базисних функцій $f_h(x)$ [7, 69, 139, 140, 151]. Особливістю математичних моделей з РБФ, що вирізняє їх серед інших моделей типу “вхід-вихід” є те, що вони уможливають апроксимувати невідоме рішення за допомогою радіально-симетричних функцій, аргументом яких є відстань між вектором входів та деяким наперед заданим центром радіально-базисної функції.

Математичні моделі з РБФ в загальному мають такий вигляд [7, 139]:

$$y = F(\vec{x}) = w_0 + \sum_{h=1}^H w_h f_h(\vec{x}), \quad (1.4)$$

де y - вихідна характеристика; $F(x)$ - нелінійне перетворення вхідного вектора $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ у вихідний; вектор $\vec{w} = (w_0, w_1, \dots, w_h)^T$ позначає невідомі параметри; вектор $\vec{f}(\vec{x}) = (1, f_1(x), f_2(x), \dots, f_h(x))^T$ означає радіально-базисні функції; $h = 1, \dots, H$, де h – кількість невідомих параметрів моделі.

У математичних моделях із РБФ базисні функції радіально змінюються навколо вибраного центру c . В моделях такого типу, як зазначено вище, за базисні вибирають деякі функції відстані між векторами:

$$f_i(\vec{x}) = \|\vec{x} - \vec{c}_h\| R_h^{-1}, \quad (1.5)$$

де \vec{c}_h - вектор центрів радіально-базисних функцій, R_h - обернена коваріаційна матриця, що визначає розмір, форму та орієнтацію рецепротного поля радіально-базисних функцій.

Як міру близькості між векторами \vec{x} та \vec{c}_h обирають метрику, зазвичай

$$\text{Евкліда } \|\vec{x} - \vec{c}_h\| = \left(\sum_{i=1}^N (x_i - c_{ih})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ або манхетенську } \|\vec{x} - \vec{c}_h\| = \sum_{i=1}^N |x_i - c_{ih}|.$$

Враховуючи (1.5) структура математичної моделі з радіально-базисними функціями набуде вигляду:

$$y = F(\vec{x}) = w_0 + \sum_{h=1}^H w_h f_h(\|\vec{x} - \vec{c}_h\| R_h^{-1}). \quad (1.6)$$

Як радіально-базисну найчастіше обирають функцію Гауса [69]:

$$f_h(\vec{x}) = f_h\left(\|\vec{x} - \vec{c}_h\| R_h^{-1}\right) = \exp\left(-\frac{1}{2}\|\vec{x} - \vec{c}_h\|^2 \sigma^{-2}\right), \quad (1.7)$$

де σ - параметр масштабу (стандартне відхилення, параметр ширини вікна, радіус базисних функцій). Функції Гауса мають локальний характер і приймають значення «0» тільки в області навколо визначеного центра. Це дозволяє легко встановлювати залежність між параметрами базисних функцій і фізичним розміщенням навчальної вибірки у багатовимірному просторі.

Параметр σ визначає розкид даних навколо центрів. Шляхом комбінації центрів та параметрів масштабу необхідно «покрити» весь простір даних. Поряд із знаходженням достатньої кількості центрів, що мають бути рівномірно розподілені у просторі даних, відповідний вибір значення параметра σ служить заповненням можливих прогалів у вхідних даних.

Рідше як радіально-базисні функції використовують [69, 139]: мультіквадратичну функцію, зворотну мультіквадратичну функцію, сплайн-функцію, функцію Коші.

Обернена коваріаційна матриця R_h у загальному випадку має вигляд [69]:

$$R_h^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ip} \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

де r_{ij} - елементи матриці R_h .

Досить часто матрицю R_h вибирають діагональною $R_h^{-1} = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2)$, при цьому вона містить зворотне відхилення для кожної вхідної розмірності, тобто $r_{ij} = 0$ для $i \neq j$:

$$R_h^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ r_{i1} & & & \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ & r_{i2} & & \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & r_{ip} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

У такому випадку рецепторне поле радіально-базисних функцій приймає вигляд гіпереліпсоїда, осі якого співпадають із осями вхідного простору та мають довжину r_i по i – й осі.

Бувають випадки, коли матрицю R_h - задають недіагональною, додатно означеною матрицею:

$$R_h^{-1} = Q^T \Lambda Q,$$

де Λ - матриця власних значень, що визначає форму і розмір рецепторного поля, Q – матриця, що визначає орієнтацію рецепторного поля радіально-базисної функції.

Слід зазначити, що для радіально-базисної функції Гауса $R^{-1} = \sigma^{-2}I$, де I одинична матриця ($n \times n$). У такому випадку рецепторне поле має вигляд гіперсфери з центром c_h та радіусом σ_h . При цьому приймається, що $r_{ij} = \sigma_{ij}^{-2} = \sigma^{-2} = const$, $i, j = \overline{1, h}$ [69]. В такому випадку, зважаючи на вищевикладене, математичну модель на основі РБФ (1.6) можна записати у вигляді:

$$y = w_0 + \sum_{h=1}^H w_h f_h(\|\vec{x} - \vec{c}_h\|_{R^{-1}})$$

або

$$y = w_0 + \sum_{h=1}^H w_h f_h(\|\vec{x} - \vec{c}_h\| \cdot \sigma^{-2}) \quad (1.10)$$

Отже, як впливає із аналізу, математичні моделі з РБФ характеризують два типи параметрів [83, 139]:

- параметри рецепторного поля радіально-базисних функцій центри C_h , та матриця розмірності рецепторного поля R_h ;
- лінійні параметри w_i .

В процесі структурної ідентифікації зазначені моделі вимагають лише налаштування параметрів рецепторного поля радіально-базисних функцій, що суттєво спрощує пошук структури математичних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій. Зважаючи на це, зазначені моделі найбільш придатні у контексті розв'язку задачі ідентифікації математичних моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН із гарантованими прогностичними властивостями, а вираз (1.1) набуде вигляду (1.10).

У результаті аналізу методів ідентифікації математичних моделей на основі радіально-базисних функцій впливає, що вони базуються на мінімізації середньоквадратичної похибки і не придатні для ідентифікації цього класу моделей з використанням інтервальних даних.

1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження

Унаслідок аналізу особливостей середовища моніторингу зворотного гортанного нерва при проведенні операцій на щитоподібній залозі встановлено, що характеристики середовища хірургічного втручання є неточними через особливості гортані пацієнтів. Розглянуті математичні моделі моніторингу зворотного гортанного нерва придатні лише для визначення типу тканини хірургічної рани, й не враховують важливої

інтегрованої характеристики середовища моніторингу ЗГН - відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН.

Сформульовано задачу ідентифікації математичних моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН із гарантованими прогностичними властивостями (1.1). Відзначено що за умов представлення вихідних характеристик у вигляді (1.2) така задача полягає у визначенні певного набору структурних елементів і зводиться до багаторазового розв'язку ІСЛАР (1.3). Проаналізовано методи ідентифікації математичних моделей за умов інтервального представлення їх вихідних характеристик й встановлено, що вони ґрунтуються на переборі моделей-претендентів із певним набором структурних елементів, а побудовані на їх основі математичні моделі часто є переускладненими.

В той же час показано, що для математичних моделей зі структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій задача структурної ідентифікації полягає лише у налаштуванні параметрів рецепторних полів радіально-базисних функцій. На основі цього встановлено, що математичні моделі з РБФ придатні для побудови моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва, а задача ідентифікації таких моделей (1.1) має вигляд (1.10), експериментальні дані при цьому представлені у вигляді (1.2).

Зважаючи на вищевикладене, сформульовано основну мету дисертаційного дослідження - зниження ризику пошкодження ЗГН і одночасно скорочення часу проведення операції на щитоподібній залозі шляхом розробки методів, алгоритмів та програмного забезпечення для ідентифікації математичних моделей з радіально-базисними функціями в умовах інтервальної невизначеності та застосування цих моделей для моделювання характеристик середовища моніторингу ЗГН.

У цілому для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробити методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей з радіально-базисними функціями в умовах інтервальної невизначеності ;
- розробити інтервальні моделі первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН, які б враховували множину спектральних ознак інформаційних сигналів – реакції на подразнення тканин хірургічної рани та відстань від точок подразнення хірургічної рани до ЗГН;
- розробити програмний комплекс для реалізації методів та алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей із радіально-базисними функціями;
- розробити математичну модель характеристик середовища моніторингу ЗГН;
- удосконалити інформаційну технологію для виявлення ЗГН на основі розробленої інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН.
- провести апробацію побудованої моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва та удосконаленої на її основі інформаційної технології під час операції на щитоподібній залозі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Розглянуто особливості середовища моніторингу зворотного гортанного нерва під час операції на щитоподібній залозі й встановлено, що основними його характеристиками є тип тканини хірургічної рани та відстань від точки подразнення до зворотного гортанного нерва. Відзначено, що первинні характеристики середовища моніторингу ЗГН є неточними через особливості гортані пацієнтів.

2. Проаналізовано існуючі математичні моделі моніторингу зворотного гортанного нерва й відзначено, що вони забезпечують класифікацію тканин хірургічної рани. Обґрунтовано доцільність розробки нових моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва, що описуватимуть характеристики середовища хірургічного втручання й уможливллять знизити ризик пошкодження зворотного гортанного нерва та зменшити час проведення операції на щитоподібній залозі.

3. Здійснено постановку задачі ідентифікації математичних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва на основі експериментальних даних в інтервальному вигляді. Зазначено, що задача ідентифікації включає процедури ідентифікації структури моделі та ідентифікації її параметрів. Показано, що задача структурної ідентифікації зводиться до багаторазового розв'язування задачі параметричної ідентифікації.

4. Проаналізовано існуючі методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей за умов інтервального представлення їх вихідних характеристик та виокремлено основні їх недоліки. Запропоновано для розв'язування задачі ідентифікації моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН застосувати математичні моделі із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій.

5. Проаналізовано особливості побудови математичних моделей з радіально-базисними функціями та охарактеризовано основні їх переваги,

зокрема особливість структурної ідентифікації зазначених моделей через налаштування параметрів рецепторного поля радіально-базисних функцій. Обґрунтовано доцільність їх застосування для розв'язку задачі побудови моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва й, ґрунтуючись на цьому, сформульовано задачі дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2

ІНТЕРВАЛЬНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕДОВИЩА МОНІТОРИНГУ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА

Із підсумків попереднього розділу випливає, що існуючі математичні моделі моніторингу зворотного гортанного нерва уможливають класифікувати тільки тип тканини в точці подразнення середовища моніторингу ЗГН. Разом з тим, зазначені моделі не враховують інтегрованої характеристики середовища - відстані від точки подразнення до зворотного гортанного нерва, визначення якої важливе для зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі за рахунок скорочення часу на моніторинг ЗГН. Таким чином, математична модель середовища моніторингу ЗГН повинна відображати зв'язок між первинними ознаками цього середовища та відстанню від точки подразнення тканин хірургічної рани до ЗГН. Первинні ознаки середовища в точці подразнення можуть бути отримані із відомих моделей класифікації тканин хірургічної рани на основі застосування електрофізіологічного способу подразнення тканин. Зокрема, запропоновано використовувати спектральні характеристики ІС, отриманого у спосіб, схема якого наведена на рис. 1.2.

Однак, встановити чіткий зв'язок між первинними ознаками тканини хірургічної рани в точці подразнення, представленими спектром ІС, та відстанню від цієї точки до ЗГН не можливо в силу двох причин. По-перше специфіка гортані кожного пацієнта призводить до того, що спектри отриманих ІС для різних пацієнтів (навіть різних точок подразнення однієї і тієї ж тканини) часто відрізняються для однієї і цієї ж відстані, що призводить до неоднорідності вибірки даних. По-друге відстань від точки подразнення тканини до ЗГН в тестовій вибірці фіксується з деякою похибкою. В обох випадках запропоновано використати інтервальну модель представлення даних. Матеріали цього розділу відображають результати

побудови такої моделі на основі субтрактивного методу кластеризації та аналізу інтервальних даних. Такий підхід забезпечить побудову єдиної математичної моделі первинних ознак тканин хірургічної рани для групи пацієнтів.

Матеріали другого розділу дисертаційної роботи відображено у працях [72, 76].

2.1. Організація експерименту для формування вхідних даних для задачі моніторингу зворотного гортанного нерва

Для математичних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва необхідна вибірка експериментальних даних, що складається із вхідних – первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН та вихідних - інтервальних значень відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН.

Опишемо детально етапи проведення експерименту для одержання первинних ознак тканин хірургічної рани, які зображено на схемі - рисунок 2.1.

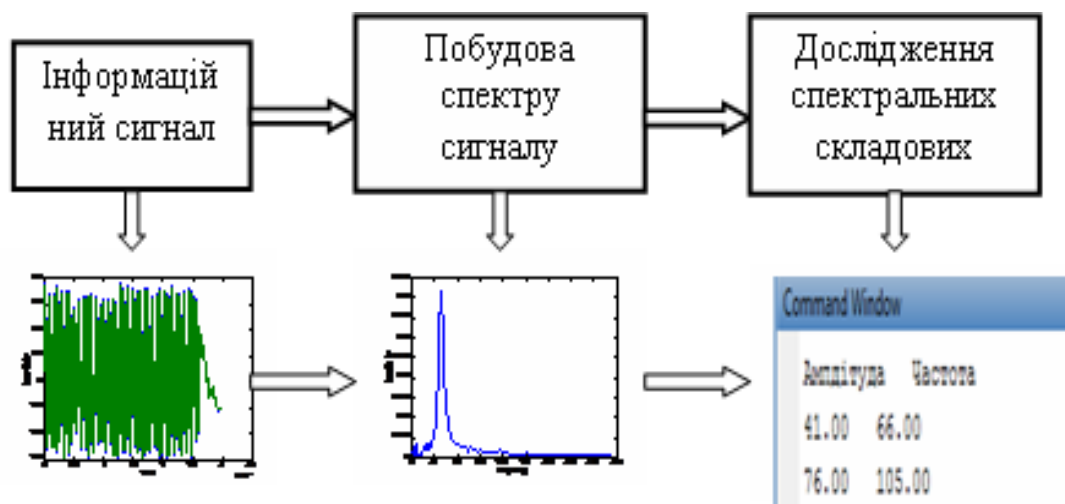


Рис. 2.1. Схема отримання первинних характеристик середовища хірургічного втручання

Крок 1. На цьому кроці отримуємо ІС у форматі *wav* для різних пацієнтів та точок подразнення тканин хірургічної рани.

Для отримання ІС, використовуємо електрофізіологічний спосіб подразнення тканин хірургічної рани та спосіб реєстрації, представлений схемою на рис. 1.2.

На рисунках 2.2 і 2.3 наведено приклади ІС, що відповідають реакції на подразнення м'язової тканини та зворотного гортанного нерва, відповідно. Як бачимо на рисунках, ІС – реакція на подразнення м'язових тканин суттєво відрізняється від ІС – реакції на подразнення безпосередньо зворотного гортанного нерва.

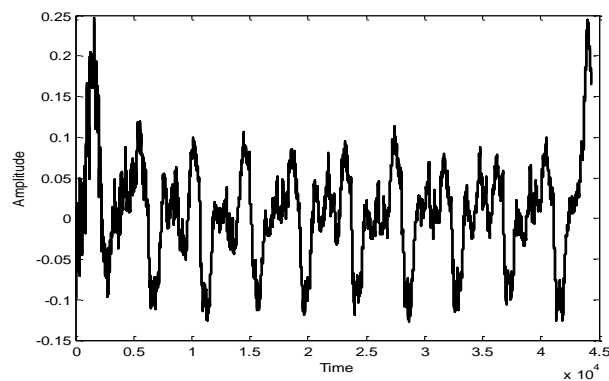


Рис. 2.2. Інформаційний сигнал – реакція на подразнення м'язової тканини

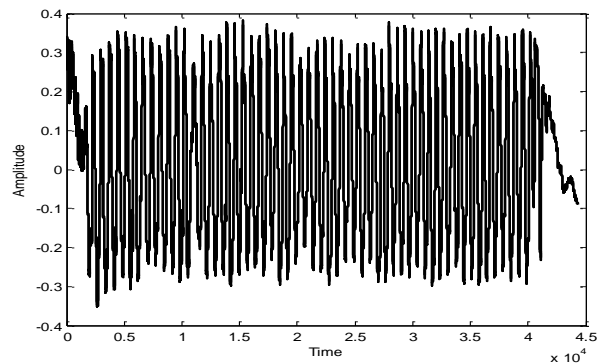


Рис. 2.3. Інформаційний сигнал – реакція на подразнення ЗГН

Крок 2. Побудова амплітудного спектру ІС із застосуванням швидкого перетворення Фур'є. При побудові спектру сигналу одержуємо його перетворення із часового у частотний діапазон.

Крок 3. Виділення характерних для точки подразнення властивостей спектру ІС.

Унаслідок багаторазової реалізації цього кроку і аналізу його результатів для різних пацієнтів та точок подразнення, встановлено, що спектральні характеристики ІС – реакції на подразнення тканин хірургічного втручання, а саме – спектральна складова із максимальною амплітудою $x_{1i} = U_{\max}$ та частота, на якій зосереджена ця спектральна складова $x_{2i} = F_{U_{\max}}$, $i=1, \dots, N$ є первинними ознаками типу тканини хірургічної рани, а їх одержання не вимагає значних обчислювальних витрат [121].

Результати отримання первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи пацієнтів та різних точок подразнення (в процесі хірургічного втручання таких точок буде від 20 до декількох сотень для кожного пацієнта) записуємо в базу даних. Одночасно у цю таблицю записуємо інтервальну оцінку відстані $[y_i]$ від точки подразнення до ЗГН. Таку оцінку отримуємо у спосіб, описаний у праці [41] за рахунок накладання стерильної сітки або візуально - за результатами спостережень хірурга. Відносна похибка визначення відстані від точки подразнення до ЗГН в цих випадках буде складати від 10% до 30%, відповідно.

Фрагмент таблиці бази даних наведено в таблиці первинних характеристик тканин моніторингу ЗГН 2.1.

Таблиця 2.1

Первинні характеристики тканин середовища моніторингу ЗГН

i	Спектральні характеристики ІС		Інтервальна оцінка відстані
	U_{\max}	$F_{U_{\max}}$	L
	x_{1i}	x_{2i}	$[y_i]$
1			
2			
...	
N			

У той же час у процесі досліджень встановлено, що у вибірці ІС - реакції на подразнення тканин хірургічної рани, є сигнали, які характеризують однакові відстані від точок подразнення до ЗГН різних пацієнтів, але з різними спектральними характеристиками (первинними ознаками). Зазначені випадки проілюстровано на рисунках 2.4, 2.5.

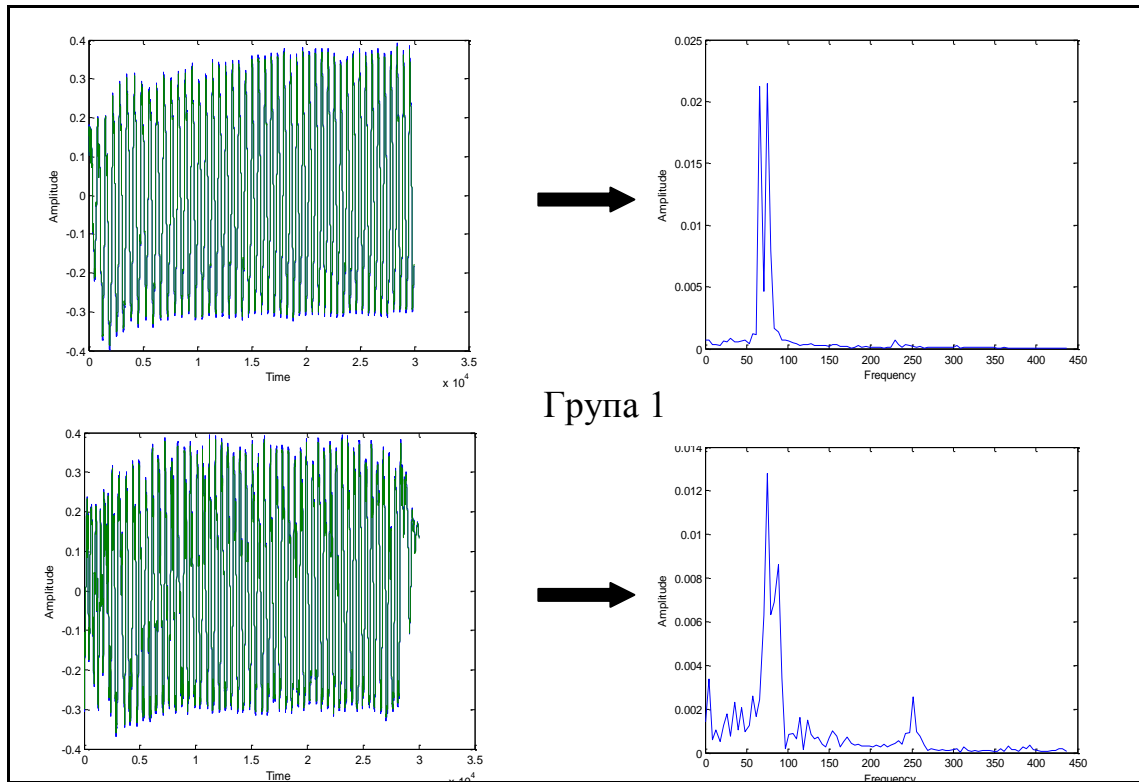


Рис. 2.4. Ілюстрація різних спектральних характеристик ІС, отриманих для точок подразнення на однаковій відстані до ЗГН

Такі інформаційні сигнали – реакція на подразнення тканин середовища моніторингу ЗГН можна об'єднати у групи. Проте спектральні ознаки ІС, що входять до однієї групи і відповідають реакції на подразнення тканин хірургічної рани на однаковій відстані до ЗГН відрізняються, тобто $(x_{11} \neq x_{12}) \wedge (x_{12} \neq x_{21})$ за умови $[y_1] \approx [y_2]$. Це свідчить про неоднорідність вибірки первинних характеристик ІС в межах групи пацієнтів.

Щодо групи ІС – реакції на подразнення м'язової тканини в різних точках на близькій відстані до ЗГН (рис. 2.5), то незважаючи на те, що частота спектральної складової зосереджена на однаковому діапазоні частот

на амплітудних спектрах обидвох ІС, спектральні ознаки зазначених ІС все-таки відрізняються, тобто $(x_{11} \neq x_{12}) \wedge (x_{12} \neq x_{21})$, $[y_1] \approx [y_2]$.

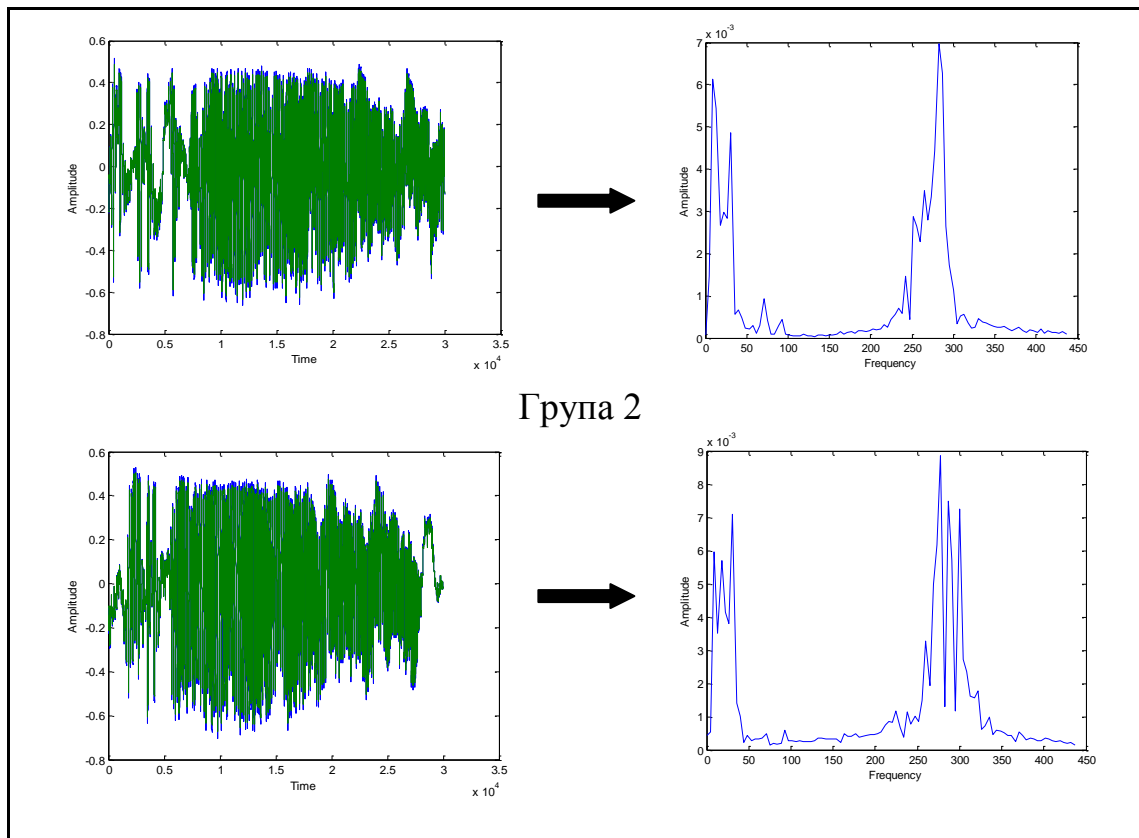


Рис. 2.5. Ілюстрація різних спектральних характеристик ІС, отриманих для різних точок подразнення на приблизно однаковій відстані до ЗГН

Водночас у базі даних містяться ІС з однаковими (близькими) спектральними характеристиками, проте ці ІС відображають реакції на подразнення тканин хірургічної рани на різних відстанях до ЗГН. Такий випадок проілюстровано на рисунку 2.6. При цьому $(x_{11} = x_{12}) \wedge (x_{12} = x_{21})$, однак $[y_1] \neq [y_2]$.

Із проведеного аналізу інформаційних сигналів випливає, що внаслідок індивідуальних особливостей гортані кожного пацієнта та їх різноманітної анатомічної будови щитоподібної залози зв'язок між первинними характеристиками середовища моніторингу ЗГН $x_{1i} = U_{\max}$, $x_{2i} = F_{U_{\max}}$ та відстанню $[y_i]$, від i -тої точки подразнення тканини хірургічної рани до ЗГН для групи пацієнтів є не детермінованим, що не дає можливості побудувати

єдину математичну модель характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи пацієнтів із застосуванням відомих стохастичних методів.

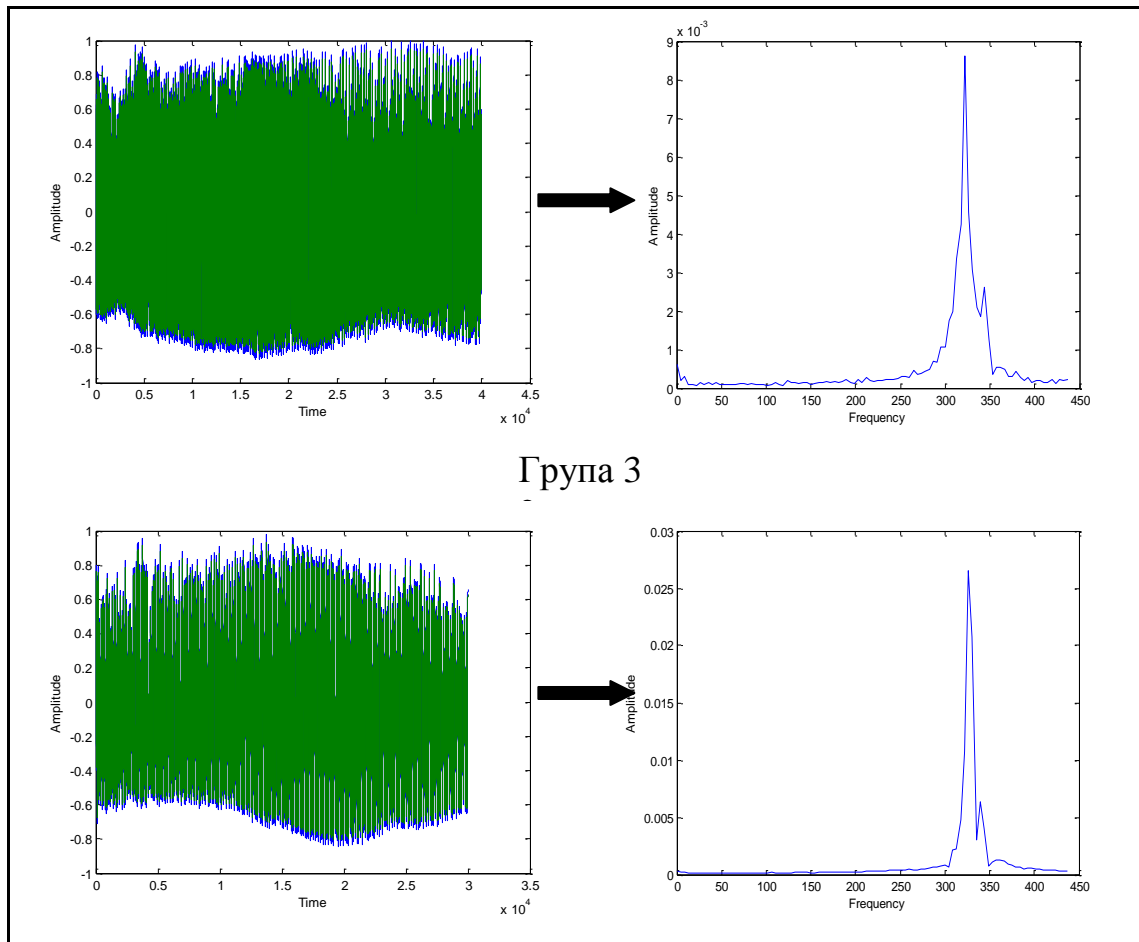


Рис. 2.6. Ілюстрація однакових спектральних характеристик ІС, отриманих для точок подразнення на різній відстані до ЗГН

За таких умов підвищується ризик пошкодження зворотного гортанного нерва під час розтину тканин хірургічної рани та збільшується час проведення операції на щитоподібній залозі.

Враховуючи вищезазначене, для опису невизначеності між спектральними характеристиками інформаційних сигналів x_{1i} , x_{2i} та відстанню $[y_i]$ від i -тої точки подразнення тканини хірургічної рани до ЗГН групи пацієнтів доцільно застосувати інтервальний аналіз даних.

2.2. Інтервальна модель первинних характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва

Як зазначено у попередньому параграфі, первинні характеристики хірургічної рани $x_{1i} = U_{\max}$, $x_{2i} = F_{U_{\max}}$ групи пацієнтів відрізняються і суттєво залежать від відстані $[y_i]$ точки подразнення хірургічної рани до зворотного гортанного нерва. Більше того трапляються випадки, коли одні і ті ж спектральні характеристики ІС вказують на відмінну відстань до ЗГН на хірургічній рані для різних пацієнтів.

Зважаючи на це, розглянемо детально метод інтервального представлення первинних характеристик середовища хірургічного втручання для задачі моніторингу ЗГН.

Нехай в процесі моніторингу зворотного гортанного нерва сформовано вибірку експериментальних даних (заданих таблицею 1):

$$\{x_{1i}, x_{2i}, i = 1, \dots, N\} \rightarrow \{[y_i], i = 1, \dots, N\}, \quad (2.2)$$

де x_{1i}, x_{2i} , $i = 1, \dots, N$ - набори первинних ознак середовища моніторингу ЗГН в i -тій точці подразнення; $[y_i]$, $i = 1, \dots, N$ - інтервальні оцінки відстаней від i -тої точки подразнення до ЗГН.

Оскільки вибірка первинних ознак середовища моніторингу ЗГН не є однорідною, проведемо групування наборів первинних ознак середовища хірургічного втручання у вибірці (2.2) з метою виявлення подібних груп характеристик. У результаті аналізу методів кластеризації для групування первинних ознак хірургічної рани, обґрунтовано застосування методу «гірської» кластеризації, який не потребує складних обчислювальних процедур, а кількість кластерів регулюється лише за допомогою єдиного параметра – радіуса кластера [58]. З метою одержання однорідних результатів кластеризації, вибірку первинних ознак середовища моніторингу ЗГН доцільно пронормувати.

