

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Нечипоренко Аліни Сергіївни**  
**«Моделі, методи та інформаційні технології раннього виявлення**  
**розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах»,**  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.13.06 - інформаційні технології

**Актуальність теми.** Проблема виявлення розладнань постає у багатьох галузях науки і техніки. У складних системах різноманітних галузей, зокрема, металургійного, паливно-енергетичного комплексів, хімічної та нафто-промисловості, аерокосмічного будування та експлуатації, екологічного та медичного моніторингу, виникають підвищені вимоги до надійності та безпеки. Неприпустимі зміни у процесах, що характеризують стан складних об'єктів, призводять до унеможливлення виконання їх цільових функцій, що іноді може викликати непоправні наслідки. Зокрема, у системах медичної діагностики, а саме клінічного моніторингу, повинен забезпечуватися безперервний контроль стану пацієнта з метою своєчасного виявлення критичних станів за відхиленнями значущих показників. Для цього необхідна реєстрація та обробка діагностичної інформації у режимі реального часу. Виникнення аварійних та катастрофічних ситуацій на об'єктах паливно-енергетичного комплексу, машинобудування, біотехнологічної промисловості, пов'язане також із значними соціальним та матеріальним втратами. Для запобігання подібним наслідкам необхідне раннє виявлення розладнань у процесах, що характеризують стан таких складних об'єктів.

У межах апріорного та апостеріорного підходів до розв'язання завдань виявлення адитивних розладнань використовуються методи, що ґрунтуються на застосуванні апарату математичної статистики. Для виявлення неадитивних розладнань на сьогодні, в основному, застосовуються методи класичного



спектрального аналізу. Проте застосування класичного спектрального аналізу обмежене розглядом стаціонарних випадкових процесів.

Реальні ж процеси у медико-біологічних, зокрема, ринологічних системах та певних системах технічної діагностики, мають характер як чисто нестаціонарних квазіперіодичних, так і хаотичних або є суперпозицією квазіперіодичної та хаотичної складових, але спільним для всіх типів процесів, у тому числі з розладнаннями, є те, що вони спричинені істотними нелінійностями у розглядуваних динамічних системах. Адекватний опис процесів з розладнаннями у такого роду системах вимагає побудови комплексних математичних моделей, що ґрунтуються на поняттях стохастичності, хаотичності, фрактальності процесів за умов інформаційної невизначеності.

Для реалізації раннього виявлення розладнань у розглянутих нестаціонарних квазіперіодичних процесах необхідне розроблення та впровадження сучасних моделей, методів та інформаційних технологій, що й визначає актуальність теми дисертаційного дослідження.

**Зв'язок дисертації з науковими програмами й темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань держбюджетних тем МОН України: «Дослідження теоретичних та технічних принципів оцінки стану людини, профілактики, лікування та реабілітації» (ДР № 0107U001541), «Теорія, методи і моделі управління життєвим циклом інтелектуальних інформаційних середовищ регіональних соціо-економічних об'єктів» (розділ «Розробка знання-орієнтованих моделей, методів та елементів інформаційного середовища на прикладі створення інформаційного середовища процесу діагностики у ринології»), (ДР № 0115U002430), «Розробка інформаційної технології ідентифікації системних адаптаційних можливостей підлітків з серцевою патологією» (ДР № 0115U002437), «Розробка методології і математичних моделей

соціально-економічних систем при реалізації концепції їх стійкого розвитку» (ДР № 0115U001522), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів; в рамках програми Horizon2020, Cost action № CA15110 «Harmonizing standardization strategies to increase efficiency and competitiveness of European life-science research»; у рамках робіт у міжнародному комітеті ISO/TC 276 Biotechnology, WG5 «Data processing and integration» та договором про науково-практичне співробітництво між ХНУРЕ та ХМАПО № DP176/603 від 15.03.2016 р.

**Загальна характеристика структури й змісту роботи.** Дисертація складається із вступу, анотацій на двома мовами, семи основних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

**У вступі** міститься обґрунтування актуальності теми дисертаційного дослідження, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, темами, визначено мету і завдання роботи, методи дослідження, сформульовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, відзначено особистий внесок здобувача, а також вказуються дані про апробацію та публікації результатів дисертації.

**У першому розділі** проведено аналіз проблеми виявлення розладнань, розглянуто публікації провідних фахівців за напрямком досліджень. Проаналізовано основні підходи до виявлення розладнань, а саме апіорний, апостеріорний та комбінований, які ґрунтуються на методах математичної статистики (А.Н. Ширяєв, Е.С. Пейдж, І. В. Нікіфоров, М. Basseville). У межах даних підходів можна виділити параметричні, напівпараметричні та непараметричні методи та їх модифікації для випадку нестачі даних про статистичний розподіл процесу. Розглянуто методи ідентифікаційного та багатомодельного підходів, що базуються на алгоритмах з пам'яттю (В. Каминскас, Д. Виткуте, Д. Гроп). Вихідна інформація для виявлення розладнань як за допомогою вищезазначених методів міститься у часових рядах. Для виявлення розладнань на основі аналізу даних гетерогенного походження проблему досліджено з позицій технічної та медичної діагностики, серед яких зроблено

акцент на групі методів прийняття діагностичних рішень. До цієї групи належать методи на основі фізичних моделей та методи, що керуються даними, які засновані на підходах обчислювального інтелекту, що за останні десятиріччя отримали потужний розвиток. При цьому розглядаються відомі постановки задач, моделі й методи розв'язання задач виявлення розладнань. Також розглянуто основні характеристики нестационарних квазіперіодичних процесів. Вказано, що відсутні інформаційні технології для вирішення проблеми раннього виявлення розладнань у такого роду процесах та обґрунтовано зв'язок проблеми раннього виявлення розладнань і планування оперативних втручань у медичній галузі.

