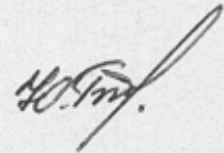


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ЮЗЕФОВИЧ Роман Михайлович



УДК 621.77:621.314

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ
ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЕРІОДИЧНО НЕСТАЦІОНАРНИХ
ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ МЕХАНІЗМІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Науковий

консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Яворський Ігор Миколайович,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
провідний науковий співробітник лабораторії вібродіагностики

Офіційні

опоненти: доктор технічних наук, професор
Бомба Андрій Ярославович,
Рівненський державний гуманітарний університет,
завідувач кафедри інформатики і прикладної математики

доктор технічних наук, професор
Романишин Юрій Михайлович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри електронних засобів
інформаційно-комп’ютерних технологій

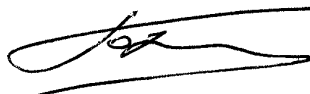
доктор технічних наук, професор
Мислович Михайло Володимирович
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
завідувач відділу теоретичної електротехніки

Захист відбудеться *06 квітня 2017 р.* о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано *02 березня 2017 р.*

Учений секретар
спеціалізованої ради Д 35.052.05,
доктор технічних наук, професор



Р. А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Виявлення несправностей, які ще не привели до катастрофічних наслідків, визначення ступеня розвитку дефекту і його ознак можливі лише на основі детального дослідження структури вібросигналів та її зв'язку з кінематикою і динамікою механізмів. Опис такої структури, в свою чергу, можливий на основі адекватних математичних моделей вібросигналів, які відображають ті їх риси, що є необхідними для встановлення стану механічної системи. Характерними ознаками вібраційних коливань є повторюваність і стохастичність. Повторюваність зумовлена циклічним принципом дії багатьох механізмів, а стохастичність може бути викликана флуктуаціями товщини і в'язкості змазки, змінами сил тертя, спонтанними та некерованими змінами навантаження, турбулентністю і т.п. Оскільки поява дефектів приводить до нелінійності механічних коливних систем, то повторюваність і стохастичність виступають у властивостях вібрацій не незалежно, а у взаємодії. Саме в характері такої взаємодії проявляються ті властивості коливного процесу, які в багатьох випадках є визначальними для встановлення стану об'єкта, що його породжує. Адекватними моделями для опису та аналізу цієї взаємодії є періодично й майже періодично нестационарні випадкові процеси (в рамках теорії другого порядку – періодично і майже періодично корельовані випадкові процеси, далі – ПКВП), такі випадкові процеси називають також циклостационарними. Застосування методів теорії та статистики ПКВП для аналізу сигналів вібрацій були започатковані в роботах Б. Г. Марченка та М. В. Мисловича, І. М. Яворського та В. Ю. Михайлишина, А. С. McCormick, А. К. Nandi, С. Capdessus, М. Sidarped, І. L. Lacoume. Розвивається цей підхід у роботах J. Antoni та його колег. У їх роботах для діагностики в основному використовуються величини, що описують кореляційні зв'язки між окремими складовими спектра.

Більшість методів статистичного аналізу вібраційних сигналів, виміряних у різних точках чи різних напрямках, ґрунтуються на їх моделях у вигляді стаціонарних випадкових процесів, тому не дозволяють аналізувати часову структуру сигналів вібрації. Виявлення несправностей, які ще не привели до катастрофічних наслідків, визначення ступеня розвитку дефекту, його локалізація та тип, можливі лише на основі детального дослідження структури вібросигналів та її зв'язку з кінематикою і динамікою механізмів.

Застосування розробленої теорії та запропонованих методів взаємопов'язаних періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) дозволить провести якісний і кількісний аналіз імовірнісних характеристик детермінованої та стохастичної складових вібраційних сигналів, записаних синхронно в різних точках механічної системи.

Робота присвячена розробці теорії та методів спектрально-кореляційної теорії взаємопов'язаних ПКВП як математичної моделі двовимірних вібраційних сигналів. Розроблені та обґрунтовані методи оцінювання їх взаємокореляційних і взаємоспектральних характеристик на основі експериментальних даних. Введені характеристики взаємопов'язаності сигналів і показано, що при обробці цілого ряду натурних даних їх доцільно використовувати при визначенні технічного стану механізмів.

Цей напрямок зумовлений розширенням і ускладненням кола науково-технічних проблем, які виникають у сучасних методах вібродіагностики та обробці сигналів, телекомунікаціях та зв'язку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації проводились у лабораторії вібродіагностики Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ НАНУ) при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт НАН України “Розвиток методів параметричного аналізу випадкових сигналів для діагностики об’єктів тривалої експлуатації” (2007–2009, № держреєстрації 0107U004066), “Розробка методів аналізу і обробки багатомірних сигналів зі стохастичною повторюваністю та створення вимірювальних систем для вібродіагностики” (2010–2012, 0110U000433), “Розробка методів і засобів багатомірного спектрального аналізу періодично нестационарних стохастичних коливань для задач технічної діагностики” (2013–2015, 0113U000304), “Розроблення стохастичних нелінійних моделей коливань пружних тіл і засобів їх застосування у задачах вібродіагностики втомних пошкоджень елементів конструкцій” (2016–2018, 0116U006336), договорів № 2.2/375 “Розробка інформаційно-вимірювальної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів” (2008–2010, 0107U005211), № 2.2 “Розробка інформаційно-вимірювальної системи для багатомірної діагностики обертових вузлів машинних комплексів” (2010–2012, 0110U004575), № 2.4 “Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань” (2013–2015, 0113U004211), рамках програми “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” (РЕСУРС), № 2.3.1 “Спеціалізовані пристрої для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів” (2016–2020, 0116U004950) в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (РЕСУРС-2).

Практичні результати одержано автором при виконанні науково-дослідних робіт з госпдоговірної тематики, а саме договорів: № 1205 від 02.11.2013 “Дослідження технічного стану редуктора механізму зміни вильоту стріли порталного крану “Сокіл” на державному підприємстві “Одеський морський торговельний порт”, № Б-224/1230 від 03.04.2014 “Дослідження причин підвищеної вібрації турбогенераторів № 4 та № 5 типу ТГВ-200 Бурштинської ТЕС”, № 1326 від 01.06.2015 “Дослідження технічного стану редуктора вугільного конвеєра на державному підприємстві “Морський торговельний порт ЮЖНИЙ”, № 1482 від 10.05.2016 “Дослідження рівня підвищеної вібрації приводу механізму підйому вантажу причального контейнерного перевантажувача LIEBHERR моделі P178L (GS) – Super, заводський номер IR1883”.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є розвиток спектрально-кореляційної теорії взаємопов’язаних періодично корельованих випадкових процесів – математичних моделей багатовимірних сигналів, розробки методів їх статистичного аналізу й використання останніх для визначення характеристик вібрацій за експериментальними даними з метою встановлення стану механізмів, що їх породжують.

Досягнення поставленої мети вимагало *вирішення таких задач*:

- розробити спектрально-кореляційну теорію взаємопов’язаних ПКВП, обґрунтувати величини для кількісної характеристики взаємозалежності нестационарних властивостей сигналів в спектральній області;
- розробити когерентний метод оцінювання взаємокореляційної функції ПКВП-сигналів, оцінювання взаємокореляційних компонентів за неперервними та дискретними даними, здійснити порівняльний аналіз неперервних та дискретних оцінок;

- дослідити компонентний метод оцінювання взаємкореляційної функції за неперервними та дискретними даними, провести аналіз впливу кроку дискретизації на статистичні характеристики оцінок;
- дослідити властивості неперервних оцінок змінної взаємоспектральної густини та взаємоспектральних компонентів, які знаходяться корелограмним методом на основі когерентних чи компонентних оцінок, провести їх порівняльний аналіз;
- дослідити дискретні значення корелограмних оцінок взаємоспектральної густини і взаємоспектральних компонентів, провести аналіз впливу кроку дискретизації на статистичні характеристики оцінок, у тому числі тих, які пов'язані з ефектом накладання;
- розробити теоретичні основи когерентного взаємкореляційного аналізу ПКВП-сигналів при невідомому періоді взаємної нестационарності, вивчити властивості оцінок періоду, які знаходяться когерентним методом;
- дослідити селективні властивості неперервного та дискретних перетворень Фур'є взаємкореляційного добутку реалізацій сигналів, провести аналіз оцінок періоду, які знаходяться на їх основі;
- розробити алгоритми та створити програмне забезпечення для когерентного і компонентного оцінювань періоду взаємної нестационарності, взаємкореляційного та взаємоспектрального аналізів, обчислення інтегральної та покомпонентної функцій когерентності, їх верифікація;
- розробити та створити технічні засоби для багатоканального відбору вібраційних сигналів, їх аналогової смугової фільтрації, підсилення, перетворення у цифровий код і запис у пам'ять персонального комп'ютера;
- дослідити взаємкореляційну і взаємоспектральну структури реалізацій вібрацій підшипника кочення (бездефектного, з дефектом на зовнішньому і внутрішньому кільцях), отриманих на основі чисельних розв'язків системи двох диференціальних рівнянь другого порядку;
- провести випробування розробленої вібродіагностичної системи ПУЛЬС на підприємствах України, встановити характерні особливості взаємної спектрально-кореляційної структури, в тому числі введених функцій когерентності, вібраційних сигналів відібраних на об'єктах, на яких виявлені ті чи інші дефекти.

Об'єктом дослідження у роботі є багатомірні випадкові вібраційні сигнали від машин і агрегатів з циклічним режимом роботи.

Предметом дослідження є математичні моделі багатомірних періодично нестационарних випадкових вібраційних сигналів у вигляді ПКВП, методи оцінювання їх взаємних імовірнісних характеристик та встановлення зв'язків між взаємкореляційними і взаємоспектральними характеристиками сигналів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано наступні методи дослідження: теорія випадкових процесів, математична та прикладна статистики, методи Фур'є аналізу, методи статистичної теорії багатомірних періодично нестационарних випадкових процесів, методи обчислювальної математики, методи розв'язування нелінійних рівнянь, метод малого параметру, комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вперше вирішено важливу науково-прикладну проблему – розроблено методи взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів при відомому і невідомому періоді нестационарності, обґрунтовані функції когерентності для

кількісного опису взаємозв'язків між періодично нестаціонарними властивостями сигналів, що дало можливість виявляти дефекти механізмів на ранніх стадіях їх розвитку, проводити їх локалізацію та встановлювати типи.

У результаті вирішення цієї проблеми одержано такі нові наукові результати:

1. Розроблено спектрально-кореляційну теорію взаємопов'язаних ПКВП-сигналів, встановлено особливості представлень їх імовірнісних характеристик рядами Фур'є та проаналізовано їх зв'язок з характеристиками випадкових процесів, що описують амплітудну й стохастичну модуляції несучих гармонік вібросигналів.

2. Запропоновано і обґрунтовано інтегральну та покомпонентну функції когерентності для кількісного опису взаємозв'язку між властивостями нестаціонарності ПКВП-сигналів та доведено, що введені функції не змінюються при лінійних перетвореннях.