На основі зазначеного методу кластеризації отримаємо k подібних груп із наборами нормованих центрів $\widehat{\bar{x}}_{1k}, \widehat{\bar{x}}_{2k}$, $k=1, \dots, K$ та заданим радіусом r . Відсортуємо у вибірці (2.2) k – груп даних за ознакою:

$$\sqrt{(\bar{x}_{1i} - \widehat{\bar{x}}_{1k})^2 + (\bar{x}_{2i} - \widehat{\bar{x}}_{2k})^2} \leq r, \quad (2.3)$$

де $\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}$ - нормовані до «1» набори первинних ознак середовища хірургічного втручання, r – деяка константа, задана емпірично для забезпечення якісних результатів групування у межах $0,1 \leq r \leq 0,5$.

У підсумку, отримаємо k подібних груп первинних ознак середовища хірургічного втручання вибірки даних (2.2):

$$\begin{aligned} \{\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, i = 1, \dots, N_1\} &\rightarrow \{[y_i], i = 1, \dots, N_1\}, \dots, \\ \{\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, i = N_{k-1} + 1, \dots, N_k\} &\rightarrow \{[y_i], i = N_{k-1} + 1, \dots, N_k\}, \dots, \\ \{\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, i = N_{K-1} + 1, \dots, N_K\} &\rightarrow \{[y_i], i = N_{K-1} + 1, \dots, N_K\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

До першої групи первинних характеристик віднесено спектральні ознаки, за якими прокласифіковано тип тканини хірургічної рани - ЗГН. Тобто, для цього випадку відстань від точки подразнення до ЗГН дорівнює нулю.

Тепер, користуючись отриманими наборами даних (2.4) сформуємо вибірку інтервальних даних нормованих первинних ознак середовища моніторингу ЗГН у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \{\widehat{\bar{x}}_{11}, \widehat{\bar{x}}_{21}\} &\rightarrow \left\{ \bigcup_{i=1}^{N_1} [y_i] \right\}, \\ \{\widehat{\bar{x}}_{1k}, \widehat{\bar{x}}_{2k}, k = 2, \dots, K\} &\rightarrow \left\{ \bigcup_{i=N_{k-1}+1}^{N_k} [y_i] \right\}, k = 2, \dots, K. \end{aligned} \quad (2.5)$$

На основі (2.5) отримуємо результуючі інтервали відстані від точки подразнення на хірургічній рані до ЗГН, що описують первинні ознаки середовища моніторингу ЗГН:

$$[y_1] = \bigcup_{i=1}^{N_1} [y_i], [y_k] = \bigcup_{i=N_{k-1}+1}^{N_k} [y_i], k = 2, \dots, K \quad (2.6)$$

При цьому варто зазначити, що константу r необхідно ітераційно підбирати таким чином, щоб результуючі інтервали відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН (2.6) були неперервними та виконувалася умова:

$$\left(\bigcup_{k=1}^K [y_k] = [y_1^-; y_1^+] \cup [y_1^+; y_2^+] \cup \dots \cup [y_{K-1}^+; y_K^+] \right) \wedge \left(\bigcap_{k=1}^K [y_k] = \emptyset \right). \quad (2.7)$$

Із (2.6) формуємо вибірку вихідних експериментальних даних для задачі моніторингу ЗГН:

$$\begin{pmatrix} \{\widehat{x}_{11}, \widehat{x}_{21}\} \\ \{\widehat{x}_{12}, \widehat{x}_{22}\} \\ \vdots \\ \{\widehat{x}_{1K}, \widehat{x}_{2K}\} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} [y_1^-; y_1^+] \\ [y_2^-; y_2^+] \\ \vdots \\ [y_K^-; y_K^+] \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Побудовані інтервали відстані від точки подразнення на хірургічній рані до зворотного гортанного нерва (2.6) описують невизначеність первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН, а це, в свою чергу, уможливило побудувати єдину математичну модель характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи пацієнтів і на цій основі знизити ризик пошкодження ЗГН та зменшити тривалість операції на щитоподібній залозі. Покрокову реалізацію методу інтервального представлення первинних характеристик тканин хірургічної рани розглянемо у наступному підрозділі.

2.3. Алгоритм формування характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва в інтервальному вигляді

Розглянемо детально алгоритм реалізації методу інтервального представлення первинних ознак тканин хірургічної рани. Блок-схема алгоритму, яку зображено на рисунку 2.7, розкриває послідовність виконання дій у контексті задачі побудови єдиної математичної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи пацієнтів на основі множини первинних ознак тканин хірургічної рани та інтервальних оцінок відстані від точки подразнення до ЗГН.

Як бачимо на блок-схемі 2.7, спочатку вводимо експериментальні дані $x_{1i}, x_{2i}, [y_i], i = 1, \dots, N$ та задаємо початкові параметри алгоритму $r = 0,01$. Важливим питанням є вибір кроку, яке вимагає додаткових досліджень. Як бачимо на блок-схемі, його визначено такою формулою $\Delta r = 1/N$.

Далі переходимо до процедури нормування первинних ознак середовища моніторингу ЗГН $x_{1i}, x_{2i}, i = 1, \dots, N$, яка полягає у представленні вибірки $x_{1i}, x_{2i}, i = 1, \dots, N$ у діапазоні від 0 до 1 за формулами:

$$\bar{x}_{1i} = \frac{x_{1i} - \min_{i=1, N} \{x_{1i}\}}{\max_{i=1, N} \{x_{1i}\} - \min_{i=1, N} \{x_{1i}\}},$$

$$\bar{x}_{2i} = \frac{x_{2i} - \min_{i=1, N} \{x_{2i}\}}{\max_{i=1, N} \{x_{2i}\} - \min_{i=1, N} \{x_{2i}\}}.$$

У результаті одержуємо вибірку нормованих значень характеристик середовища хірургічного втручання $\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, i = 1, \dots, N$.

Перед тим, як перейти до процедури кластеризації нормованих первинних характеристик тканин хірургічної рани, необхідно обчислити значення радіуса кластера, а також параметр кроку Δr , що визначає кількість

ітерацій обчислювальної схеми реалізації методу інтервального представлення первинних характеристик середовища хірургічного втручання.

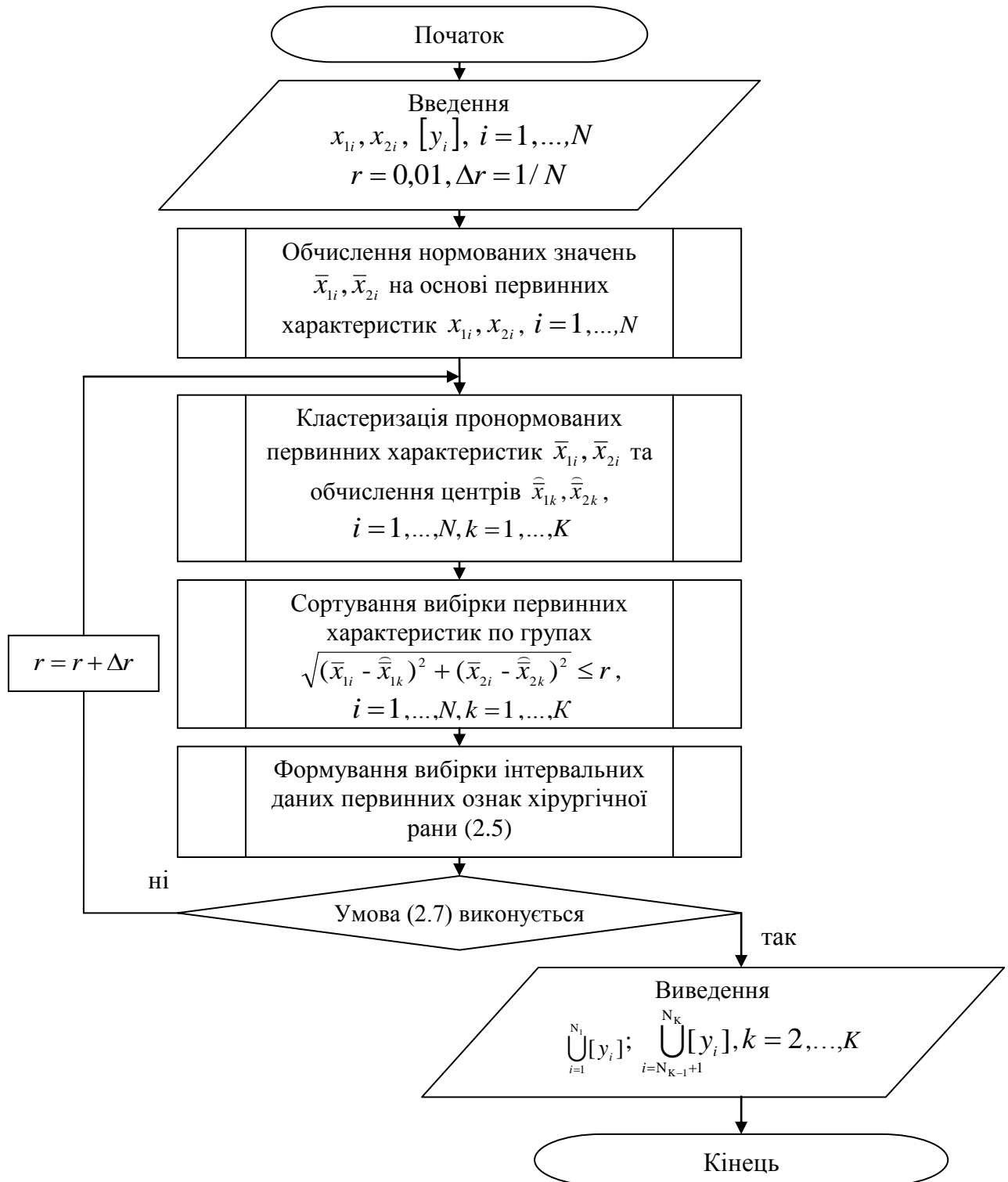


Рис. 2.7. Блок-схема алгоритму побудови інтервальної моделі первинних характеристик тканин хірургічної рани

Вибір параметра Δr є досить трудомісткою та складною задачею. Параметр кроку необхідно задати таким чином, щоб результуючі інтервали відстані від точки подразнення до зворотного гортанного нерва утворювали неперервний інтервал і одночасно не перетиналися. Умова забезпечення неперервності інтервалів необхідна для того, щоб врахувати усі можливі набори первинних характеристик тканин хірургічної рани. Зазначена умова обов'язково забезпечується, якщо значення параметру кроку Δr задати достатньо малим. Проте у такому випадку відбувається збільшення часу формування результуючих інтервалів оцінок відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН.

З метою зменшення обчислювальної складності схеми реалізації методу представлення первинних характеристик тканин хірургічної рани для налаштування параметра кроку доцільно застосувати методи випадкового пошуку. Експериментальні дослідження запропонованого алгоритму побудови інтервальної моделі первинних характеристик тканин хірургічної рани дали можливість визначити емпіричний діапазон радіуса кластера $[0,01; 0,5]$ і емпіричне значення кроку $\Delta r = 1/N$, де N – кількість спостережень.

Після вибору параметрів кластеризації здійснюємо групування пронормованих первинних ознак середовища моніторингу ЗГН $\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}$, $i = 1, \dots, N$ із застосуванням алгоритму субтрактивної кластеризації, блок-схему якого наведено на рисунку 2.8. Варто відзначити, що кількість сформованих кластерів залежить від заданого радіуса кластера, який на початку задаємо у розмірі $r = 0,01$. У результаті одержуємо k -ту кількість подібних груп первинних ознак тканин хірургічної рани із відповідними нормованими центрами $\hat{x}_{1k}, \hat{x}_{2k}$, $k = 1, \dots, K$.

Далі переходимо до відсортування у вибірці пронормованих первинних ознак середовища моніторингу зворотного гортанного нерва k – подібних груп за ознакою (2.3). У результаті одержимо вибірку k подібних груп первинних ознак середовища моніторингу ЗГН вибірки експериментальних даних $x_{1i}, x_{2i}, [y_i]$, $i = 1, \dots, N$ (2.4).

Після цього переходимо до формування вибірки інтервальних даних нормованих первинних ознак середовища моніторингу ЗГН у вигляді (2.5). У результаті одержуємо K інтервалів відстані від точки подразнення до ЗГН. Перевіряємо на неперервність результуючі інтервали відстані від точки подразнення до ЗГН $\bigcup_{i=1}^{N_1}[y_i]$; $\bigcup_{i=N_{k-1}+1}^{N_k}[y_i]$, $k = 2, \dots, K$, одержані із виразу (2.5).

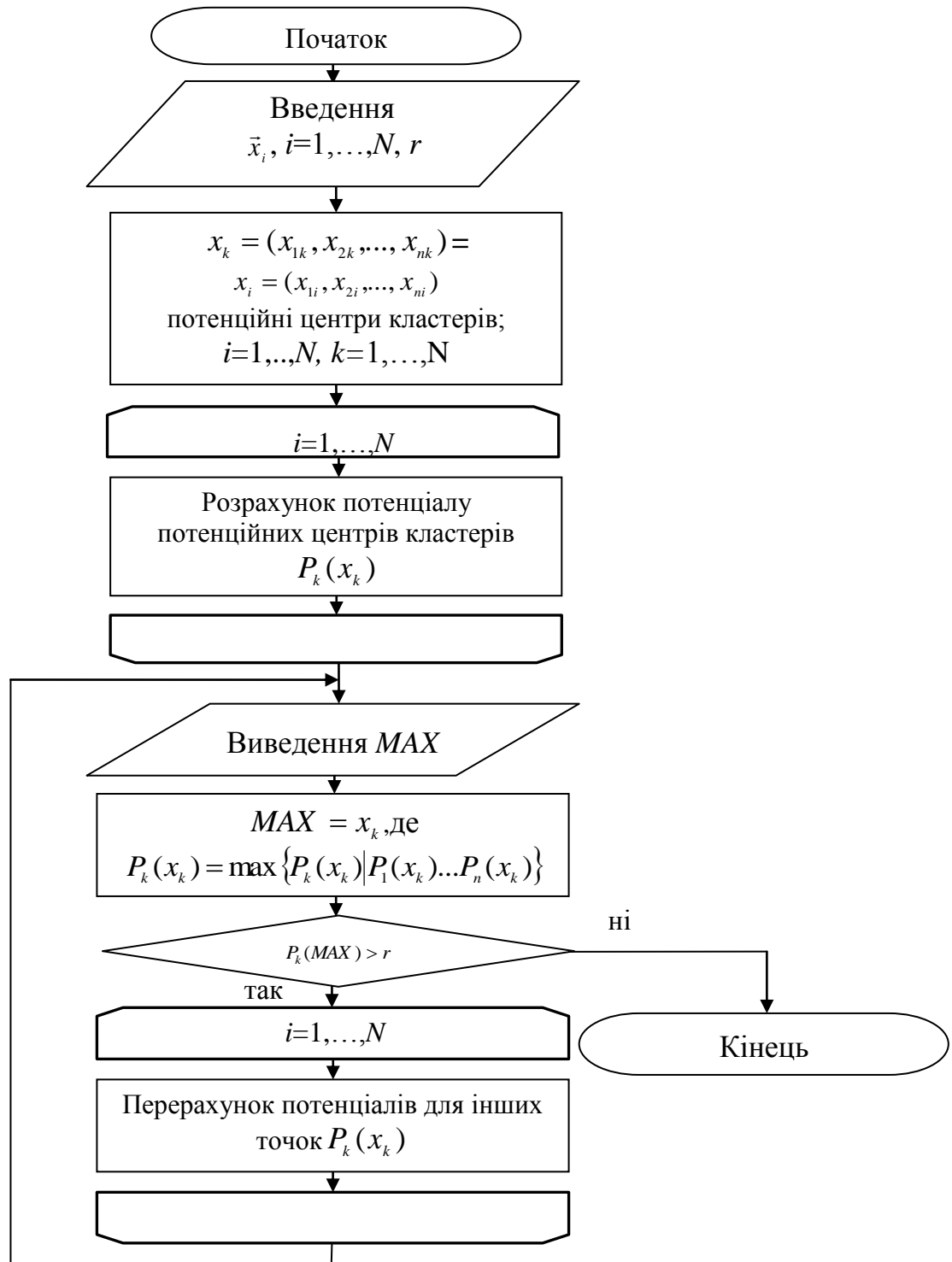


Рис. 2.8. Блок-схема алгоритму субтрактивної кластеризації

Якщо забезпечується умова неперервності результуючих інтервалів відстані, тобто умова (2.7), то завершуємо процедуру формування первинних ознак тканин хірургічної рани. У іншому випадку збільшуємо радіус кластера r на Δr та повертаємося до процедури кластеризації первинних ознак тканин хірургічної рани $x_{1i}, x_{2i}, [y_i], i = 1, \dots, N$.

Для спрощення ілюстрації функціонування алгоритму побудови інтервальних моделей первинних характеристик тканин хірургічної рани в цьому розділі використаємо також нормовані на інтервалі від 0 до 1 інтервальні оцінки відстаней від точки подразнення до ЗГН.

Схематично процедуру формування результуючого інтервалу відстані від точок подразнення до ЗГН для першої групи ознак тканин середовища моніторингу ЗГН представлено на рисунку 2.9.

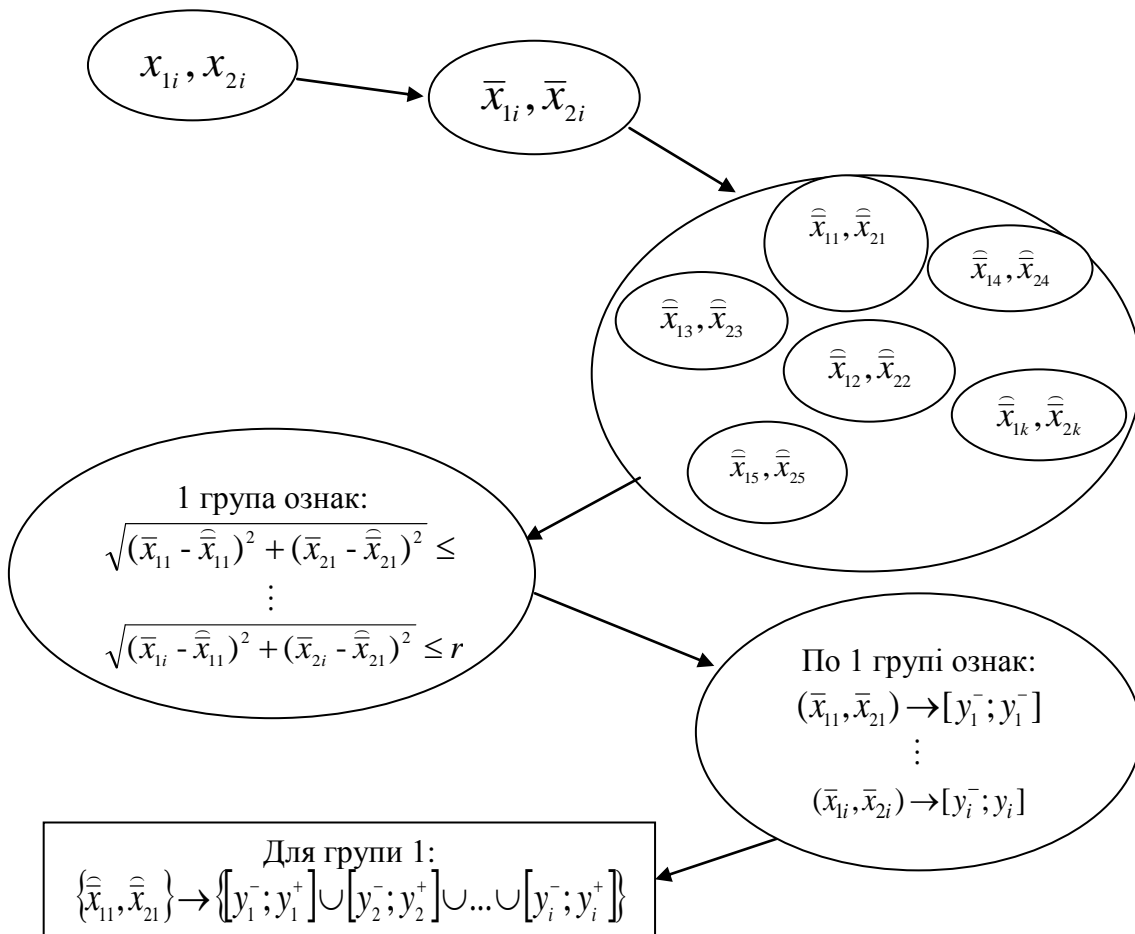


Рис. 2.9. Схема формування результуючих інтервалів відстані для першої групи ознак тканин хірургічної рани

Реалізацію вищеописаного алгоритму формування первинних ознак середовища моніторингу ЗГН із застосуванням субтрактивної кластеризації та аналізу інтервальних даних розглянемо на прикладі.

Нехай під час операції на щитоподібній залозі в процесі моніторингу ЗГН одержано вибірку експериментальних даних, що представлена у вигляді наборів первинних – спектральних ознак тканин хірургічної рани x_{1i}, x_{2i} , $i=1, \dots, 22$ та відповідних інтервальних значень відстані від точок подразнення до ЗГН $[y_i^-; y_i^+]$, $i=1, \dots, 22$, таблиця 2.2.

Таблиця 2.2

Первинні характеристики тканин хірургічної рани

i	x_{1i}	x_{2i}	$[y_i^-; y_i^+]$	i	x_{1i}	x_{2i}	$[y_i^-; y_i^+]$
1	11.48	321.52	[0;0]	12	2.77	66.15	[2;3]
2	26.46	8.82	[8;10]	13	31.87	79.87	[1;2]
3	17.60	378.70	[0;0]	14	5.03	17.64	[3;6]
4	25.09	348.39	[0;0]	15	12.86	17.64	[3;5]
5	46.91	8.82	[8;9]	16	29.65	13.23	[6;7]
6	21.49	4.41	[9;10]	17	23.28	13.23	[7;8]
7	24.58	326.34	[0;0]	18	41.62	13.23	[4;5]
8	18.57	330.75	[0;0]	19	38.54	13.23	[5;6]
9	32.02	74.98	[2;3]	20	41.15	8.82	[8;10]
10	33.05	70.56	[1;3]	21	63.95	8.82	[8;9]
11	25.89	88.20	[1;2]	22	36.41	4.41	[9;10]

Сформуємо вибірку інтервальних даних нормованих первинних ознак середовища моніторингу ЗГН із застосуванням розробленого алгоритму, блок-схему якого зображено на рис. 2.7. Згідно алгоритму на другому кроці проводимо нормування спектральних ознак інформаційних сигналів – реакції на подразнення тканин хірургічної рани. У результаті одержуємо таблицю нормованих ознак тканин хірургічної рани, таблиця 2.3.

Таблиця 2.3

Нормовані первинні ознаки тканин хірургічної рани

i	\bar{x}_{1i}	\bar{x}_{2i}	i	\bar{x}_{1i}	\bar{x}_{2i}
1	0.1080	0.8472	12	0.3305	0.1650
2	0.3588	0.0118	13	0.4494	0.2016
3	1.0000	0.8669	14	0	0.0353
4	0.2451	1.0000	15	0.1311	0.0353
5	0.3359	0.9190	16	0.4123	0.0236
6	0.7013	0.0118	17	0.3056	0.0236
7	0.3274	0.8601	18	0.6127	0.0236
8	0.2267	0.8719	19	0.5611	0.0236
9	0.4519	0.1885	20	0.1080	0.0118
10	0.4692	0.1767	21	0.9866	0.0118
11	0.3493	0.2239	22	0.2756	0

На третьому кроці кластеризуємо нормовані характеристики $\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}$, із застосуванням субтрактивного алгоритму кластеризації, при цьому радіус r задаємо у розмірі 0,01.

У результаті реалізації кроку кластеризації отримуємо при заданому радіусі 14 дуже побідних груп первинних ознак тканин хірургічного втурчання із відповідними наборами центрів та інтервальних оцінок відстаней від точок подразнення до ЗГН, таблиця 2.4.

Таблиця 2.4

Набори центрів груп первинних ознак тканин хірургічної рани

k	\hat{x}_{1k}	\hat{x}_{2k}	$[y_k]$	k	\hat{x}_{1k}	\hat{x}_{2k}	$[y_k]$
1	0.458	0.189	[0;0]	8	0.711	0.012	[0.6;0.8]
2	0.310	0.024	[0.2;0.3]	9	0.248	1.000	[0;0]
3	0.109	0.012	[0.6;0.7]	10	0.109	0.847	[0.1;0.3]
4	0.569	0.024	[0.1;0.2]	11	1.000	0.012	[0.7;0.8]
5	0.418	0.024	[0.1;0.2]	12	0.000	0.035	[0.8;1]
6	0.332	0.860	[0.2;0.3]	13	0.230	0.872	[0.1;0.3]
7	0.335	0.165	[0.5;0.6]	14	0.354	0.224	[0.4;0.5]

Як бачимо, інтервали оцінок відстані для кожної з груп перетинаються. Такий результат унеможлиблює побудову адекватної інтервальної моделі первинних ознак характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи

пацієнтів. Після шести ітерацій отримали найбільш значущі результати кластеризації. При цьому радіус кластера становив 0,31. За таких умов одержали 5 подібних груп із відповідними наборами центрів $\hat{x}_{1k}, \hat{x}_{2k}, k=1, \dots, 5$, таблиця 2.5.

Таблиця 2.5

Центри груп первинних ознак хірургічної рани

k	\hat{x}_{1k}	\hat{x}_{2k}	$[y_k]$
1	0.452	0.189	[0;0]
2	0.227	0.872	[0.1;0.3]
3	0.276	0.000	[0.3;0.6]
4	0.701	0.012	[0.6;0.8]
5	0.000	0.035	[0.8;1]

Після реалізації четвертого кроку алгоритму одержуємо відсортовану нормовану вибірку первинних характеристик тканин хірургічної рани у вигляді множини первинних ознак тканин хірургічної рани та відповідних інтервальних оцінок відстані до ЗГН. Отримані групи первинних ознак тканин хірургічної рани таблиці даних 2.2 зображено на рисунках 2.10 – 2.14.

Група 1

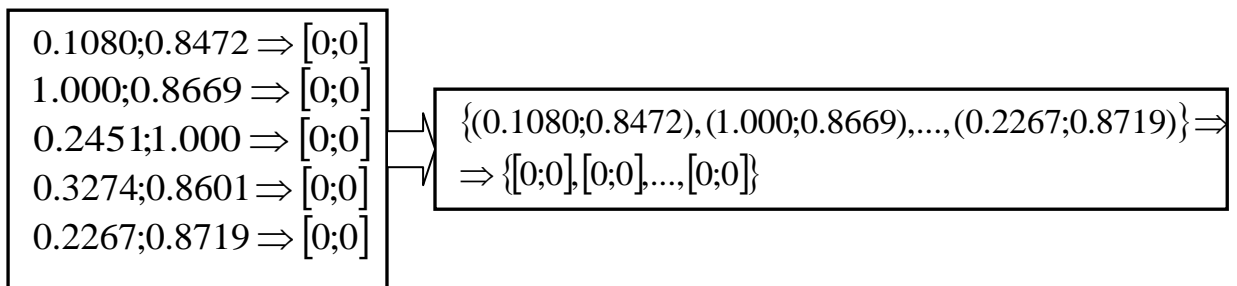


Рис. 2.10. Перша група первинних ознак тканин хірургічної рани

Зі схеми рис. 2.10 випливає, що до першої групи відносяться спектральні характеристики інформаційних сигналів, які вказують, що точка подразнення хірургічної рани знаходиться безпосередньо на зворотному гортанному нерві. Ширина результуючого інтервалу відстані від точки подразнення до ЗГН при цьому рівна 0.

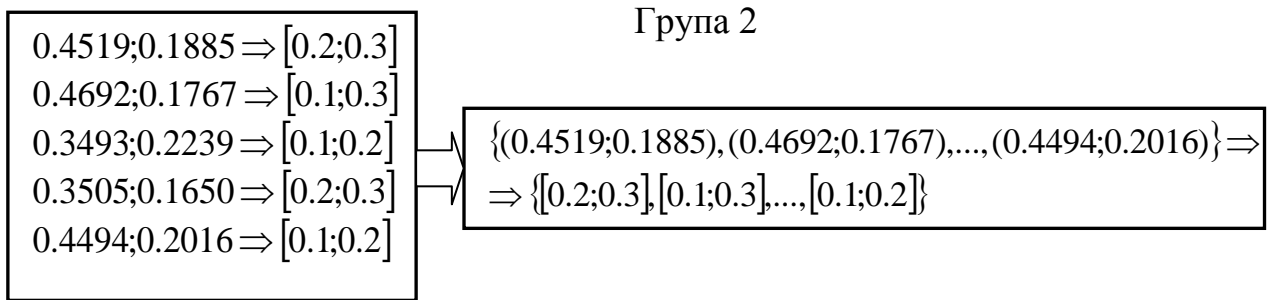


Рис. 2.11. Друга група первинних ознак тканин хірургічної рани

Первинні ознаки, що входять до другої групи (див. рис. 2.11) відносяться до групи ризику, оскільки вказують, що точка подразнення хірургічної рани дуже близько до зворотного гортанного нерва.

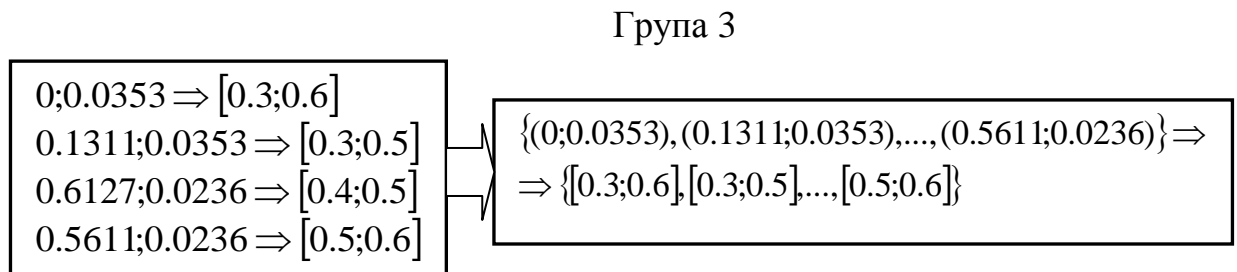


Рис. 2.12. Третя група первинних ознак тканин хірургічної рани

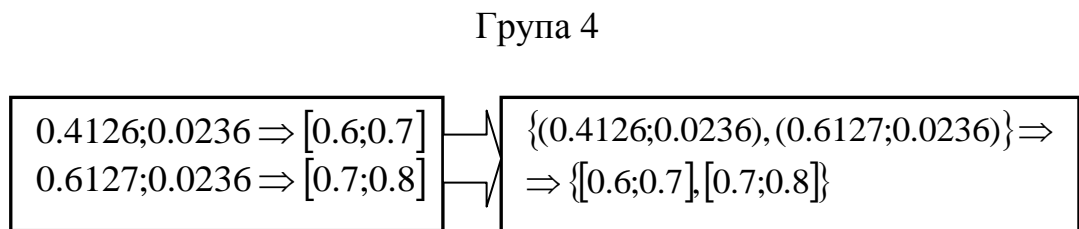


Рис. 2.13. Четверта група первинних ознак тканин хірургічної рани

Як свідчать результати, представлені на схемах рисунків 2.12 - 2.13, первинні характеристики тканин хірургічної рани, що становлять третю та четверту групи, вказують на безпечну область середовища хірургічного втручання під час проведення операції на щитоподібній залозі.

Спектральні характеристики ІС – реакції на подразнення тканин хірургічної рани, що становлять п'яту групу ознак вказують на безпечну ділянку середовища хірургічного втручання.