На основі проведеного аналізу виявлено **основні недоліки існуючих моделей і методів виявлення розладнань**, які пов'язані, **по-перше**, з використанням моделей та методів математичної статистики, які потребують великого обсягу даних та репрезентативності вибірок, залежать від умов експерименту, **по-друге**, з **втратою фізичного сенсу ознак вихідної вибірки, складністю інтерпретації та неспроможністю встановлення причини розладнання**, при використанні методів, що керуються даними, **по-третє**, з налаштуванням існуючих моделей та методів на виявлення лише адитивних змін, які не відображають структурні властивості процесів, **по-четверте**, існуючі моделі та методи не враховують властивості нестационарності та квазіперіодичності процесів та хаотичності процесів, що аналізуються. Здійснений аналіз сучасних досягнень і не розв'язаних завдань у галузі раннього виявлення розладнань надав можливість сформулювати основні напрямки дослідження дисертаційної роботи, засновані на комплексному використанні методів аналізу часових рядів, обчислювального інтелекту, фрактального аналізу, методів на основі фізичних моделей:

- а) розроблення моделі процесів обробки та аналізу гетерогенних даних, на основі якої реалізуються завдання виявлення розладнань та планування оперативних втручань, з урахуванням аналітичної неоднозначності даних;

- б) розроблення моделей та методів на основі дослідження фізичних властивостей нестационарних квазіперіодичних процесів, з урахуванням їх стану та структури;
- в) удосконалення методу імітаційного моделювання просторово-часових характеристик багатовимірних нестационарних квазіперіодичних часових рядів, для забезпечення візуалізації місцезнаходження розладнань, що дасть можливість фахівцеві проводити оперативні втручання з більшою ефективністю;
- г) розробка методів раннього виявлення розладнань та фільтрації аномалій нестационарних квазіперіодичних процесів на основі апарату обчислювального інтелекту із екстракцією інформативних ознак розладнань за допомогою аналізу часових рядів;
- д) створення інформаційних технологій раннього виявлення неадитивних розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах на основі розроблених моделей та методів з використанням імітаційного CFD-моделювання для планування втручань;
- і) розробка інтелектуальної інформаційної системи, яка реалізує інформаційні технології раннього виявлення розладнань та планування оперативних втручань.

**Другий розділ** присвячено розробленню концептуальних засад побудови інтелектуальних інформаційних систем виявлення розладнань і планування оперативних втручань. Запропоновано підхід до підвищення ефективності виявлення розладнань у нестационарних квазіперіодичних процесах, який містить інформаційне забезпечення процесу раннього виявлення розладнань та інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень, програмно-апаратне та математичне забезпечення, для вдосконалення якого використовується сукупність методів аналізу гетерогенних даних. Формалізовано комплекс вимог до побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, який складається з функціональних, технологічних та вимог до бізнес-процесів.

Розроблено та обґрунтовано теоретико-множинну модель процесів обробки та аналізу гетерогенних даних нестационарних квазіперіодичних процесів. На підставі запропонованих моделей реалізуються функції інтелектуальної підтримки прийняття рішень та імітаційного моделювання як основи для забезпечення раннього виявлення розладнань та планування оперативних втручань. Обґрунтовано основні етапи процесу виявлення розладнань та процесу планування оперативного втручання. Для завдань інтелектуального аналізу даних використовуються математичні моделі та методи на основі обчислювального інтелекту. Для забезпечення інтеграції інформаційних потоків запропоновано модифіковану онтологічну модель, яка дозволяє зменшити синтаксичну, семантичну та структурну неоднорідності гетерогенних даних. Запропоновано модифікацію методу оцінювання аналітичної неоднозначності, яка реалізує обчислення невизначеностей у залежності від типу даних вихідної множини гетерогенних даних. Використання даного методу дозволяє підвищити точність раннього виявлення розладнань.

**У третьому розділі** проведено дослідження фізичних властивостей нестационарних квазіперіодичних процесів. З метою розв'язання завдання раннього виявлення розладнань розроблено моделі і методи визначення інформативних ознак нестационарних квазіперіодичних процесів. Показано, що стан та структуру процесів, що досліджуються, доцільно оцінювати із застосуванням обчислень аерогідродинамічних характеристик.