3. Розвинуто методи когерентного взаємокореляційного аналізу ПКВП-сигналів, що ґрунтується на усередненні відліків їх реалізацій через період нестаціонарності, виведено умови асимптотичної незміщеності та слушності неперервних і дискретних оцінок взаємокореляційної функції та взаємокореляційних компонентів, встановлено умови відсутності ефектів накладання першого й другого роду.

4. Отримано компонентні оцінки взаємокореляційної функції, які знаходяться на основі тригонометричного полінома, коефіцієнти якого обчислюють за допомогою як неперервних, так і дискретних перетворень Фур'є скінчених відрізків реалізацій сигналів, встановлено умови їх середньоквадратичної збіжності.

5. Розроблено теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємоспектрального аналізу ПКВП-сигналів. Для оцінювання взаємоспектральної густини і взаємоспектральних компонентів обґрунтовано корелограмний метод, який є узагальненням метода Блекмана-Тьюкі, та доведено слушність оцінок.

6. Когерентний і компонентний методи взаємокореляційного аналізу узагальнено на випадок, коли період нестаціонарності є невідомим, доведено, що точки екстремальних значень статистик відносно пробного періоду є асимптотично незміщеними і слушними оцінками періоду, а самі величини цих екстремумів збігаються в середньоквадратичному до взаємокореляційних функцій чи взаємокореляційних компонентів.

7. Встановлено характерні особливості взаємокореляційної та взаємоспектральної структур вібраційних сигналів обертових вузлів промислових об'єктів при наявності дефектних елементів. Показано, що введені інтегральна та покомпонентна функції когерентності дають можливість виявити дефекти на ранніх стадіях їх зародження, розділити та локалізувати їх, встановити типи.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розробленої спектрально-кореляційної теорії взаємопов'язаних ПКВП-сигналів, введених інтегральних та покомпонентних функцій когерентності, створено вібродіагностичну систему, алгоритми та програмне забезпечення для розв'язання низки прикладних задач.

Програмне забезпечення дає можливість обчислювати весь комплекс спектрально-кореляційних характеристик коливань, які досить повно описують їх структуру. Знання такої структури коливань є необхідним для встановлення стану систем, які їх породжують, у тому числі механічних. Використання характеристик періодичної нестаціонарності для аналізу вібрацій дає можливість виявляти дефекти таких систем на ранній стадії розвитку. Взаємний статистичний аналіз вібрацій є ефективним засобом для встановлення їх просторових властивостей, локалізації їх джерел та встановлення типів. Статистична обробка вібраційних сигналів цілого ряду дефектних механізмів

показала високу ефективність використання для цього частотних залежностей введених функцій когерентності.

Практичну цінність створеного програмного забезпечення, яке використано при розробці вібродіагностичної системи ПУЛЬС, підтверджують результати його практичного використання при проведенні діагностичних робіт на ряді підприємств України, зокрема на теплових електростанціях у м. Бурштин (Івано-Франківська обл.) та смт. Добротвір (Львівська обл.), ДП “Одеський морський торговельний порт”, ДП “Морський торговельний порт “Южний” (Одеська обл.), на газоперекачувальних станціях (м. Комарно, смт. Дашава, Львівська обл.).

Результати дослідження можуть бути застосовані при виконанні науково-дослідних робіт у Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України, Національному університеті “Львівська політехніка”. Також результати роботи можуть бути використані при виконанні робіт по встановленню технічного стану механізмів паливно-енергетичного сектору, виявлення рівня підвищеної вібрації складних машинних комплексів на промислових підприємствах України.

Результати дисертаційної роботи використано у ряді підприємств України (спеціалізований експертно-технічний центр ТОВ фірма “ДІАЛАБ”, приватне науково-виробниче підприємство “Інститут новітніх технологій”, підприємство “Кипер-пласт”, ТОВ “Порттехексперт”), що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та практичні результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи і виносяться на захист, одержані автором самостійно. Три праці опубліковано самостійно [6, 21, 68]. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – проаналізовано кореляційні і спектральні властивості взаємопов’язаних ПКВП, запропоновано методи оцінювання їх характеристик; [2] – проведено статистичну обробку експериментальних даних різного походження і аналіз її результатів; [3, 48] – виведено формули для статистичних характеристик компонентних оцінок матсподівання і кореляційної функції для типових ПКВП, проведено їх порівняльний аналіз з відповідними когерентними; [4] – проведено аналіз впливу величини кроку дискретизації на швидкість збіжності дисперсії оцінок кореляційних характеристик, досліджено ефект накладання 1-го та 2-го роду; [5, 11, 54, 55, 57, 65] – досліджено когерентні оцінки взаємокореляційних компонентів двох ПКВП, отримано вирази для їх зміщення і дисперсії, наведено умови їх збіжності; [7, 25, 47, 52, 60] – розроблено програмне забезпечення для взаємокореляційного і взаємоспектрального аналізів вібрацій і результатів обробки експериментальних даних при його використанні; [8] – проведено аналіз багатомірних моделей у вигляді ПКВП та наведені методи статистичного аналізу останніх; [9, 49, 50] – проаналізовано взаємокореляційні і взаємоспектральні властивості двох залежних між собою ПКВП; [10, 44] – проведено аналіз властивостей інтегральної функції когерентності двох взаємопов’язаних ПКВП, результати конкретизовано для амплітудно- і фазомодульованих сигналів; [12] – виведено та проаналізовано формули для статистичних характеристик дисперсії оцінок, обґрунтовано величину кроку дискретизації; [13] – аналіз дискретних компонентних оцінок взаємокореляційних характеристик, обґрунтування величини кроку дискретизації; [14] – проведено аналіз оцінок взаємоспектральних характеристик при когерентному оцінюванні взаємоспектральної функції; [15] – проведено аналіз властивостей дисперсії оцінок когерентної корелограмної оцінки взаємоспектральної густини; [16, 51] –

проведено аналіз реальних вібраційних сигналів, встановлено їх авто- та взаємкореляційні і взаємспектральні характеристики, які можна використовувати як діагностичні критерії; [17, 31, 61, 67] – проведено аналіз формул, що визначають властивості МНК-оцінки математичного сподівання ПКВП, наведено приклади аналізу типових процесів; [18, 53] – проаналізовано оцінки взаємкореляційних функцій двох ПКВП, які визначаються на основі оцінок їх взаємкореляційних компонентів; [19, 42] – за допомогою методу малого параметру доведено асимптотичну збіжність оцінок періоду регулярних складових ПКВП, виведено і проаналізовано формули для зміщення і дисперсії оцінки періоду; [20] – у першому наближенні отримано формули для зміщення й дисперсії оцінок, які визначають вплив попереднього визначення періоду на величину похибки оцінювання; [22, 79] – проведено аналіз збіжності МНК-оцінок математичного сподівання і кореляційної функції ПКВП, проведено порівняльний аналіз з компонентними оцінками; [23, 36, 38, 56, 78] – проведено взаємкореляційний і взаємспектральний аналізи складових вектора вібрацій підшипника кочення з дефектами на зовнішньому і внутрішньому кільцях; [24, 66] – розроблено програмне забезпечення для когерентного аналізу вібрацій при невідомому періоді і результати обробки експериментальних даних при його використанні, розроблено методи взаємного статистичного ПКВП-аналізу у ранній діагностиці механізмів циклічної дії; [26] – проаналізовано властивості імовірнісних характеристик вібрацій бездефектного підшипникового вузла, які описуються диференціальними рівняннями другого порядку; [27, 35, 59, 70, 71] – проведено моделювання вібрацій стержня з тріщиною для різних параметрів циклічних навантажень та їх статистичну обробку; [28, 64, 69] – проаналізовано когерентні оцінки періоду часової мінливості кореляційної та коваріаційної функцій ПКВП та залежність дисперсії оцінки періоду від довжини відрізка реалізації та параметрів, що описують імовірнісну структуру сигналу; [29, 34, 73] – показано, що вібраційний відгук можна описати моделлю у вигляді ПКВП; на основі обробки симульованих реалізацій досліджено кореляційні властивості вібрації тіла з тріщиною; [30, 62, 63, 72] – отримано й проаналізовано вирази для зміщення й дисперсії оцінки періоду регулярної складової ПКВП, яка отримується за допомогою схеми Бюй-Балло, а також проаналізовано залежності середньоквадратичної та систематичної похибок оцінювання періоду від довжини реалізації та параметрів сигналу; [32, 46] – проведено аналіз взаємкореляційної структури амплітудно- і фазомодульованих сигналів; [33] – проведено аналіз властивостей корелограмної оцінки взаємспектральної густини амплітудно- і фазомодульованих сигналів; [37] – наведено результати взаємного статистичного аналізу експериментальних даних з використанням розвинутих методів; [39, 74] – проведено взаємкореляційний аналіз складових вектора вібрацій; [40, 75–77] – проведено аналіз оцінок взаємкореляційних характеристик горизонтальної і вертикальної складових вектора вібрацій за симульованими реалізаціями та експериментальними даними; [41] – проведено аналіз властивостей коефіцієнтів Фур'є взаємкореляційних функцій амплітудно- і фазомодульованих сигналів; [43] – моделювання вібраційних сигналів із наперед заданими взаємкореляційними характеристиками; [45] – описано нові можливості, які появляються при використанні методів ПКВП у діагностиці турбоагрегатів ТЕЦ, проведено експериментальні роботи; [58] – запропоновано алгоритми визначення покомпонентної функції когерентності та їх програмна реалізація.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі, доповідалися і обговорювалися на 15 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозиумах та наукових семінарах, у тому числі на: XV міжнародній європейській конференції з обробки сигналів EUSIPCO (Poznań, Poland, 2007); IV міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи” (Ялта, 2008); V міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні комп’ютерні системи та мережі: розробка та використання” (Львів, 2011); V міжнародній конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій” (Львів, 2014); міжнародній науково-технічній конференції “Конструкційна міцність матеріалів та ресурс обладнання АЕС” (Київ, 2012); V і VIII міжнародних науково-технічних конференціях молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології” (Київ, 2009, 2015); III міжнародній науково-технічній конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (Львів, 2012); XI міжнародній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії” (Львів, 2012); міжнародній науковій конференції пам’яті проф. Володимира Поджаренка “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах” (Вінниця, 2013); IX, X, XI, XII Всеукраїнських міжнародних конференціях “Оброблення сигналів, зображень та розпізнавання образів” (УКРОБРАЗ) (Київ, 2008, 2010, 2012, 2014); українсько-польській науково-технічній конференції “Електроніка та інформаційні технології” (Львів, 2014); Національній науково-технічній конференції “Неруйнівний контроль та технічна діагностика” (Київ, 2012); I, II, III і IV науково-технічних конференціях “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації” (Львів, 2010, 2012, 2014, 2016); XIX, XX, XXI відкритих науково-технічних конференціях молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів, 2007, 2009, 2011); конференціях молодих учених із сучасних проблем механіки і математики ім. акад. Я. С. Підстригача (Львів, 2009, 2010); проблемно-науковій міжгалузевій конференції “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання” (Бучач-Тернопіль, 2009); Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (Тернопіль, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016).