Група 5

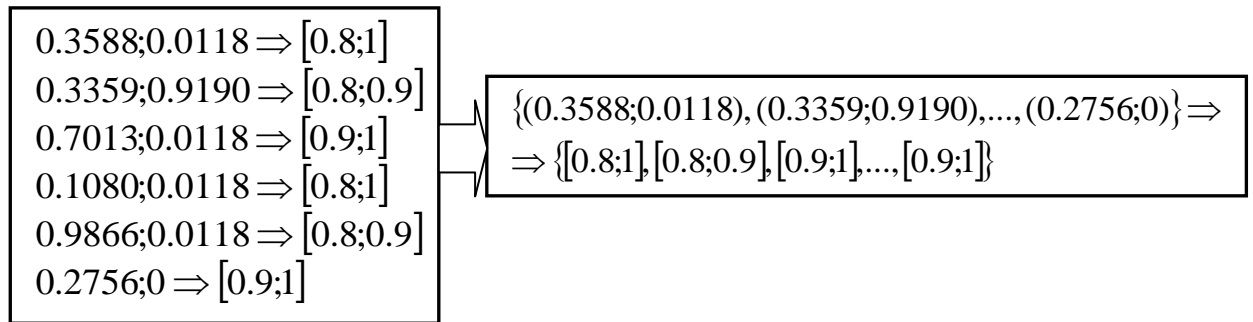


Рис. 2.14. П'ята група первинних ознак тканин хірургічної рани

Користуючись наборами даних із рисунків 2.10 – 2.14, на п'ятому кроці реалізації алгоритму одержуємо результуючі інтервали відстані від точки подразнення на хірургічній рані до зворотного гортанного нерва, що описують первинні ознаки тканин хірургічної рани. При цьому інтервальні моделі характеристик тканин хірургічної рани мають вигляд:

$$(\hat{\bar{x}}_{11} = 0.279, \hat{\bar{x}}_{12} = 0.012) \rightarrow \{[0;0] \cup [0;0] \cup [0;0] \cup [0;0] \cup [0;0]\} \rightarrow \\ \rightarrow [y_1^- = 0; y_1^+ = 0];$$

$$(\hat{\bar{x}}_{21} = 0.230, \hat{\bar{x}}_{22} = 0.872) \rightarrow \{[0.2;0.3] \cup [0.1;0.3] \cup [0.1;0.2] \cup [0.2;0.3] \cup \\ \cup [0.1;0.2]\} \rightarrow [y_2^- = 0.1; y_2^+ = 0.3];$$

$$(\hat{\bar{x}}_{31} = 0.711, \hat{\bar{x}}_{32} = 0.012) \rightarrow \{[0.3;0.6] \cup [0.3;0.5] \cup [0.4;0.5] \cup [0.5;0.6]\} \rightarrow \\ \rightarrow [y_3^- = 0.3; y_3^+ = 0.6];$$

$$(\hat{\bar{x}}_{41} = 0.021, \hat{\bar{x}}_{42} = 0.035) \rightarrow \{[0.6;0.7] \cup [0.7;0.8]\} \rightarrow \\ \rightarrow [y_4^- = 0.6; y_4^+ = 0.8];$$

$$(\hat{\bar{x}}_{51} = 0.458, \hat{\bar{x}}_{52} = 0.189) \rightarrow \{[0.9;1] \cup [0.8;0.9] \cup \dots \cup [0.8;0.9] \cup [0.9;1]\} \rightarrow \\ \rightarrow [y_5^- = 0.8; y_5^+ = 1] \quad (2.9)$$

Побудовані інтервали нормованої відстані від точки подразнення до зворотного гортанного нерва на хірургічній рані наведено на рис. 2.15.

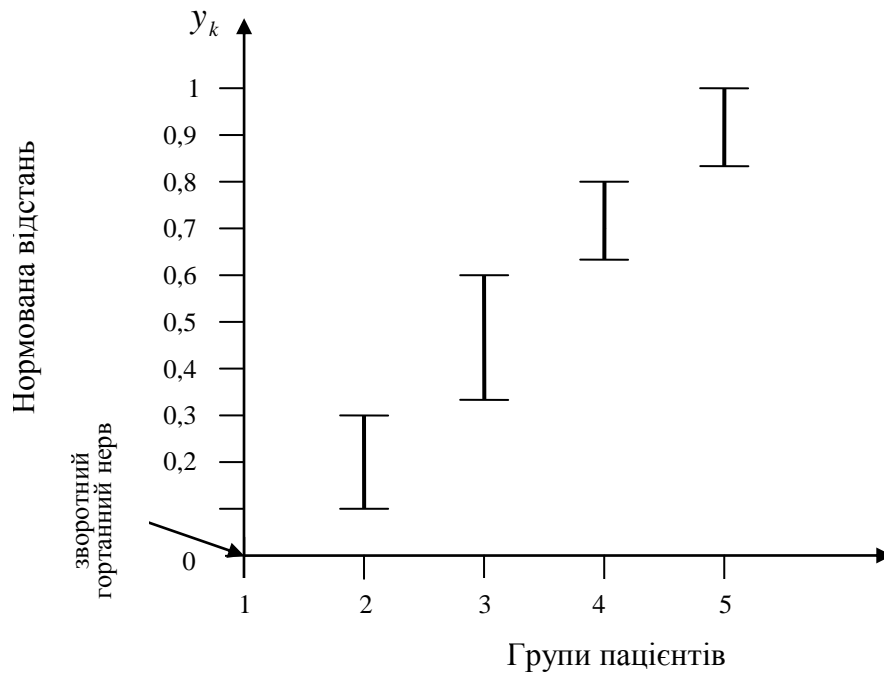


Рис. 2.15. Ітервальне представлення нормованої відстані від точки подразнення тканин хірургічної рани до зворотного гортанного нерва

Як бачимо на рисунку 2.15, побудовані інтервали відстані від точки подразнення до ЗГН не перетинаються та є результатом об'єднання експериментальних інтервальних значень відстані, що характерні для наборів спектральних характеристик інформаційних сигналів, які складають групу пацієнтів. У підсумку результуючі інтервали означають відстань від 0, що вказує на подразнення безпосередньо ЗГН до 1, що свідчить про безпечну ділянку для розтину тканин хірургічної рани.

Отже, запропоновані метод та алгоритм інтервального представлення первинних характеристик тканин хірургічної рани забезпечують побудову єдиної інтервальної моделі первинних характеристик хірургічної рани для групи пацієнтів. У підсумку це уможливить побудову математичної моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій, що забезпечить інтервальну оцінку відстані від точки подразнення хірургічної

рани до ЗГН, а це, в свою чергу, зменшить час проведення операції на щитоподібній залозі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Охарактеризовано процедуру виділення спектральних характеристик інформаційних сигналів – реакції на подразнення тканин хірургічної рани. Із результатів експериментальних досліджень встановлено, що такими параметрами є первинні ознаки тканин хірургічної рани - спектральна складова із максимальною амплітудою та частота, на якій вона зосереджена.

2. На основі субтрактивного алгоритму кластеризації та аналізу інтервальних даних розроблено та обґрунтовано інтервальну модель первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН у вигляді множини спектральних характеристик інформаційних сигналів та інтервальних оцінок відстаней від точок подразнення хірургічної рани до ЗГН спільних для групи пацієнтів, що у підсумку забезпечує побудову єдиної математичної моделі первинних характеристик хірургічної рани для групи пацієнтів.

3. Розроблено алгоритм побудови інтервальної моделі первинних характеристик тканин хірургічної рани, який ґрунтується на процедурах нормування та кластеризації й не вимагає складних обчислювальних процедур, що продемонстровано на прикладі.

РОЗДІЛ 3

МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ СТРУКТУРНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ У ВИГЛЯДІ РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИХ ФУНКЦІЙ

У попередньому розділі дисертаційної роботи побудовано інтервальну модель характеристик тканин середовища моніторингу ЗГН у вигляді множини первинних ознак (спектральних характеристик) ІС – опосередкованої реакції на подразнення тканин електрофізіологічним способом. Інтервальне представлення цих ознак створює можливості для побудови єдиної математичної моделі інтегрованої характеристики середовища хірургічного втручання для групи пацієнтів і уможлиблює її використання для розв’язування задачі оперативного моніторингу ЗГН. У першому розділі обґрунтовано, що таку математичну модель доцільно будувати із використанням базису у вигляді набору радіальних функцій.

Зважаючи на вищезазначене, у цьому розділі дисертаційної роботи наведено результати розробки математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей інтегрованої характеристики середовища моніторингу ЗГН на основі радіально-базисних функцій.

Розроблений новий метод ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій передбачає поєднання процедури формування центрів рецепторного поля радіально-базисних функцій та аналізу інтервальних даних. Таке поєднання є нетрадиційним для методу кластеризації і забезпечує одночасне налаштування структури моделі та одержання гарантованих оцінок її параметрів.

У цьому розділі також наведено ряд прикладів, які підтверджують працездатність розроблених методів.

Результати, наведені в цьому розділі опубліковано у працях [28, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 82, 85, 86, 116, 145].

3.1. Метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями

Нехай результати експерименту представлено у вигляді вибірки інтервальних даних:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} x_{21} \dots x_{n1} \\ x_{12} x_{22} \dots x_{n2} \\ \vdots \\ x_{1k} x_{2k} \dots x_{nk} \end{pmatrix}, [Y] = \begin{pmatrix} [y_1^-; y_1^+] \\ [y_2^-; y_2^+] \\ \vdots \\ [y_k^-; y_k^+] \end{pmatrix}, k = 1, \dots, K. \quad (3.1)$$

Поставимо умову, щоб

$$\hat{y}_k \in [y_k], \forall k = 1, \dots, K \quad (3.2)$$

де \hat{y}_k значення, що обчислені із виразу, який задає структуру моделі з РБФ:

$$y = w_0 + \sum_{h=1}^H w_h \cdot f_h(\|\vec{x} - \vec{c}_h\|_{R_h}) \quad (3.3)$$

для заданих вхідних значень $\vec{x}_k = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk})$, $k = 1, \dots, K$.

У виразі (3.3) невідомими є кількість радіально-базисних функцій f_h , $h=1, \dots, H$, характеристики рецепторних полів радіально-базисних функцій \vec{c}_h , R_h , $h=1, \dots, H$, та вектор параметрів \vec{w} .

Розглянемо схему знаходження оцінок невідомих параметрів моделі. Зважаючи на поставлену умову (3.2) та структуру моделі (3.3), одержимо ІСЛАР:

$$\begin{cases} y_1^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_1 - \vec{c}_1\|_{R_1}) + \dots + w_h \cdot f_h(\|\vec{x}_1 - \vec{c}_h\|_{R_h}) \leq y_1^+ \\ y_2^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_2 - \vec{c}_1\|_{R_1}) + \dots + w_h \cdot f_h(\|\vec{x}_2 - \vec{c}_h\|_{R_h}) \leq y_2^+ \\ \vdots \\ y_k^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_k - \vec{c}_1\|_{R_1}) + \dots + w_h \cdot f_h(\|\vec{x}_k - \vec{c}_h\|_{R_h}) \leq y_k^+ \end{cases} \quad (3.4)$$

Отримана система є інтервальною системою лінійних алгебричних рівнянь відносно невідомих параметрів \vec{w} і також системою із невідомою кількістю радіально-базисних функцій та значеннями характеристик рецепторних полів РБФ. Розв'язком отриманої ІСЛАР є область параметрів у вигляді многогранника Ω :

$$\Omega = \left\{ \vec{w} \in R^m \mid y_k^- \leq \sum_{h=1}^H \vec{w}_h^T \cdot \vec{f}_h (\|\vec{x}_k - \vec{c}_h\| \cdot R_h) \leq y_k^+ \right\},$$

$$k=1, \dots, K, h=1, \dots, H. \quad (3.5)$$

Проте, щоб розв'язати одержану ІСЛАР (3.4), необхідно спочатку налаштувати структуру моделі з РБФ, на основі якої система побудована.

Ідентифікація структури математичної моделі заданого типу полягає у визначенні кількості радіально-базисних функцій та налаштуванні параметрів їх рецепторних полів - центрів \vec{c}_h та коваріаційної матриці R_h , $h=1, \dots, H$, за умов сумісності системи (3.4).

Схему структурної ідентифікації математичних моделей із структурними елементами у вигляді РБФ наведено на рис. 3.1.

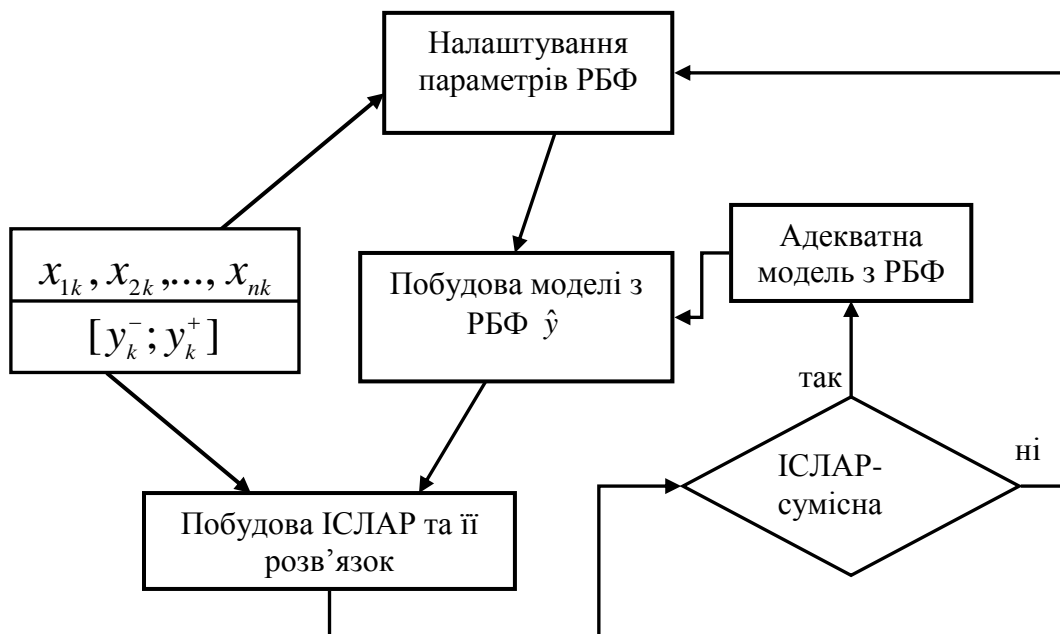


Рис. 3.1. Схема структурної ідентифікації математичних моделей з РБФ

Як бачимо на схемі рис. 3.1, ідентифікація структури моделі з РБФ здійснюється у спосіб початкового її задання та подальшої модифікації за результатами процедури налаштування її параметрів із розв'язування ІСЛАР. Ітерації процедури вибору модифікації структури інтервальної моделі на основі радіально-базисних функцій повторюємо до того часу, поки ІСЛАР не буде сумісна. За умов сумісності системи одержуємо структуру інтервальної моделі з РБФ із гарантованими прогностичними властивостями.

Для налаштування параметрів рецепторних полів $\vec{c}_h, R_h, h=1, \dots, H$ РБФ доцільно застосувати модифікований метод «гірської» кластеризації, оскільки зазначений метод не вимагає великої вибірки експериментальних даних та не потребує попереднього задання кількості кластерів, що суттєво зменшує часові витрати на реалізацію методу. Також варто відзначити, що кількість кластерів на основі зазначеного методу регулюється за допомогою єдиного параметра – радіуса кластера [107], що підкреслює його низьку обчислювальну складність. Разом з тим радіус кластера, на відміну від традиційного методу кластеризації, обираємо за умови забезпечення сумісності ІСЛАР.

Згідно методу кластеризації на початку формуємо потенційні центри кластерів із стрічок матриці X вхідних змінних (3.1) й обчислюємо потенціали визначених центрів кластерів за формулою:

$$P_h(c_h) = \sum_{k=1}^K \exp(-\alpha \cdot \|\vec{c}_h - \vec{x}_k\|), \quad (3.6)$$

де $\vec{c}_h = (c_{1h}, c_{2h}, \dots, c_{Kh})$ - потенційний центр h – го кластера; α – додатна константа; $\|\vec{c}_h - \vec{x}_k\|$ - відстань між потенційним центром h – го кластера \vec{c}_h і вхідними експериментальними даними \vec{x}_k ; H – кількість можливих кластерів, $k=1, \dots, K, h=1, \dots, H$.

Для вхідних змінних, представлених вектором $\vec{x}_k = (x_{1k}, x_{2k})$ графічна

ілюстрація розподілу потенціалу представляє поверхню у вигляді гірського рельєфу (див. рис. 3.2), вершини якого мають найбільший потенціал і є претендентами на центри сформованих кластерів.

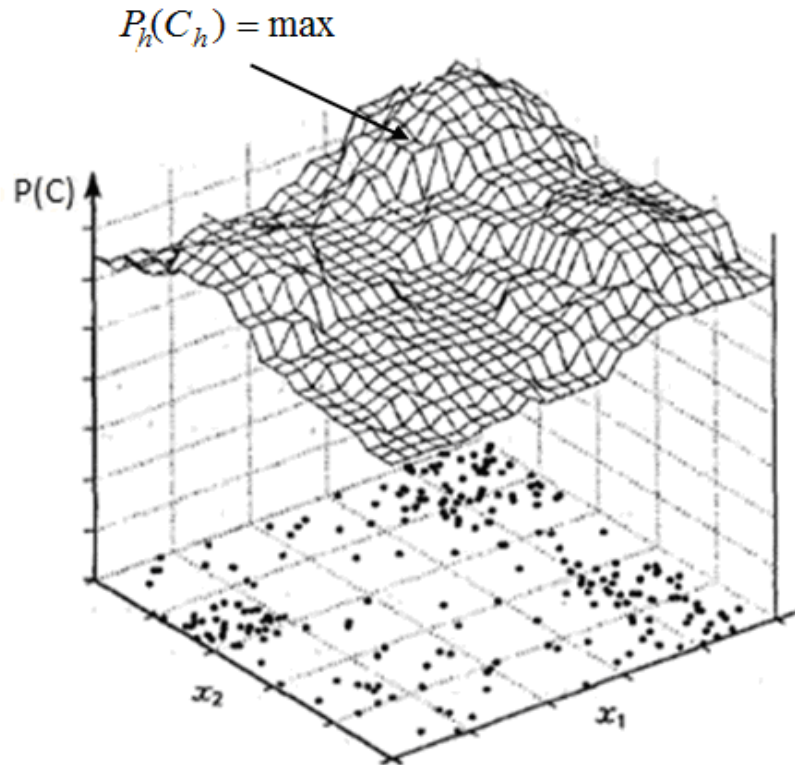


Рис. 3.2. Розподіл потенціалу при налаштуванні параметрів РБФ на основі «гірського» методу кластеризації

Як бачимо на рис. 3.2, одна "гірська" вершина оточена іншими вершинами, що зумовлює проблему побудови дуже подібних кластерів даних із відповідними центрами. Це не забезпечує якісних результатів кластеризації та ускладнює задачу структурної ідентифікації математичних моделей з РБФ. Водночас слід відзначити, що на відміну від класичного методу кластеризації, в нашому випадку під «якісними результатами кластеризації» будемо розуміти ті результати, які забезпечують сумісність ІСЛАР.

Як центри кластерів обираємо координати "гірських" вершин, тобто центром кластера обираємо точку із найбільшим потенціалом:

$$\vec{c}_h = \arg \max_{c_1, c_2, \dots, c_H} (P_h(\vec{c}_1), P_h(\vec{c}_2), \dots, P_h(\vec{c}_H)),$$

$$h=1, \dots, H. \quad (3.7)$$

З метою унеможливлення впливу знайденого центру h -го кластера із (3.7), тобто уникнення побудови подібних кластерів перераховуємо значення потенціалу для тих можливих центрів кластерів, що залишилися:

$$P_{h+1}(\vec{c}_{h+1}) = P_h(\vec{c}_{h+1}) - P_h(\vec{c}_h) \cdot \exp(-\beta \cdot \|\vec{c}_{h+1} - \vec{c}_h\|),$$

$$h=1, \dots, H. \quad (3.8)$$

де $P_h(\vec{c}_h)$ - потенціал центру h -го кластера на h -ій ітерації; $P_{h+1}(\vec{c}_h)$ - потенціал центру h -го кластера на $h+1$ ітерації; \vec{c}_h - центр знайденого h -го кластера, β - додатна константа, $\|\vec{c}_{h+1} - \vec{c}_h\|$ - відстань між потенційним центром $h+1$ - го кластера та центром знайденого h -го кластера \vec{c}_h .

Процедуру вибору центрів кластерів виконуємо до того часу, поки не буде виключено всі стрічки матриці вхідних змінних X , яку представлено у наборі (3.1).

У результаті налаштування параметрів рецепторного поля РБФ одержуємо вектор центрів \vec{c}_h із відповідними компонентами та коваріаційну матрицю R_h , $h=1, \dots, H$, що дозволяє отримати поточну структуру математичної моделі з РБФ із h -ою кількістю радіально-базисних функцій та h невідомими параметрами.

Перевірка адекватності поточної структури моделі з РБФ, сформованої на поточній ітерації із заданими налаштуваннями (радіусом кластера), полягає в перевірці на сумісність ІСЛАР (3.4). У відомих методах інтервального аналізу [25, 32] обґрунтовано, що ІСЛАР (3.4) є сумісною, якщо існує розв'язок хоча б однієї із таких задач лінійного програмування:

$$w_h \rightarrow \min(\max) \ , \ h=1, \dots, H \quad (3.9)$$

за умов (3.4).

Зауважимо, що для перевірки сумісності ІСЛАР достатньо розв'язати тільки одну із задач лінійного програмування (3.9).

Якщо ж розв'язок задачі хоча б однієї із задач лінійного програмування (3.9) відсутній, то необхідно зменшити радіус кластера та перейти до ітерації налаштування параметрів рецепторних полів. Такий спосіб забезпечує ускладнення структури моделі.

Варто зазначити, що можлива втрата точності при пошуку області параметрів \vec{w} у вигляді опуклого многогранника (3.5) за рахунок похибок заокруглень. Одночасно представлення розв'язків ІСЛАР у вигляді опуклого многогранника суттєво ускладнює алгоритм побудови коридорів інтервальних моделей з РБФ для прогнозування відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН на основі первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН.

За таких умов доцільно проводити пошук множинних оцінок усіх параметрів w_h , $h=1, \dots, H$ із задач лінійного програмування (3.9), застосовуючи метод локалізації області параметрів у вигляді прямокутного паралелепіпеда Π^+ [27, 30].

Ілюстрацію представлення оцінки області параметрів для $\vec{w}_h = (w_{1h}, w_{2h})$ інтервальних моделей з радіально-базисними функціями у вигляді прямокутного паралелепіпеда Π^+ наведено на рисунку 3.3.

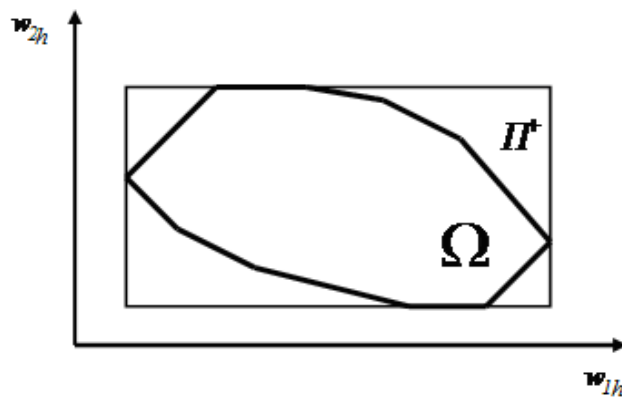


Рис. 3.3. Ілюстрація гарантованих інтервальних оцінок параметрів інтервальних моделей з РБФ

При цьому розв'язок задачі локалізації області параметрів моделі записуємо у такому вигляді:

$$w_h^- = \operatorname{argmin}(w_h) \quad w_h^+ = \operatorname{argmax}(w_h) \quad (3.10)$$

за умов (3.4).

Як було зазначено вище, задача (3.10) складається із $2H$ задач лінійного програмування. В процесі її розв'язування буде обчислено координати $2H$ вершин із усіх вершин опуклого многогранника Ω :

$$w_h \rightarrow \min, \quad h=1, \dots, H, \quad (3.11)$$

$$w_h \rightarrow \max, \quad h=1, \dots, H \quad (3.12)$$

за умов (3.4).

Результатом розв'язку задач (3.11), (3.12) за умов (3.4) є інтервальний вектор оцінок параметрів інтервальної моделі на основі радіально-базисних функцій $[\bar{w}]$. При цьому компоненти вектора оцінок параметрів інтервальної моделі на основі радіально-базисних функцій записуємо в інтервальному вигляді $[w_h^-, w_h^+]$, $h = 1, \dots, H$, де w_h^-, w_h^+ – нижня та верхня гарантовані межі значень параметрів.

У результаті локалізації області параметрів прямокутним паралелепіпедом Π^+ отримуємо коридор інтервальних моделей з радіально-базисними функціями у такому вигляді:

$$[\hat{y}] = \left[\min \left\{ \sum_{h=1}^H w_h^- \cdot f_h(\|\bar{x} - \bar{c}_h\| \cdot R_h); \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot f_h(\|\bar{x} - \bar{c}_h\| \cdot R_h) \right\}; \right. \\ \left. \max \left\{ \sum_{h=1}^H w_h^- \cdot f_h(\|\bar{x} - \bar{c}_h\| \cdot R_h); \sum_{h=1}^H w_h^+ \cdot f_h(\|\bar{x} - \bar{c}_h\| \cdot R_h) \right\} \right]. \quad (3.13)$$

При цьому у випадку додатності значень радіально-базисних функцій, коридор інтервальних моделей (3.3) записуємо у такому вигляді:

$$[\hat{y}] = [w_0^-; w_0^+] + f_1(\|\vec{x} - \vec{c}_1\| \cdot R_1) \cdot [w_1^-; w_1^+] + \dots + f_h(\|\vec{x} - \vec{c}_h\| \cdot R_h) \cdot [w_h^-; w_h^+]. \quad (3.14)$$

Отже, як зазначено вище, складність задачі налаштування параметрів рецепторних полів РБФ для ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій суттєво залежить від обраного радіуса кластера та правила його модифікації в ітераційній процедурі налаштування, а складність параметричної ідентифікації математичних моделей з РБФ за умов інтервальної невизначеності – від методу локалізації області параметрів.

З огляду на це, у наступному підрозділі детально розглянемо алгоритм реалізації методу структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій та властивості інтервальних моделей із РБФ, побудованих на його основі.

3.2. Алгоритм ідентифікації математичних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій на основі аналізу інтервальних даних

Метод ідентифікації інтервальних моделей з РБФ, описаний у попередньому підрозділі, поєднує процедури структурної ідентифікації, що полягає у налаштуванні параметрів рецепторного поля радіально-базисних функцій, та параметричної ідентифікації, в основі якої пошук області невідомих параметрів моделі із розв'язку ІСЛАР. Розглянемо тепер детально алгоритм ідентифікації математичних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій за умов інтервальної невизначеності.

Блок-схему алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з РБФ, який розкриває послідовність виконання дій у контексті розв'язку задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій, зображено на рисунку 3.4. На початку вводимо експериментальні дані $\vec{x}_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})$, $[y_k]$, $k = 1, \dots, K$ та початкові параметри алгоритму: радіус кластера $r=1$ та параметр кроку $\Delta r = 1/K$.

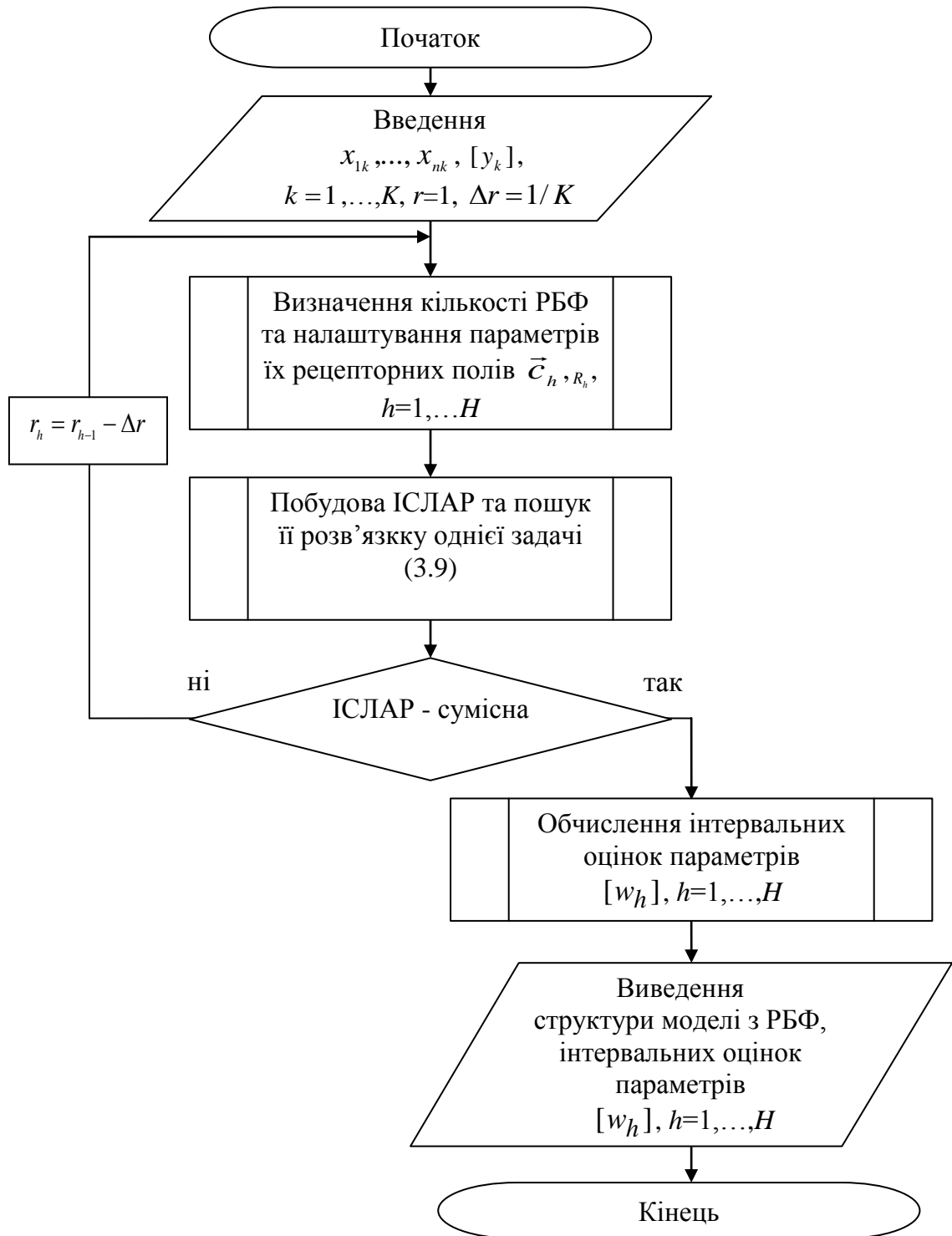


Рис. 3.4. Блок - схема алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з РБФ

При цьому радіус кластера визначає діапазон впливу центру кластера на кожну з компонент точки вхідних даних. Варто відзначити, що на відміну від відомого «гірського» методу кластеризації, параметр кроку Δr , який визначає кількість ітерацій обчислювальної схеми реалізації методу

структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з РБФ, визначаємо із умови обов'язкового забезпечення сумісності ІСЛАР.

У стандартному алгоритмі субтрактивної кластеризації радіус кластера вибирають випадковим чином, крок зміни радіуса задають дуже великого розміру. Проте у зазначеному випадку за умов інтервального представлення вихідних експериментальних даних результатом кластеризації вхідних експериментальних даних повинна бути структура моделі на основі радіально-базисних функцій, яка забезпечує сумісність ІСЛАР. Тому вибір цього кроку не може бути випадковим і повинен забезпечувати збіжність процедури ідентифікації.

Отже, для побудови математичної моделі з РБФ із гарантованими прогностичними властивостями на початку задамо $r=1$, а $\Delta r = 1/K$, де K – загальна кількість інтервальних даних. При цьому кількість кроків Δr дорівнює кількості експериментальних інтервальних даних. Такий вибір кроку завжди забезпечуватиме збіжність обчислювальної процедури, тобто сумісність ІСЛАР за скінченну кількість кроків.

Слід зазначити, що параметр Δr можна обирати і більш складнішим способом, зокрема половинним поділом:

$$\Delta r_h = \frac{\Delta r_{h-1}}{2}, \quad (3.15)$$

де Δr_{h-1} - параметр кроку на попередній ітерації реалізації алгоритму. Такі схеми найбільш придатні у випадках, коли вибірка експериментальних даних для розв'язування задачі дуже велика. При цьому зменшується обчислювальна складність реалізації алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з РБФ, оскільки зменшується кількість ітерацій алгоритму. Проте, варто зазначити, що в цьому випадку не гарантується збіжність обчислювальної процедури алгоритму.

Як видно з блок-схеми алгоритму рис. 3.4, на наступному кроці, переходимо до знаходження кількості радіально-базисних функцій та

параметрів їх рецепторних полів - центрів \vec{c}_h та коваріаційної матриці R_h , $h=1, \dots, H$. Зазначена процедура базується на субтрактивному алгоритмі кластеризації, блок-схему якого наведено на рисунку 3.5.