Для побудови моделі інтегральної ознаки стану нестационарних квазіперіодичних процесів застосовано підхід класичної механіки рідини з використанням обчислень коефіцієнтів місцевих опорів відповідно до формули А.Д. Альтшуля, безрозмірні коефіцієнти якої отримуються за допомогою рівняння Рьохрера, як такого, що найбільш адекватно відображує гідродинамічні характеристики нестационарного квазіперіодичного процесу з врахуванням сукупного впливу параметрів зовнішнього середовища. Такий підхід дозволяє отримувати інтегральну ознаку, яка не залежить від

варіабельності геометричних конфігурацій каналів нерегулярної форми, які характеризуються нестационарними квазіперіодичними процесами.

Розроблено метод синтезу інтегрального критерію оцінювання структури нестационарних квазіперіодичних процесів, використання якого дозволяє отримати кількісну оцінку структурного розладнання. Основними етапами методу є обчислення інтегральної ознаки нестационарних квазіперіодичних процесів та визначення інтервалів сталості на основі розрахунку критичного значення інтегральної ознаки стану нестационарного квазіперіодичного процесу. Критичне значення інтегральної ознаки є критерієм зміни структури нестационарного квазіперіодичного процесу, яке свідчить про розладнання.

Запропоновано вдосконалення методу імітаційного моделювання просторово-часових характеристик багатовимірних нестационарних квазіперіодичних часових рядів за допомогою CFD-моделювання відповідно до якої у якості граничної умови на виході каналу нерегулярної форми задається нестационарний квазіперіодичний ряд. Це дозволяє отримувати візуалізацію просторово-часових характеристик процесів із розладнанням. Проведено перевірку адекватності вдосконаленого методу із застосуванням фізичної моделі. Розроблені модель та методи реалізовано в основних інформаційних процесах технологій раннього виявлення структурних розладнань та планування оперативних втручань.

У четвертому розділі проведено дослідження властивостей нестационарних квазіперіодичних процесів за допомогою теорії аналізу часових рядів та фрактального аналізу. Показано, що за допомогою аналізу часових рядів можливим є виявлення внутрішньої структури та прихованих залежностей часового ряду нестационарного квазіперіодичного процесу, які містять значущу інформацію. Досліджено методи попередньої обробки часових рядів для завдань фільтрації та апроксимації, на підставі чого запропоновано використання методу нечіткого F-перетворення як найбільш придатного для подальшого використання попередньо оброблених F-перетворенням рядів для

формування істотних інформативних ознак розладнань у квазіперіодичному процесі.

Розроблено метод формування інформативних ознак розладнань нестационарних квазіперіодичних рядів із врахуванням властивостей стохастичності, хаотичності та фрактальності. Показано, що для аналізу квазіперіодичних часових рядів доцільно використовувати параметричні методи, де на підставі відомих значень функції будується модель процесу, що аналізується. Визначення значущих спектральних компонент реалізовано за допомогою модифікованого коваріаційного методу, який використовує алгоритм мінімізації методом найменших квадратів одночасно всіх коефіцієнтів лінійного передбачення, а також об'єднує лінійне передбачення уперед і назад. Це обумовлює високу частотну селективність та низьку обчислювальну складність методу.

Доцільність визначення хаотичних властивостей, як додаткової значущої інформації про структуру процесу підтверджується результатами моделювання з використанням диференціальних рівнянь із запізненням. Продемонстровано, що зміна значення величини запізнення свідчить про перехід системи, яка характеризується досліджуваними процесами, в інший режим функціонування.

У результаті застосування підходів фрактального аналізу виявлено сукупність інформативних ознак, яка містить показники Херста, Ляпунова, апроксимованої ентропії, фрактальних розмірностей. Доведено, що інформативними ознаками, окрім вищезазначених, є коефіцієнти нечіткого F-перетворення фазових портретів нестационарних квазіперіодичних часових рядів.

Врахування множини інформативних ознак, отриманих у результаті застосування методу, дозволяє підвищити ефективність раннього виявлення розладнань.

**У п'ятому розділі** запропоновано методи раннього виявлення розладнань та фільтрації аномалій у нестационарних квазіперіодичних процесах на основі нейронних мереж. Розроблено метод раннього виявлення розладнань на основі



нейронних мереж опорних векторів, який дозволяє враховувати властивість лінійної нероздільності даних та здійснює формування множини інформативних ознак шляхом їх екстракції за допомогою імплементації розроблених здобувачем у попередніх розділах роботи методів синтезу інтегрального критерію оцінювання структури нестационарних квазіперіодичних процесів і визначення інформативних ознак розладнань на основі аналізу часових рядів із застосуванням модифікованого коваріаційного методу та фрактального аналізу. Для врахування лінійної нероздільності даних застосовано радіальну базисну функцію ядра, параметри якої, а саме, параметр регуляризації та зворотна ширина радіальної базисної функції ядра, визначаються за допомогою процедури крос-валідації на основі генетичного алгоритму, що дозволяє скоротити час обчислення. Відбір найбільш інформативних ознак досліджуваних процесів з сукупності тих, що визначено у попередніх розділах здійснюється за допомогою моделі нечіткої регресії та методу найменших кутів і сукупності моделей обчислювання інформаційної ентропії – для гетерогенних даних, що є лінійно нероздільними.