Результати доповідалися на регулярних семінарах відділів і лабораторій ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України протягом 2008-2016 рр. У повному обсязі робота доповідалася та обговорювалася на розширеному науковому семінарі відділів № 6 “Електрофізичних методів неруйнівного контролю”, № 7 “Інтелектуальних технологій і систем діагностики”, № 8 “Методів і систем дистанційного зондування” та лабораторії вібродіагностики № 9л.

Публікації. Результати роботи викладені в 79 наукових публікаціях, у тому числі: 2 розділи у закордонних колективних монографіях, 7 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, 32 статті у наукових фахових виданнях України, 2 патенти, 4 статті в інших виданнях, 32 публікації у збірниках матеріалів і праць конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел з 251 найменування на 29 сторінках та додатку на 7 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 414 сторінок, з них 330 сторінок основного тексту. Робота містить 255 рисунків та одну таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, показано зв'язок із науковими програмами, планами, темами, висвітлено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** розглянуто основні задачі багатовимірної вібраційної діагностики. На даний час розвиток комп'ютерних технологій та їх впровадження в управління промисловими об'єктами зумовлює перехід від традиційних методів аналізу технічного стану складних механічних систем (турбогенератори, електродвигуни, порталні крани, вугільні конвеєри тощо) до більш інформативних, які дозволяють досліджувати розвиток їх дефектів на стадії утворення. Широке використання для контролю технічного стану нових методів, які дають можливість поглибити знання про стан технологічного процесу, дозволяє спланувати поточні ремонти, зменшити простої, прогнозувати показники виробництва, а також здійснювати аналіз його ефективності.

У розділі також описано фізичні величини, які характеризують вібрації (переміщення, швидкість, прискорення), показано, що оцінка параметрів вібрацій за однією з величин може призвести до помилкових висновків про динамічний стан об'єкта і не дозволить передбачити втомні, резонансні та інші критичні ситуації. Проаналізовано проблему розробки і створення віброперетворювачів, які дають можливість одночасно вимірювати різні складові сигналу, а це в свою чергу створює можливості для: зменшення затрат часу на встановлення акселерометрів, що збільшує продуктивність праці; використання акселерометрів у місцях з обмеженими розмірами; швидкого і надійного проведення замірів вібрації; забезпечення максимальної точності вимірів з використанням одного спеціального кабелю; забезпечення широкого динамічного, частотного і температурного діапазону; вільного вибору.

У **другому розділі** представлено основи спектрально-кореляційної теорії зв'язаних періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) – математичних моделей вібраційних сигналів. Імовірнісні характеристики ПКВП відображають взаємодію стохастичної і детермінованої складових вібрацій, яка виникає в разі появи дефектів. Така взаємодія у ПКВП-сигналах $\xi(t)$ і $\eta(t)$ описується амплітудною і фазовою модуляцією несучих гармонік:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad \eta(t) = \sum_{k \in Z} \eta_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad (1)$$

де Z – множина цілих чисел, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, а T – період нестационарності. Взаємкореляційна

функція сигналів (1) $b_{\xi\eta}(t, u) = E \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\eta}(t+u)$, $\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m_{\xi}(t)$, $\overset{\circ}{\eta}(t) = \eta(t) - m_{\eta}(t)$, $m_{\xi}(t) = E\xi(t)$, $m_{\eta}(t) = E\eta(t)$ визначається рядом Фур'є:

$$b_{\xi\eta}(t, u) = \sum_{k \in Z} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t},$$

де

$$B_k^{(\xi\eta)}(u) = \sum_{q \in Z} R_{q-k, q}^{(\xi\eta)}(u) e^{iq\omega_0 u},$$

при цьому $R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) = E \overset{\circ}{\xi}_p(t) \overset{\circ}{\eta}_q(t+u)$, $\overset{\circ}{\xi}_p(t) = \xi_p(t) - m_p^{(\xi)}$, $\overset{\circ}{\eta}_q(t) = \eta_q(t) - m_q^{(\eta)}$,

$m_p^{(\xi)} = E\xi_p(t)$, $m_q^{(\eta)} = E\eta_q(t)$, “-” – знак спряження. З випадковими процесами $\xi_p(t)$ і $\eta_q(t)$ безпосередньо пов’язана інформація про ті чи інші дефекти базових обертових вузлів. Тому на основі взаємкореляційних функцій $R_{pq}(u)$, а отже і взаємкореляційних компонентів $B_k^{(\xi\eta)}(u)$ можна судити про наявність чи відсутність зв’язків між дефектами. Якщо кореляційні зв’язки між модулюючими процесами $\xi_p(t)$ та $\eta_q(t)$ різних номерів p і q відсутні, тобто $R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) = R_p^{(\xi\eta)}(u)\delta_{pq}$, δ_{pq} – символ Кронекера, то всі взаємкореляційні компоненти, крім нульового, дорівнюють нулю. Взаємкореляційна функція у цьому випадку не змінюється з часом, а це означає, що два ПКВП-сигнали є стаціонарно зв’язаними. Очевидно, що при $R_p^{(\xi\eta)}(u) = 0$ сигнали взагалі є некорельованими.

Миттєва взаємоспектральна густина

$$f_{\xi\eta}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b_{\xi\eta}(t, u) e^{-i\omega u} du$$

представляється рядом Фур’є:

$$f_{\xi\eta}(\omega, t) = \sum_{k \in Z} f_k^{(\xi\eta)}(\omega) e^{ik\omega_0 t},$$

де

$$f_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{-i\omega u} du = \sum_{q \in Z} f_{q-k, q}^{(\xi\eta)}(\omega - k\omega_0), \quad (2)$$

при цьому $f_{pq}^{(\xi\eta)}(\omega)$ – взаємоспектральні густини стаціонарних модулюючих процесів $\xi_p(t)$ і $\eta_q(t)$:

$$f_{pq}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) e^{-i\omega u} du.$$

Нульовий взаємоспектральний компонент $f_0^{(\xi\eta)}(\omega)$ визначається взаємоспектральними густинами модулюючих процесів однакових номерів, а взаємоспектральний компонент номера k – взаємоспектральними густинами тих процесів, номери яких відрізняються на число k .

Взаємоспектральні компоненти $f_k^{(\xi\eta)}(\omega)$ визначають одночасно ступінь корельованості гармонік у представленнях кожного з сигналів

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} e^{i\omega t} dZ_{\xi}(\omega), \quad \eta(t) = \sum_{k \in Z} e^{i\omega t} dZ_{\eta}(\omega).$$

Для взаємкорельованих ПКВП сигналів:

$$Ed\overset{\circ}{Z}_{\xi}(\omega_2)d\overset{\circ}{Z}_{\eta}(\omega_1) = \sum_{k \in Z} f_k^{(\xi\eta)}(\omega) f(\omega_2 - \omega_1 + k\omega_0) d\omega_1 d\omega_2,$$

де $d\overset{\circ}{Z}_{\xi}(\omega)$ і $d\overset{\circ}{Z}_{\eta}(\omega)$ – прирости центрованих випадкових функцій

$\overset{\circ}{Z}_{\xi}(\omega) = Z_{\xi}(\omega) - \sum_{k \in Z} m_k^{(\xi)} U(\omega - k\omega_0)$ і $\overset{\circ}{Z}_{\eta}(\omega) = Z_{\eta}(\omega) - \sum_{k \in Z} m_k^{(\eta)} U(\omega - k\omega_0)$, при цьому $m_k^{(\xi)}$ і

$m_k^{(\eta)}$ – коефіцієнти Фур’є математичних сподівань сигналів $\xi(t)$ і $\eta(t)$, а $U(\omega)$ – функція Хевісайда. Корельованість гармонік сигналів $\xi(t)$ і $\eta(t)$, різниця між частотами яких

становить $k\omega_0$, $k \in Z$, є визначальною властивістю періодично нестационарного взаємозв'язку сигналів, який проявляється в періодичній зміні за часом їх імовірнісних характеристик. Для кількісної характеристики такого взаємозв'язку введена величина

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_k^{(\xi\eta)}\left(\omega + k \frac{\omega_0}{2}\right) \right|}{\left[f_0^{(\xi)}\left(\omega - k \frac{\omega_0}{2}\right) f_0^{(\eta)}\left(\omega + k \frac{\omega_0}{2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

яка описує нормовану кореляцію між гармонічними складовими сигналу $\xi(t)$ на частоті $\omega - k \frac{\omega_0}{2}$ і сигналу $\eta(t)$ на частоті $\omega + k \frac{\omega_0}{2}$. У формулі (3) $f_0^{(\xi)}(\omega)$ і $f_0^{(\eta)}(\omega)$ – нульові спектральні компоненти сигналів. Така корельованість ніяк не може бути відображена в характеристиках стаціонарних наближень сигналів, тобто при $k=0$. Число k будемо називати порядком інтегральної функції когерентності. Функція когерентності нульового порядку дає можливість проаналізувати тільки взаємозв'язки між спектральними густинами середньої потужності сигналів.

Оскільки

$$f_{-k}^{(\xi\eta)}(\omega) = \overline{f_k^{(\xi\eta)}}(\omega) = \overline{f_k^{(\eta\xi)}}(\omega + k\omega_0),$$

то

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(-\omega) = \gamma_k^{(\eta\xi)}(\omega), \quad \gamma_{-k}^{(\xi\eta)}(\omega) = \gamma_k^{(\eta\xi)}(\omega).$$

Введена функція когерентності (3) нестационарного взаємозв'язку сигналів не змінюється при лінійних перетвореннях сигналів. Така інваріантність обумовлена відповідними зсувами за частотою як нульових спектральних компонентів кожного з сигналів, так і вищих взаємоспектральних компонентів, що характеризують корельованість гармонік різних сигналів. Властивість інваріантності дає можливість використовувати введену величину при виявленні нелінійних спотворень сигналів, які мають місце при виникненні дефектів. Функція когерентності (3), визначається сумою спектральних густин всіх стаціонарно зв'язаних процесів, номери яких відрізняються на число k . Тому така функція когерентності була названа інтегральною.

Для характеристики взаємозв'язку окремих модулюючих процесів $\xi_k(t)$ і $\eta_k(t)$ введемо функцію когерентності, яка визначається спектральними густинами окремих модулюючих процесів, а також їх взаємоспектральними густинами:

$$\gamma_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \right|}{\left[f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}.$$

Така функція когерентності була названа покомпонентною, а абсолютне значення різниці між числами k і l – її порядком. Доведено, що після лінійних перетворень сигналів покомпонентна функція когерентності, як і інтегральна, не змінюється, тому її доцільно використовувати у задачах вібродіагностики.

Також у розділі розглянуто алгоритми виділення окремих модулюючих процесів, які ґрунтуються на переносі частот і низькочастотній фільтрації, наведено приклади такого виділення.