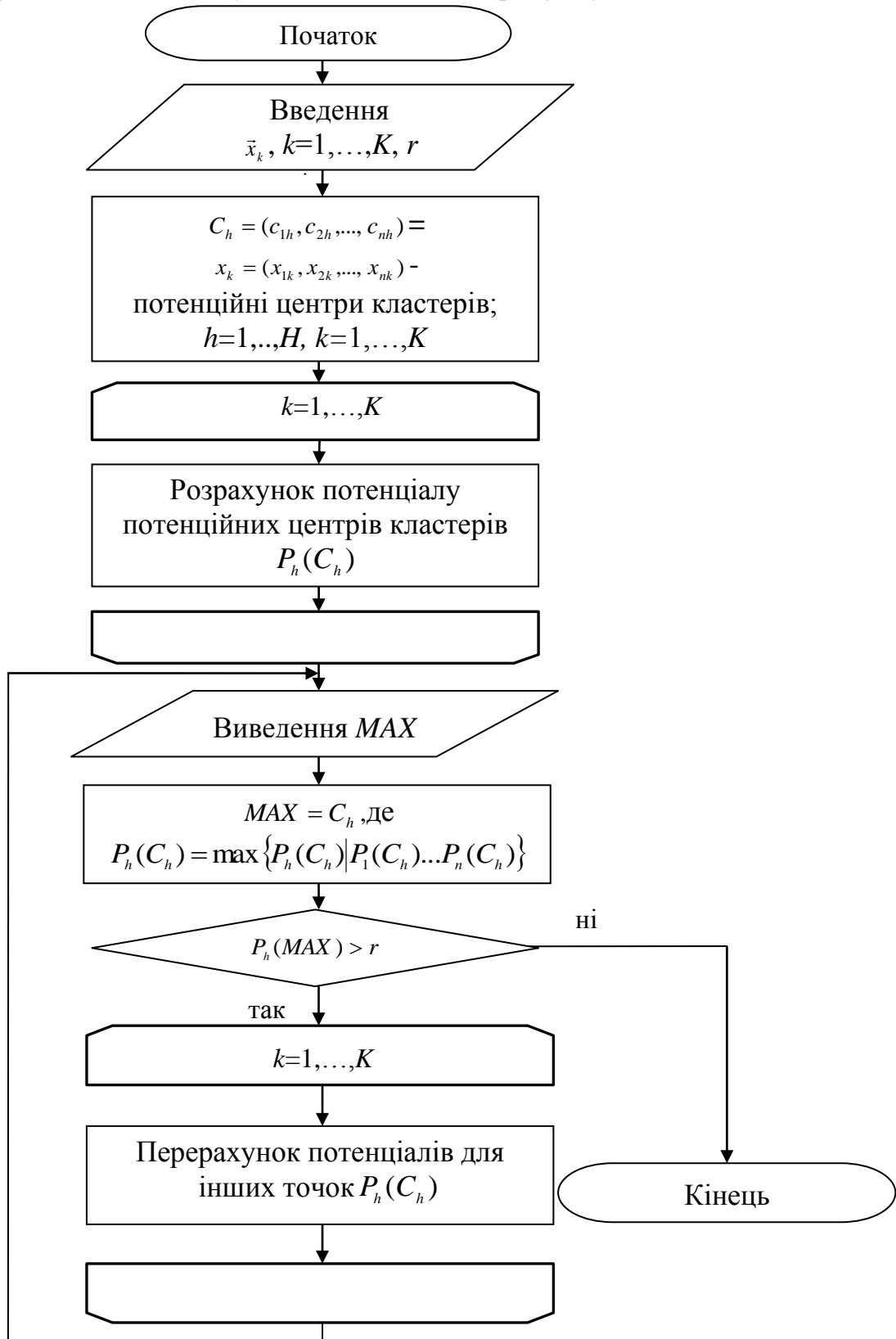


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму кластеризації

Зазначений алгоритм ґрунтується на виконанні нижче наведених кроків.

Крок 1. Формуємо потенційні центри кластерів. Ними є рядки матриці вхідних експериментальних даних (3.1);

Крок 2. Розраховуємо потенціал потенційних центрів кластерів на основі формули (3.6);

Крок 3. Вибираємо точку даних з максимальним потенціалом для представлення центра кластера на основі виразу (3.7);

Крок 4. Виключаємо вплив знайденого центра кластера шляхом перерахунку потенціалів для інших можливих центрів кластерів за формулою (3.8);

Крок 5. Визначаємо наступний кластер і координати його центра. Якщо максимальне значення потенціалу центра кластера перевищує деякий наперед заданий поріг – радіус кластеризації, тобто $P_h(C_h) > r$, то переходимо на *крок 4*, в протилежному випадку – завершуємо алгоритм.

Ітераційна процедура виділення центрів кластерів і перерахунку потенціалів повторюється до того часу, поки всі точки в просторі вхідних експериментальних даних не виявляться всередині околиць радіуса кластеризації шуканих центрів кластерів.

У результаті реалізації алгоритму кластеризації одержуємо h кластерів $h=1, \dots, H$ із відповідними центрами \vec{C}_h , $h=1, \dots, H$ та формами рецепторних полів радіально-базисних функцій у вигляді матриць R_h , $h=1, \dots, H$. Кількість знайдених центрів кластерів відповідає кількості радіально-базисних функцій.

При початково заданих параметрах кластеризації одержуємо один кластер із відповідним центром і у підсумку – одну радіально-базисну функцію. Якщо за таких умов забезпечується сумісність ІСЛАР, то немає потреби шукати складніші структури моделей. Такий випадок можливий, якщо інтервали вихідних експериментальних даних дуже широкі.

У результаті одержуємо початкову структуру моделі:

$$y = w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x} - \vec{c}_1\|_{R_1}) \quad (3.16)$$

На основі одержаної структури моделі (3.16) та інтервальних експериментальних даних $[y_k]$, $k=1, \dots, K$ будуємо ІСЛАР та шукаємо її розв'язки. Згідно структури моделі (3.16) та інтервальних експериментальних даних $[y_k]$ ІСЛАР матиме вигляд:

$$\begin{cases} y_1^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_1 - \vec{c}_1\|_{R_1}) \leq y_1^+ \\ y_2^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_2 - \vec{c}_1\|_{R_1}) \leq y_2^+ \\ \vdots \\ y_k^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_k - \vec{c}_1\|_{R_1}) \leq y_k^+ \end{cases} \quad (3.17)$$

Для перевірки сумісності ІСЛАР (3.17) застосовуємо процедуру знаходження її хоча б одного розв'язку на основі однієї задачі лінійного програмування (3.9). Якщо хоча б один розв'язок ІСЛАР (3.17) існує, то далі, згідно із блок-схемою рис. 3.4, переходимо до наступного кроку – процедури пошуку інтервальних оцінок параметрів моделі – прямокутного паралелепіпеда P^+ , розв'язуючи всі задачі лінійного програмування (3.9) за умови (3.17) та завершуємо процедуру ідентифікації інтервальної моделі з радіально-базисними функціями.

Якщо ж побудована ІСЛАР (3.17) не сумісна, то повертаємося до процедури налаштування параметрів рецепторного поля РБФ, при цьому радіус кластера r зменшуємо на Δr . Зменшення радіуса рецепторного поля завжди призведе до ускладнення структури математичної моделі з РБФ.

Варто зауважити, що чим більший радіус кластера, тим менше ітерацій у алгоритмі структурної ідентифікації математичних моделей з РБФ. Якщо ж радіус кластера r зменшити до дуже малого розміру, то це може призвести до переускладнення математичної моделі з радіально-базисними функціями і на основі цього до збільшення обчислювальної складності реалізації методу ідентифікації.

Отже, із зазначеного вище випливає, що вибір параметрів методу структурної ідентифікації моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій, а саме радіуса кластера r та кроку Δr , пов'язаний із умовою досягнення сумісності ІСЛАР.

На основі запропонованого способу обчислення параметрів кластеризації сумісність ІСЛАР завжди досягається і у найгіршому випадку кількість радіально-базисних функцій дорівнюватиме кількості спостережень ($H=K$). При цьому збіжність процедури ідентифікації структури моделі з РБФ пов'язана із тим, що побудована інтервальна система завжди буде сумісною.

Варто зазначити, що математичні моделі з РБФ, одержані в результаті реалізації вищеописаного алгоритму ідентифікації прості в оперуванні внаслідок особливостей структурної ідентифікації. Оскільки структура інтервальної моделі з РБФ задана лінійно-параметричним алгебричним рівнянням із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій, то складність структури такої моделі характеризується кількістю невідомих параметрів h , які відповідають кількості центрів рецепторного поля радіально-базисних функцій. Точність інтервальних моделей з РБФ визначаємо як різницю меж коридору прогнозування (3.13).

Тепер розглянемо особливості побудови ІСЛАР (3.4) та реалізації методу ідентифікації інтервальних моделей з РБФ для задачі побудови інтервальної моделі інтегрованих характеристик середовища моніторингу ЗГН. В цьому випадку вектор вхідних даних представлений двома компонентами – спектральною складовою із максимальною амплітудою та частотою, на якій зосереджена спектральна складова, а норма Евкліда має такий вигляд:

$$\|\vec{x}_k - \vec{c}_H\| = \sqrt{(x_{1k} - c_{1H})^2 + (x_{2k} - c_{2H})^2}.$$

При цьому ІСЛАР (3.4) набуде такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 y_1^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1 \left(\sqrt{(x_{11} - c_{11})^2 + (x_{21} - c_{12})^2} \cdot R_1 \right) + \dots \\
 \dots + w_h \cdot f_h \left(\sqrt{(x_{11} - c_{1h})^2 + (x_{21} - c_{2h})^2} \cdot R_h \right) \leq y_1^+ \\
 y_2^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1 \left(\sqrt{(x_{12} - c_{11})^2 + (x_{22} - c_{12})^2} \cdot R_1 \right) + \dots \\
 \dots + w_h \cdot f_h \left(\sqrt{(x_{12} - c_{1h})^2 + (x_{22} - c_{2h})^2} \cdot R_h \right) \leq y_2^+ \\
 y_3^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1 \left(\sqrt{(x_{13} - c_{11})^2 + (x_{23} - c_{12})^2} \cdot R_1 \right) + \dots \\
 \dots + w_h \cdot f_h \left(\sqrt{(x_{13} - c_{1h})^2 + (x_{23} - c_{2h})^2} \cdot R_h \right) \leq y_3^+ \\
 \vdots \\
 y_k^- \leq w_0 + w_1 \cdot f_1 \left(\sqrt{(x_{1k} - c_{11})^2 + (x_{2k} - c_{12})^2} \cdot R_1 \right) + \dots \\
 \dots + w_h \cdot f_h \left(\sqrt{(x_{1k} - c_{1h})^2 + (x_{2k} - c_{2h})^2} \cdot R_h \right) \leq y_k^+
 \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Як бачимо із системи (3.18), оскільки вектор вхідних даних для побудови моделей характеристик тканин хірургічної рани містить дві компоненти, то і вектор центрів РБФ складатиметься із двох компонент. Оскільки кожна k -та нерівність у системі (3.18) забезпечує належність значення функції $\hat{y}(\bar{x})$ в k -ій точці подразнення хірургічної рани до відповідного k -го інтервалу відстані від точки подразнення до ЗГН, то одночасне виконання умов, заданих нерівностями системи, означатиме існування розв'язку задачі побудови інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН із гарантованими прогностичними властивостями.

Отже, описаний вище алгоритм демонструє особливості методу структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей із структурними елементами у вигляді РБФ, ґрунтується на процедурах кластерного аналізу та лінійного програмування. Також, як впливає із вищенаписаного, складність реалізації алгоритму ідентифікації суттєво залежить від параметрів кластеризації.

На основі побудованого методу та алгоритму ідентифікації інтервальних моделей із РБФ створено програмне забезпечення для побудови

моделей з РБФ, яке використовувалося для побудови інтервальних моделей інтервованої характеристики середовища моніторингу ЗГН.

3.3. Програмне забезпечення для реалізації алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями

Для реалізації вищеописаного методу та алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з РБФ розроблено програмний комплекс, який є інструментальним засобом для математичного моделювання інтервальних моделей на основі РБФ. Розглянемо детально функціональні можливості розробленого програмного комплексу. В результаті аналізу вимог до програмного забезпечення виділено основні варіанти використання та побудовано діаграму (див. рис. 3.6), яка візуалізує основні функції програмного продукту.

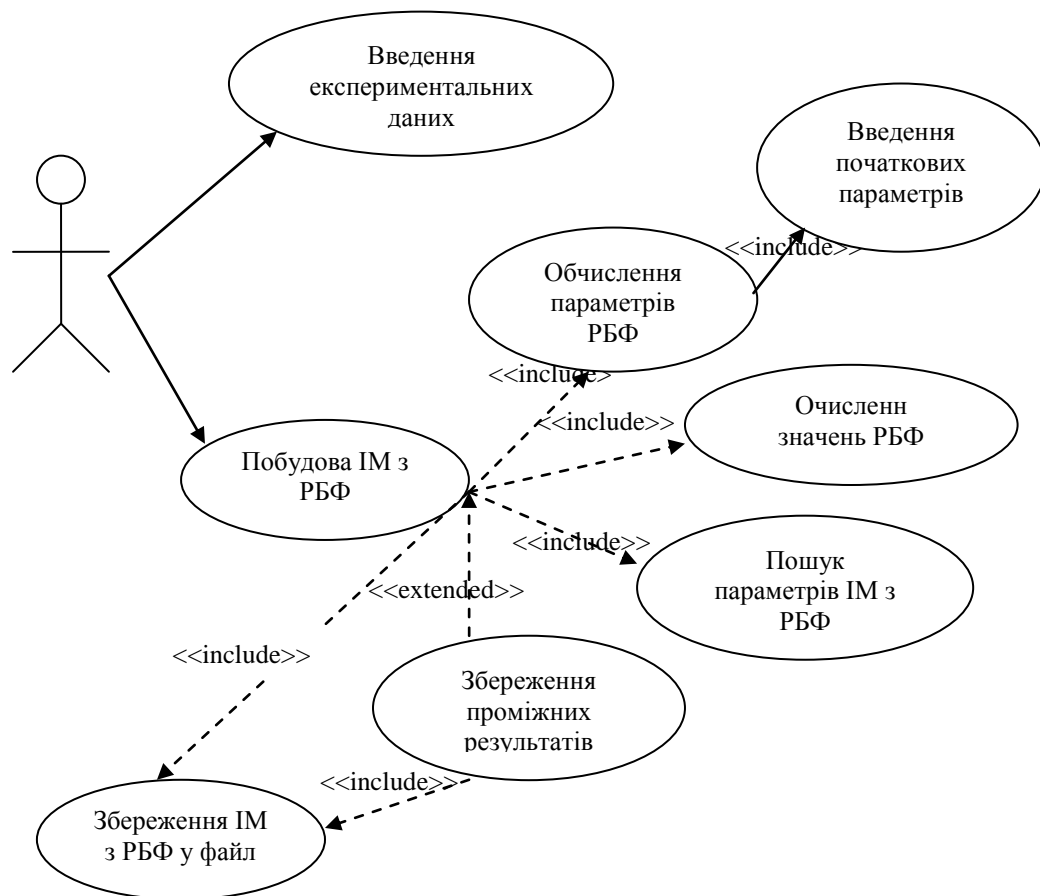


Рис. 3.6. Діаграма варіантів використання

Адміністратор програмної системи, у ролі якого може виступати будь-яка особа з необмеженим доступом, яка матиме можливість вводити експериментальні дані та на їх основі будувати інтервальні моделі з радіально-базисними функціями.

Як бачимо на рисунку 3.6, програмна система повинна надавати користувачу можливість введення експериментальних даних та початкових параметрів, які необхідні для реалізації алгоритму структурної ідентифікації інтервальних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій.

Функція “Побудова інтервальної моделі з РБФ” включає підфункції “Обчислення параметрів РБФ”, “Обчислення значень РБФ”, “Пошук параметрів інтервальної моделі з РБФ”, “Запис проміжних результатів”, та “Запис інтервальної моделі з РБФ у файл”.

Підфункція “Обчислення параметрів РБФ”, безпосередньо реалізує метод “тірської” кластеризації на основі субтрактивного алгоритму. В результаті роботи зазначеної підфункції одержуємо вектори центрів кластерів - \vec{c}_h , коваріаційну матрицю R_h та кількість радіально-базисних функцій - h .

Підфункція “Обчислення значень РБФ” на основі вектора вхідних даних \vec{x}_k , $k=1, \dots, K$, вектора центрів радіально-базисних функцій \vec{c}_h , $h=1, \dots, H$ та коваріаційної матриці R_h обчислює значення радіально-базисних функцій \vec{f}_h , $h=1, \dots, H$.

Підфункція “Пошук параметрів інтервальної моделі з РБФ” реалізує метод параметричної ідентифікації математичних моделей з РБФ на основі аналізу інтервальних даних. На основі вхідних даних \vec{x}_k - та інтервальних вихідних $[y_k^-; y_k^+]$, $k=1, \dots, K$, які вводить користувач, одержуємо вектор оцінок параметрів $[\vec{w}_h]$, $h=1, \dots, H$ інтервальної моделі на основі радіально-базисних функцій.

Підфункція “Запис проміжних результатів” забезпечує можливість зупинки програми у процесі роботи функції побудови інтервальної моделі з РБФ, запис результатів у файл. При наступному запуску програми зазначена підфункція уможливить продовження процедури структурно-параметричної ідентифікації інтервальної моделі з РБФ із місця зупинки.

Програмний комплекс для автоматизації пошуку математичної моделі на основі радіально-базисних функцій розроблено із використанням структурно-функціонального підходу. Алгоритм функціонування програмного модуля, який відповідає за побудову інтервальної моделі з РБФ наведено на рис. 3.7.



Рис. 3.7. Алгоритм функціонування програмного модуля побудови інтервальної моделі з РБФ

Для реалізації програмного комплексу використано пакет прикладних програм для математичного моделювання (компілятор Matlab), який на даний момент є ефективним інструментом проведення прикладних розрахунків та розробки нових алгоритмів [33, 39, 44]. Значною перевагою системи зазначеного пакету прикладних програм є відкритість коду реалізованих програм, що полегшує дослідження та розвиток реалізованих алгоритмів та

наявність широкого спектру вбудованих стандартних функцій та інструментів – "тулбоксів", що ґрунтуються на матричних структурах даних [44]. Лістинг програми для ідентифікації інтервальної моделі з РБФ наведено у додатку Б.

У результаті реалізації функції налаштування математичної моделі з РБФ одержуємо вектор центрів та параметр ширини рецепторних полів. Екранну форму вікна візуалізації результатів зображено на рисунку 3.8.

```

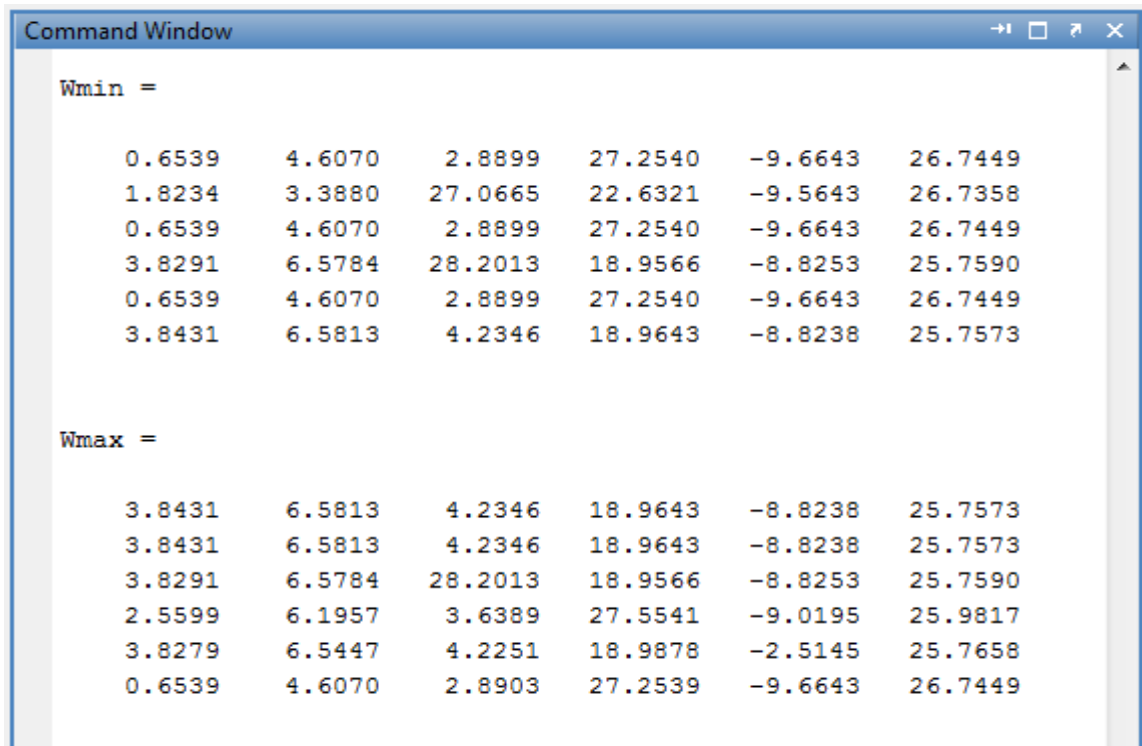
Command Window
Centry:
0.452    0.189
0.306    0.024
0.336    0.919
0.613    0.024
0.000    0.035
0.108    0.847
1.000    0.867
Sigma:
0.071    0.071
  
```

Рис. 3.8. Екранна форма візуалізації результатів реалізації функції налаштування структури моделі з РБФ

Із рисунку 3.8. бачимо, що математична модель на основі радіально-базисних функцій містить 7 базисних функцій із відповідними параметрами рецепторних полів. Вектор центрів при цьому містить дві компоненти. Для радіально-базисної функції Гауса одержуємо значення параметра ширини вікна базисної функцій, яке буде стандартне для всіх радіально-базисних функцій.

У результаті реалізації функції знаходження гарантованої області оцінок параметрів моделі з радіально-базисними функціями на основі методу локалізації у вигляді прямокутного паралелепіпеда одержуємо множинні

оцінки параметрів. На основі множинних оцінок параметрів відбувається синтез інтервальних оцінок параметрів моделі. Екранні форми візуалізації результатів зображено на рисунках 3.9-3.10.

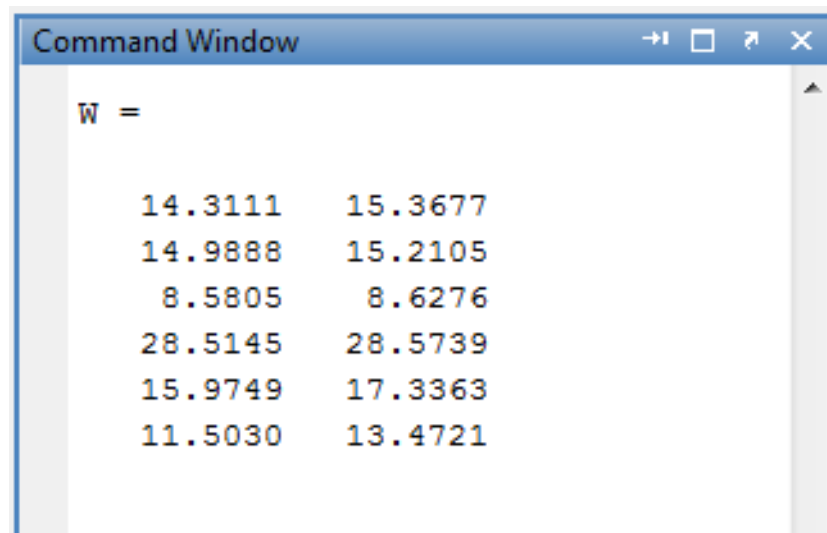


```

Command Window
Wmin =
    0.6539    4.6070    2.8899    27.2540   -9.6643    26.7449
    1.8234    3.3880    27.0665    22.6321   -9.5643    26.7358
    0.6539    4.6070    2.8899    27.2540   -9.6643    26.7449
    3.8291    6.5784    28.2013    18.9566   -8.8253    25.7590
    0.6539    4.6070    2.8899    27.2540   -9.6643    26.7449
    3.8431    6.5813    4.2346    18.9643   -8.8238    25.7573

Wmax =
    3.8431    6.5813    4.2346    18.9643   -8.8238    25.7573
    3.8431    6.5813    4.2346    18.9643   -8.8238    25.7573
    3.8291    6.5784    28.2013    18.9566   -8.8253    25.7590
    2.5599    6.1957    3.6389    27.5541   -9.0195    25.9817
    3.8279    6.5447    4.2251    18.9878   -2.5145    25.7658
    0.6539    4.6070    2.8903    27.2539   -9.6643    26.7449
  
```

Рис. 3.9. Екранна форма візуалізації результатів реалізації функції налаштування параметрів моделі



```

Command Window
W =
    14.3111    15.3677
    14.9888    15.2105
     8.5805     8.6276
    28.5145    28.5739
    15.9749    17.3363
    11.5030    13.4721
  
```

Рис. 3.10. Екранна форма візуалізації результатів синтезу інтервальних оцінок параметрів моделі

У результаті реалізації функції побудови математичної моделі з радіально-базисними функціями одержуємо інтервальну модель зі структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій із гарантованими прогностичними властивостями, що забезпечує прогноз в межах похибок експериментальних даних. При цьому на екран виводиться результат прогнозу вихідної характеристики моделі.

Для побудови інтервальної моделі з РБФ розроблено графічний інтерфейс користувача, екранну форму якого зображено на рисунку 3.11.

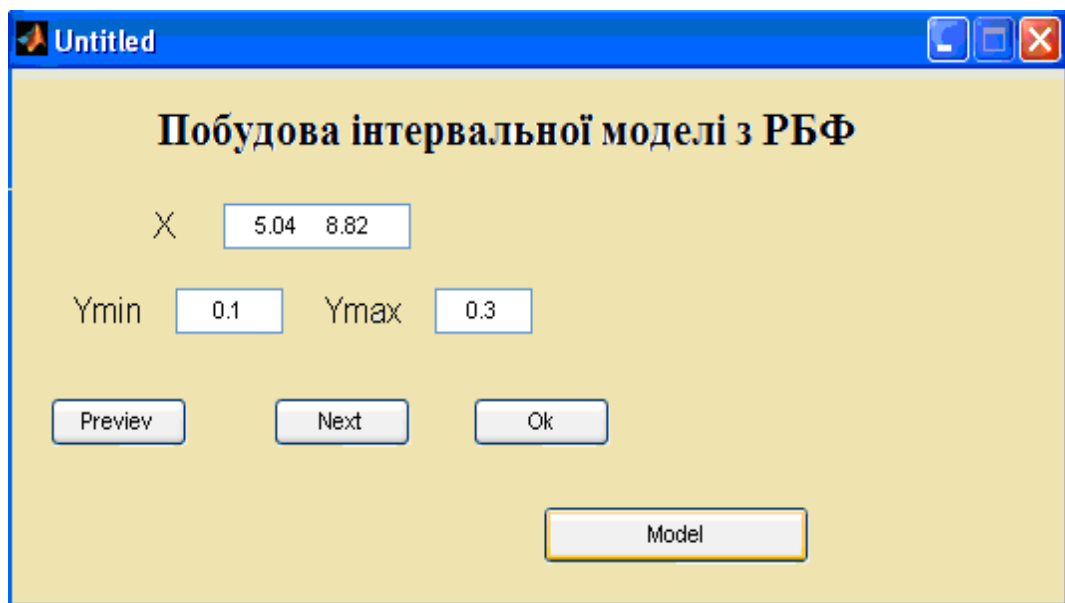


Рис. 3.11. Графічний інтерфейс користувача для побудови інтервальної моделі з РБФ

Приклад. Ефективність розроблених методу, алгоритму та програмного комплексу для ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій проілюструємо на прикладі розв’язування задачі ідентифікації інтервальної моделі для прогнозування індикаторів економічної безпеки Тернопільської області.

Для початку продемонструємо властивості математичних моделей з РБФ на прикладі вказаної задачі. Для моделювання оберемо індекс зовнішньоекономічної безпеки регіону – імпорт (див. таблицю експериментальних даних у додатку В). Результати моделювання наведено на

рисунках 3.12-3.14. Вертикальна лінія на рисунках відділяє навчальну вибірку від контрольної (тестової).

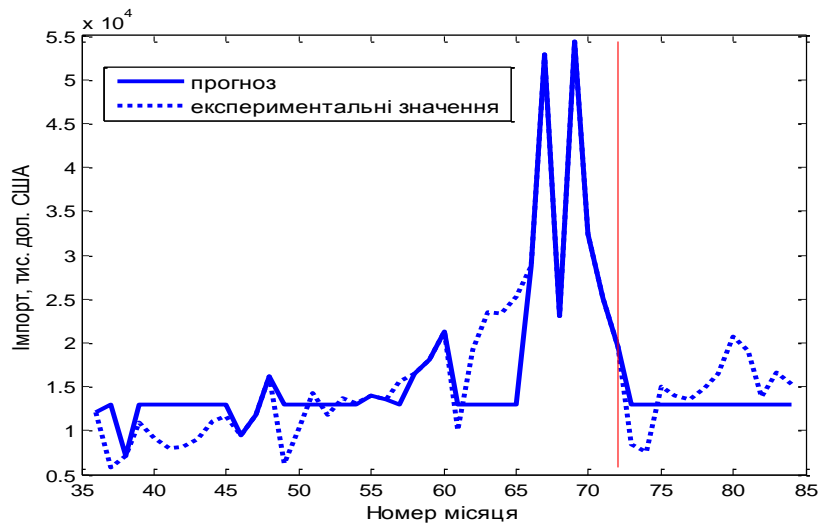


Рис. 3.12. Прогнозування імпорту на основі математичної моделі з РБФ із надто малим значенням параметра ширини вікна

Як бачимо на рисунку 3.12, при заданому параметрі ширини вікна надто малого розміру, математична модель на основі РБФ не придатна для прогнозування вихідної характеристики (у цьому випадку індексу зовнішньоекономічної безпеки регіону у цьому випадку).

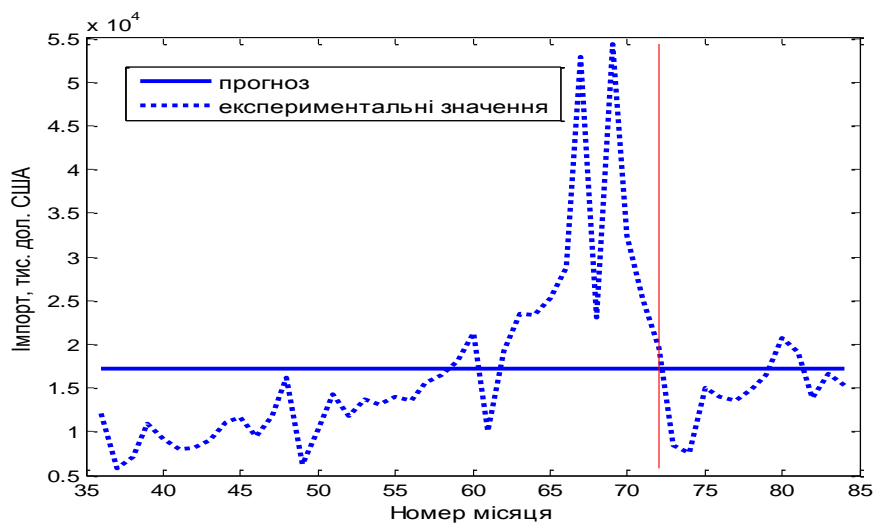


Рис. 3.13. Прогнозування імпорту на основі математичної моделі з РБФ із надто великим значенням параметра ширини вікна

На рисунку 3.13 продемонстровано випадок, коли параметр ширини вікна задано надто великого розміру. За таких умов побудована математична модель із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій неадекватна для прогнозування вихідних характеристик .

На рисунку 3.14 наведено результат прогнозування індексу зовнішньоекономічної безпеки регіону – імпорту на основі оптимальної структури математичної моделі з РБФ.