Запропоновано метод фільтрації аномалій нестационарних квазіперіодичних часових рядів на основі згорткової нейронної мережі глибинного навчання. Синтез моделі відбору інформативних ознак для аналізу реалізовано шляхом обчислювання оптимального значення роздільної здатності, як найбільш інформативного параметру матриці зображень за допомогою методу ансамбля дерев рішень («Random Forest»). Імплементація методу після попереднього навчання нейронної мережі дозволяє обробляти великі масиви даних у режимі реального часу з метою фільтрації помилкових даних ресстрації.

**У шостому розділі** розглянуто розроблені теоретичні основи побудови інформаційних технологій предметної галузі на прикладі ринології. **Модель кожної інформаційної технології являє собою сукупність структури даних, комплексу математичних моделей і методів та множини інформаційних процесів. Комплекс математичних моделей і методів, що розв'язують**

завдання раннього виявлення розладнань, реалізовано у формі інформаційних процесів, які є основою інформаційних технологій раннього виявлення неадитивних розладнань та планування оперативних втручань. Здобувачем також висвітлено зв'язок між інформаційними технологіями на концептуальному рівні.

Застосування розроблених інформаційних технологій дозволяє забезпечувати раннє виявлення неадитивних розладнань у режимі реального часу, а також підвищити ефективність оперативних втручань у медичній галузі та запобігти непотрібним втручанням.

У цьому розділі представлено результати експериментальної реалізації розроблених моделей, методів та інформаційних технологій на їх основі для розв'язання завдань раннього виявлення розладнань та планування оперативних втручань. Розроблено архітектуру ринологічної інформаційної системи на основі сервіс-орієнтованої парадигми, функціональні моделі підсистем прийняття рішень та планування оперативних втручань, програмно-апаратне забезпечення системи. Розроблена інтелектуальна система підтримки прийняття рішень забезпечує обробку, аналіз та інтеграцію інформаційних потоків предметної області.

У додатках наведено дані результатів обчислень за допомогою розроблених у роботі моделей та методів, дані реєстрації нестационарних квазіперіодичних процесів за допомогою розробленого програмно-апаратного забезпечення, допоміжні таблиці та розрахунки.

Висновки є узагальненням основних результатів, отриманих здобувачкою у межах досліджень, і сформульовані достатньо аргументовано.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні теоретичних та прикладних основ раннього виявлення розладнань у нестационарних квазіперіодичних процесах. Виконані дослідження дозволили отримати такі основні наукові результати.

**Уперше:**

1. Запропоновано теоретико-множинну модель процесів обробки та аналізу гетерогенних даних нестационарних квазіперіодичних процесів. Модель містить функції інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі сукупності математичних моделей із використанням нейронних мереж та планування втручань з використанням методів імітаційного моделювання. Це дозволяє реалізувати комплексний підхід до підвищення якості раннього виявлення розладнань.

2. Запропоновано математичну модель інтегральної ознаки стану нестационарних квазіперіодичних процесів, яка враховує сукупний вплив статичних та динамічних параметрів зовнішнього середовища. Обчислення інформативних ознак для вирішення завдання раннього виявлення розладнань із використанням розробленої моделі дає можливість враховувати наявні властивості нестационарності та квазіперіодичності.

3. Розроблено метод синтезу інтегрального критерію оцінювання структури нестационарних квазіперіодичних процесів, який містить у собі етапи визначення інтервалів сталості та критичного значення інтегральної ознаки стану, що дає змогу забезпечити прогнозування структурних розладнань за умов неповної інформації про стан процесу.

4. Розроблено метод раннього виявлення розладнань у нестационарних квазіперіодичних процесах з використанням нейронних мереж опорних векторів, що містить етапи визначення властивості лінійної нероздільності даних, параметрів регуляризації та зворотної ширини радіальної базисної функції ядра за допомогою процедури крос-валідації на основі генетичного алгоритму. Метод реалізує також відбір найбільш інформативних ознак за допомогою моделі нечіткої регресії та методу найменших кутів, сукупності моделей обчислення інформаційної ентропії. Імплементация методу дозволяє підвищити точність виявлення розладнань та зменшити витрати ресурсів на усунення розладнань.

5. Запропоновано метод фільтрації аномалій нестационарних квазіперіодичних рядів на основі згорткової нейронної мережі глибинного навчання, який містить етапи перетворення одновимірних масивів нестационарних квазіперіодичних рядів у двомірні масиви зображень, обчислення оптимального значення параметру роздільної здатності зображень за допомогою ансамблю дерев рішень, а також синтезу моделі класифікації на основі згорткових мереж глибинного навчання, що дає можливість відфільтрувати помилки реєстрації даних.

**Удосконалено:**

1. Метод імітаційного моделювання просторово-часових характеристик багатовимірних нестационарних квазіперіодичних часових рядів предметної галузі, який на відміну від існуючих містить етап завдання нестационарних граничних умов з урахуванням властивостей квазіперіодичності, що дає можливість сформувати багатовимірне візуальне подання нестационарного квазіперіодичного ряду та за його допомогою локалізувати місцезнаходження розладнань.

2. Метод оцінювання аналітичної неоднозначності гетерогенної інформації, який на відміну від існуючих містить етапи ідентифікації типу даних та класу невизначеності, що дає змогу підвищити точність раннього виявлення розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах.