У третьому розділі подано основи когерентного взаємкореляційного аналізу ПКВП-сигналів, який ґрунтується на усередненні відліків їх реалізацій, які відбираються через період нестационарності. Для обчислення взаємкореляційної функції можуть бути використані наступні статистики:

$$\hat{b}_{\xi\eta}(t, u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [\xi(t+nT) - \hat{m}_{\xi}(t+nT)] [\eta(t+u+nT) - \hat{m}_{\eta}(t+u+nT)], \quad (4)$$

$$\hat{b}_{\xi\eta}(t, u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \xi(t+nT) \eta(t+u+nT) - \hat{m}_{\xi}(t) \hat{m}_{\eta}(t+u), \quad (5)$$

де

$$\hat{m}_{\xi}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \xi(t+nT),$$

$$\hat{m}_{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta(t+nT).$$

При цьому припускається, що усереднення проводиться на довжині відрізка реалізації $\theta = NT + u_m$, u_m – найбільше значення зсуву, для якого оцінюється взаємкореляційна функція, а N – натуральне число. Оцінки взаємкореляційних компонентів знаходяться за формулою:

$$\hat{B}_k^{(\xi\eta)}(u) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{b}_{\xi\eta}(t, u) e^{-ik\omega_0 t} dt. \quad (6)$$

У розділі отримано формули для зміщення й дисперсії оцінок, проведено їх аналіз, виведено умови їх асимптотичної незміщеності і слухності. Статистичні характеристики оцінок (4) і (5) представлені рядами Фур'є, для коефіцієнтів в яких знайдені прості асимптотичні формули, які суттєво полегшують обчислення середньоквадратичних похибок оцінювання в залежності від числа періодів, які усереднюються, а також авто- та взаємкореляційних компонентів сигналів.

З метою обґрунтованого вибору інтервалу дискретизації проведено аналіз дискретних оцінок взаємкореляційних компонентів, які знаходяться на основі інтегральних сум, що є наближеними значеннями відповідних інтегралів. Показано, що дискретизація приводить до збільшення як систематичної, так і випадкової похибок оцінювання, що в значній мірі зумовлено ефектами накладання першого й другого роду. Формули для зміщення й дисперсії в загальному випадку містять додаткові члени, величини яких є одного порядку малості зі значеннями основних. Саме поява нових членів у виразах для зміщення й дисперсії відрізняє вплив дискретизації на властивості оцінок в даному випадку від ефекту накладання у випадку спектрального аналізу стаціонарних сигналів. Отримано умови відсутності ефектів накладання першого й другого роду. Останні не співпадають з умовами теореми про дискретизацію Котельникова-Шеннона. При їх виконанні похибки дискретизації визначаються різницями між інтегралами і відповідними інтегральними сумами, які визначають похибки оцінювання.

Когерентні оцінки взаємкореляційної функції та взаємкореляційних компонентів проаналізовані для амплітудно-модульованих сигналів. Для вибраних апроксимацій авто- та взаємкореляційних функцій модулюючих процесів отримані залежності статистичних характеристик оцінок від довжини відрізка реалізації, кроку дискретизації, а також параметрів сигналів. Проаналізовано на основі таких залежностей вплив нестационарності

сигналів на похибки оцінювання. Показано, що середньоквадратичні похибки ростуть зі збільшенням зсуву, і їх апіорі задані величини можуть бути отримані тільки для зсувів, які є меншими від деякої заданої величини u_m – точки усічення корелограми. Така точка усічення може бути обґрунтована, виходячи з розрахунків, проведених для окремих параметрів обробки та параметрів сигналів.

Четвертий розділ дисертації присвячено аналізу компонентних оцінок взаємкореляційної функції. Така оцінка має вигляд тригонометричного полінома

$$\hat{B}_{\xi\eta}(t, u) = \sum_{k=-N_2}^{N_2} \hat{B}_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t}, \quad (9)$$

коефіцієнти якого знаходимо на основі інтегральних перетворень Фур'є скінчених відрізків реалізацій сигналів:

$$\hat{B}_k^{(\xi\eta)}(u) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}_\xi(t)] [\eta(t+u) - \hat{m}_\eta(t+u)] e^{ik\omega_0 t} dt.$$

Тут

$$\hat{m}_\xi(t) = \sum_{k=-N_1}^{N_1} e^{ik\omega_0 t} \left[\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) e^{-ik\omega_0 t} dt \right],$$

$$\hat{m}_\eta(t) = \sum_{k=-N_1}^{N_1} e^{ik\omega_0 t} \left[\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \eta(t) e^{-ik\omega_0 t} dt \right],$$

а N_1 і N_2 – номери найвищих гармонік, які враховуються в оцінках математичного сподівання й взаємкореляційної функції. Компонентний метод оцінювання можна застосовувати тоді, коли є відомим число гармонічних складових взаємкореляційної функції N_2 , а також математичного сподівання N_1 . Таке число може бути знайдене на основі результатів обробки реалізацій когерентним методом. Компонентні оцінки є ефективнішими від когерентних, особливо при малому числі гармонік та швидкому зниканні кореляційних зв'язків. При збільшенні числа гармонік ефективність компонентних оцінок спадає і в асимптотиці компонентні статистики переходять у когерентні. При скінченому числі гармонік різницю між похибками когерентних і компонентних оцінок визначаємо за формулами для статистичних характеристик, які отримано в розділі. Такі характеристики представлено рядами Фур'є, коефіцієнти яких визначаються інтегральними перетвореннями кореляційних компонентів. Показано, що такі коефіцієнти для зміщення оцінки є періодичними функціями зсуву. Така залежність приводить до небажаної властивості – швидкого зростання відносної похибки зі збільшенням зсуву, а це вимагає усічення корелограми. Встановлено, що з ростом зсуву збільшується також середньоквадратичне відхилення оцінок, тому точка усічення корелограми u_m повинна вибиратися з використанням формул для статистичних характеристик як першого, так і другого порядків.

У розділі отримано та проаналізовано формули для визначення статистичних характеристик дискретних компонентних оцінок взаємкореляційної функції. Показано, що вирішальний вплив на ефективність дискретних оцінок має гармонічний склад тієї чи іншої характеристики та швидкість зникання кореляційних зв'язків. Досліджено ефекти накладання першого і другого роду та отримано умови їх відсутності. При виконанні таких умов виведено формули для коефіцієнтів Фур'є зміщення та дисперсії, які дають можливість обчислити систематичну похибку оцінки та її середньо квадра-

тичне відхилення у залежності від кроку дискретизації, величини вибірки та точки усікання корелограми і на цій основі провести обґрунтований вибір параметрів обробки.

Властивості статистичних характеристик компонентних оцінок взаємкореляційної функції конкретизовано для амплітудно-модульованих сигналів, що дало можливість детальніше проаналізувати залежність статистичних похибок оцінювання від параметрів обробки, а для конкретних параметрів сигналу отримати числові результати. Показано, що періодична залежність від зсуву похибок оцінювання зумовлена нестационарністю сигналів, а амплітуда періодичних осциляцій може бути зменшена відповідним вибором довжини реалізації та кроку дискретизації. За відсутності ефектів накладання першого і другого роду різниця між похибками неперервних та дискретних оцінок можуть бути обчислені на основі виведених співвідношень і на цьому ґрунті вибрано такий крок дискретизації, який забезпечує потрібну різницю між відповідними інтегралами та інтегральними сумами.

У п'ятому розділі розглянуто теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємоспектрального аналізу ПКВП-сигналів. Для оцінювання миттєвої взаємоспектральної густини обґрунтовано корелограмний метод, який є узагальненням на випадок взаємопов'язаних ПКВП-сигналів методу Блекмана-Тьюкі. Оцінка взаємоспектральної густини знаходиться при такому підході основі на згладженого перетворення Фур'є оцінки взаємкореляційної функції:

$$\hat{f}_{\xi\eta}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{b}_{\xi\eta}(t, u) k(u) e^{-i\omega u} du, \quad (7)$$

де $k(-u) = k(u)$, $k(0) = 1$, $k(u) = 0$ при $|u| > u_m$, u_m – точка усічення корелограми. Оцінка взаємкореляційної функції при цьому може знаходитись як когерентним, так і компонентним методом.

Показано, що при когерентному оцінюванні зміщення оцінки (7) має дві складові, одна з яких зменшується, а друга збільшується при розширенні спектрального вікна. Дисперсія оцінки при збільшенні ширини вікна зростає. Наявність таких різних тенденцій у залежностях статистичних характеристик оцінок ускладнює обґрунтований вибір параметрів обробки – точки усікання корелограми і довжини реалізації. Такий вибір слід проводити, виходячи з конкретної мети спектрального аналізу і сформованих з використанням отриманих у розділі формул для складових середньоквадратичної похибки оцінювання. Такі формули представлено рядами Фур'є, коефіцієнти яких виражаються через авто- та взаємоспектральні компоненти сигналів.

У розділі проведено аналіз властивостей оцінок взаємоспектральних компонентів, які отримуються на основі згладжених оцінок взаємоспектральних компонентів:

$$\hat{f}_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{B}_k^{(\xi\eta)}(u) k(u) e^{-i\omega u} du.$$

Спектральні компоненти кількісно характеризують форму часової можливості спектральної густини, а будучи одночасно перетворенням Фур'є взаємоспектральних компонентів, є носіями інформації про спектральні властивості стаціонарно зв'язаних модульованих процесів, що формують дані ПКВП-сигнали. Показано, що виділена випадкова складова систематичної похибки асимптотично прямує до нуля при збільшенні довжини реалізації, і ця збіжність покращується зі збільшенням ширини спектрального вікна. Регулярна складова похибки є меншою для більш гладких взаємоспектральних компонентів і меншої ширини спектрального вікна. З виведених асимптотичних формул

для дисперсії оцінок взаємоспектральних компонентів впливає, що вона залежить від усіх тих компонентів, які містяться у ряді Фур'є взаємоспектральної густини. Звідси випливає, що при визначенні похибки оцінювання навіть взаємоспектральної густини стаціонарного наближення ПКВП не може обмежуватись тільки характеристиками цього наближення. Таким чином, емпіричний взаємоспектральний аналіз стаціонарного наближення ПКВП аж ніяк не може бути проведений в рамках стаціонарних моделей, а тільки в рамках тих ПКВП, наближеними яких вони є.

Властивості когерентних корелограмних оцінок взаємоспектральних характеристик конкретизовано для амплітудно- і фазомодульованих сигналів. Отримано асимптотичні формули для коефіцієнтів Фур'є дисперсії оцінки взаємоспектральних компонентів, які виражають залежності цих величин від спектральних компонентів, довжини реалізації, форми вибраного вікна та точки усікання корелограми. Обчислення, проведені для конкретних параметрів сигналів, дають змогу оцінити похибку оцінювання і на цій основі опрацювати рекомендації по вибору параметрів взаємоспектральної обробки ПКВП-сигналів.