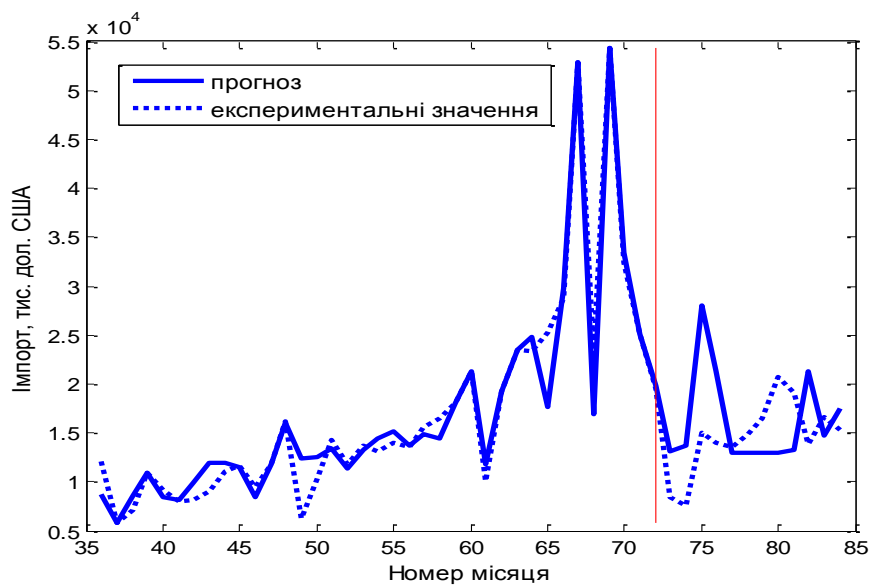


Рис. 3.14. Прогнозування імпорту на основі математичної моделі з РБФ із оптимальним значенням параметра ширини вікна

Зазначені результати свідчать, що невірне налаштування параметра ширини вікна радіально-базисних функцій суттєво ускладнює процедуру структурної ідентифікації математичних моделей з радіально-базисними функціями.

Тепер продемонструємо особливості реалізації методу та алгоритму ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій. Для цього побудуємо математичну модель на основі РБФ для прогнозування індексу соціальної безпеки регіону – кількість зареєстрованих безробітних у державній службі зайнятості. При цьому встановлено, що зазначений показник наведений із деякою похибкою.

За таких умов позначимо за $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_8)$ - чинники, що впливають на індекси економічної безпеки Тернопільської області (див. додаток Д), як вхідні дані, а $[y^-(k); y^+(k)]$ - кількість безробітних, які зареєстровані в державній службі зайнятості – як вихідні, $k=1, \dots, 72$.

Із застосуванням алгоритму ідентифікації математичних моделей з РБФ на основі аналізу інтервальних даних та розробленого на його основі програмного забезпечення побудуємо інтервальну модель для прогнозування індекса соціальної безпеки регіону. З огляду на обсяг вибірки експериментальних даних впливає, що крок Δr , доцільно задати у вигляді (3.15) Це зменшить кількість ітерацій для побудови адекватної структури інтервальної моделі з РБФ із гарантованими прогностичними властивостями, що характеризує взаємозв'язок між індексами економічної безпеки регіону та факторами впливу.

Структуру інтервальної моделі з РБФ, яка забезпечує сумісність побудованої на її основі ІСЛАР одержуємо, якщо радіус кластера дорівнює 0,5. У результаті реалізації процедури визначення кількості РБФ та параметрів їх рецепторних полів одержуємо п'ять радіально-базисних функцій із відповідними центрами (табл. 3.1). Параметр ширини вікна РБФ при цьому становить: $\sigma = 0,177$.

Таблиця 3.1

Значення центрів радіально-базисних функцій

\vec{c}_1	0,106	0,104	0,192	0,349	0,093	0,414	0,001	0,002
\vec{c}_2	0,192	0,164	0,302	0,503	0,644	0,715	0,014	0,003
\vec{c}_3	0,463	0,403	0,615	0,874	1,000	0,693	0,003	0,002
\vec{c}_4	0,480	0,400	0,613	0,607	0,453	0,806	0,002	0,001
\vec{c}_5	0,059	0,129	0,124	0,311	0,471	0,288	0,003	0,002

Зважаючи на дані із табл. 3.2 одержуємо інтервальну модель з РБФ для прогнозування індикатора соціальної безпеки Тернопільської області у вигляді:

$$y = w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x} - \vec{c}_1\| \sigma^{-2}) + w_2 \cdot f_2(\|\vec{x} - \vec{c}_2\| \sigma^{-2}) + w_3 \cdot f_3(\|\vec{x} - \vec{c}_3\| \sigma^{-2}) + w_4 \cdot f_4(\|\vec{x} - \vec{c}_4\| \sigma^{-2}) + w_5 \cdot f_5(\|\vec{x} - \vec{c}_5\| \sigma^{-2}) \quad (3.19)$$

На основі експериментальних даних (див дод. Д) та одержаної структури моделі (3.19) будуємо ІСЛАР:

$$\begin{cases} 30.528 \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_1 - \vec{c}_1\| \sigma^{-2}) + \dots + w_5 \cdot f_5(\|\vec{x}_1 - \vec{c}_5\| \sigma^{-2}) \leq 54.272 \\ 31.032 \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_2 - \vec{c}_1\| \sigma^{-2}) + \dots + w_5 \cdot f_5(\|\vec{x}_2 - \vec{c}_5\| \sigma^{-2}) \leq 55.168 \\ 30.816 \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_3 - \vec{c}_1\| \sigma^{-2}) + \dots + w_5 \cdot f_5(\|\vec{x}_3 - \vec{c}_5\| \sigma^{-2}) \leq 54.168 \\ \vdots \\ 17.424 \leq w_0 + w_1 \cdot f_1(\|\vec{x}_{72} - \vec{c}_1\| \sigma^{-2}) + \dots + w_5 \cdot f_5(\|\vec{x}_{72} - \vec{c}_5\| \sigma^{-2}) \leq 30.976 \end{cases} \quad (3.20)$$

У результаті розв'язку задач лінійного програмування (3.11), (3.12), за умов (3.20) одержуємо оцінки параметрів моделі у вигляді десяти вершин області розв'язків ІСЛАР (3.20):

$$\bar{w}_1 = (0.6539; 4.6070; 2.8899; 27.2540; -9.6643),$$

$$\bar{w}_2 = (1.8234; 3.3880; 27.0665; 22.6321; -9.5643),$$

$$\bar{w}_3 = (0.6539; 4.6070; 2.8899; 27.2541; -9.6644),$$

$$\bar{w}_4 = (3.8291; 6.5784; 28.2013; 18.9566; -8.8253),$$

$$\bar{w}_5 = (0.6539; 4.6070; 2.8899; 27.2541; -9.6643),$$

$$\bar{w}_6 = (3.8431; 6.5813; 4.2346; 18.9643; -8.8238),$$

$$\bar{w}_7 = (3.8431; 6.5813; 3.2346; 18.9643; -8.8238),$$

$$\bar{w}_8=(3.8291; 6.5784; 28.2013; 18.9567; -8.8254),$$

$$\bar{w}_9=(2.5599; 6.1957; 3.6389; 27.5541; -9.0195),$$

$$\bar{w}_{10}=(3.8279; 6.5447; 4.2251; 18.9878; -2.5145).$$

При цьому вектор інтервальних оцінок параметрів моделі $[\vec{w}] = [w_h^-, w_h^+]$, $h=1, \dots, 5$, має вигляд:

$$\begin{aligned} [\vec{w}] &= ([w_1^-; w_1^+], [w_2^-; w_2^+], [w_3^-; w_3^+], [w_4^-; w_4^+], [w_5^-; w_5^+]) = \\ &= ([1.909; 3.093], [5.061; 6.181], [7.904; 11.362], \\ & [21.780; 23.719], [-9.361; -7.94]), \end{aligned} \quad (3.21)$$

а гарантовані прогнознi коридори для iндекса економiчної безпеки – кiлькостi зареєстрованих безробітних у державній службi зайнятості:

$$\begin{aligned} [\hat{y}^-; \hat{y}^+] &= f_1(\|\bar{x} - c_1\| \sigma^{-2}) \cdot [1.909; 3.093] + f_2(\|\bar{x} - c_2\| \sigma^{-2}) \cdot [5.061; 6.181] + \\ &+ f_3(\|\bar{x} - c_3\| \sigma^{-2}) \cdot [7.904; 11.362] + f_4(\|\bar{x} - c_4\| \sigma^{-2}) \cdot [21.780; 23.719] + \\ &+ f_5(\|\bar{x} - c_5\| \sigma^{-2}) \cdot [-9.361; -7.94]. \end{aligned} \quad (3.22)$$

На рисунку 3.15 наведено графік кiлькостi зареєстрованих безробітних у державній службi зайнятості в межах похибок експериментальних даних на основі iнтервальної моделі з радіально-базисними функціями з оцінками параметрів математичної моделі з РБФ, одержаними за формулою середнього:

$$\begin{aligned} w_1 &= 1/10 \cdot (0.6539 + 1.8234 + 0.6539 + 3.8291 + \\ &+ 0.6539 + 3.8431 + 3.8431 + 3.8291 + 2.5599 + 3.8279) = 2,5517; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_2 &= 1/10 \cdot (4.6070 + 3.3880 + 4.6070 + 6.5784 + \\ &+ 4.6070 + 6.5813 + 6.5813 + 6.5784 + 6.1957 + 6.5447) = 5,6268; \end{aligned}$$

$$w_3 = 1/10 \cdot (2,8899 + 27.0665 + 2.8899 + 28.2013 + 2.8899 + 4.2346 + 3.2346 +$$

$$+28.2013+3.6389+4.2251)=10.7472;$$

$$w_4=1/10\cdot(27.2540+22.6321+27.2541+18.9566+27.2541+18.9643+18.9643+ \\ +18.9567+27.5541+18.9878)=22.7778;$$

$$w_5=1/10\cdot((-9.6643)+(-9.5643)+(-9.6644)+(-8.8253)+(-9.6643)+(-8.8238)+ \\ +(-8.8238)+(-8.8254)+(-9.0195)+(-2.5145))=-8,5389.$$

Зважаючи на це, вектор параметрів інтервальної моделі зі структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій для прогнозування кількості зареєстрованих безробітних у державній службі зайнятості має вигляд такий:

$$\vec{w} = (2.5517; 5.6268; 10.7472; 22.7778; -8.5389).$$

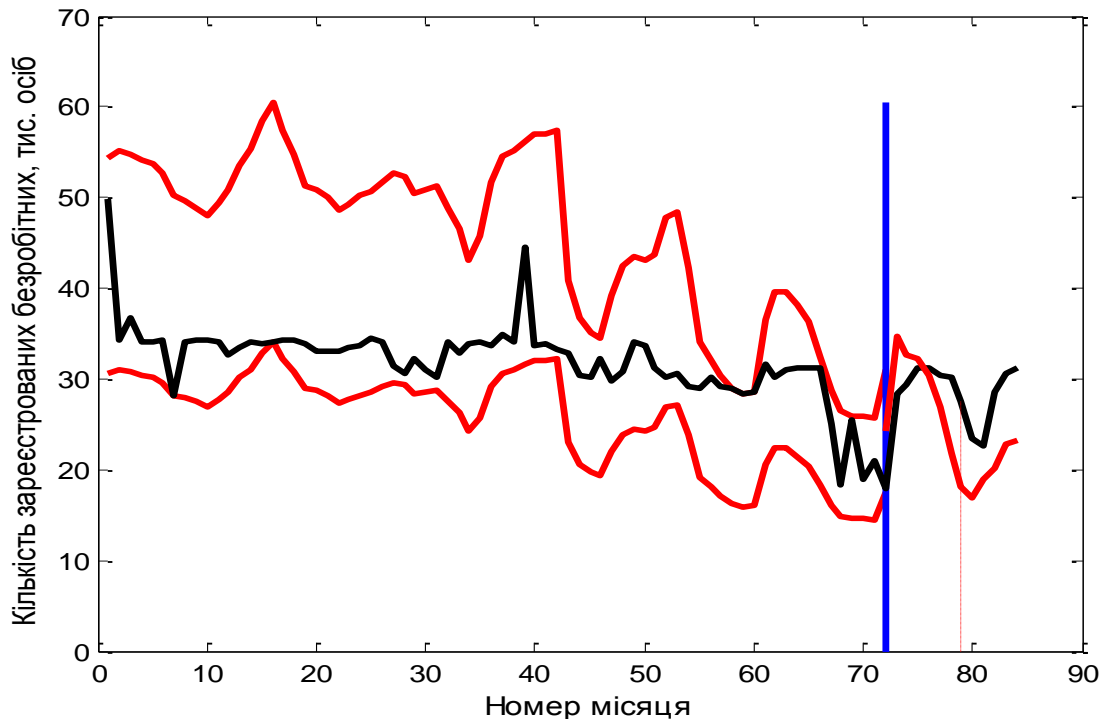


Рис. 3.15. Прогноз індикатора економічної безпеки регіону – кількості зареєстрованих безробітних у державній службі зайнятості на основі інтервальної моделі з РБФ

Як бачимо із рисунка 3.15, з 1 по 72 місяць дотримується умова включення модельованого показника в коридор експериментальних даних, ширина якого визначається шириною інтервалу. З 73 по 84 місяць наведено результат використання розробленої інтервальної моделі з РБФ для прогнозування модельованого індексу економічної безпеки держави, а також крива (сірим кольором) реального значення цього показника.

У прогностичний період відносна максимальна похибка відхилення прогностичного значення від експериментального на 79 місяць, як наведено на рисунку 3.15, не більша 18,8 %, що засвідчує достатньо високі прогностичні властивості побудованої інтервальної моделі з РБФ. Варто зазначити, що побудовані інтервальні моделі з РБФ інших індексів економічної безпеки регіону, враховуючи чинники, що на них впливають, мають такожі гарантовані прогностичні властивості.

Вищезазначені результати підтверджують ефективність розроблених методу, алгоритму та програмного забезпечення для структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з РБФ.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблено та обгрунтовано метод ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями, в якому поєднано процедури налаштування параметрів рецепторного поля радіально-базисних функцій та аналізу інтервальних даних, що забезпечує структурну і параметричну ідентифікацію моделей.

2. Розроблено алгоритм ідентифікації інтервальних моделей із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій, який базується на процедурах кластеризації та лінійного програмування, що забезпечує його низьку обчислювальну складність.

3. Розроблено програмне забезпечення для ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями із застосуванням компілятора Матлаб. Проведено апробацію програмного забезпечення, в основі якого метод та алгоритм ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями, для побудови інтервальної моделі з РБФ, яка забезпечує прогноз індикаторів економічної безпеки регіону із заданою точністю.

РОЗДІЛ 4

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ РАДІАЛЬНО-БАЗИСНИМИ ФУНКЦІЯМИ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ МОНІТОРИНГУ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА

Складність операції на щитоподібній залозі пов'язана із ризиком пошкодження ЗГН. Відповідно виникає потреба в його оперативному моніторингу із урахуванням особливостей анатомічної будови щитоподібної залози та індивідуальність гортані кожного пацієнта.

Проаналізовані у першому розділі існуючі математичні моделі моніторингу ЗГН, в основі яких є первинні характеристики середовища моніторингу ЗГН, тільки забезпечують класифікацію тканин хірургічної рани, але не враховують відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН, визначення якої створює можливості для скорочення часу на проведення операції за рахунок зменшення часу на моніторинг ЗГН.

Існуюча інформаційна технологія моніторингу ЗГН побудована на основі моделей первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН, тому має ряд недоліків, зокрема високий ризик пошкодження ЗГН та високі витрати часу на його моніторинг.

В цьому розділі із використанням розроблених методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з РБФ розглянуто результати розробки математичної моделі інтервованої характеристики середовища моніторингу ЗГН. На основі розробленої інтервальної моделі з гарантованими прогностичними властивостями удосконалено технологію моніторингу ЗГН. Наведено результати застосування розроблених інтервальної моделі інтегрованих характеристик середовища хірургічного втручання та удосконаленої технології моніторингу ЗГН в процесі операцій на щитоподібній залозі.

Матеріали цього розділу дисертації опубліковано у працях [72, 74, 76, 78, 84].

4.1. Удосконалена інформаційна технологія для моніторингу зворотного гортанного нерва

Проведений аналіз методів, технічних та програмних модулів дали можливість удосконалити інформаційну технологію для виявлення ЗГН під час проведення операції на щитоподібній залозі. Схему удосконаленої інформаційної технології наведено на рисунку 4.1.

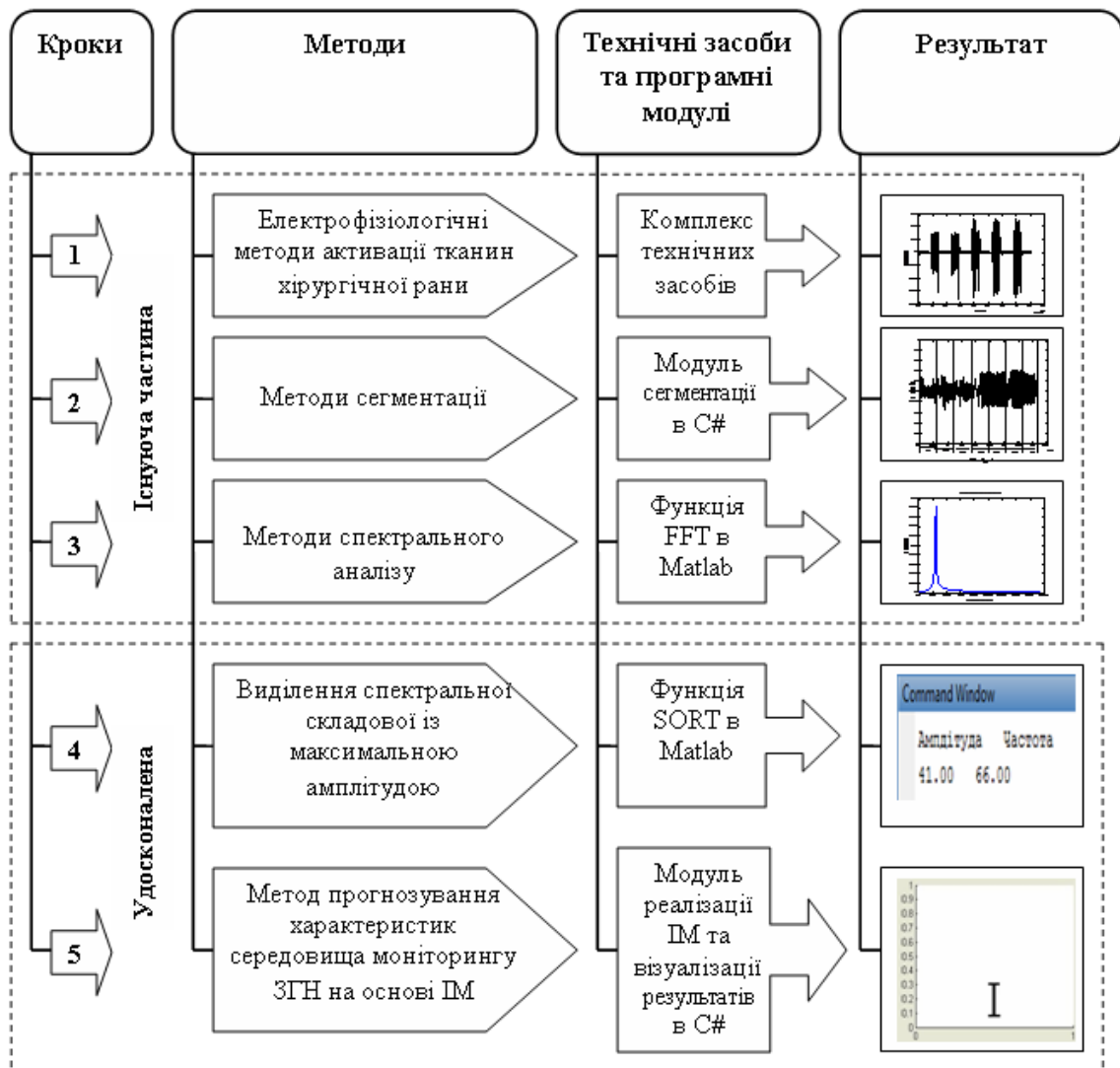


Рис 4.1. Удосконалена інформаційна технологія для моніторингу ЗГН

На рис. 4.1 штрих-пунктирною лінією виділено частину методів, засобів та програмного забезпечення, яка належить існуючій інформаційній технології. Кроки 4 та 5 відображають частину удосконаленої інформаційної технології.

Результуючу оцінку відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН $[\hat{y}]$ одержуємо у результаті поетапного проходження усіх кроків удосконаленої інформаційної технології, представленої на рисунку 4.1. Інформаційна технологія включає п'ять кроків, починаючи від формування експериментальних даних і закінчуючи виведенням результату прогнозування інтервальної моделі з РБФ.

Зупинимось на характеристиці етапів удосконаленої інформаційної технології. Існуючу інформаційну технологію виявлення ЗГН детально описано у праці [62].

Крок 1. На цьому етапі використовуємо технічні засоби для подразнення тканин хірургічної рани, що детально описані у праці [63]. Отримуємо інформаційний сигнал - результат подразнення тканин хірургічної рани внаслідок застосування способу, що описаний у патенті [64]. Одержаний сигнал оцифровується та заноситься в оперативну пам'ять комп'ютера.

Подразнення тканин хірургічної рани проводиться у різних точках.

Крок 2. При подразненні тканин хірургічної рани протягом кількох вдихань та видихань пацієнтом повітря отриманий інформаційний сигнал потрібно сегментувати на ділянки, які відповідають процесу вдихання чи видихання. У результаті подразнення тканин хірургічної рани у різних точках одержимо множину фрагментів інформаційного сигналу.

Крок 3. Із застосуванням швидкого перетворення Фур'є будемо спектр інформаційного сигналу – реакції на подразнення тканин хірургічної рани [121].

Крок 4. Виділення спектральної складової у спектрі сигналу із максимальною амплітудою та середньої частоти, на якій вона зосереджена.

Зазначений крок удосконаленої інформаційної технології базується на алгоритмі опрацювання ІС, блок-схему якого наведено на рис. 4.2

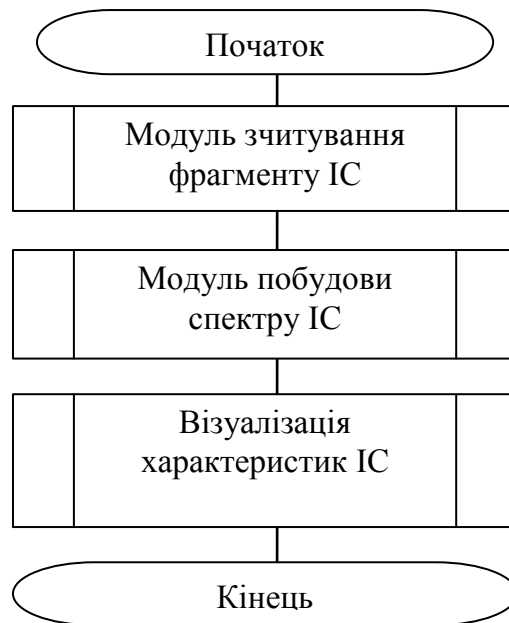


Рис. 4.2. Алгоритм опрацювання інформаційних сигналів

Лістинг програми для реалізації алгоритму наведено в додатку Е.

Цей етап потрібен для того, щоб одержати первинні характеристики точки подразнення тканин хірургічної рани і для подальшого прогнозування відстані від точки подразнення до ЗГН на основі математичної моделі інтегрованої характеристики середовища моніторингу ЗГН.

Крок 5 Реалізація методу прогнозування характеристик середовища моніторингу ЗГН полягає в одержанні інтервальної оцінки відстані від точки подразнення хірургічної рани до зворотного гортанного нерва на основі інтервальної моделі з радіально-базисними функціями.

З метою реалізації цього кроку використовуємо математичну модель інтегрованої характеристики середовища моніторингу ЗГН, яка прогнозує відстань від точки подразнення тканин хірургічної рани з характерними первинними ознаками до ЗГН. Зазначену математичну модель розроблено завчасно на основі існуючої вибірки даних із понад 20000 ІС та із застосуванням розроблених методів інтервального представлення первинних характеристик середовища моніторингу ЗГН та методів структурної і

параметричної ідентифікації інтервальних моделей з РБФ. Результати побудови математичної моделі інтегрованої характеристики середовища моніторингу ЗГН розглянуто в наступному пункті цього розділу.

Візуалізацію результатів виконання цього завершального кроку інформаційної технології виконано у вигляді виведення інтервальної оцінки відстані від поточної точки подразнення до ЗГН. Обидва модулі прогнозування та візуалізації результатів прогнозування виконано на мові С# та інтегровано в існуючий програмний код, за допомогою якого реалізовано програмні модулі технології.

Налаштування та верифікацію удосконаленої інформаційної технології моніторингу ЗГН спочатку здійснювали із використанням існуючої бази даних пацієнтів та їх ІС із її модифікацією шляхом уведення додаткових полів, доопрацювання програмного інтерфейсу доступу до даних бази.

Для спрощення процедури формування вхідних експериментальних даних, якими є спектральні характеристики ІС, розроблено простий графічний інтерфейс користувача, екранну форму якого наведено на рисунку 4.3.

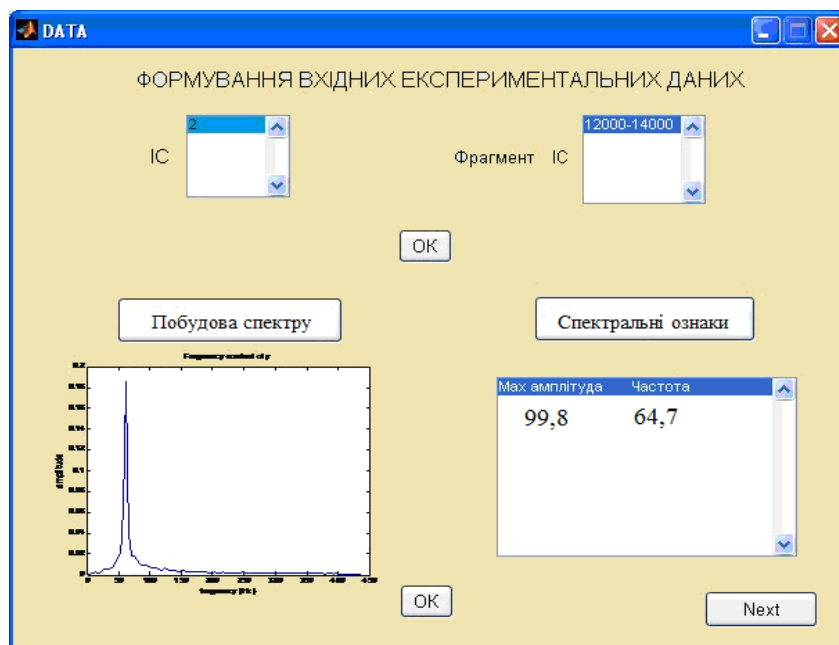


Рис. 4.3. Екранна форма графічного інтерфейсу користувача для одержання спектральних характеристик ІС

Користувач із бази даних обирає інформаційний сигнал та його фрагмент і в результаті реалізації алгоритму (рис. 4.2) одержує первинні характеристики тканин хірургічної рани – спектральну складову із максимальною амплітудою U_{\max} та частоту, на якій зосереджена спектральна складова $F_{U_{\max}}$. При натисканні клавіші «ОК», отримані вхідні експериментальні дані зберігаються у файлі. При виборі кнопки «Next» відбувається перехід до формування наступного набору спектральних характеристик ІС.

Для забезпечення можливості ефективного доступу до ІС пацієнтів та з метою верифікації розробленої інформаційної технології було модифіковано описану у праці [67] базу даних, яка призначена для зберігання інформації про пацієнтів та відповідних ІС, отриманих в процесі операцій на щитоподібній залозі. Опишемо коротко сутності бази даних, які необхідні для верифікації та апробації удосконаленої інформаційної технології моніторингу ЗГН:

- пацієнт;
- сигнал;
- фрагмент.

У результаті даталогічного проектування, одержано таблиці із структурою, що зображено на рисунках 4.4-4.6.

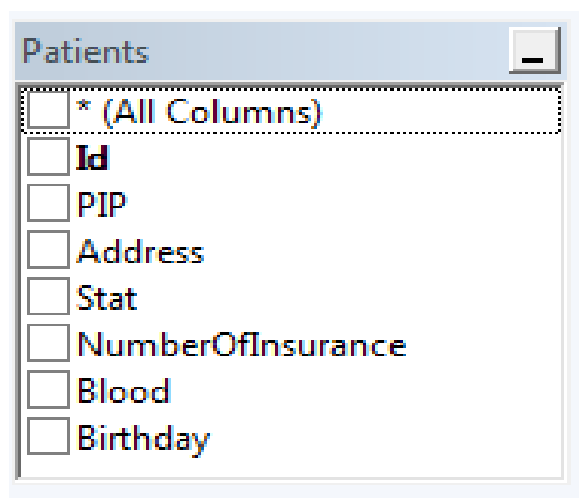


Рис. 4.4. Подання таблиці Patients (пацієнт)

Унікальний ідентифікатор таблиці Patients - Id генерується автоматично. Таблиця Patients, як зазначено на рисунку 4.4, має такі атрибути: PIP - прізвище, ім'я, по-батькові пацієнта, Address - адреса пацієнта, Stat - стать пацієнта, NumberOfInsurance - номер страховки, Blood - група крові та резус фактор, Birthday - дата народження.

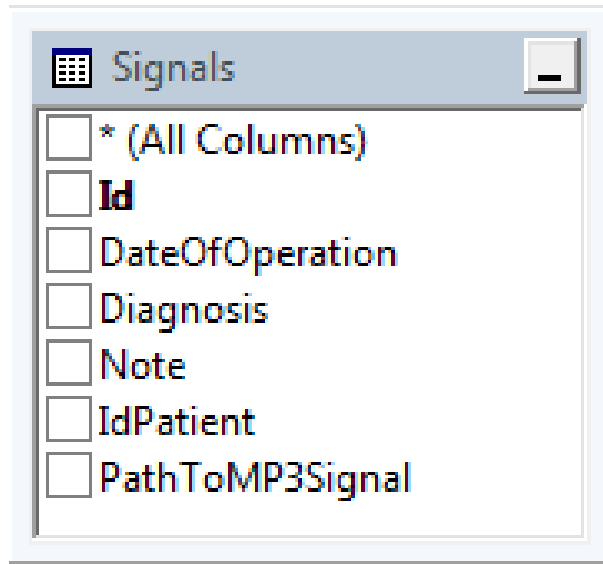


Рис. 4.5. Подання таблиці Signals (сигнал)

Унікальний ідентифікатор таблиці Signals - Id генерується автоматично. Таблиця Signals, як бачимо на рисунку 4.5, має такі атрибути: DateOfOperation - дата операції, Diagnosis - діагноз, Note - замітки лікаря, IdPatient - ідентифікатор пацієнта, PathToMP3Signal - шлях до файлу із записаним інформаційним сигналом.

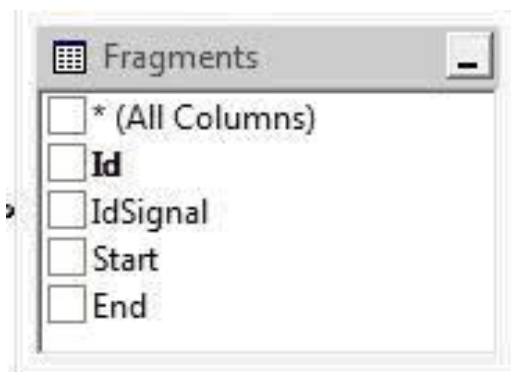


Рис. 4.6. Подання таблиці Fragments (фрагмент)

Унікальний ідентифікатор таблиці Fragments - Id генерується автоматично. Таблиця Fragments, як проілюстровано на рисунку 4.6, має такі атрибути: IdSignal - ідентифікатор сигналу, якому належить зазначений фрагмент, Start - початок зазначеного фрагмента в сигналі, End - кінець зазначеного фрагмента в сигналі.

У таблиці 4.1 описано характеристики атрибутів таблиць спроектованої бази даних.

Таблиця 4.1

Склад та характеристики атрибутів таблиць бази даних

Сутність	Назва атрибуту	Значення	Тип даних	Обмеження
Patients	Id	Так	Автоінкремент, числовий	Немає
	PIP	Так	Символьний	До 20 символів
	Address	Ні	Символьний	До 20 символів
	Stat	Так	Символьний	До 3 символів
	NumbeOfInsurance	Ні	Числовий	Від 1 і більше
	Blood	Так	Числовий	{1,2,3,4}
	Birthday	Так	Дата і час	Немає
Signals	Id	Так	Автоінкремент, числовий	Немає
	DateOfOperation	Так	Дата і час	Немає
	Diagnosis	Так	Символьний	До 20 символів
	Note	Ні	Символьний	До 50 символів
	IdPatient	Так	Числовий	Немає
	PathToMP3Signal	Так	Символьний	Немає
Fragments	Id	Так	Автоінкремент, числовий	Немає
	IdSignal	Так	Числовий	Немає
	Start	Так	Числовий	Від 0 до $120 \cdot 10^5$
	End	Так	Числовий	Від 1 до $120 \cdot 10^5$

Відношення між вищезазначеними таблицями – Patients, Signals,

Fragments проілюстровано на рисунку 4.7.