**Отримав подальший розвиток:**

Метод визначення інформативних ознак розладнань нестационарних квазіперіодичних рядів, який містить етапи нечіткої апроксимації, визначення спектральних компонент на основі модифікованого коваріаційного методу та оцінювання стохастичних, хаотичних, та фрактальних властивостей ряду з використанням фрактального аналізу, що у сукупності дає змогу підвищити ефективність раннього виявлення розладнань.

**Обґрунтованість нових наукових результатів** визначається їх відповідністю основним принципам та коректному використанню таких методів: 1) системного аналізу, загальної теорії систем, теоретико-множинного підходу – для побудови моделі процесів обробки та аналізу гетерогенних даних нестационарних квазіперіодичних процесів; 2) аналізу часових рядів у часовій, частотній, та частотно-часовій областях, нечіткого F-перетворення, фрактального аналізу, методах нелінійної динаміки – при розробленні методів екстракції інформативних ознак часових рядів нестационарних квазіперіодичних процесів; 3) методах теорії гідродинаміки – при розробці моделі інтегральної ознаки стану та методу синтезу інтегрального критерію оцінювання структури нестационарних квазіперіодичних процесів на основі дослідження їх фізичних властивостей; 4) методах математичної фізики – для реалізації чисельного моделювання нестационарних квазіперіодичних процесів на основі CFD-аналізу; 5) обчислювального інтелекту – при побудові методів раннього виявлення розладнань та фільтрації аномалій у нестационарних квазіперіодичних процесах; 6) методичних основах побудови інформаційних технологій – при побудові інформаційних технологій раннього виявлення розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах та планування втручань.

**Теоретичні результати підтверджено математичним моделюванням та експериментами на фізичній моделі, перевіркою одержаних результатів при їх практичній реалізації.**

Автор дисертації проявив ґрунтовне знання проблеми, опрацював великий обсяг наукової літератури, виконав ряд теоретичних досліджень, провів адекватний аналіз одержаних результатів, зробив обґрунтовані висновки у кожному розділі.

**Практичне значення одержаних результатів:** Інформаційне, та програмне та апаратне забезпечення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, реалізоване у формі інформаційних технологій раннього

виявлення неадитивних розладнань у нестаціонарних квазіперіодичних процесах та інформаційних технологій планування оперативних втручань, надає можливість фахівцям отримати необхідний набір кількісних характеристик розладнань, знизити ризик помилкового визначення параметрів процесів при здійсненні лікувально-діагностичних заходів, а також процедур технічної діагностики. Імплементція інформаційної технології раннього виявлення неадитивних розладнань дозволяє ідентифікувати розладнання на ранній стадії, що дає змогу реалізовувати превентивні заходи та запобігти аварійним ситуаціям. Результати роботи апробовано і впроваджено у лікувально-діагностичний процес у міській клінічній лікарні № 30, м. Харків, Харківського науково-практичного центру хвороб вуха, горла, носа, ХМАПО, клінічній лікарні «Феофанія» Державного Управління справами, м. Київ, у стандарти оцінювання функції носового дихання «ISCOANA», у наукову діяльність Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук, м. Харків, у навчальний процес кафедри програмної інженерії ХНУРЕ, що підтверджується відповідними документами. Програмно-апаратну систему «Optimus» сертифіковано та включено до державного реєстру, свідоцтво державної реєстрації № 14777/2015 від 12.06.2015 р.

**Можливі конкретні шляхи використання результатів дисертаційного дослідження.** До числа організацій, яким можна рекомендувати використання результатів дисертаційної роботи можна віднести, при вдосконаленні систем технічної діагностики – ПАТ «Харківський підшипниковий завод» (АТ «ХАРП»), компанії Volkswagen, Toyota, Nissan та ін., які зацікавлені у впровадженні методів раннього виявлення розладнань; при вдосконаленні процедур медичної діагностики та планування оперативних втручань – Інститут отоларингології ім. проф. О.С. Коломійченка НАМН України, компанії «Medtronic», «Symbionics», які виробляють системи хірургічної симуляції.

Розроблене математичне, інформаційне програмне та апаратне забезпечення у потрібних модифікаціях можна використати у створених на його основі інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень (ІСППР) різних рівнів – від міністерства охорони здоров'я до державних чи приватних клінік.

**Повнота викладених результатів в опублікованих працях.** Усі основні наукові положення та результати, що подано до захисту, опубліковані у необхідному обсязі у фахових виданнях та пройшли апробацію.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 58 наукових праць (з них 8 одноосібно): 28 статей, серед яких 21 у фахових періодичних виданнях України та за кордоном з технічних наук, з них 6 статей в англійських виданнях, 4 з яких включено у міжнародну наукометричну базу Scopus, 7 статей у додаткових виданнях за темою дисертації, 1 з яких включено у міжнародну наукометричну базу Scopus, 2 патенти України на винахід, 1 патент України на корисну модель, 27 тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій (5 в англійських виданнях, що включені в міжнародну наукометричну базу Scopus).