З метою дослідження впливу інтервалу дискретизації на точність оцінювання проведено аналіз оцінок взаємоспектральної густини та взаємоспектральних компонентів за дискретними даними. Встановлено, що як систематичні похибки, так і середньоквадратичні відхилення оцінок взаємоспектральних характеристик залежить як від значень характеристик на частоті, для якої вони оцінюються, так і від значень на частотах, зсунутих відносно неї на величини, кратні до $2\pi/\Delta u$, де Δu – інтервал дискретизації за зсувом, тобто мають місце ефекти накладання. Вирази для похибок містять всі ті складові, які попадають в область ненульових значень взаємоспектральних характеристик. Ефектів накладання можна позбутися тільки у випадку, коли спектр сигналу є обмежений за частотою. Якщо $\Delta u < \pi/\omega_m$, де ω_m – верхня частота сигналу, то похибки є близькими до похибок неперервних оцінок. Якщо умова $\Delta u < \pi/\omega_m$ не виконується, то різниця між дисперсіями неперервних та дискретних оцінок буде ставати все більшою при зростанні Δu , а при таких Δu , коли поза інтервалом $\left[-\frac{\pi}{\Delta u}, \frac{\pi}{\Delta u}\right]$ спектральні характеристики є значними за величиною, статистична похибка дискретної оцінки буде значно більшою від похибки неперервної.

У розділі розглянуто також компонентний метод взаємоспектрального аналізу, при якому оцінка взаємодіючої функції представляється у вигляді тригонометричного полінома (7). Проведено аналіз як неперервних, так і дискретних оцінок взаємоспектральної густини. Отримано прості асимптотичні вирази для зміщення й дисперсії оцінки. На основі цих виразів виконано порівняльний аналіз ефективності когерентних та компонентних оцінок, а також дискретного й компонентного оцінювання. У формулі для коефіцієнтів Фур'є дисперсії оцінки взаємоспектральної густини при когерентному методі число компонентів є необмеженим, тому при широкосмугових ПКВП-сигналах абсолютні значення останні будуть більшими. Конкретні числові значення коефіцієнтів Фур'є дисперсії оцінок обох типів можуть бути обчислені при використанні отриманих співвідношень і апроксимаційних виразів для спектральних компонентів. Вирази для дискретних компонентних оцінок взаємоспектральної густини отримано в припущенні, що при знаходженні взаємоспектральної функції відсутні ефекти накладання першого і другого роду. Формули для статистичних характеристик такої оцінки в порівнянні з неперервним

випадком містять додаткові складові, які зумовлені ефектом накладання. Цих складових можна позбутися тільки у випадку, коли взаємоспектральна густина сигналів відрізняється від нуля в обмеженій смузі $[-\omega_m, \omega_m]$ за умови $\Delta u < \pi / \omega_m$.

У шостому розділі розвинуто методи взаємного статистичного аналізу ПКВП-сигналів при невідомому періоді нестационарності. Першою задачею, яка впливає при цьому, є виявлення періодичної взаємозалежності між нестационарними властивостями сигналів та визначення її періоду. Така взаємозалежність проявляється, перш за все, у періодичних змінах у часі кореляційних зв'язків сигналів. Тому для її виявлення доцільно використовувати оцінки тих величин, які є чутливими до таких змін. У розділі показано, що формування таких оцінок може бути проведено як за когерентним, так і за компонентним методом з тією особливістю, що замість істинного значення періоду в них використовується деякий пробний період. Сформована в такий спосіб когерентна оцінка взаємокореляційної функції має вигляд

$$\hat{b}_{\xi\eta}(t, u, \tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \overset{\circ}{\xi}(t+n\tau) \overset{\circ}{\eta}(t+u+n\tau),$$

де τ – пробний період і $E \overset{\circ}{\xi}(t) = E \overset{\circ}{\eta}(t) = 0$. Точки екстремальних значень цієї величини, як випливає з аналізу, можуть розглядатися як оцінки періоду взаємної нестационарності, а її значення – як оцінки взаємокореляційної функції для вибраних моментів часу t і зсуву u . Аналіз статистичних властивостей таких оцінок проведений

на основі розв'язків нелінійних рівнянь $\frac{\partial b_{\xi\eta}(t, u, \tau)}{\partial \tau} = 0$, які представляються у вигляді

степеневих рядів за деяким малим параметром. Значення цього параметра визначаються середньоквадратичним відхиленням оцінки взаємокореляційної функції. Воно буде асимптотично зменшуватися зі збільшенням довжини відрізка реалізації сигналів, коли виконуються умови слухності оцінки взаємокореляційної функції. Показано, що отримані в такий спосіб оцінки періоду взаємної нестационарності є асимптотично незміщеними і слухними, та встановлено, що зміщення оцінки має порядок $O(N^{-2})$, а дисперсія – $O(N^{-3})$.

Формули, отримані в першому наближенні для зміщення й дисперсії, дають можливість обчислити середньоквадратичну похибку оцінювання в залежності від довжини реалізації і параметрів, які описують авто- та взаємокореляційну структуру сигналу. Встановлено, що результати такого методу оцінювання суттєво залежать від вибору початкової точки когерентного усереднення реалізацій і найкращі результати отримуються у випадку, коли початкова точка відповідає екстремальному значенню взаємокореляційної функції та максимальному значенню її другої похідної.

У розділі доведено, що оцінки періоду можна знаходити як точки екстремальних значень компонентних статистик

$$\hat{C}_k^{(\xi\eta)}(u, \tau) = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\eta}(t+u) \cos k \frac{2\pi}{\tau} t dt,$$

$$\hat{S}_k^{(\xi\eta)}(u, \tau) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\eta}(t+u) \sin k \frac{2\pi}{\tau} t dt,$$

а самі значення цих величин є оцінками взаємокореляційних компонентів. Статистична збіжність таких оцінок встановлена на основі розв'язків нелінійних рівнянь

$$\frac{\partial \hat{C}_k^{(\xi\eta)}(u, \tau)}{\partial \tau} = 0, \quad \frac{\partial \hat{S}_k^{(\xi\eta)}(u, \tau)}{\partial \tau} = 0,$$

отриманих за допомогою методу малого параметра. Їх зміщення і дисперсія мають, відповідно, порядок $O(N^{-2})$ і $O(N^{-3})$. На основі аналізу отриманих у першому наближенні формул для статистичних характеристик оцінок показано, що їх дисперсії є оберненопропорційними до добутку абсолютного значення взаємкореляційного компонента, який оцінюється, на його номер. Виведені співвідношення конкретизовано для амплітудно-модульованих сигналів, встановлено залежність середньоквадратичної похибки оцінювання від параметрів, які описують авто- та взаємкореляційну структуру модулюючих процесів.

Проаналізовано компонентні оцінки періоду, що знаходяться за допомогою дискретних перетворень Фур'є. Показано, що перехід від неперервного до дискретного оцінювання не змінює принципів властивостей оцінок, тобто при довільних кроках дискретизації вони залишаються асимптотично незміщеними й слухними. Однак величина кроку дискретизації впливає на швидкість збіжності оцінок, яка значно зменшується при наявності накладання як першого, так і другого роду. Виведено умови відсутності ефектів накладання і показано, що при їх виконанні різниця між статистичними похибками неперервних і дискретних оцінок визначається тільки швидкістю загасання кореляційних зв'язків. Отримано формули, що визначають статистичні характеристики оцінок у залежності від числа відліків, кроку дискретизації та параметрів модульованих сигналів, які дають можливість оцінити статистичні похибки обробки, які забезпечують наперед задану похибку.

На основі розглянутих в третьому-шостому розділах статистичних досліджень обґрунтовано алгоритми і створено програмне забезпечення для обробки реалізацій ПКВП-сигналів, які описано у **сьомому розділі**. Загальну схему алгоритму взаємкореляційного та взаємспектрального аналізу, визначення інтегральної та покомпонентної функцій когерентності наведено на рис. 1. Відібрані вібраційні сигнали спочатку аналізуються методами спектрально-кореляційної теорії стаціонарних випадкових процесів, відповідні спектральні піки прив'язуються до частот обертання елементів механізму і методом найменших квадратів виділяється детермінована складова вібраційних процесів. Стохастична складова аналізується методами ПКВП і встановлюються основні закономірності кореляційної та спектральної структури кожного з сигналів. Першою задачею сумісного аналізу сигналів є визначення періоду взаємної нестационарності. Для цього можуть бути використані як когерентний, так і компонентний методи. Знання періоду нестационарності дає можливість обчислити взаємкореляційну функцію, взаємспектральні компоненти, а на їх основі за допомогою метода Блекмана-Тьюкі – миттєві спектральні густини і взаємспектральні компоненти. Після зсувів спектральних компонентів на величини $k \frac{\omega_0}{2}$, $k = 1, 2, \dots$, знаходяться інтегральні функції k -х порядків, що визначають кореляцію тих гармонік обох сигналів, які зсунуті на величини $k\omega_0$. Для обчислення покомпонентної функції когерентності за допомогою частотних зсувів і низькочастотної фільтрації виділяються стаціонарні модулюючі процеси, обчислюються їх авто- та взаємкореляційні функції, спектральні та взаємспектральні густини, а на їх основі – покомпонентні функції когерентності.