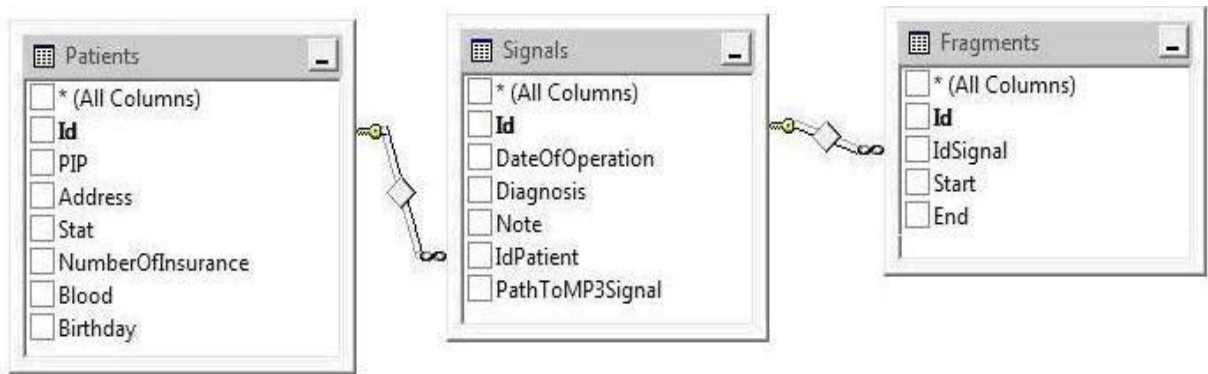


Рис. 4.7. Подання відношення між таблицями

Також в процесі удосконалення, верифікації та апробації на тестових даних описаної вище інформаційної технології моніторингу ЗГН розроблено спеціалізований програмний комплекс для автоматизації процесу розробки та апробації інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН. Розроблений комплекс побудовано на модульному принципі з використанням структурно-функціонального підходу. Діаграму потоків даних (DFD) між модулями продемонстровано на рисунку 4.8.

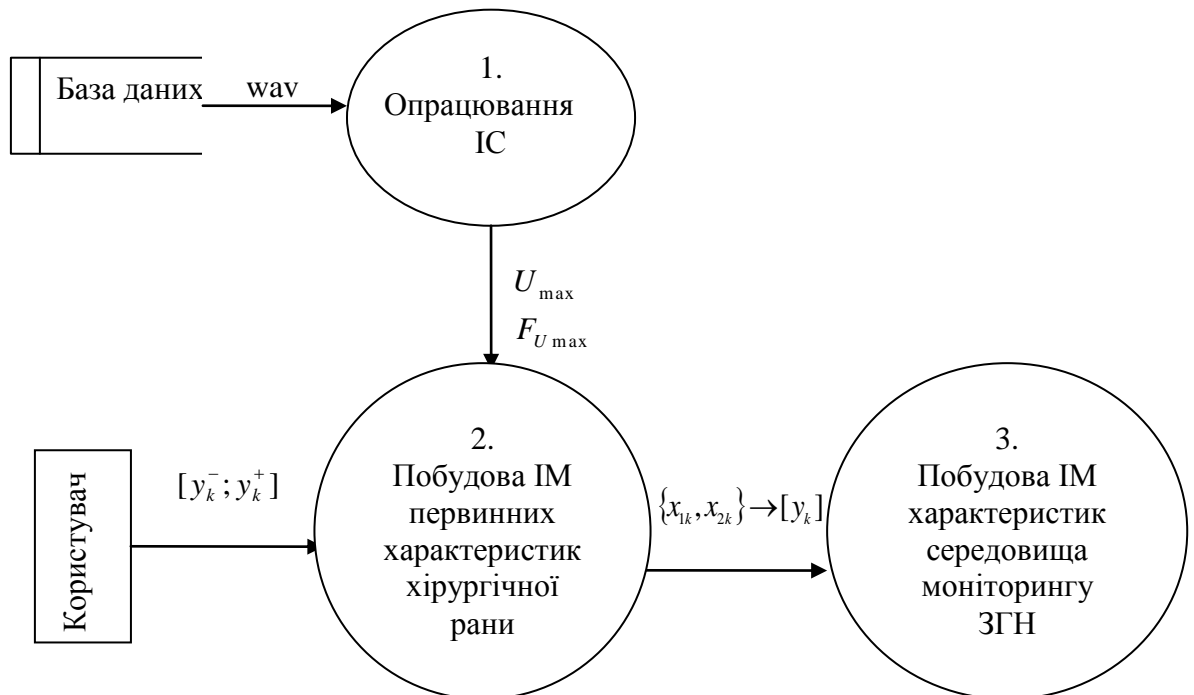


Рис. 4.8. DFD-модель системи побудови інтервальних моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН

Перший модуль забезпечує визначення інформативних параметрів сигналів, які розміщені у базі даних. Другий модуль відповідає за побудову інтервальних моделей первинних характеристик хірургічної рани. Для реалізації зазначеного модуля розроблено зручний інтерфейс користувача, екранну форму якого зображено на рис. 4.9.

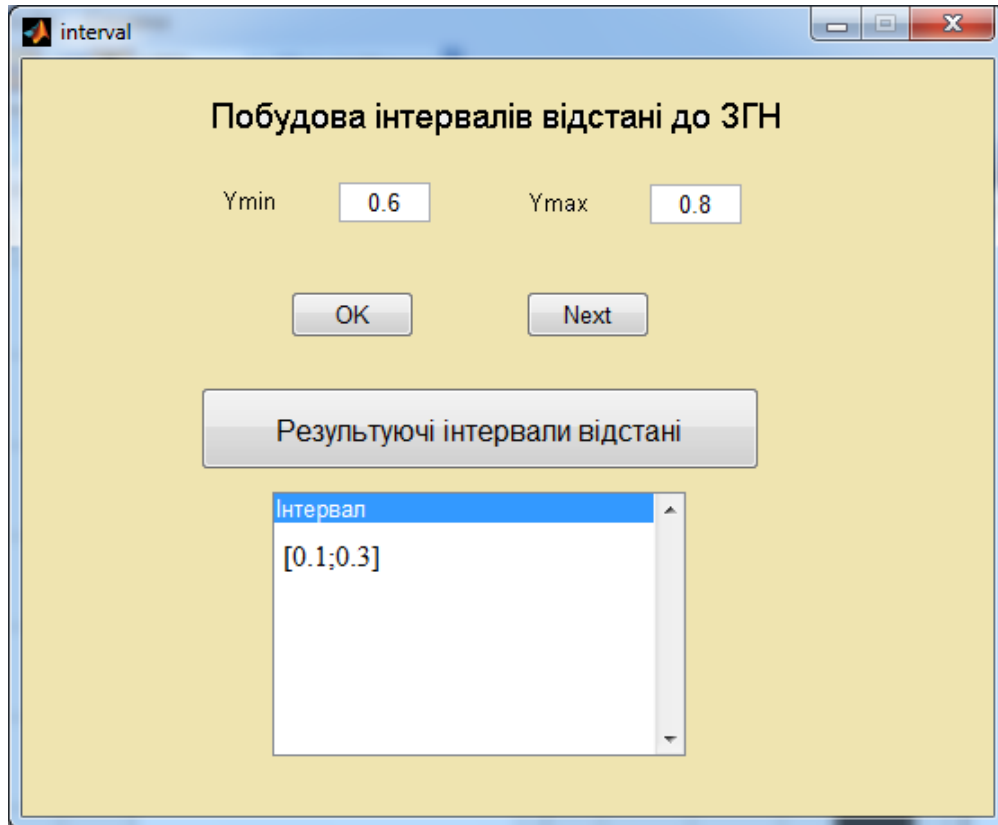


Рис. 4.9. Екранна форма для побудови інтервальної моделі первинних характеристик тканин хірургічної рани

У результаті реалізації зазначеного модуля одержуємо результуючі інтервали відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН, характерні для групи пацієнтів.

Третій модуль забезпечує побудову інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН. У результаті його реалізації отримуємо інтервальну оцінку відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН.

Таким чином розроблене програмне забезпечення дало можливість провести тестову апробацію та верифікацію удосконаленої інформаційної

технології моніторингу ЗГН з використанням математичних моделей характеристик середовища моніторингу ЗГН.

4.2. Інтервальна модель з радіально-базисними функціями в задачі моніторингу зворотного гортанного нерва

Зважаючи на введені у попередніх розділах позначення, відстань від точки подразнення до ЗГН - $[y_i]$, де i – індекс, що позначає спектральні характеристики інформаційних сигналів – реакції на подразнення тканин хірургічної рани. При цьому вектор \vec{x}_i складається із двох компонент-спектральної складової із максимальною амплітудою U_{\max} та частоти спектральної складової $F_{U_{\max}}$. Тоді отримані на основі опрацювання інформаційних сигналів дані представимо у вигляді:

$$\vec{x}_i \rightarrow [y_i^-; y_i^+], i=1, \dots, N, \quad (4.1)$$

де y_i^- , y_i^+ - нижня і верхня межі значення відстані від точки подразнення до зворотного гортанного, одержаної на основі інформаційного сигналу пацієнта під час проведення операції на щитоподібній залозі.

У попередньому розділі зазначено, що метод ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями поєднує в собі процедури налаштування структури та оцінки параметрів. Оскільки основою для побудови моделі є вхідні та вихідні дані, то, перш за все, розглянемо процедуру одержання експериментальних даних для задачі виявлення місця розміщення зворотного гортанного нерва на хірургічній рані.

Експериментальні дослідження проведено на вибірці із понад трьох тис. фрагментів інформаційних сигналів різних пацієнтів, що одержані в процесі операції на щитоподібній залозі. В результаті опрацювання фрагментів інформаційних сигналів із застосуванням розробленого програмного забезпечення, одержано вибірку первинних характеристик

тканин хірургічної рани x_{1i} - спектральних складових із максимальною амплітудою та x_{2i} - частот, на яких зосереджені спектральні складові, $i=1, \dots, N$.

Із застосуванням субтрактивного алгоритму кластеризації та аналізу інтервальних даних розроблено інтервальні моделі первинних характеристик тканин хірургічної рани. Для формування груп спектральних характеристик сигналів з метою урахування всіх можливих інформативних наборів ознак та забезпечення неперервності результуючих інтервалів відстані від точок подразнення до ЗГН радіус кластера на початку задано у розмірі $r=0,01$, а крок – $\Delta r = 1/ N$.

При цьому одержуємо 264 дуже подібних групи первинних характеристик сигналів із відповідними наборами центрів та інтервалами відстані для кожної з груп, що перетинаються. Зазначений результат унеможливорює побудову адекватних інтервальних моделей первинних характеристик хірургічної рани для груп пацієнтів.

За таких умов збільшуємо радіус кластера на Δr до того часу, поки не буде досягнуто умови неперервності інтервалів відстані, що характерні для групи пацієнтів, і на цій основі не буде побудовано інтервальної моделі первинних характеристик середовища хірургічного втручання.

Після виконання 148 ітерацій реалізацій алгоритму одержали 100 груп первинних ознак середовища хірургічного втручання із відповідними наборами центрів та результуючими інтервальними оцінками відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН, для яких виконується умова (2.7). При цьому радіус кластера становив $r=0,0481$.

Побудовані інтервальні моделі первинних характеристик тканин хірургічної рани уможливили сформувати таблицю експериментальних даних (табл. 4.2) для задачі моніторингу ЗГН. У таблиці кожному набору спектральних характеристик інформаційних сигналів відповідає результуючий інтервал відстані від точки подразнення середовища хірургічного втручання до ЗГН, при цьому $k=1, \dots, 100$.

Таблиця 4.2

Первинні характеристики тканин хірургічної рани

k	Спектральні характеристики ІС		Відстань до ЗГН, см	k	Спектральні характеристик и ІС		Відстань до ЗГН, см
	U_{\max}	$F_{U_{\max}}$			U_{\max}	$F_{U_{\max}}$	
	x_{1k}	x_{2k}			x_{1k}	x_{2k}	
1	162.14	388.20	[0;0]	51	12	94.82	[0.98;1]
2	89.48	371.52	[0;0.02]	52	11.83	92.23	[1;1.02]
3	73.14	354.97	[0.02;0.04]	53	10.59	88.82	[1.02;1.04]
4	69.75	283.79	[0.04;0.06]	54	11.52	87.82	[1.04;1.06]
5	58.19	266.15	[0.06;0.08]	55	10.58	86.34	[1.06;1.08]
6	46.24	253.79	[0.08;0.1]	56	13.94	84.82	[1.08;1.1]
7	42.62	246.15	[0.1;0.12]	57	12.63	82.19	[1.1;1.12]
8	40.10	233.79	[0.12;0.14]	58	14.52	80.42	[1.12;1.14]
9	37.60	228.7	[0.14;0.16]	59	13.33	79.02	[1.14;1.16]
10	35.48	215.16	[0.16;0.18]	60	12.79	77.24	[1.16;1.18]
11	32.55	208.70	[0.18;0.2]	61	12.08	76.23	[1.18;1.2]
12	31.91	201.8	[0.2;0.22]	62	13.05	74.05	[1.2;1.22]
13	30.05	195.56	[0.22;0.24]	63	11.19	72.05	[1.22;1.24]
14	32.02	184.97	[0.24;0.26]	64	19.22	64.05	[1.24;1.26]
15	28.89	178.20	[0.26;0.28]	65	12.56	62.05	[1.26;1.28]
16	27.83	167.83	[0.28;0.3]	66	19.97	61.41	[1.28;1.3]
17	25.79	162.24	[0.3;0.32]	67	10.80	59.64	[1.3;1.32]
18	28.25	155.78	[0.32;0.34]	68	13.92	57.64	[1.32;1.34]
19	27.95	142.24	[0.34;0.36]	69	17.47	56.57	[1.34;1.36]
20	24.73	139.01	[0.36;0.38]	70	12.38	54.04	[1.36;1.38]
21	22.38	122.05	[0.38;0.4]	71	17.16	52.64	[1.38;1.4]
22	21,1	120.05	[0.4;0.42]	72	11.83	51.99	[1.4;1.42]
23	19.58	118.82	[0.42;0.44]	73	12.82	49.99	[1.42;1.44]
24	18.65	115.23	[0.44;0.46]	74	15.13	48.82	[1.44;1.46]
25	17.72	118.82	[0.46;0.48]	75	19.45	36.84	[1.46;1.48]
26	16.57	116.52	[0.48;0.5]	76	10.76	34.02	[1.48;1.5]
27	15.97	117.82	[0.5;0.52]	77	13.30	31.30	[1.5;1.52]
28	17.97	116.62	[0.52;0.54]	78	12.30	28.05	[1.52;1.54]
29	28.17	115.82	[0.54;0,56]	79	19.66	26.48	[1.54;1.56]
30	23.68	114.41	[0.56;0.58]	80	18.31	23.05	[1.56;1.58]
31	23.21	113.32	[0.58;0.6]	81	13.64	22.05	[1.58;1.6]
32	22.11	112.82	[0.6;0.62]	82	19.64	17.99	[1.6;1.62]
33	24.73	110.82	[0.62;0.64]	83	18.83	17.64	[1.62;1.64]
34	22.75	108.82	[0.64;0.66]	84	16.32	13.75	[1.64;1.66]

Продовження таблиці 4.2

35	21.61	108.82	[0.66;0.68]	85	17.58	13.65	[1.66;1.68]
36	20.09	108.52	[0.68;0.7]	86	19.72	13.24	[1.68;1.70]
37	20.17	107.42	[0.7;0.72]	87	15.61	8.83	[1.70;1.72]
38	19.25	108.02	[0.72;0.74]	88	12.60	8.52	[1.72;1.74]
39	18.09	122.05	[0.74;0.76]	89	17.82	8.20	[1.74;1.76]
40	18.01	106.05	[0.76;0.78]	90	15.09	8.05	[1.76;1.78]
41	17.45	104.41	[0.78;0.8]	91	12.74	8.02	[1.78;1.8]
42	15.77	104.41	[0.8;0.82]	92	19.61	4.88	[1.8;1.82]
43	14.75	104.02	[0.82;0.84]	93	15.87	4.67	[1.82;1.84]
44	14.23	103.96	[0.84;0.86]	94	13.53	4.54	[1.84;1.86]
45	14.17	103.34	[0.86;0.88]	95	12.17	4.44	[1.86;1.88]
46	13.54	103.23	[0.88;0.9]	96	11.07	4.42	[1.88;1.9]
47	12.19	102.84	[0.9;0.92]	97	10.55	4.42	[1.9;1.92]
48	12.07	102.25	[0.92;0.94]	98	8.59	4.42	[1.92;1.94]
49	12.03	91.98	[0.94;0.96]	99	7.24	4.42	[1.94;1.97]
50	12	91.48	[0.96;0.98]	100	5.58	4.42	[1.97;2]

Із застосуванням розробленого математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення та зважаючи на дані таблиці 4.2 розроблено інтервальну модель інтегрованої характеристики середовища моніторингу ЗГН, яка прогнозує відстань від точки подразнення тканини хірургічної рани до ЗГН.

Для налаштування структури моделі необхідно обчислити кількість радіально-базисних функцій та характеристики їх рецепторних полів на основі реалізації алгоритму ідентифікації інтервальних моделей з РБФ. Радіус кластера на початку задаємо у розмірі $r=1$, а крок - $\Delta r=0.1$ і обчислюємо значення параметрів рецепторного поля радіально - базисних функцій.

Варто зазначити, що у випадку розв'язування зазначеної задачі, параметр кроку Δr , що визначає кількість ітерацій обчислювальної схеми реалізації алгоритму побудови інтервальної моделі характеристик моніторингу ЗГН, можна налаштувати у спосіб «ділення на 2», тобто

$$\Delta r_h = \frac{\Delta r_{h-1}}{2}.$$

Отримана структура моделі з РБФ на першій ітерації має одну радіально-базисну функцію і відповідно один невідомий параметр;

$$\hat{y}_1 = w_1 \cdot f_1(\|\vec{x} - \vec{c}_1\| \sigma^{-2}). \quad (4.2)$$

При цьому одержуємо такі значення параметрів РБФ $\vec{c} = (0,346; 0,178)$, $\sigma = 0,354$.

На основі поточної структури моделі (4.2) та вихідних інтервальних даних будуємо ІСЛАР:

$$\begin{cases} y_1^- \leq w_1 \cdot f_1(\sqrt{(x_{11} - c_{11})^2 + (x_{21} - c_{21})^2} \cdot \sigma^{-2}) \leq y_1^+ \\ y_2^- \leq w_1 \cdot f_1(\sqrt{(x_{12} - c_{11})^2 + (x_{22} - c_{21})^2} \cdot \sigma^{-2}) \leq y_1^+ \\ \vdots \\ y_{100}^- \leq w_1 \cdot f_1(\sqrt{(x_{1(100)} - c_{11})^2 + (x_{2(100)} - c_{21})^2} \cdot \sigma^{-2}) \leq y_{100}^+ \end{cases} \quad (4.3)$$

Побудована ІСЛАР (4.3) виявилася несумісною, тому зменшуємо радіус кластера на Δr і продовжуємо налаштування структури моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій до того часу, поки не буде досягнуто умови сумісності ІСЛАР. За рахунок зменшення радіуса кластера структура моделі з РБФ буде ускладнюватися.

На сьомій ітерації отримуємо структуру математичної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН із чотирма радіально-базисними функціями і відповідними центрами та параметром ширини, що забезпечує сумісність ІСЛАР, побудовану на її основі:

$$\begin{aligned} 0 &\leq w_1 f_1(\sqrt{(x_{11} - c_{11})^2 + (x_{12} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2}) + \dots \\ &\dots + w_4 f_4(\sqrt{(x_{11} - c_{41})^2 + (x_{12} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2}) \leq 0; \\ 0 &\leq w_1 f_1(\sqrt{(x_{12} - c_{11})^2 + (x_{22} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2}) + \dots \\ &\dots + w_4 f_4(\sqrt{(x_{12} - c_{41})^2 + (x_{22} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2}) \leq 0.02; \end{aligned}$$

$$0.02 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{13} - c_{11})^2 + (x_{23} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{13} - c_{41})^2 + (x_{23} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 0.04;$$

$$\vdots$$

$$0.38 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(21)} - c_{11})^2 + (x_{2(21)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(21)} - c_{41})^2 + (x_{2(21)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 0.4;$$

$$0.4 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(22)} - c_{11})^2 + (x_{2(22)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(22)} - c_{41})^2 + (x_{2(22)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 0.42;$$

$$0.42 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(23)} - c_{11})^2 + (x_{2(23)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(23)} - c_{41})^2 + (x_{2(23)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 0.44;$$

$$\vdots$$

$$0.98 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(51)} - c_{11})^2 + (x_{2(51)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(51)} - c_{41})^2 + (x_{2(51)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1;$$

$$1 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(52)} - c_{11})^2 + (x_{2(52)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(52)} - c_{41})^2 + (x_{2(52)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.02;$$

$$1.02 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(53)} - c_{11})^2 + (x_{2(53)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(53)} - c_{41})^2 + (x_{2(53)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.04;$$

$$\vdots$$

$$1.58 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(81)} - c_{11})^2 + (x_{2(81)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(81)} - c_{41})^2 + (x_{2(81)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.6;$$

$$1.6 \leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(82)} - c_{11})^2 + (x_{2(82)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots$$

$$\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(82)} - c_{41})^2 + (x_{2(82)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.62;$$

$$\begin{aligned}
1.62 &\leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(83)} - c_{11})^2 + (x_{2(83)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots \\
&\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(83)} - c_{41})^2 + (x_{2(83)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.64; \\
&\quad \vdots \\
1.92 &\leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(98)} - c_{11})^2 + (x_{2(98)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots \\
&\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(98)} - c_{41})^2 + (x_{2(98)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.94; \\
1.94 &\leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(99)} - c_{11})^2 + (x_{2(99)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots \\
&\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(99)} - c_{41})^2 + (x_{2(99)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 1.97; \\
1.97 &\leq w_1 f_1 \left(\sqrt{(x_{1(100)} - c_{11})^2 + (x_{2(100)} - c_{12})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) + \dots \\
&\dots + w_4 f_4 \left(\sqrt{(x_{1(100)} - c_{41})^2 + (x_{2(100)} - c_{42})^2} \cdot \sigma^{-2} \right) \leq 2.
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Зважаючи на таблицю експериментальних даних із 100 наборів первинних характеристик тканин хірургічної рани, вище наведено лише фрагменти ІСЛАР.

Обчислені значення центрів РБФ наведено у таблиці 4.3. Параметр ширини вікна базисних функцій при цьому $\sigma = 0,141$.

Таблиця 4.3

Центри радіально-базисних функцій

\bar{c}_1	0,414	0,144
\bar{c}_2	0,101	0,051
\bar{c}_3	0,004	0,001
\bar{c}_4	0,830	0,211

За таких умов структура інтервальної моделі з радіально-базисними як моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН має вигляд:

$$\hat{y} = w_1 f_1(\|\bar{x} - \bar{c}_1\| \sigma^{-2}) + w_2 f_2(\|\bar{x} - \bar{c}_2\| \sigma^{-2}) + w_3 f_3(\|\bar{x} - \bar{c}_3\| \sigma^{-2}) + w_4 f_4(\|\bar{x} - \bar{c}_4\| \sigma^{-2}). \tag{4.5}$$

Обчисливши значення радіально-базисних функцій ІСЛАР (4.4) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 0,999 \cdot w_2 + 0,989 \cdot w_3 + 0,995 \cdot w_4 \leq 0; \\
 0 &\leq 0,979 \cdot w_1 + 0,939 \cdot w_2 + 0,974 \cdot w_3 + 0,903 \cdot w_4 \leq 0.02; \\
 0.02 &\leq 0,697 \cdot w_1 + 1 \cdot w_2 + 0,994 \cdot w_3 + 0,999 \cdot w_4 \leq 0.04; \\
 &\vdots \\
 0.38 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 0,997 \cdot w_2 + 0,959 \cdot w_3 + 0,980 \cdot w_4 \leq 0.4; \\
 0.4 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 0,996 \cdot w_2 + 0,954 \cdot w_3 + 0,975 \cdot w_4 \leq 0.42; \\
 0.42 &\leq 1 \cdot w_1 + 0,994 \cdot w_2 + 0,940 \cdot w_3 + 0,967 \cdot w_4 \leq 0.44; \\
 &\vdots \\
 0.98 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 0,997 \cdot w_2 + 0,955 \cdot w_3 + 0,975 \cdot w_4 \leq 1; \\
 1 &\leq 1 \cdot w_1 + 0,992 \cdot w_2 + 0,937 \cdot w_3 + 0,963 \cdot w_4 \leq 1.02; \\
 1.02 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 0,994 \cdot w_2 + 0,941 \cdot w_3 + 0,968 \cdot w_4 \leq 1.04; \\
 &\vdots \\
 1.58 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 0,993 \cdot w_2 + 0,942 \cdot w_3 + 0,965 \cdot w_4 \leq 1.6; \\
 1.6 &\leq 0,999 \cdot w_1 + 1 \cdot w_2 + 0,988 \cdot w_3 + 0,996 \cdot w_4 \leq 1.62; \\
 1.62 &\leq 0,984 \cdot w_1 + 0,999 \cdot w_2 + 0,988 \cdot w_3 + 1 \cdot w_4 \leq 1.64; \\
 &\vdots \\
 1.92 &\leq 0,961 \cdot w_1 + 0,989 \cdot w_2 + 1 \cdot w_3 + 0,995 \cdot w_4 \leq 1.94; \\
 1.94 &\leq 0,952 \cdot w_1 + 0,934 \cdot w_2 + 0,991 \cdot w_3 + 0,922 \cdot w_4 \leq 1.97; \\
 1.97 &\leq 0,991 \cdot w_1 + 0,989 \cdot w_2 + 0,997 \cdot w_3 + 0,983 \cdot w_4 \leq 2. \quad .(4.6)
 \end{aligned}$$

Оцінку гарантованої області параметрів інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН із структурними елементами у

вигляді радіально-базисних функцій обчислюємо із розв'язків задач лінійного програмування (3.11), (3.12) за умов (4.6). При цьому одержуємо такі вершини \bar{w}_h , $h=1, \dots, 8$ «точної» області параметрів інтервальної моделі з РБФ:

$$\bar{w}_1=(2,2646; 0,1020; 0,8109; -2,0069);$$

$$\bar{w}_2=(2,2118; 0,0492; 0,7557; -1,9200);$$

$$\bar{w}_3=(2,1207; 0,0926; 0,07336; -1,8618);$$

$$\bar{w}_4=(2,2285; 0,1454; 0,7610 -1,9757);$$

$$\bar{w}_5=(2,4296; 0,0269; 0,0854; -2,1954);$$

$$\bar{w}_6=(2,3160; 0,1429; 0,7798; -2,0708);$$

$$\bar{w}_7=(2,2521; 0,0357; 0,7528; -2,0155);$$

$$\bar{w}_8=(2,5187; 0,1272; 0,0831; -2,2356),$$

а також інтервальні оцінки параметрів моделі:

$$\begin{aligned} [\bar{w}] &= ([w_1^-; w_1^+], [w_2^-; w_2^+], [w_3^-; w_3^+], [w_4^-; w_4^+]) = \\ &= ([2,239 \ 2,341], [0,002 \ 0,084], [0,774 \ 0,783], [-1,97 \ -0,091]). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Отримані інтервальні оцінки параметрів (4.7) дають змогу записати коридор інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій, що забезпечують прогнозування інтервальної оцінки відстані від точки подразнення хірургічної рани до ЗГН під час операції на щитоподібній залозі:

$$[\hat{y}] = f_1(\|\bar{x} - \bar{c}_1\| \sigma^{-2}) \cdot [2,239; 2,321] + f_2(\|\bar{x} - \bar{c}_2\| \sigma^{-2}) \cdot [0,002; 0,084] + f_3(\|\bar{x} - \bar{c}_3\| \sigma^{-2}) \cdot [0,774; 0,783] + f_4(\|\bar{x} - \bar{c}_4\| \sigma^{-2}) \cdot [-1,972; -0,091]. \quad (4.8)$$

Результати верифікації та апробації розробленої інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій на прикладах ІС – реакції на подразнення тканин хірургічної рани пацієнтів наведено у наступному підрозділі.

4.3. Експериментальні дослідження ефективності інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва

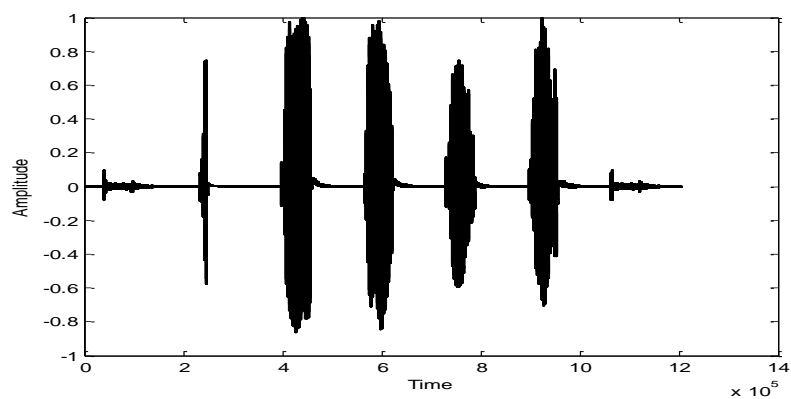
У цьому підрозділі дисертаційної роботи розглянуто результати застосування розробленого програмного забезпечення для ідентифікації інтервальних моделей з РБФ та удосконаленої інформаційної технології для моніторингу зворотного гортанного нерва під час проведення операції на щитоподібній залозі.

Побудована у попередньому підрозділі інтервальна модель моніторингу ЗГН відзначається простою структурою. Верифікацію побудованої інтервальної моделі з РБФ як моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН проводимо на вибірці із 120 інформаційних сигналів.

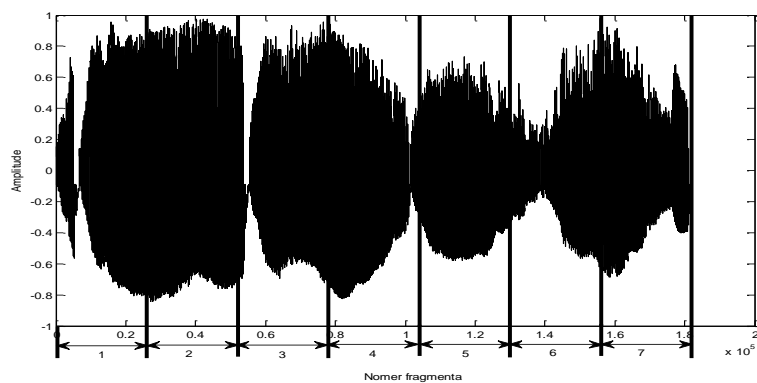
Проілюструємо результат виявлення місця розміщення зворотного гортанного нерва на хірургічній рані із застосуванням розробленої інтервальної моделі з радіально-базисними функціями на прикладах. Для початку проілюструємо результат виявлення ЗГН на основі інформаційних сигналів – реакції на подразнення зворотного гортанного нерва (див. рис. 4.10).

У результаті реалізації модуля сегментації одержуємо сегментований інформаційний сигнал, який проілюстровано на рис. 4.10, б), а результат

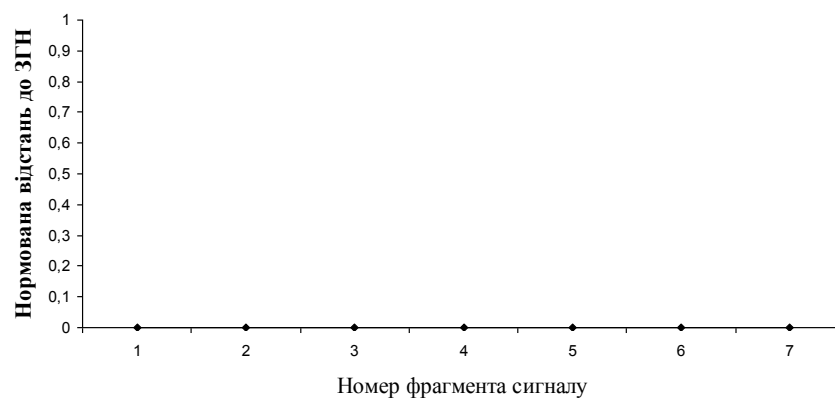
виявлення зворотного гортанного нерва для кожного фрагмента сигналу проілюстровано на рис. 4.10, в).