#### **Зауваження щодо змісту та оформлення дисертаційної роботи такі:**

1. У Вступі при обґрунтуванні актуальності теми дисертаційного дослідження на стор. 4 при відзначенні значного **внеску відомих вчених у створення та імплементацію методів обчислювального інтелекту, орієнтованих на моделі обробки та аналізу даних для завдань виявлення розладнань**, серед численної когорти відомих вчених, яку, безумовно, очолюють яскраві представники вказаної наукової школи Є.В. Бодяньський, О.І. Михальов, та ін. згадані також постаті геніального математика-ймовірнісника Т. Байєса (18 століття), та основоположника системно аналітичного методу аналізу ієрархій у теорії прийняття рішень Т. Сааті (70 роки ХХ ст.). Віднесення Т. Байєса та Т. Сааті **до розробників та впроваджувачів методів**

обчислювального інтелекту щодо розв'язання вказаних завдань є недоречним і вимагало б у роботі особливої оцінки як творців підґрунтя методології, що розробляється та удосконалюється у дисертаційному дослідженні.

2. У підрозділі 1.3 на стор. 69 – 76 вказано, що реальні процеси у ринологічних системах та певних системах технічної діагностики мають характер як чисто нестационарних квазіперіодичних, так і хаотичних або є суперпозицією квазіперіодичної та хаотичної складових, але спільним для всіх типів процесів є те, що вони спричинені істотними нелінійностями у розглядуваних динамічних системах. У підрозділі 4.4 дисертації на стор. 204-218 розглядається оцінювання системи показників нелінійних ознак процесів з розладнаннями та формування вектора істотних ознак розладнань, породжених стохастичними, хаотичними та фрактальними властивостями процесів. Самі ж показники стохастичності, хаотичності, фрактальності процесів недостатньо означені на рівні фундаментальних понять ні у розділі 1, ні у розділі 4, а ці показники не є загальноживаними, особливо для такої галузі знань як інформаційні технології.

У зв'язку зі сказаним доцільно було б в оглядовому підрозділі 1.3 надати означення на рівні фундаментальних понять таких показників: стохастичність та трендостійкість часового ряду та показник Херста; прогнозоспроможність часового ряду та показники Ляпунова; апроксимована ентропія як міра передбачуваності амплітудних значень часового ряду; поняття фракталу, фрактальної розмірності та використовувані у роботі її показники – Мінковського, Хігучі, Хаусдорфа. Тоді у підрозділі 4.4. можна було б компактно викласти методи оцінки цих показників.

Враховуючи при цьому існуючі обмеження на обсяг оглядового розділу 1 дисертації, вказаного ефекту можна було б досягти за рахунок істотного зменшення розгляду у підрозділі 1.2 класичних та інших методів виявлення



розладнань, заснованих на моделях стаціонарних випадкових процесів, які є непридатними для вирішення проблеми дисертаційного дослідження і не використовуються у роботі.

**3.** У підрозділі 2.4 на стор. 126 - 128 у прикладі з розрахунку невизначеності для різних типів даних згідно з удосконаленим методом оцінювання аналітичної неоднозначності для числових рядів тиску прийнято істотне припущення, що закон розподілу значень тиску є нормальним, про що свідчить використання критерію Стьюдента для оцінки статистичної значущості коефіцієнта кореляції двох часових рядів, які є результатом корельованих багаторазових вимірювань.

**Яким чином буде реалізуватися запропонований метод, зокрема перевірка значущості коефіцієнта кореляції, у випадку закону розподілу тиску, який відрізняється від нормального (тоді закон розподілу коефіцієнта кореляції не буде за Стьюдентом)?**

**У запропонованому методі закон розподілу тиску має належати до певних відомих класів розподілу ймовірностей чи може мати довільний характер?**

**Крім того, доцільно пояснити поняття «бюджет невизначеності», яке вживається при обґрунтуванні кінцевого результату оцінювання аналітичної невизначеності гетерогенних даних**

**4.** Застосовані у підрозділах 3.1, 3.2, 3.3 гідродинамічні моделі, що пов'язують диференціальний тиск з витратою потоку повітря, і служать для формування інтегральної ознаки стану нестаціонарного квазіперіодичного процесу, **не враховують (спеціальним чином на рівні подання моделей) невизначеності основних характеристик процесів: гідродинамічного коефіцієнта опору, коефіцієнта тертя, характеристик вихроутворення, невизначеності граничних умов, тощо, невизначеності неконтрольованих (що не можуть бути враховані) збурень.** Принаймні, невизначеність, яка у

реальності існує, за кожним параметром, характеристикою, збуренням може бути представлена найпростішою стохастичною невизначеністю. Правда, у такому разі ми мали б справу з стохастичними диференціальними рівняннями гідродинаміки у частинних похідних, які, очевидно, ще не реалізовані у пакетах на зразок CFD. При цьому і без того складний математичний апарат обчислювальної гідродинаміки ще більше ускладнився б.

**Ці обставини доцільно було б врахувати здобувачці у подальших наукових дослідженнях як фактор підвищення точності оцінювання інтегральної ознаки стану нестационарних квазіперіодичних процесів у каналах нерегулярної форми.**

5. У підрозділі 3.4 аналіз рис. 3.23, 3.24 і відповідного опису на стор. 170, 171 спонукає до питання: у якому масштабі виготовлена фізична модель (макет) носової порожнини, лінійні розміри якої разів у 10 більші від розмірів носової порожнини?