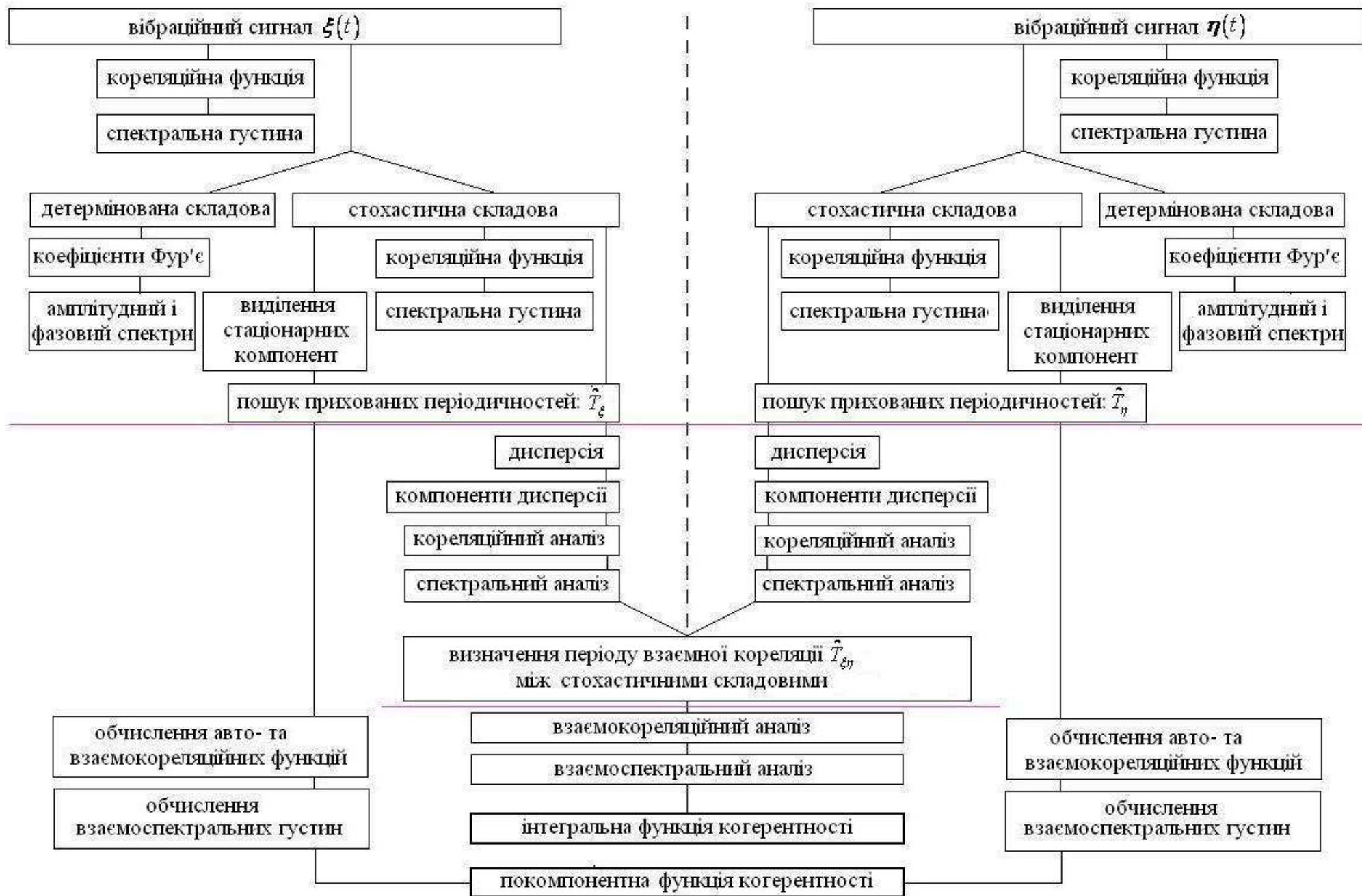


Рис. 1. Схема визначення інтегральної та покомпонентної функції когерентності

Наведена схема статистичної обробки була використана для взаємного аналізу горизонтальних і вертикальних вібрацій підшипника кочення з дефектами на зовнішньому та внутрішньому кільцях, отриманих на основі чисельних розв'язків системи двох нелінійних диференційних рівнянь другого порядку з періодичними змінними коефіцієнтами. Для обчислень був вибраний дефект у формі вищерблення. При проведенні аналізу кожної зі складових вібрацій виявлено, що вони містять потужні детерміновані коливання, в амплітудних спектрах котрих є більше 10 значущих гармонік, частоти яких є кратними до частоти перекочування кульок по зовнішньому кільці. Стохастичні складові є періодично нестационарними. В амплітудних спектрах, які описують зміни їх автокореляційних функцій за часом, є більше 20 значущих гармонік, що пояснюється ударним характером викликаних дефектом вібрацій. Кореляційні компоненти мають вигляд швидко зникаючих осциляцій, причому частоти зникаючих коливань значно перевищують частоту, що відповідає періоду нестационарності $\omega_0 = 2\pi / T$. Взаємокореляційний аналіз складових показав, що вони є періодично нестационарно зв'язаними. Значення оцінки періоду взаємної нестационарності є близьким до періоду обертання тіл кочення (рис. 2).

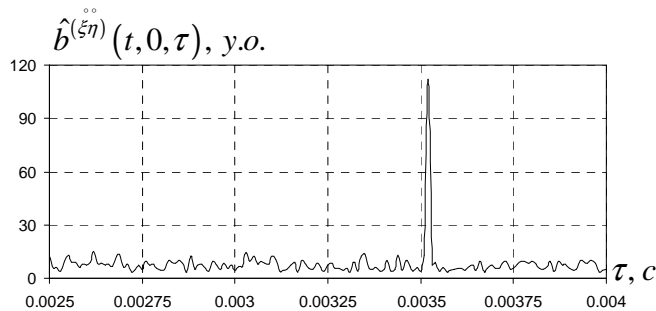


Рис. 2. Когерентний функціонал оцінки періоду взаємної нестационарності стохастичних складових вібрацій підшипника кочення з дефектом на зовнішньому кільці

Гармонічний склад взаємокореляційної функції не є широким і значущими є тільки перші п'ять взаємокореляційних компонентів. Вони мають вигляд швидкозникаючих високочастотних коливань (рис. 3). При проведенні взаємоспектрального аналізу виявлено, що найбільш корельованими на відстані ω_0 є гармоніки, частоти яких переважно зосереджено в смузі 250÷1000 Гц, на відстані $2\omega_0$ – гармоніки з частотами, що належать до смуги 250÷1250 Гц, на відстані $3\omega_0$ – також до смуги 250÷1250 Гц. Нульовий взаємоспектральний компонент помітно відрізняється від нуля у смузі 250÷1250 Гц. Загальними характеристиками такої корельованості є інтегральні функції когерентності, графіки якої наведені на рис. 4. Їх значущі величини належать до діапазону 250÷1250 Гц з максимумом біля 750 Гц. Це свідчить про те, що гармоніки з частотою обертання кульок підшипника є промодульовані випадковими процесами, спектри яких належать до вищої смуги частот. Центральна частота такої смуги майже в три рази перевищує частоту обертання кульок. Значення інтегральної функції когерентності нульового порядку коливається біля рівня 0.6, а це є ознакою того, що вертикальна і горизонтальна вібрації є лінійно пов'язані. Відтак, можна зробити висновок про те, що дефект підшипника у вигляді вищерблення зовнішнього кільця проявляється у високочастотній модуляції гармонік з частотами, що є кратними до частоти обертання кульок. Форма частотної залежності інтегральної функції когерентності, ширина її частотної смуги є ознаками, які характеризують тип та розміри дефекту. Спектральні властивості модуляцій, які

виникають при появі дефекту, описують покомпонентні функції когерентності (рис. 5). Вони повільно зникають зі збільшенням частоти, при цьому на частоті біля 80 Гц присутній невеликий максимум.

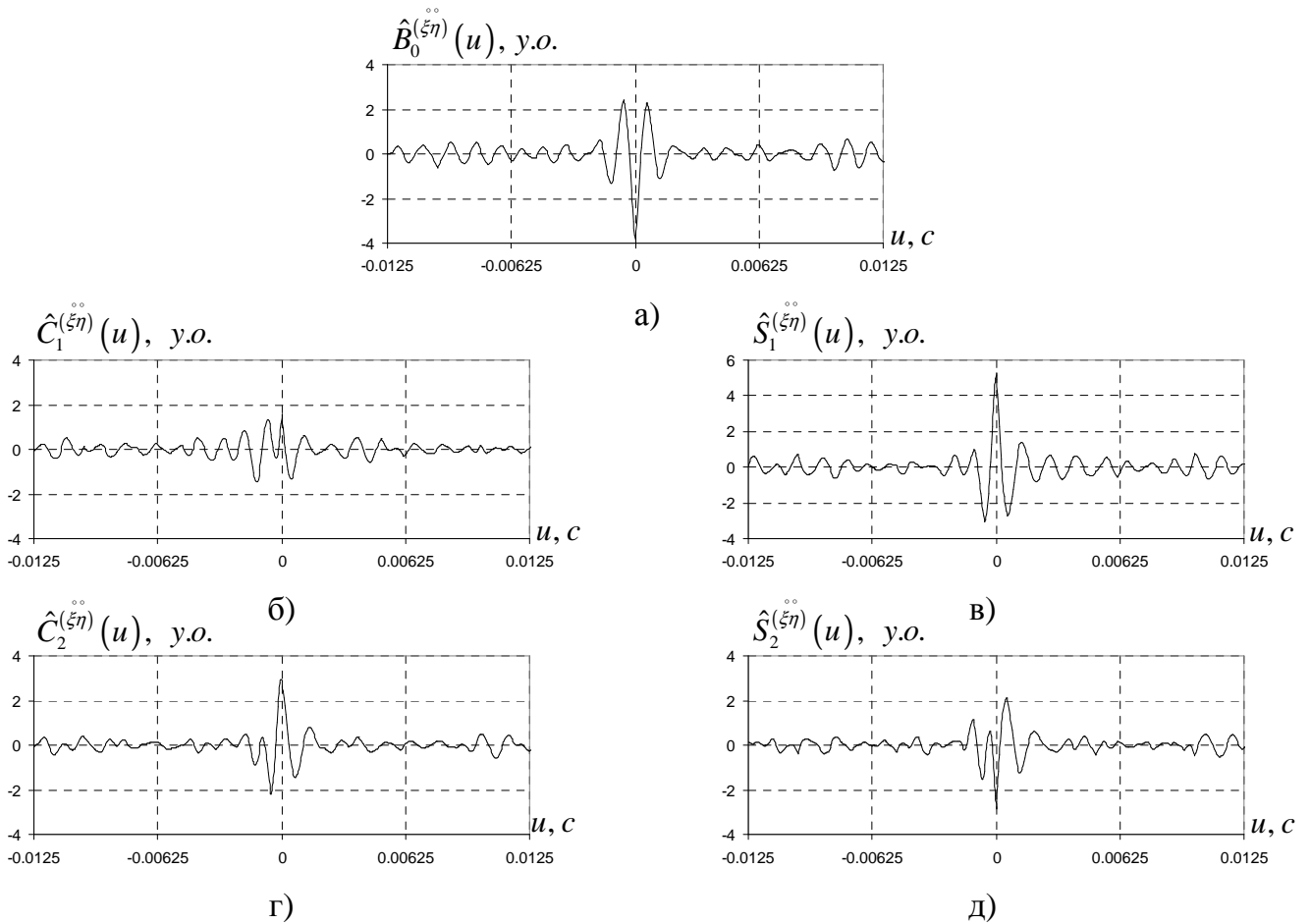


Рис. 3. Нульовий (а), перший та другий косинусні (б, г) та синусні (в, д) взаємокореляційні компоненти