а)



б)

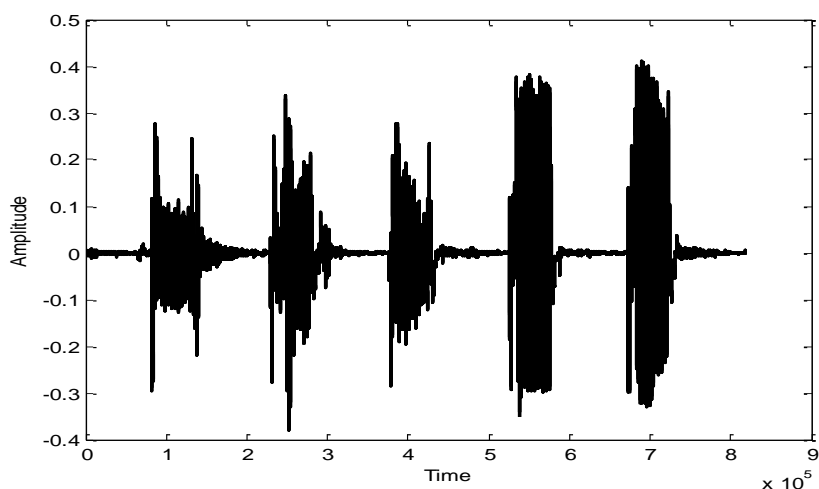


в)

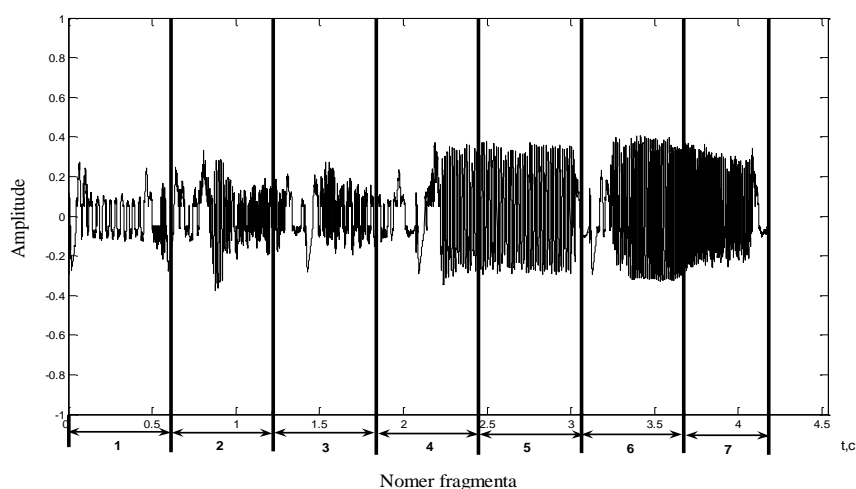
Рис. 4.10. Результат виявлення ЗГН із застосуванням розробленої інтервальної моделі з РБФ

Як бачимо із рисунку 4.10, якщо точка подразнення, яка відповідає фрагменту інформаційного сигналу, належить безпосередньо зворотному гортанному нерву – рис. 4.10, б), то у результаті прогнозування на основі інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН одержуємо оцінку відстані у вигляді інтервалу $[0;0]$ - рис. 4.10, в).

Тепер продемонструємо результат виявлення ЗГН на прикладі ІС – реакції на подразнення тканин хірургічної рани, які наведено на рис. 4.11.



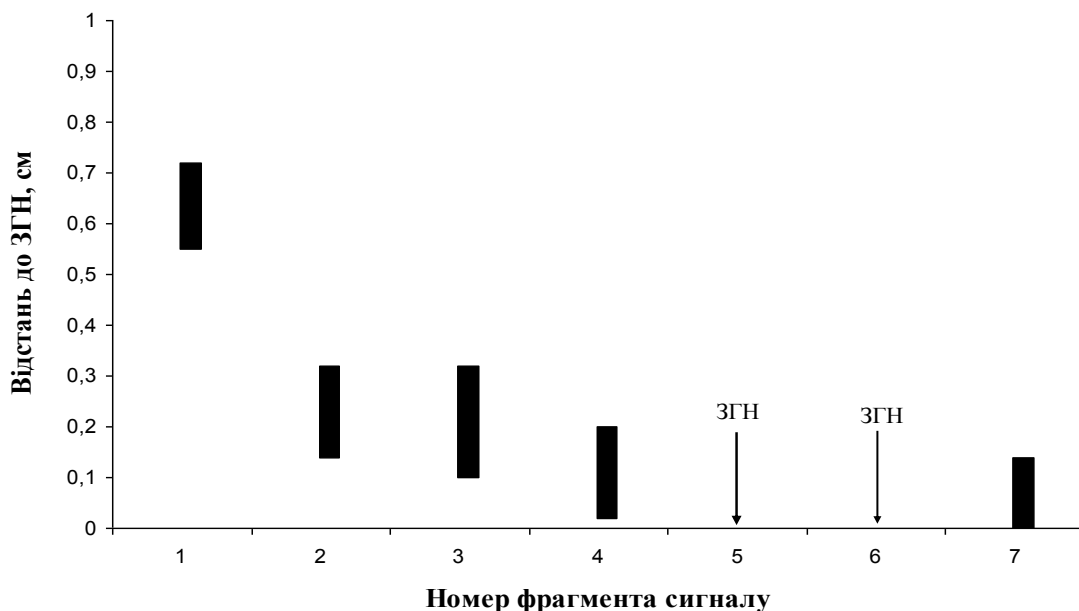
а)



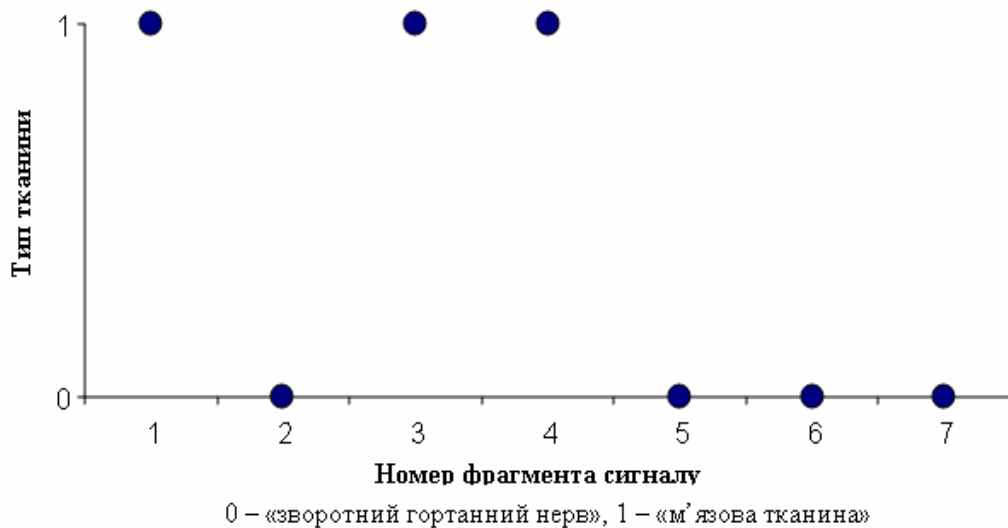
б)

Рис. 4.11. Інформаційний сигнал-реакція на подразнення тканин хірургічної рани а) одержаний експериментально, б) одержаний в результаті сегментації

Як бачимо із рисунка 4.11, б), ІС поділено на 7 фрагментів, які відповідають сімом точкам подразнення тканин хірургічної рани. Застосуємо побудовану інтервальну модель із структурними елементами у вигляді РБФ (4.8) та існуючу модель класифікації для моніторингу зворотного гортанного нерва на хірургічній рані. Результати моделювання наведено на рисунку 4.12.



а)



б)

Рис. 4.12. Результат виявлення ЗГН на основі: а) інтервальної моделі характеристик середовища хірургічного втручання; б) існуючої математичної моделі класифікації

Порівняння результатів моделювання тканин хірургічної рани існуючою моделлю і розробленою в дисертаційній роботі показує, що інтервальна модель характеристик середовища моніторингу ЗГН із структурними елементами у вигляді РБФ, дає можливість не тільки визначити тип тканини хірургічної рани, а й встановити місце розміщення зворотного гортанного нерва, тобто спрогнозувати відстань від точки подразнення до ЗГН (рис. 4.12, а)).

Результат застосування існуючої математичної моделі класифікації для ідентифікації ЗГН проілюстровано на рис. 4.12, б). Згідно існуючої моделі 1, 3 та 4 фрагменти інформаційного сигналу відповідають реакції на подразнення м'язової тканини, а 2, 5, 6, 7 фрагменти – реакції на подразнення зворотного гортанного нерва. Зважаючи на це, варто відмітити, що інтервальна модель на основі РБФ дає точніший результат, на відміну від існуючої математичної моделі класифікації, оскільки результати опрацювання другого фрагменту ІС показують, що зазначений фрагмент відповідає реакції на подразнення м'язової тканини.

Сьомий фрагмент сигналу характеризується певною невизначеністю, оскільки існуюча модель вказує, що це результат подразнення зворотного гортанного нерва, а інтервальна модель на основі радіально-базисних функцій – що це або ЗГН, або дуже близько до ЗГН ($[0; 0.14]$). Слід зазначити, що така невизначеність не становить ризику пошкодження ЗГН під час операції на щитоподібній залозі.

Таким чином, існуючі технічні засоби, програмне забезпечення, побудоване на основі методу і алгоритму структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей з РБФ, уможливили розв'язати задачу виявлення місця розміщення зворотного гортанного нерва на хірургічній рані, що, у свою чергу, знижує ризик його пошкодження та зменшує час проведення операції на щитоподібній залозі за рахунок зменшення часу на моніторинг ЗГН.

Тривалість операції на щитоподібній залозі залежить від різних факторів, зокрема:

- об'єму оперативного втручання;
- особливостей пацієнта;
- виникнення ускладнень.

Звичайна операція в середньому становить 1,5 години. Збільшення часу операції може спостерігатися при зобі великих розмірів, при загридинному розташуванні щитовидної залози. При ураженні лімфовузлів шийї операція може тривати 3-4 години [105]. Моніторинг ЗГН є частиною операції на щитоподібній залозі, оскільки хірург при розтині тканин хірургічної рани з метою уникнення пошкоджень постійно контролює місце розміщення ЗГН.

Ефективність удосконаленої інформаційної технології для моніторингу ЗГН підтверджено результатами її апробації на вибірці із 50 пацієнтів. При цьому кількість інформаційних сигналів становила понад 1000. Результати порівняння ефекту від запропонованої інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН та існуючої математичної моделі наведено в табл. 4.4

Таблиця 4.4

Результати порівняння ефективності математичних моделей для моніторингу ЗГН

Модель для моніторингу ЗГН	Ризик пошкодження ЗГН	Середній час проведення операції
Існуюча	20%	близько 90 хв
Розроблена	16%	73 хв

Як бачимо з таблиці 4.4, на основі розробленої інтевальної моделі з РБФ як моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН ризик пошкодження ЗГН знижується на 4%, а тривалість операції на щитоподібній залозі за рахунок зменшення часу на моніторинг зворотного гортанного нерва зменшується на 19 %, що підтверджено довідкою про впровадження результатів дисертаційного дослідження у Тернопільській міській

комунальній лікарні швидкої допомоги, яка розміщена у додатку А. Також варто зазначити, що із застосуванням існуючих математичних моделей для моніторингу ЗГН при зменшенні часу проведення операції на щитоподібній залозі ризик пошкодження ЗГН збільшуватиметься, а при застосуванні розробленої інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва ризик пошкодження ЗГН залишатиметься незмінним.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Удосконалено інформаційну технологію виявлення ЗГН, яка на відміну від існуючих, включає модуль оцінки відстані від точки подразнення хірургічної ранги до ЗГН, що забезпечує зниження ризику пошкодження ЗГН та одночасне зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

2. Розроблено інтервальну модель характеристик середовища моніторингу ЗГН із структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій, яка, на відміну від існуючих, забезпечує оцінку відстані від точки подразнення до зворотного гортанного нерва та уможливорює одночасне зниження ризику пошкодження зворотного гортанного нерва та зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

3. Проведено апробацію удосконаленої інформаційної технології для моніторингу ЗГН при проведенні операції на щитоподібній залозі. Результатами порівняльного аналізу застосування удосконаленої інформаційної технології у випадку використання відомої математичної моделі та розробленої інтервальної моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва підтверджено достовірність отриманих теоретичних результатів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей із радіально-базисними функціями в умовах інтервальної невизначеності та застосування цих моделей для моделювання характеристик середовища моніторингу ЗГН з метою зниження ризику його пошкодження і одночасно скорочення часу проведення операції на щитоподібній залозі за рахунок скорочення часу моніторингу ЗГН.

При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Встановлено, що існуючі математичні моделі характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва придатні тільки для розв'язування задач класифікації тканин хірургічної рани, проте для скорочення часу моніторингу ЗГН в цілому важливою є розробка математичних моделей середовища хірургічного втручання, спільних для групи пацієнтів, що відображали б місце розміщення ЗГН в залежності від точок подразнення тканин хірургічної рани. Показано, що внаслідок специфіки гортані кожного пацієнта, вибірка експериментальних даних для структурної та параметричної ідентифікації таких моделей не є однорідною, тому обґрунтовано її представлення в інтервальному вигляді.

2. Проаналізовано існуючі методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних. Встановлено, що існуючі методи мають високу обчислювальну складність реалізації і формують складні структури моделей, які не придатні для моделювання характеристик середовища хірургічного втручання і моніторингу ЗГН. Обґрунтовано для цих цілей використання математичних моделей зі структурними елементами у вигляді радіально-базисних функцій.

3. Розроблено новий метод ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій, в якому поєднано процедури формування центрів рецепторного поля радіально-базисних функцій та

аналізу інтервальних даних. Таке поєднання забезпечує одночасне налаштування структури моделі та одержання гарантованих оцінок її параметрів, що у сукупності знижує обчислювальну складність реалізації структурної ідентифікації.

4. Розроблено інтервальну модель характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва на основі радіально-базисних функцій, яка прогнозує відстань від точки подразнення до зворотного гортанного нерва та на вибірці із 120 пацієнтів уможливорює одночасне зниження ризику пошкодження зворотного гортанного нерва та зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

5. Із застосуванням субтрактивного алгоритму кластеризації та аналізу інтервальних даних розроблено інтервальну модель характеристик середовища моніторингу ЗГН за умов неоднорідності вибірки даних, яка представлена у вигляді множини первинних ознак тканин хірургічної рани та відповідних інтервальних оцінок відстаней від точки подразнення до ЗГН, що, на відміну від існуючих, уможливорює побудову єдиної математичної моделі характеристик середовища моніторингу ЗГН для групи пацієнтів.

6. Розроблено модульну архітектуру та UML – моделі програмного комплексу для реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей із радіально-базисними функціями, який використано на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету для створення методичного та програмного забезпечення та виконання науково-дослідних робіт, що підтверджено довідками про впровадження.

7. Із застосуванням програмно реалізованих інтервальних моделей характеристик середовища хірургічного втручання удосконалено інформаційну технологію виявлення зворотного гортанного нерва. На вибірці із 50 пацієнтів показано, що застосування запропонованої інформаційної технології знижує ризик пошкодження ЗГН на 4 % та одночасно скорочує час моніторингу ЗГН на 19 % під час операції на щитоподібній залозі, що

підтверджено довідкою про впровадження в Тернопільській міській комунальній лікарні швидкої допомоги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакан Г. М. К определению множества достижимости линейной управляемой системы / Г. М. Бакан, А. В. Шолохов // Проблемы управления и информатики. - 2005. - №4. - С. 15–24.
2. Бакан Г. М. Теоретико-множественная идентификация линейных объектов в классе размытых эллипсоидальных множеств / Г. М. Бакан, Н. Н. Куссуль // Автоматика. - 1990. - №4. - С. 72–78.
3. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. - М.: Наука, 1975. – 631 с.
4. Бахрушин В.Є. Математичне моделювання: Навчальний посібник / В. Є. Бахрушин. - Запоріжжя: ГУ "ЗІДМУ", 2004. – 140 с.
5. Бахрушин В.Є. Математичні основи моделювання систем: Навчальний посібник / В.Є. Бахрушин. - Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2009. – 224 с.
6. Бодянский Е. В. Рекуррентный алгоритм обучения радиально-базисных нейронных сетей, основанный на приближительных множествах / Е. В. Бодянский, Е. В. Горшков, В. В. Колодяжный [и др.] // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. - 2005. - № 1. - С. 116-122.
7. Бодянский Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения: Монография / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко; ТЕЛТЕХ. - Харьков, 2004. – 372 с.
8. Боровиков В.П., Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере / В.П.Боровиков, Г. И. Ивченко. - М.: Финансы и статистика, 2000. – 320 с.
9. Бочков А. Ф. Интервальный анализ как альтернатива регрессионному анализу / А. Ф. Бочков, А. П. Воцинин, Г. Р. Сотиров // Заводская лаборатория. - 1990. - №7. - С. 76–81.

10. Бочков А. Ф. Оценивание параметров модели для объектов с интервальной неопределенностью в выходных параметрах / А. Ф. Бочков, М. В. Милевский; – Деп. в ВИНТИ. - Москва, 1988. - № 926 – В 88. – 23 с.
11. Бочков А. Ф. Интервальные модели в задачах идентификации статистических объектов с неопределенностью / А. Ф. Бочков, М. В. Милевский.; Препринт // ВЦ СО АН СССР. - Красноярск, 1990. - №17. - С. 7–10.
12. Ватолин А. А. О задачах линейного программирования с интервальными коэффициентами / А. А. Ватолин // Журн. вычисл. математики и матем. физики. - 1984. - Т. 24. - С. 1629–1637.
13. Волочий Б. Передача сигналу в інформаційних системах / Волочий Б. Ю. - Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2005. - Ч. 1. – 196 с.
14. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. - Харьков: Основа, 1997. – 111 с.
15. Воцинин А. П. Решение задач оптимизации по интервальным оценкам критерия / А. П. Воцинин // Заводская лаборатория. - 1987. - №7. - С. 68–71.
16. Воцинин А.П. Оптимизация в условиях неопределенности / А. П. Воцинин, Г. Р. Сотиров. - М.: МЭИ – София : Техника, 1989. – 224 с.
17. Горбань А.Н. Нейроинформатика / А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кирдин и др. - Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
18. Грановский В.Г. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. Г. Грановский, Т.Н. Сирая. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 289 с.
19. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. - М. : Мир, 1979. – 302 с.
20. Дайхес Н.А. Профилактика нарушений иннервации гортани при лечении больных узловыми заболеваниями щитовидной железы. Усовершенствованная медицинская технология / Н.А.Дайхес,

Ю.В.Назарочкин, Е.И.Трофимов, Д.А.Харитонов, Е.М.Фуки. - Москва, 2006. - 386 с.

21. Дивак М.П. Аналіз точності лінійної інтервальної моделі в задачах статичної ідентифікації / М. П. Дивак // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. Автоматика, вимірювання та керування. - 1999. - № 366. - С. 31–35.

22. Дивак М.П. Використання насиченого експерименту для оцінювання параметрів інтервальної моделі при аналізі інтервальних даних / М. П. Дивак // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 1999. - №2(5). - С. 33–36.

23. Дивак М.П. Властивості інтервальних моделей при інтервальній формі їх параметрів / М. П. Дивак // Сб. науч. тр. международного науч.-учеб. центра информ. технологий и систем, науч. совет НАН Украины по пробл. “Кибернетика”. Моделирование и управление состоянием эколого-экономических систем региона. - К., 2001. - С. 58–63.

24. Дивак М. П Допустиме оцінювання множини параметрів статичної системи в класі багатомірних еліпсоїдів / М. П. Дивак // Комп'ютинг. - 2002. - Том 1.- №1. - С. 108- 114.

25. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем із інтервальними даними / М. П. Дивак. - Тернопіль: Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011. – 216 с.

26. Дивак М. П. Ідентифікація параметрів моделі на основі аналізу інтервальних даних / М.П. Дивак, О. В. Крамар // Вісн. Тернопільського держ. технічн. унів. - Тернопіль, 1999. - Т. 4. – №1. - С. 76–80.

27. Дивак М. П. Метод локалізації гарантованих оцінок в задачах параметричної ідентифікації / М. П. Дивак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2000. - №4. - С. 12–17.

28. Дивак М. П. Метод ідентифікації вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, Н.Я. Савка // Наукові праці

Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». - 2012. - Вип. 15 (203). - С. 132-139.

29. Дивак М.П. Метод інтервального аналізу енергетичного спектру інформаційного сигналу для задачі ідентифікації зворотного гортанного нерва / М.П. Дивак, Н.І. Падлецька // Індуктивне моделювання складних систем: системЗб. наук. пр. - К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2014. - Вип. 6. – С. 69-80.

30. Дивак М. П. Обчислювальні аспекти методів локалізації розв'язків задач параметричного оцінювання в умовах обмежених похибок / М. П. Дивак // Відбір та обробка інформації. - 2002. - №16 (92). - С. 43–47.

31. Дивак М. П. Проектування інтервальних моделей соціально-екологічних систем на основі нечітких даних / М. П. Дивак, Г. М. Гладій, С. В. Волощук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. праць. - 2002. - Вип. 9. - С. 130–135.

32. Дывак М. Структурная идентификация интервальных моделей статических систем / М. Дывак, В. Манжула // Международный научно-технический журнал "Проблемы управления и информатики". - 2008. - №2. - С. 45-57.

33. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6/ Обработка сигналов и проектирование фильтров / В. П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 676 с.

34. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко // Наукова думка. - Київ, 1981. - С. 296.

35. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко. - К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.

36. Ивахненко А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А. Г. Ивахненко, Й. А. Мюллер. - К.: Техника, 1985. – 223 с.

37. Калман Р Идентификация систем с шумами / Р. Калман // Успехи матем. Наук. - 1985. - Вып. 4. - С. 27–41.

38. Калмыков С. А. Методы интервального анализа / С. А. Калмыков, Ю. И. Шокин, З. Х. Юлдашев. - Новосибирск: Наука, 1986. – 222 с.
39. Конюшенко В. В. Язык технических вычислений [Электронный ресурс]- Режим доступа - <http://www.mat.net.ua>. – Назва з екрану.
40. Кунцевич В. М. Активная идентификация и управление при ограниченных шумах / В. М. Кунцевич, А. В. Кунцевич. // Пр. міжн. конф. з управління “АВТОМАТИКА-2000”, Львів 11-15 вересня 2000 р. - Львів: Держ. НДІ інформ. інфраструкт, 2000. - Т. 1. - С. 7–13.
41. Козак О.Л. Застосування методів допускового еліпсоїдного оцінювання параметрів інтервальних моделей для задачі візуалізації гортанного нерва / Козак О.Л., Дивак М.П., Пукас А.В. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. - 2010. - №680. - С. 196-205.
42. Куржанский А. Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / А. Б. Куржанский. - М.: Наука, 1977. – 392 с.
43. Куссуль М.Э. Нейросетевой классификатор для систем безопасности автомобиля / М.Э. Куссуль, А.С. Сычев // Математичні машини і системи. - 2004. - № 2. - С. 15 – 21.
44. Лазарев Ю. Ф. Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие. - К.: НТУУ "КПИ", 2003. – 424 с.
45. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях / А. Н. Лебедев . - М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
46. Лисенков А. Н. О методах идентификации и управления в условиях неопределенности / А. Н. Лисенков // Межд. конф. по интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ – 92 : Сб. тр. - Москва, 1992. - Т. 1. - С. 92 – 96.
47. Литвиненко В.І. Методологія синтезу колективу радіально-базисних мереж для розв’язання задач класифікації за допомогою алгоритму клонального відбору / В. І. Литвиненко, А. О. Фефелов, О.О. Дідик // Наукові праці. - 2009. - Вип. 93. - Т. 106. - С. 114-126.

48. Лычак М. М. Идентификация и оценивание состояния объектов управления на основе множественного подхода / М. М. Лычак // Проблемы управления и информатики. - 1999. - №5. - С. 34-41.
49. Лычак М. М. Решение задачи линейного программирования на основе множественного подхода / М. М. Лычак, В. Н. Шевченко, Н. П. Царук // Проблемы управления и информатики. - 2005. - №4. - С. 103–111.
50. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг; - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1991. – 432 с.
51. Льюнг Л. О точности модели в идентификации систем / Л. Льюнг // Известия АН. Техническая кибернетика. - М.: Наука, 1992. - №6. - С. 55–64.
52. Мандзій Б. Основи теорії сигналів: Підручник / Б. Мандзій, І. Желяк. - Львів: Видавництво «Ініціатива», 2008. – 370 с.
53. Марков С. М. Некоторые задачи интерполяции, идентификации и оценивания для интервальных данных / С. М. Марков // Межд. конф. по интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ-92. - Москва, 1992. - Т.1. - С. 103.
54. Мартинюк В. П. Моделювання індикаторів економічної безпеки держави засобами штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями / В.П. Мартинюк, М.П. Дивак, Н. Я. Савка // Світ фінансів. Науковий журнал. - Тернопіль, 2011. - Вип. 1. - С. 56-66.
55. Мартинюк В. Проблеми моніторингу та забезпечення економічної безпеки держави / В. Мартинюк // Світ фінансів. - 2007. - № 4. - С.185-187.
56. Мартинюк В. П. Фінансові аспекти розбудови митної системи в інтересах економічної безпеки України: монографія / В. П. Мартинюк. - К.: Кондор, 2011. – 326 с.
57. Мессарович М. Общая теория систем: Математические основы / М. Мессарович, Я. Такахара. - М.: Мир, 1978. – 311 с.
58. Метод гірської кластеризації [Електронний ресурс]. - Режим доступу:<https://sites.google.com/site/ne4itkalogika/necitkaklasterizacia/metod-girskoie-klasterizaciie>. – Назва з екрану.

59. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. - М.: Наука, 1971. – 207 с.
60. Новое в хирургии щитовидной железы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gutaclinic.ru>. - Назва з екрану.
61. Особенности анатомического строения щитовидной железы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.thyroidcancer.ru> - Назва з екрану.
62. Падлецька Н.І. Інформаційна технологія для ідентифікації зворотного гортанного нерва під час операції на щитовидній залозі / Н.І. Падлецька, М.П. Дивак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2015. - № 1. - С. 151-157.
63. Патент України на корисну модель №66648. Пристрій для ідентифікації гортанного нерва / Шідловський В.О., Дивак М.П., Шідловський О.В., Козак О.Л., Розновський Я. Р. - Бюл. "Промислова власність", 2012. - № 1.
64. Патент України на корисну модель №51174. Спосіб ідентифікації гортанного нерва з інших тканин хірургічної рани при проведенні хірургічних операцій на щитовидній залозі / Дивак М.П., Шідловський В.О., Козак О.Л. // Бюл. "Промислова власність". - 2010. - № 13.
65. Перегудов Ф.И Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. - М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
66. Порплиця Н. П. Реалізація методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі алгоритму поведінки бджолоїної колонії / Н.П. Порплиця, М.П. Дивак // Вісник Кременчуцького національного університету Михайла Остроградського. - 2015. - Вип. 4 (93). - С. 34-40.
67. Пукас А.В. Науково-навчальна web-орієнтована система для дослідження та ідентифікації зворотного гортанного нерва / А.В. Пукас, Ю.А. Гордієвич, І. Ю. Ленчик // Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених та студентів "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології". - Тернопіль, 2014. - С. 150-152.

68. Розновський Я. Р Ідентифікація гортанних нервів серед тканин операційної рани / Я. Р. Розновський // Науковий вісник міжнародного гуманітарного університету [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.vestnik-medicine.mgu.od.ua>. – Назва з екрану.

69. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник. - Харків: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2006. – 404 с.

70. Савка Н. Алгоритм ідентифікації штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями на основі аналізу інтервальних даних/ Н. Савка // Матеріали Міжнародної молодіжної наукової конференції “Покоління майбутнього: Погляд молодих учених”. - Курск (Росія): Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. - С.150-153.

71. Савка Н.Я. Етапи ідентифікації штучних нейронних мереж з радіально-базисними функціями / Н. Я. Савка // Матеріали Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології”. - Тернопіль: ТНЕУ, 2011. - С. 87.

72. Савка Н. Я. Застосування методу ідентифікації параметрів математичної моделі із РБФ на основі аналізу інтервальних даних для виявлення зворотного гортанного нерва / Н.Я. Савка // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». - Хмельницький, 2014. - №1. - С.153-158.

73. Савка Н.Я. Застосування штучних нейронних мереж з радіально-базисними функціями для вирішення актуальних задач сьогодення / Н.Я. Савка // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Транскордонне співробітництво як важлива складова євроінтеграційних процесів України”. - Чернівці, 2010. - С. 437-440.

74. Савка Н. Я. Застосування штучних нейронних мереж із радіально-базисними функціями для виявлення відстані до зворотного гортанного нерва на хірургічній рані / Н. Я Савка // Матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології”. - Тернопіль: ТНЕУ, 2013. - С. 51-52.

75. Савка Н. Я. Застосування штучних нейронних мереж з радіально-базисними функціями для розв'язування задач прогнозування / Н.Я. Савка // Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник. Серія: Технічні науки та архітектура. - Харків, 2011. - Вип. 94. - С. 349-353.

76. Савка Н.Я. Інтервальні моделі з радіально-базисними функціями для задачі виявлення розміщення зворотного гортанного нерва / Н. Я. Савка, О.Л. Козак // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наукових праць. - Дніпропетровськ, 2015. - № 815. - С. 225-233.

77. Савка Н.Я. Класифікатор на базі штучних нейронних мереж радіального типу / Н.Я. Савка // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія : Комп'ютерні системи та компоненти. - Чернівці, 2013. - Том 4. – Вип. 4. - С. 22-27.

78. Савка Н.Я. Локалізація зворотного гортанного нерва на хірургічній рані із застосуванням штучних нейронних мереж радіального типу / Н.Я. Савка // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки. - Чернівці: ЧНУ, 2013. - С. 45-48.

79. Савка Н. Я. Математичне моделювання за допомогою штучних нейронних мереж / Н. Я. Савка // Світова економічна криза: причини, наслідки та перспективи подолання: Матеріали міжнародної наукової студентсько-аспірантської конференції. – Львів, 2010. – С. 505-506.

80. Савка Н.Я. Методи ідентифікації штучних нейронних мереж з радіально-базисними функціями / Н.Я. Савка // Матеріали першої Міжнародної науково-технічної конференції "Обчислювальний інтелект 2011". - Черкаси, 2011. - С. 120-121.

81. Савка Н.Я. Моделювання індикаторів економічної безпеки держави засобами радіальних штучних нейронних мереж ідентифікованих методами аналізу інтервальних даних / Н.Я. Савка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Науковий журнал. - Вінниця, 2013. - №1. - С. 37-44.

82. Савка Н. Я. Моделювання індикаторів економічної безпеки Тернопільської області із застосуванням штучних нейромереж радіального типу / Н.Я. Савка // Матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології”. - Тернопіль: ТНЕУ, 2012. - С. 49-50.

83. Савка Н.Я. Проблеми ідентифікації штучних нейронних мереж з радіально-базисними функціями та можливі напрямки їх розв’язання / Н.Я. Савка, В.М. Спільчук, І.Я. Співак // Індуктивне моделювання складних систем: Збірник наукових праць. - Київ: МННЦІТС. - Вип. 2. - С. 181-193.

84. Савка Н. Я. Програмна реалізація модуля класифікації на основі інтервальних моделей з РБФ для задачі виявлення гортанного нерва / Н. Я. Савка // Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології”. - Тернопіль: ТНЕУ, 2014. - С. 38-40.

85. Савка Н. Я. Синтез оптимальної архітектури штучної нейронної мережі з радіально-базисними функціями для моделювання індикаторів економічної безпеки Тернопільської області / Н.Я. Савка // Матеріали XI Міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)". - Вінниця: ВНТУ, 2012. - С. 257-258.

86. Савка Н.Я. Структурно-параметрична ідентифікація інтервальних моделей з радіально- / Н.Я. Савка, О. Л. Козак, І. П. Струбицька // Proceedings of the international scientific and practical conference "The Top Actual Researches in Modern Science". - Dubai: Roast Publishing, 2015. - Vol I. - P. 17-22.

87. Сейдж А. Идентификация систем / А. Сейдж, Дж. Мелс. - М.: Наука, 1976. – 495 с.

88. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. - СПб: Питер, 2002. – 608 с.

89. Смагін А. А. Інтелектуальні інформаційні системи: Навч. посібн. / А. А. Смагін, С. В. Ліпатова, О. С. Мельниченко. - Ульянівськ: УЛГУ, 2010. – 136 с.