Чи використовується якийсь (який ?) принцип подібності (до реальної носової порожнини) при фізичному моделюванні, оскільки, як видно з рис. 3.25, результати фізичного моделювання добре узгоджуються з результатами комп'ютерного моделювання?

6. У підрозділі 4.3 на стор. 196, 197 при аналізі рис. 4.9, на якому відображена спектральна щільність потужності (СЩП) тиску потоку повітря у носовій порожнині, отримана за модифікованим коваріаційним методом, зокрема за рис. 4.9 а (розладнань немає) та 4.9 б (розладнання є) не видно відчутної різниці між графіками СЩП на цих рисунках, що **чисто візуально за графіками не дозволяє віднести ситуацію, відображену на рис. 4.9 б до розладнань**, хоч реально у цьому випадку має місце розладнання «вазомоторний риніт». Виникає питання: чому це так?

Друге питання: неясно, які характеристики чи властивості графіка СЩП процесу взагалі можуть свідчити про розладнання в аналізованому методом спектральної щільності потужності процесі?

7. У підрозділі 4.4 при обчисленні показника Ляпунова на стор. 213 – 214 неясно, який зміст параметрів  $L$  та  $M$  у матриці  $X$ , що обчислюється за формулою (4.56).

Крім того, на стор. 214 неясно, з яких міркувань встановлено, що інтервал значень показника Ляпунова  $0.413 \geq \lambda \geq 0.3417$  відповідає відсутності розладнань, а інтервал  $0.1827 \leq \lambda \leq 0.413$  – наявності розладнань у квазіперіодичному нестационарному процесі?

8. У підрозділі 5.1 на рис. 5.1, рис. 5.2 на стор. 226 і на рис. 5.3 а), б) на стор. 227 при відображенні фазових портретів системи для диференціального тиску при апроксимації їх за методом дискретного перетворення Фур'є (ДПФ, FFT) та за методом нечіткого F-перетворення не наведені легенди відповідних ліній графіків, що утруднює аналіз рисунків.

8.1. Можна тільки здогадатись, що осцилюючим графікам відповідають вихідні фазові портрети для диференціального тиску (до відповідних функціональних перетворень), і виникає питання, чому фазові портрети для диференціального тиску описуються сильно осцилюючим графіками?

8.2. Знову ж таки, можна здогадатись, що перетвореним фазовим портретам за методом ДПФ відповідають відносно гладкі, але криві лінії на рис. 5.1 і 5.2, а F-перетвореним фазовим портретам відповідають кусково-лінійні ламані прямі на рис. 5.2 і на рис. 5.3 а), б) відповідно (чому це так?).

8.3. Не ясно, про що свідчать ділянки відсутності ліній перетворених фазових портретів особливо після нечіткого F-перетворення (див. рис. 5.3 а), б)) при наявності на цих місцях осцилюючого графіка вихідного фазового портрету системи (до нечіткого F-перетворення)?

8.4. З порівняння відображених вихідних фазових портретів (до нечіткого F-перетворення) на рис. 5.3 а) та 5.3 б) впливає, що стани системи з розладнаннями (рис. 5.3 б)) характеризуються осциляціями графіків вихідних фазових портретів істотно меншої частоти порівняно з випадками відсутності розладнань на рис. 5.3 а) (яким чином це можна пояснити?)

8.5. З порівняння відображених F-перетворених фазових портретів на рис. 5.3 а) та 5.3 б) впливає, що стани системи з розладнаннями (рис. 5.3 б)) дають F-перетворені фазові портрети з дещо меншою кількістю зламів (але не настільки) кусково-лінійних ламаних, ніж стани з відсутністю розладнань (рис. 5.3 а)).

Однак стани системи з розладнаннями (рис. 5.3 б)) дають F-перетворені фазові портрети з більшою кількістю більш заплутаних петлеподібних контурів, ніж стани з відсутністю розладнань (рис. 5.3 а)).

Здобувачка з якихось міркувань наводила результати відображення фазових портретів системи для диференціального тиску до і після нечіткого F-перетворення для випадку відсутності (рис. 5.3 а) та наявності розладнань (рис. 5.3 б)). Тому таку якісно особливу поведінку фазових портретів, яка була викладена у пунктах 8.1 – 8.5 зауваження 8, доцільно було б у роботі пояснити.

9. У підрозділі 5.1. на стор. 245 на рис. 5.9 при відображенні редукованої вибірки значень інформативних ознак розладнань з 10 елементів

$$SM = \{k_2 \zeta, PIF, k_e, k_{am}, \alpha, H, HFD, CTD, VAS\}$$

на рис. 5.9 у координатних осях (*index, values*) відсутня легенда про відповідність певного маркера певній з 10 інформативних ознак.

Не ясно, якій величині відповідає змінна *index* і яка шкала її значень. Можна тільки здогадатись, що шкала значень змінної *values* задана на інтервалі нормалізації інформативних ознак розладнань [0, 1].