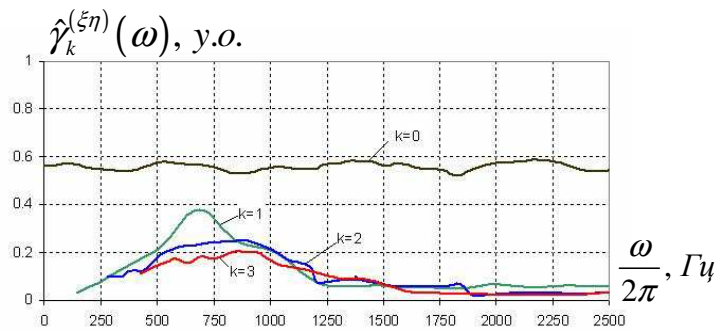


Рис. 4. Оцінка інтегральної функції когерентності для різних k

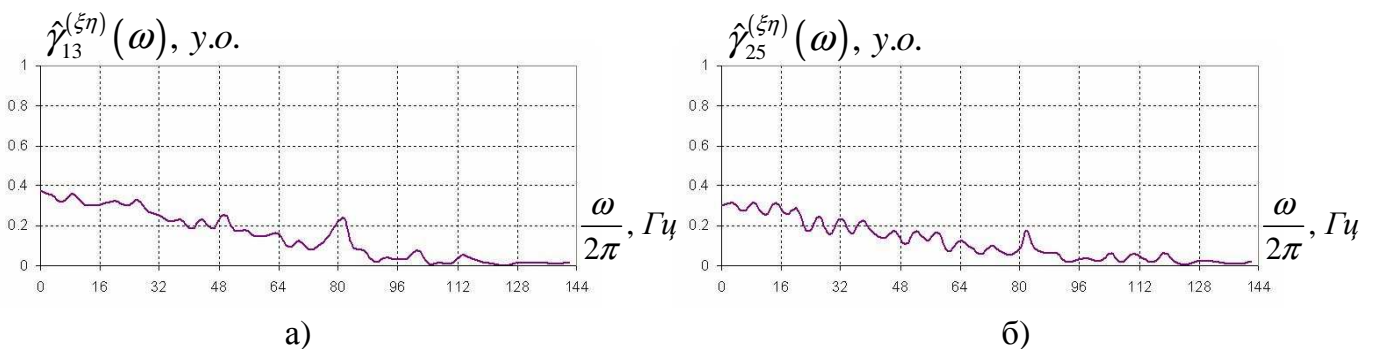
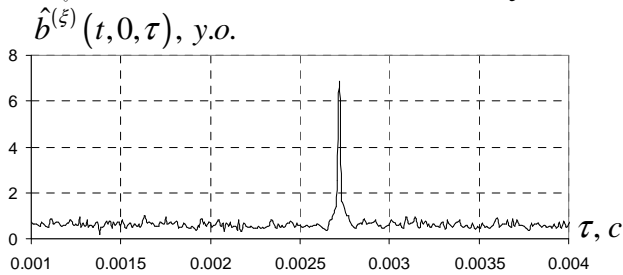
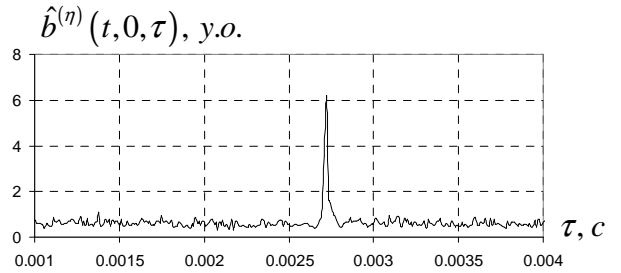


Рис. 5. Оцінка покомпонентної функції когерентності 2-го (а) та 3-го (б) порядків

Подібний аналіз горизонтальних і вертикальних вібрацій проведено у випадку, коли дефект знаходиться на внутрішньому кільці підшипника. З використанням компонентного функціоналу визначено період нестаціонарності стохастичних складових (рис. 6), який є періодом обертання кульок по зовнішньому кільці, і на цьому періоді виявлено значні зміни їх потужностей (рис. 7).

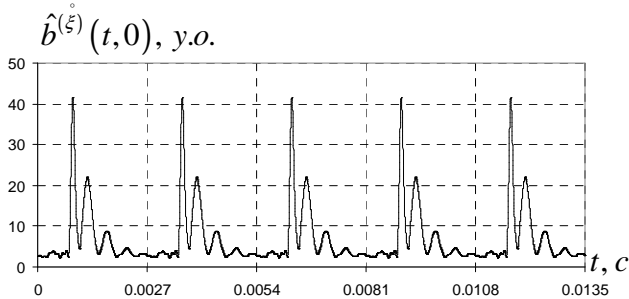


а)

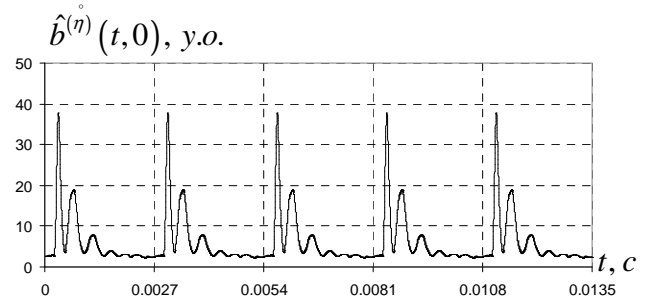


б)

Рис. 6. Функціонал оцінки періоду стохастичної складової вібраційних сигналів вертикальної (а) та горизонтальної (б) вібрацій підшипника кочення з дефектом на внутрішньому кільці



а)



б)

Рис. 7. Дисперсія стохастичної складової вібраційних сигналів вертикальної (а) та горизонтальної (б) вібрацій підшипника кочення з дефектом на внутрішньому кільці

Гармонічний склад оцінок дисперсій є досить подібним до того, який отримано при дефекті зовнішнього кільця. Проте при проведенні взаємного аналізу стохастичних складових взаємозалежності між їх нестаціонарними властивостями не виявлено. Інтегральна функція когерентності в цьому випадку має вигляд слабких флуктуацій біля нуля.

Для використання розроблених методів при обстеженні промислових об'єктів розроблено та виготовлено мобільну багатоканальну вібродіагностичну систему ПУЛЬС (рис. 8), яка служить для відбору та обробки вібраційних сигналів обертових механізмів і попередження на цій основі аварійних ситуацій на турбогенераторах, газо- та нафтоперекачувальних станціях, буриньких установках, портових кранах та інших об'єктах.



Рис. 8. Зовнішній вигляд багатоканальної вібродіагностичної системи ПУЛЬС

Характеристики створеної системи описано у **восьмому розділі**. Для її апробації був виготовлений та введений в експлуатацію вібромеханічний стенд ВМС-1 (рис. 9). На цьому стенді проводились дослідження імовірнісних характеристик вібраційних сигналів від елементів механізмів і вузлів, що обертаються.

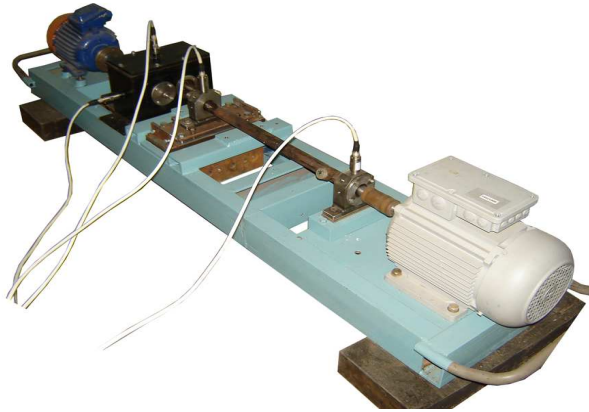


Рис. 9. Загальний вигляд вібромеханічного стенду ВМС-1

Багатоканальну систему ПУЛЬС використано при проведенні діагностичних робіт на багатьох підприємствах України. На основі результатів статистичної обробки різноманітних сигналів встановлено характерні риси взаємкореляційної та взаємспектральної структур вібрацій механізмів, на яких виявлено ті чи інші дефекти. Приклади досліджень наведено у восьмому розділі. Розглянемо фрагменти реалізацій вертикальних і горизонтальних вібрацій, відібраних з підшипникових вузлів центрифуги Flottweg Z4E ($P=19$ кВт, $N=3650$ об/хв.) за допомогою вібродіагностичної системи ПУЛЬС у режимі роботи при навантаженні. Аналіз реалізацій з використанням функціоналу (7) показав, що в обох сигналах виразно проявляються властивості нестационарності другого порядку (рис. 10).

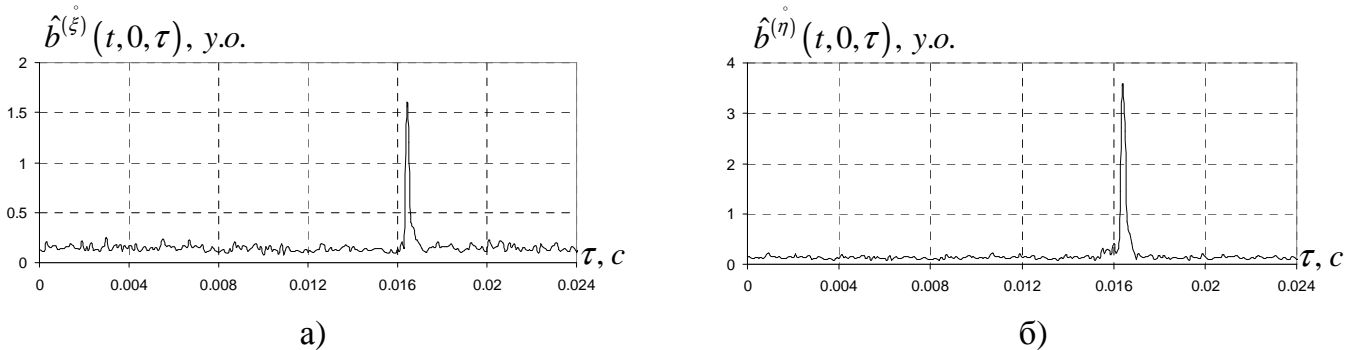


Рис. 10. Функціонал визначення періоду стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

Оцінки дисперсій на періоді мають вигляд коротких гостро подібних імпульсів (рис. 11), тому їх амплітудні спектри є досить широкими. Залежність амплітуд гармонік від номерів k є подібними до тих, які були отримані для симульованих реалізацій дефектного підшипника кочення. Сигнали також є періодично нестационарно зв'язаними (рис. 12). Їх взаємкореляційні компоненти мають форму швидкозникаючих коливань з виразними викидами, які слідуєть через період взаємнестационарності (рис. 13). Максимальні значення оцінки нульового взаємкореляційного компонента $\hat{B}_0^{(\xi\eta)}(u)$ (рис. 13а), першого синусного $\hat{S}_1^{(\xi\eta)}(u)$ (рис. 13б), другого косинусного $\hat{C}_1^{(\xi\eta)}(u)$ (рис. 13д) взаємкореляційних компонентів зсунуті вліво

відносно нуля на п'яту частину періоду нестационарності. Значення нульового взаємоспектрального компонента, а також вищих взаємоспектральних компонентів, які помітно відрізняються від нуля, зосереджені в смузі $1 \div 2$ кГц.