90. Тимошук П.В. Нейромережеві методи розв'язання задачі класифікації / П.В. Тимошук, Я. В. Бренич // Науковий вісник НЛТУ України. - 2012. - Вип. 22.13. - С. 343 - 349.
91. Томашевський В.М. Моделювання систем / В.М. Томашевський. - К.: Видавнича група ВНУ, 2005. – 352 с.
92. Удаление щитовидной железы. Целесообразность и последствие [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://shhitovidnaya-zheleza.ru>. – Назва з екрану.
93. Хирургические нейромониторы "Нейросан–100", "Нейросан–400" (neurosign) [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.conus.ru>. – Назва з екрану.
94. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации / Я. З. Цыпкин. - М.: Наука, 1995. – 336 с.
95. Черненко С.М. Рак щитоподібної залози: уроки десятиріч / С. М. Черненко [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.health-ua.org/archives/health/1486.html>. - Назва з екрану.
96. Шарая И. А. О максимальной внутренней оценке множеств решений интервальных линейных систем / И. А. Шарая // Вычислительные технологии. - 1998. - Т. 3. – №2. - С.55–66.
97. Шарый С. П. Алгебраический подход во "внешней задаче" для интервальных линейных систем / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. - 1998. - Т. 3. - №2. - С.67–114.
98. Шарый С. П. Алгебраический подход к анализу линейных статических систем с интервальной неопределённостью / С. П. Шарый // Известия РАН. Теория и системы управл. - 1997. - №3. - С.51–61.
99. Шарый С. П. Анализ чувствительности интервальных линейных статических систем / С. П. Шарый // Труды XI международной Байкальской школы-семинара "Методы оптимизации и их приложения". - Иркутск: ИСЭМ, 1998. - С.187–190.

100. Шарый С. П. Внешнее оценивание обобщенных множеств решений интервальных линейных систем / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. - 1999. - Т. 4. - №4. - С.82–110.

101. Шарый С. П. Интервальные алгебраические задачи и их численное решение: Дис. доктора физ. – мат. наук / С. П. Шарый. - Новосибирск: Ин-т вычисл. Технологий СО РАН, 2000. - 322с.

102. Шарый С. П. Интервальный анализ: прошлое, настоящее и будущее / С. П. Шарый // Наука в Сибири. - 1997. - №41 (2127). - С.3–12.

103. Шарый С. П. Новый подход к анализу статических систем с интервальной определённой в данных / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. - 1997. - Т. 2 – №1. - С.84–102.

104. Шідловський В. О. Спосіб ідентифікації гортанних нервів при операціях на щитоподібній і прищитоподібних залозах / В. О. Шідловський та ін. // Львівський медичний часопис. Acta Medica Leopoliensia: Журнал. - 2010. - Т. 16. - № 4. - С.112-114.

105. Шідловський В.О. Стандартні та нестандартні технології в хірургії щитоподібної залози / В. О. Шідловський, О. В. Шідловський, І. М. Дейкало, В. М. Ліпський // Шпитальна хірургія. - 2013. - № 3. - С.21-24.

106. Шокин Ю. И. Интервальный анализ / Ю. И. Шокин. - Новосибирск: Наука, 1981. - 116с.

107. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>. - Назва з екрану.

108. Щитовидная железа, анатомическое строение. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://enc.sci-lib.com>. – Назва з екрану.

109. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. - М.: Мир, 1975. - 531с.

110. Яковлев А. Г. Интервальные вычисления – предмет исследований и полезный инструмент / А. Г. Яковлев // Интервальные вычисления. - 1991. - №1. - С.10–26.

111. Ahmed Deniwar Electrophysiological neuromonitoring of the laryngeal nerves in thyroid and parathyroid surgery / Ahmed Deniwar, Parisha Bhatia, Emad Kandil // A review World Journal of Experimental Medicine World J Exp Med. - 2015. - 5(2). - P.120-123.

112. Basmajian J.V. Electromyography comes of age / J. V. Basmajian // Science 197. - 1972. - P.606.

113. Bodyanskiy Y. Rough Sets-Based Recursive Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks / Y. Bodyanskiy, Y. Gorshkov, V. Kolodyazhniy, I. Pliss - Berlin: Springer-Verlag, 2005. - 59-65 p.

114. Dequanter D. Usefulness of neuromonitoring in thyroid surgery / D. Dequanter, F. Charara, M. Shahla, Ph. Lothaire // European Archives of Oto-Rhino-Laryngology: Springer Berlin Heidelberg. - 2014. - doi:10.1007/s00405-014-3293-y.

115. Dyvak M. Algorithm for Identification of Weighting Coefficients of Artificial Neural Networks with RBF for the Task of Detecting Laryngeal Nerve in Surgical Wound / M. Dyvak, N. Savka, I. Strubyska, V. Spilchuk // Proceedings of the XI th International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer science” (TCSET’2014). - Lviv – Slavske, Ukraine: National University “Lviv Polytechnic”, 2014. - P.92.

116. Dyvak M. Identification of Artificial Neural Networks with Radial Basis Functions by Methods of Interval Data Analysis / M. Dyvak, N. Savka // Proc. of the XIth International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM’2011). - Lviv-Polyana-Svalyava: National University “Lviv Polytechnic”, 2011. - P.304.

117. Dyvak M. Device for identification of laryngeal nerves / M. Dyvak // Proc. (forum catalogue) of the 3th international forum on innovative technologies for medicine. – Bialystok, Poland, December 1-3, 2009. – P. 34.

118. Dyvak M. Electrophysiological method and interval model for identification the distance to reverse laryngeal nerve during surgery operation on the thyroid / Mykola Dyvak, Andriy Pukas // Computational Problems of Electrical

Engineering. Proceedings of abstracts of the 15th International Conference CPEE'2014: National University "Lviv Polytechnic". - Kostryno, Zakarpattia Region, Ukraine, 2011. - P.65.

119. Dyvak M. Identification the Recurrent Laryngeal Nerve by the Autocorrelation Function of Signal as Reaction on the Stimulation of Tissues in Surgical Wound / M. Dyvak, N. Padletska, A. Pukas, O. Kozak // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proceedings of the XIIth International Conference CADSM'2013. - Lviv-Polyana-Svalyava: Publishing House of Lviv Polytechnic., 2013. - P.89-92.

120. Dyvak M. Interval Model for Identification of Laryngeal Nerves / M. Dyvak, O. Kozak , A. Pukas // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097. - 2010. - R. 86. - NR 1. - P.139-140.

121. Dyvak M. Spectral analysis the information signal in the task of identification the recurrent laryngeal nerve in thyroid surgery / Mykola Dyvak, Natalia Kasatkina, Andriy Pukas, Natalia Padletska, // Proc. (forum catalogue) of the 13th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering". - Grubow, Poland, September 5-8, 2012. - P.55.

122. Fuhrmann P. Algebraic methods in system theory / P. Fuhrmann, R. E. Kalman Festschrift. - Berlin: Springer-Verlag, 1993. - P.233–265.

123. Gantmaher F. R. Matrix theory / F. R. Gantmaher. - Moscow: Publisher "PhysMatLit", 2010. – 560 p.

124. Gianlorenzo Dionigi Postoperative laryngoscopy in thyroid surgery: proper timing to detect recurrent laryngeal nerve injury / Gianlorenzo Dionigi, Luigi Boni, Francesca Rovera, Stefano Rausei, Paolo Castelnovo, Renzo Dionigi // Langenbecks Arch Surg. - 2010. - DOI 10.1007/s00423-009-0581-x.

125. Gulcin Hepgul The Identification of Recurrent Laryngeal Nerve by Injection of Blue Dye into the Inferior Thyroid Artery in Elusive Locations Journal of Thyroid Research / Gulcin Hepgul, Meltem Kucukyilmaz, Oguz Koc, Yigit Duzkoylu, Yavuz Selim Sari, and Yesim Erbil // Hindawi Publishing Corporation Journal of Thyroid Research. - 2003. - P.1-3.

126. Hamad A. Radial basis function neural network in fault detection of automotive engines / Adnan Hamad, Dingli Yu, J. B. Gomm, Mahavir S. Sangha // International Journal of Engineering, Science and Technology. - 2010. - Vol. 2. - No 10. - P.1-8.

127. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman - Verlag: Springer, 2009. - 746p.

128. Kala R. Evolutionary Radial Basis Function Network for Classificatory Problems / R. Kala, H. Vazirani, N. Khanwalkar, M. Bhattacharya // International Journal of Computer Science and Applications. Technomathematics Research Foundation. - 2010. - Vol. 7. - No 4. - P.34-49.

129. Kalman R. E. Realization theory of linear systems over commutative ring / R. Kalman, Y. Rouchaleau // Automatica, Languages and Program. - Amsterdam, 1974. - P.61–65.

130. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization / D. Karaboga // Techn. rep. — TR06. —Erciyes: Erciyes Univ. Press, - 2005. - P.10.

131. Kartush Laryngeal Nerve Monitoring / Jack M, Naumann, Ilka C // American Society of Electroneurodiagnostic Technologists: Provided by ProQuest LLC. All Rights Reserved. - 2014.

132. Laryngeal nerve damage: MedlinePlus Medical Encyclopedia. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ency/article/001643.htm>. - Назва з екрану.

133. Ljung L. Theory and practice of recursive identification / L. Ljung. - Cambr., Mass: MIT Press, 1983. – 529 p.

134. Loch-Wilkinson T.J. Nerve stimulation in thyroid surgery: is it really useful? / T.J. Loch-Wilkinson, P.L Stalberg, S.B. Sidhu, M.S. Sywak, J.F. Wilkinson, L.W. Delbridge // ANZ J Surg. - 2007. - 77(5).- E. 377-80.

135. MATLAB&Toolboxes [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/signalprocess/index.php>. - Назва з екрану.

136. Moore R. E. Interval Analysis / R. E. Moore. - Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1966. – 145 p.
137. Moore R. E. Methods and Applications of Interval Analysis / R. E. Moore. - SIAM, Philadelphia, 1979. – 190 p.
138. Moron E. Intraoperative neuro-monitoring of the recurrent laryngeal nerve / Moron E., Jonas J., Cavallaro A., Sapienza P., Bahr R. // Experience of 1000.
139. Nelles O. Nonlinear Systems Identification / O. Nelles. - Berlin: Springer, 2001. - 785p.
140. Park J. Universal approximation using radial-basis-function networks / J. Park , I. W. Sandberg // Neural Computation. - 1991. - 3. - P. 246-257.
141. Pietro Giorgio Calò Identification alone versus intraoperative neuromonitoring of the recurrent laryngeal nerve during thyroid surgery: experience of 2034 consecutive patients / Pietro Giorgio Calò, Giuseppe Pisano, Fabio Medas, Maria Rita Pittau, Luca Gordini, Roberto Demontis and Angelo Nicolosi // Journal of Otolaryngology - Head & Neck Surgery. - 2014. - doi:10.1186/1916-0216-43-16.
142. Rohn J. Input-output model with interval data / J. Rohn // Econometrica. - 1980. - Vol. 48. - P.767–769.
143. Savka N Intelligent Classifier Based on Radial Basis Function Network for the Task of Identification the Recurrent Laryngeal Nerve in a Surgical Wound / Nadiya Savka, Mykola Dyvak, Andriy Pukas, Vasyl Nemish // Journal of Applied Computer Science. - Poland, 2014. - Vol. 22. – No 2. - P.55-64.
144. Savka N. Intellectual Classifier Based on Artificial Neural Networks with RBF to Detect Reverse Laryngeal Nerve / N. Savka, V. Nemish, O. Kushnir // Proceedings of the XIIth International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM’2013). - Lviv-Polyana-Svalyava: National University “Lviv Polytechnic”, 2013. - P.314-315.
145. Savka N. The Method of Identifying Weights of Artificial Neural Networks with Radial Basis Functions Based on Multiple-Set Approach / N/ Savka, V.

Nemish, O. Kushnir // Proceedings of the XI th International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications " (TCSET'2012). - Lviv – Slavske: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. - P.392.

146. Schapire Robert E. The boosting approach to machine learning: An overview / Robert.E., Schapire // In MSRI Workshop on Nonlinear Estimation and Classification. - 2002.

147. Scheuller M.C. Laryngeal mask anesthesia with intraoperative laryngoscopy for identification of the recurrent laryngeal nerve during thyroidectomy / M.C. Scheuller, P. Ellison // Laryngoscope. - 2002. - 112(9). - E. 1594-7.

148. Sean L. Essentials of Metaheuristics (Second edition) / L. Sean // Raleigh: Lulu. - 2013. - P.250.

149. Serkan S. Safe thyroidectomy with intraoperative methylene blue spraying / Sari Serkan, Aysan Erhan, Mahmut Muslumanoglu, Yeliz E Ersoy, Huseyin Bektasoglu and Erkan Yardimci // Thyroid Research. - 2012.

150. Shary S. P. Solving the linear interval tolerance problem / S. P. Shary // Mathematics and Computer in Simulation. - 1995. - V. 39. - P.53–85.

151. Sunil E. V. T. Radial basis function neural network for / E. V. T Sunil, C. Sh. Yung // IEEE Trans. on Neural Networks. - 1994. - 5. - P. 594-603.

152. Walter E. Identification of parametric model from experimental data / E. Walter, L. Pronzato. - London, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo: Springer, 1997. – 413 p.

Додаток А

Акти про використання результатів дисертаційної роботи

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Головний лікар Тернопільської міської комунальної лікарні швидкої допомоги



Чайківський Я.Ф.
“ 5 ” травня 2016 р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи

Савки Надії Ярославівни

**“Методи ідентифікації інтервальних моделей характеристик середовища
моніторингу зворотного гортанного нерва”**

При проведенні хірургічних операцій на щитоподібній залозі використано результати дисертаційної роботи здобувача кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Савки Надії Ярославівни, а саме метод моніторингу зворотного гортанного нерва на області хірургічного втручання, в основі якого інтервальні моделі з радіально-базисними функціями.

Результатом застосування запропонованого методу є зниження ризику пошкодження зворотного гортанного нерва та зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

Відповідальний за впровадження
д.м.н., проф. каф. хірургії №1 з урологією
імені професора Л.Я. Ковальчука
Тернопільського державного медичного
Університету ім. І. Я. Горбачевського



Шідловський В.О.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
економічного університету
д.е.н., проф. Задорожний З.-М. В.

“ 5 лютого 2016 р.”



АКТ

про використання результатів кандидатської роботи

Савки Надії Ярославівни

“ Методи ідентифікації інтервальних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва ”

Комісія у складі: голови – декана факультету комп’ютерних інформаційних технологій, керівника науково дослідної роботи, д.т.н., проф. Дивака М.П. та членів: в. о. директора науково-дослідного інституту інноваційного розвитку та державотворення Письменного В.І., начальника відділу прогнозування і маркетингу Кушніра О.Р. склали цей акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Савки Н.Я. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп’ютерних наук факультету комп’ютерних інформаційних технологій з безпосередньою участю автора, а саме:

- науково-дослідної роботи на тему “Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотнього гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі” (номер державної реєстрації 0112U000078), у якій автором розроблено інтервальну модель на основі радіально-базисних функцій, яка забезпечує класифікацію тканин хірургічної рани та знаходження оцінки відстані від точки подразнення області хірургічного втручання до зворотного нерва із гарантованою точністю;

- науково-дослідної роботи на тему “Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об’єктів” (номер державної реєстрації 0114U000569), у якій автором розроблено метод структурно-параметричної ідентифікації інтервальних моделей з радіально-базисними функціями.

Голова комісії

декан факультету комп’ютерних
інформаційних технологій,
керівник НДР, д.т.н., проф.

Дивак М.П.

Члени комісії:

в. о. директора НДІ ІРД

Письменний В. І.

начальник відділу ПМ

Кушнір О.Р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Перший проректор
Тернопільського національного
економічного університету
к.ф.-м.н., доцент Шинкарик М.І.

“ 5 ” серпня 2016 р.



АКТ

Про впровадження в навчальний процес Тернопільського національного економічного університету результатів дисертаційної роботи
Савки Надії Ярославівни
“Методи ідентифікації інтервальних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва”

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи здобувача кафедри комп'ютерних наук Савки Надії Ярославівни на тему “Методи ідентифікації інтервальних моделей характеристик середовища моніторингу зворотного гортанного нерва” використані в навчальному процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету для студентів спеціальностей “Інженерія програмного забезпечення” та “Програмне забезпечення систем”.

При викладанні дисциплін “Інтервальні обчислення” та “Інтелектуальний аналіз даних” надається інформація щодо ідентифікації інтервальних моделей на основі радіально-базисних функцій методами гарантованого оцінювання параметрів; у процесі виконання лабораторних робіт використовується розроблене у дисертаційній роботі програмне забезпечення для структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей.

Декан факультету комп'ютерних
інформаційних технологій,
д.т.н., професор

М.П. Дивак

В. о. завідувача кафедри
комп'ютерних наук,
к.т.н., доцент

А.В. Пукас

К.т.н., доцент кафедри
комп'ютерних наук

М.Я. Шпінталь

Додаток Б

Лістинг програми для побудови інтервальної моделі з РБФ

```

function INTERVAL_IM_FR_Y_P_1
LEARNING_SET = 1:72;
Input = [];
Output = [];
goal=0.3;
spread=700;
MN= 5;
DF=1;
inputs = [1:8];
output = [5];
net = newrb(Input(inputs,LEARNING_SET),Output(output,LEARNING_SET),goal,spread,MN,DF)
b1 = net.b{1}
b2 = net.b{2}
IW = net.IW{1}
LW = net.LW{2,1}
N = size(IW, 1) + 1;
f = ones(1, N);
A1 = zeros( length(LEARNING_SET), N);
delta = 0.28;
yplus = (Output(output,1:72)+Output(output,1:72)*delta)
yminus = (Output(output,1:72)-Output(output,1:72)*delta)
for i = LEARNING_SET
    p = Input(inputs,i);
    A1(i,:) = [ af(p,IW, b1); 1]';
end
A1
yplus
yminus
Wmin=[]; Wmax=[];
for i=1:size(A1,2)
    f = zeros (1,size(A1,2));
    f(i)=1;
    Wmin = [Wmin; linprog(f,[A1; -A1],[yplus(LEARNING_SET) -yminus(LEARNING_SET)])]';
    f(i)=-1;
    Wmax = [Wmax; linprog(f,[A1; -A1],[yplus(LEARNING_SET) -yminus(LEARNING_SET)])]';
end
Wmin
Wmax
Wmin = mean(Wmin)
Wmax = mean(Wmax)
Wavg = mean([Wmin; Wmax])
for i=1:size(Input,2)
    p = Input(inputs,i);
    y_Nadya_plus (i) = Wmax * [af(p,IW,b1); 1];
    y_Nadya_minus (i) = Wmin * [af(p,IW,b1); 1];
    y_Nadya_avg (i) = Wavg * [af(p,IW,b1); 1];
end
function val=tar(W, A1, yplus,yminus)
Wmin=W(1:length(W)/2)';
Wmax=W(length(W)/2+1:length(W))';
ymin=(A1*Wmin)';
ymax=(A1*Wmax)';
ii = find(or (yminus > ymin, ymax > yplus));
val = ones(1,length(ymax))./ymax-ymin;
val(ii)=1000;
function a = af (p, IW, b1)
a = zeros (size(IW,1),1);
for i=1:length(a)
a(i) = exp ( - ( sqrt (sum ((IW(i,:)-p') .^ 2)) * b1(i))^2 ) ;end

```

Додаток В

Експериментальні дані для прогнозування імпорту

Період	№ місяця	Перераховано митних платежів в держбюджет, грн.	Оформлено вантажів, тис. тонн	Кількість оформлених ВМД	Оформлено транспортних засобів	К-сть оформлених попередніх декларацій	К-сть оформлених попередніх повідомлень	Заведено справ про порушення митних правил на суму, грн.	Заведено справ про контрабанду на суму, грн.	Імпорт, тис. дол. США
	k	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	$[y^-(k); y^+(k)]$
2006	36	8384833,03	17,48	1016	913	203	353	1033,0	-	12074,1
	37	5031581,82	11,67	606	651	113	226	579401,0	336440	5764,48
	38	7959606,05	14,87	916	813	147	328	206078,0	90584	7179,6
	39	8888419,67	18,51	1091	943	202	402	7063043,0	-	10993,3
	40	8637731,69	13,97	868	756	154	358	55263,0	-	9231
	41	8961534,13	15,23	1012	899	154	443	326620,0	-	8042,4
	42	9343750,32	19,27	904	833	148	358	123685,0	-	8171,2
	43	9876239,92	14,93	915	800	155	373	27813,0	-	8959,8
	44	13592727,48	23,63	972	1010	176	363	157280,0	-	11071,2
	45	14002415,71	19,73	979	911	160	417	284781,0	-	11662,1
	46	11063717,14	23,26	1048	987	126	448	48667,0	-	9455,6
	47	14460756,33	24,11	1049	1033	132	434	15705,0	-	11732,8
48	12767157,28	21,91	1167	1083	203	500	2176,0	-	16167,6	
49	7014760,0	17,46	732	686	121	281	14802,0	-	6220,66	
50	10081982,4	16,12	945	824	132	376	782384,0	-	10349,7	
51	13057968,06	21,51	1210	1106	226	481	797749,0	-	14344,5	
52	14066271,7	17,17	1008	908	117	437	244659,0	-	11772,4	
53	13314542,75	20,71	1139	1083	119	470	116791,0	231223	13629,3	
54	15413756,2	19,83	1104	1033	117	446	127809,0	-	13169,4	
55	15760830,19	20,61	1176	1102	136	488	16932,0	-	14015,9	
56	14473102,25	19,73	1074	995	128	481	1123801,0	-	13623,8	
57	15579287,24	24,39	1063	1083	134	411	66044,0	-	15620	
58	15950395,32	36,96	1209	1392	132	508	147657,0	359159	16523,9	
59	18205037,37	38,3	1261	1448	169	505	55362,0	-	18040,3	
60	21199726,08	32,64	1339	1329	208	470	33375,0	-	21319,9	
61	11770356,47	25,04	782	686	121	281	1500,0	-	10060,84	
62	25053375,99	36,31	1388	824	132	376	23248,0	-	19221,1	
63	27553201,00	43,85	1408	1106	226	481	398596,0	789146	23437,8	
64	28983929,32	39,81	1300	908	117	437	398596,0	-	23276,5	
65	29995740,73	42,72	1452	1083	119	470	6557,0	-	25192,8	
66	29179239,08	35,46	1411	1033	117	446	12859,0	-	28775,5	
67	55494159,65	37,06	1686	1102	136	488	491467,0	245675	52888,9	
68	42278314,48	48,38	1637	995	128	481	650,0	-	23030,6	
69	56531261,49	75,43	1948	1083	134	411	11909,0	-	54336,5	
70	41329962,64	64,87	1857	1392	132	508	38072,0	-	32403,6	
71	39492118,67	48,41	1456	1448	169	505	50271,0	-	25084,3	
72	43544162,69	27,31	1258	1329	208	470	5268,0	-	19582,5	
73	17294990,52	9,59	606	525	127	194	24670,0	1123802	34,6	
74	15166439,17	14,02	709	703	147	219	7141,0	-	32,7	
75	29417337,31	25,38	962	556	212	248	21577,0	-	32,2	
76	28610400,3	24,57	942	929	212	279	263504,0	-	30,4	
77	26798002,66	25,03	954	979	212	299	2682885,0	227926	26,9	
78	25847898,49	24,98	1018	1074	198	350	2682885,0	-	21,8	
79	34654340,36	26,56	1182	1264	236	406	1211,0	-	17,1	
80	37617759,27	46,19	1162	1372	193	332	3480,0	-	14,9	
81	38103957,91	44,65	1335	1493	191	377	1400,0	-	14,0	
82	21243943,8	35,3	1304	1289	208	404	3100,0	-	13,2	
83	25873235,43	43,28	1322	1478	212	369	81237,0	-	11,9	
84	28284474,1	35,67	1414	1346	240	410	9346,0	-	11,2	

Додаток Д

Експериментальні дані для прогнозування індикатора соціальної безпеки
Тернопільської області

Період	№ місяця	Перераховано митних платежів в держбюджет, грн.	Оформлено вантажів, тис. тонн	Кількість оформлених ВМД	Оформлено транспортних засобів	К-сть оформлених попередніх декларацій	К-сть оформлених попередніх повідомлень	Заведено справ про порушення митних правил на суму, грн.	Заведено справ про контрабанду на суму, грн.	К-сть безробітних, які зареєстровані в державній службі зайнятості, тис. осіб
	k	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	$[y^-(k); y^+(k)]$
2003	1	5216128,14	8,86	567	451	48	227	9873441,0	23764	[30,528; 54,272]
	2	6443868,7	11,05	731	615	56	288	84588,0	-	[31,032; 55,168]
	3	7647405,08	14,46	829	687	45	307	20912364,0	9726143	[30,816; 54,784]
	4	4790370,33	16,28	744	703	21	281	139137,0	-	[30,456; 54,144]
	5	5629560,98	19,4	771	685	29	320	46197,0	-	[30,168; 53,632]
	6	5255195,33	18,39	849	719	30	318	155707,0	-	[29,592; 52,608]
	7	18744222,93	46,71	1081	1365	34	452	190166,0	-	[28,224; 50,176]
	8	6189293,18	22,95	864	1011	20	369	12443,0	-	[27,864; 49,536]
	9	5225720,85	20,56	879	828	15	299	214779,0	-	[27,504; 48,896]
	10	6429778,68	22,0	937	926	24	385	95512,0	-	[27,48]
	11	7137739,58	23,02	861	919	21	325	48998,0	-	[27,792; 49,408]
	12	10227286,18	19,29	981	897	31	364	59592,0	-	[28,584; 50,816]
2004	13	3923498,71	8,84	560	322	23	189	11514,0	-	[30,096; 53,504]
	14	5370652,61	14,81	751	651	34	257	54677,0	-	[31,104; 55,296]
	15	8012252,82	13,19	855	694	40	310	75375,0	380000	[32,904; 58,496]
	16	6861988,54	11,49	797	638	38	316	69205,0	-	[34,056; 60,544]
	17	6984819,3	29,79	812	916	24	279	92951,0	-	[32,256; 57,344]
	18	6853413,22	12,25	808	677	30	296	150510,0	48315	[30,744; 54,656]
	19	7702523,48	14,7	811	783	42	338	6790,0	-	[28,872; 51,328]
	20	9554145,0	29,57	842	952	27	294	43772,0	-	[28,656; 50,944]
	21	9500431,79	15,77	827	731	36	321	10039,0	-	[28,152; 50,048]
	22	9729619,84	15,32	900	786	48	345	48993,0	-	[27,36; 48,64]
	23	9027142,01	18,14	897	809	32	299	15089,69	-	[27,648; 49,152]
	24	8170620,84	16,87	995	795	54	278	6525,0	-	[28,224; 50,176]
2005	25	5022599,49	11,39	627	510	40	217	353342,0	146922	[28,512; 50,688]
	26	7161648,44	13,07	807	656	72	257	5649,0	-	[29,088; 51,712]
	27	12309469,62	18,1	1134	893	80	372	186243,0	131282	[29,664; 52,736]
	28	13007569,35	16,13	1018	867	86	456	3430,0	-	[29,448; 52,352]
	29	10733286,3	16,48	882	812	100	398	2508,0	-	[28,368; 50,432]
	30	13611203,35	14,26	1011	880	126	443	1290062,0	-	[28,584; 50,816]
	31	13804786,97	13,84	937	870	151	384	100,0	-	[28,8; 51,2]
	32	11043825,43	16,5	912	922	167	331	2262267,0	2246742	[27,432; 48,768]
	33	10132015,96	27,58	1020	966	174	377	33163,0	-	[26,208; 46,592]
	34	7924811,25	22,55	1023	960	126	419	33439,0	-	[24,264; 43,136]
	35	6548181,0	20,13	1029	935	141	385	61120,0	-	[25,776; 45,824]
	36	8384833,03	17,48	1016	913	203	353	1033,0	-	[29,088; 51,712]
2006	37	5031581,82	11,67	606	651	113	226	579401,0	336440	[30,672; 54,528]
	38	7959606,05	14,87	916	813	147	328	206078,0	90584	[31,032; 55,168]
	39	8888419,67	18,51	1091	943	202	402	7063043,0	-	[31,608; 56,192]
	40	8637731,69	13,97	868	756	154	358	55263,0	-	[32,112; 57,088]
	41	8961534,13	15,23	1012	899	154	443	326620,0	-	[32,04; 56,96]
	42	9343750,32	19,27	904	833	148	358	123685,0	-	[32,256; 57,344]
	43	9876239,92	14,93	915	800	155	373	27813,0	-	[22,968; 40,832]
	44	13592727,48	23,63	972	1010	176	363	157280,0	-	[20,664; 36,736]
	45	14002415,71	19,73	979	911	160	417	284781,0	-	[19,728; 35,072]
	46	11063717,14	23,26	1048	987	126	448	48667,0	-	[19,368; 34,432]
	47	14460756,33	24,11	1049	1033	132	434	15705,0	-	[22,032; 39,168]
	48	12767157,28	21,91	1167	1083	203	500	2176,0	-	[23,904; 42,496]
2007	49	7014760,0	17,46	732	686	121	281	14802,0	-	[24,48; 43,52]
	50	10081982,4	16,12	945	824	132	376	782384,0	-	[24,264; 43,136]
	51	13057968,06	21,51	1210	1106	226	481	797749,0	-	[24,624; 43,776]
	52	14066271,7	17,17	1008	908	117	437	244659,0	-	[26,928; 47,872]
	53	13314542,75	20,71	1139	1083	119	470	116791,0	231223	[27,216; 48,384]
	54	15413756,2	19,83	1104	1033	117	446	127809,0	-	[23,832; 42,368]
	55	15760830,19	20,61	1176	1102	136	488	16932,0	-	[19,224; 34,176]
	56	14473102,25	19,73	1074	995	128	481	1123801,0	-	[18,072; 32,128]
	57	15579287,24	24,39	1063	1083	134	411	66044,0	-	[17,064; 30,336]
	58	15950395,32	36,96	1209	1392	132	508	147657,0	359159	[16,344; 29,056]
	59	18205037,37	38,3	1261	1448	169	505	55362,0	-	[15,912; 28,288]
	60	21199726,08	32,64	1339	1329	208	470	33375,0	-	[16,056; 28,544]
2008	61	11770356,47	25,04	782	686	121	281	1500,0	-	[20,52; 36,48]
	62	25053375,99	36,31	1388	824	132	376	23248,0	-	[22,32; 39,68]
	63	27553201,00	43,85	1408	1106	226	481	398596,0	789146	[22,32; 39,68]
	64	28983929,32	39,81	1300	908	117	437	398596,0	-	[21,456; 38,144]
	65	29995740,73	42,72	1452	1083	119	470	6557,0	-	[20,448; 36,352]
	66	29179239,08	35,46	1411	1033	117	446	12859,0	-	[18,288; 32,512]
	67	55494159,65	37,06	1686	1102	136	488	491467,0	245675	[16,128; 28,672]
	68	42278314,48	48,38	1637	995	128	481	650,0	-	[14,904; 26,496]
	69	56531261,49	75,43	1948	1083	134	411	11909,0	-	[14,544; 25,856]
	70	41329962,64	64,87	1857	1392	132	508	38072,0	-	[14,544; 25,856]
	71	39492118,67	48,41	1456	1448	169	505	50271,0	-	[14,4; 25,6]
	72	43544162,69	27,31	1258	1329	208	470	5268,0	-	[17,424; 30,976]

Додаток Е

Лістинг програми для опрацюванні інформаційного сигналу

```

dir = '40 Гц/';
y=wavread(['3.wav']);
a=plot (y);
ylabel('Amplitude')
xlabel('Time')
set(a,'Color','black','LineWidth',2)
figure;
y1=wavread(['2.wav'], [880000 930000]);
plot (y1);
ylabel('Amplitude')
xlabel('Time')
[x, Fs]=wavread(['2.wav'], [880000 930000]);
x = mean(x,2);
Tm = 18.5;
Fs = 44100;
L = 10000;
T=0:1/Fs:Tm;
figure;
FftS=abs(fft(y3,L));
FftS=2*FftS./L;
FftS(1)=FftS(1)/2;
F=0:Fs/L:Fs/2-1/L;
n=100;
p1=plot(F(1:n),FftS(1:n));
ylabel('Amplitude')
xlabel('Frequency')
[amplitudy, index_chastot]= sort(FftS(1:n),'descend');
fprintf('Амплітуда\tЧастота\n')
for i=1:length(index_chastot)
fprintf('% .2f\t% .2f\n',[amplitudy(i)*1000, F(index_chastot(i))'],'Linewidth',10)
end

```