При вказаній невизначеності рис. 5.9 не має сенсу.

**10.** У підрозділі 5.1. на стор. 249 - 251 **при оцінюванні таких характеристик правильності класифікації** гетерогенних інформативних ознак як чутливість, специфічність та точність (Acc, Se, Sp відповідно) у випадку лінійної нерозділюваності класів з використанням радіальних базисних функцій ядра та використанням таких методів класифікації як: мережі Байеса, дерева рішень, «random forest», нейромереж опорних векторів, - **не ясно таке:**

Чому у таблиці 5.3 на стор. 250 відображені результати правильності класифікації **тільки для трьох груп інформативних ознак розладнань:** 1) значень максимумів напівперіодів апроксимаційних кривих часових рядів, 2) компонентів FFT-перетворення фазових портретів системи, 3) компонентів F-перетворення фазових портретів системи для диференціального тиску, а не всіх десяти ознак що містяться у векторі  $CM = \{k_2, \zeta, PIF, k_e, k_{am}, \alpha, H, HFD, CTD, VAS\}$ ?

**11.** У підрозділі 5.1. на стор. 250 – 251 і далі, **крім таблиць 5.3, 5.4, що містять точкові оцінки характеристик правильності класифікації розладнань за введеними інформативними ознаками,** які отримані у результаті повторюваних статистичних експериментів з вибіркою вхідних квазіперіодичних сигналів з розладнаннями, **для оцінки надійності (ступеня достовірності) цих результатів треба було б отримати ще інтервальні оцінки характеристик правильності класифікації розладнань,** які характеризуються довірчими інтервалами для кожної з характеристик при заданій ймовірності  $p$  надійності результатів (рівня значущості), зокрема, при  $p=0,95$ .

Доцільно було б вказати, скільки серій вимірювань квазіперіодичних сигналів з розладнаннями містить вибірка (обсяг вибірки), за якою статистично оцінювались характеристики правильності класифікації розладнань.

Вказані зауваження не впливають на високу загальну позитивну оцінку роботи, яка виконана на високому науковому рівні і має вагомі практичні застосування.

## ВИСНОВОК

Дисертаційна робота А.С. Нечипоренко є завершеним науковим дослідженням, у ході якого вирішено важливу наукову-прикладну проблему створення теоретичних та прикладних основ раннього виявлення неадитивних розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах.

Розроблений і обґрунтований комплекс методів є теоретичною основою для розв'язання практичних задач побудови інформаційних технологій раннього виявлення неадитивних розладнань та планування оперативних втручань, які реалізовано в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень з використанням методів імітаційного моделювання, комплексу математичних моделей на основі підходів обчислювального інтелекту, за допомогою яких здійснюється оброблення та аналіз гетерогенних даних, що характеризують нестационарні квазіперіодичні процеси. Такий комплексний підхід дозволяє підвищити ефективність раннього виявлення розладнань у нестационарних квазіперіодичних процесах.

Дисертація відповідає паспортів спеціальності 05.13.06 – інформаційні технології, оскільки предметом дослідження виступають теоретичні та методологічні основи побудови інформаційних технологій предметної галузі, розроблення моделей та методів прийняття рішень за умов невизначеності при створенні автоматизованих систем різноманітного

**призначення, а робота задовольняє формулі спеціальності та стосується таких ключових напрямків досліджень:**

- розроблення наукових і методологічних основ створення та застосування інформаційних технологій та інформаційних систем для автоматизованої переробки інформації й управління;
- розроблення інформаційних технологій для аналізу та синтезу структурних, інформаційних і функціональних моделей об'єктів і процесів, що автоматизуються;
- моделювання предметних галузей інформаційних систем (аналітичне, імітаційне, інфологічне, об'єктно-орієнтоване тощо) на підґрунті створення та застосування відповідних інформаційних технологій;
- розроблення інформаційно-пошукових і експертних систем обробки інформації для прийняття рішень, а також знаннеорієнтованих систем підтримки рішень в умовах ризику та невизначеності та інтелектуальних інформаційних технологій.

Дисертаційна робота оформлена у відповідності з вимогами до докторських дисертацій. Автореферат та опубліковані роботи здобувача за темою дисертації з достатньою повнотою відбивають її зміст. Результати, що захищені у кандидатській дисертації не виносяться на захист докторської дисертації.

Вважаю, що за актуальністю теми, науковою новизною, ступенем обґрунтованості наукових результатів, практичною цінністю, повнотою викладення матеріалу у працях здобувача, оформленням дисертаційна робота А.С. Нечипоренко «Моделі, методи та інформаційні технології раннього виявлення розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах» повністю відповідає чинним вимогам п.п. 9, 10, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» (Постанова Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р.) щодо

докторських дисертацій, а її здобувач, **Нечипоренко Аліна Сергіївна**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології.

Офіційний опонент:

Головний науковий співробітник  
Інституту космічних досліджень  
Національної академії наук України та  
Державного космічного агентства України,

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

Я.І. Зелик

Підпис **Зелика Яреми Ігоровича**  
Засвідчую:

Вчений секретар ІКД НАН України та ДКА України

кандидат технічних наук



О.О. Ніжніченко