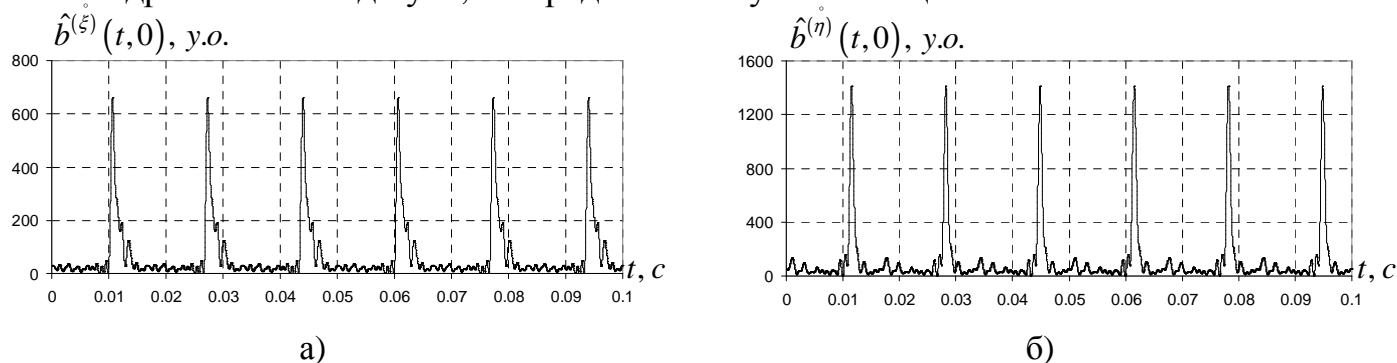


Рис. 11. Дисперсія стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) вібрацій центрифуги

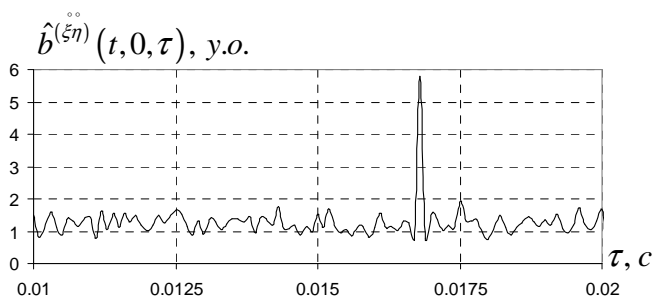


Рис. 12. Залежність функціоналу когерентного функціоналу від пробного періоду τ

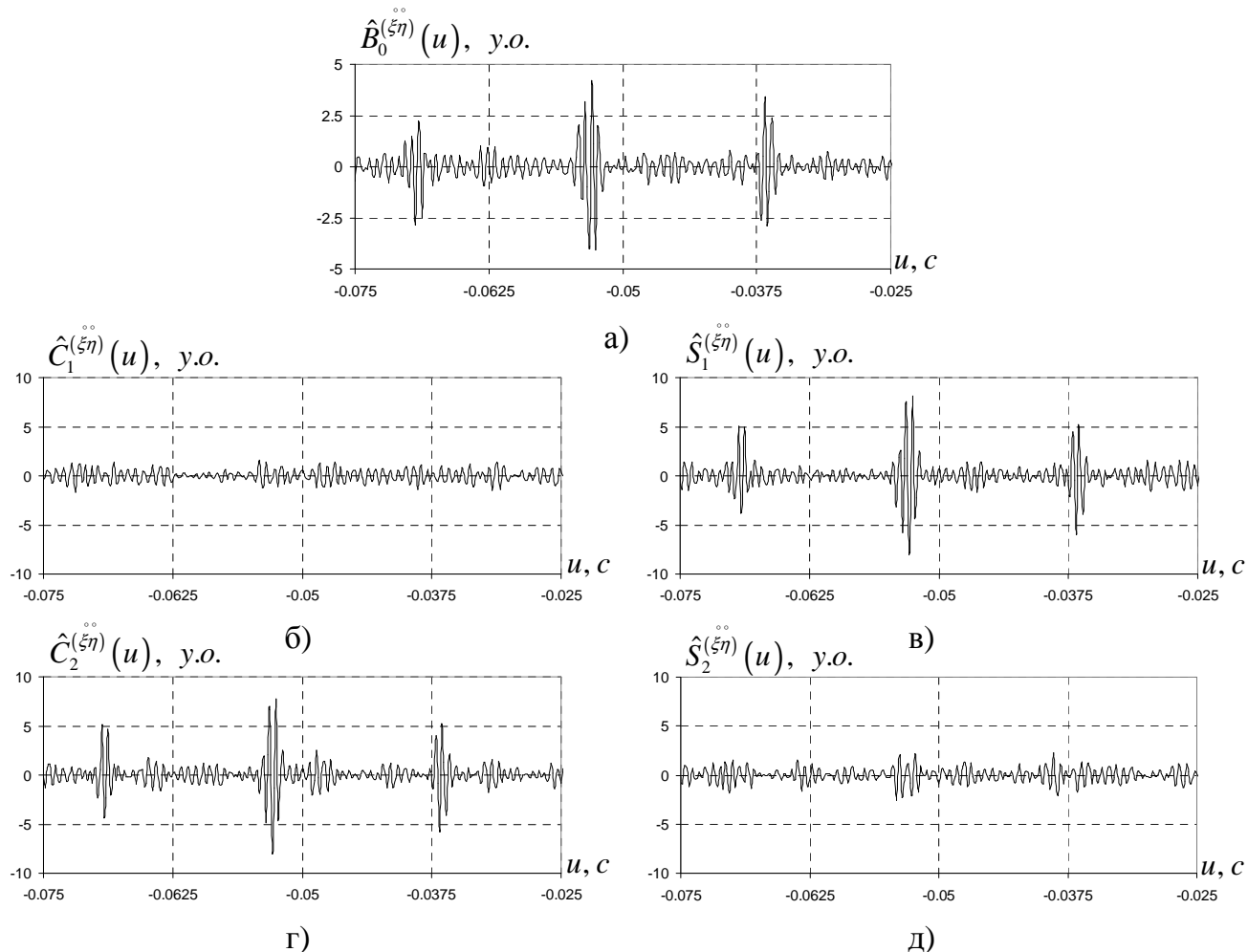


Рис. 13. Нульовий (а), перший і другий косинусні (б, г) та синусні (в, д) взаємочореляційні компоненти

Слід відзначити, що рівень значень вищих взаємоспектральних компонентів, які визначають кореляції гармонік стохастичних складових сигналів суттєво перевищує рівень нульового взаємоспектрального компонента. Це означає, що взаємопов'язаність нестационарних властивостей сигналів є сильнішою, ніж їх пов'язаність у стаціонарному наближенні.

Інтегральна функція когерентності (рис. 14) має вигляд гребінки в смузі 0.5÷2.5 кГц. Переніс по частоті у вищу смугу пояснюється тим, що гармоніки частоти обертання вала (~60 Гц) промодульовані високочастотними смуговими процесами, спектри яких також гребінчасті.

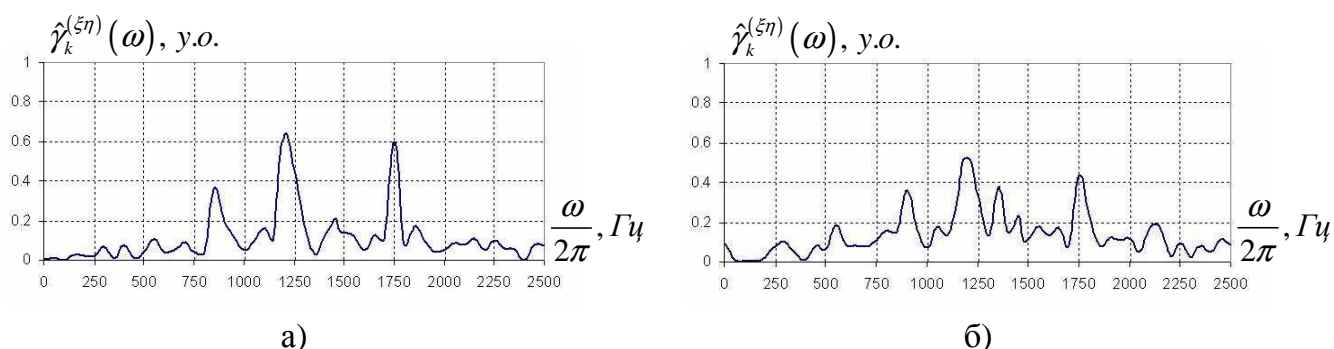


Рис. 14. Оцінка інтегральної функції когерентності при $k = 0$ (а) і $k = 1$ (б)

Такий висновок впливає також з аналізу покомпонентних функцій когерентності (рис. 15). Виявлені властивості функцій когерентності є наслідком того, що розподілений дефект обертового вузла, який проявляється у нерівномірному радіальному навантаженні, супроводжується також розвинутим локальним. Останній має ударний характер. Виявлений дефект був підтверджений під час ремонту обертового вузла.

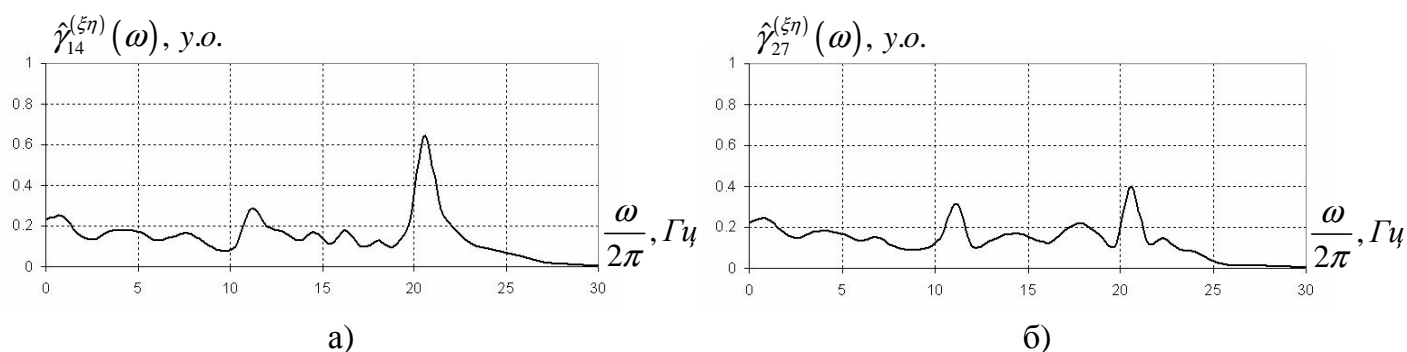


Рис. 15. Покомпонентна функція когерентності 3-го (а) та 5-го (б) порядків

У розділі також наведено результати взаємного ПКВП-аналізу вертикальних і горизонтальних вібрацій, відібраних за допомогою вібродіагностичної системи ПУЛЬС з підшипникових вузлів електродвигуна вугільного конвеєра ($P=355$ кВт, $N=1460$ об/хв.). Встановлено, що обидві складові мають властивості періодичної нестационарності другого порядку: оцінкам їх дисперсій властиві глибокі періодичні зміни (рис. 16). Це дає можливість стверджувати, що в електродвигуні розвинувся дефект. Для встановлення його рівня та типу було проведено взаємний аналіз складових з використанням всього комплексу ПКВП-характеристик другого порядку і виявлено характерні особливості їх спектрально-кореляційної структури. Гармонічний склад оцінок кореляційних функцій є нешироким (значущими є амплітуди перших шести гармонік) і подібним. Періодично нестационарні властивості складових є взаємопов'язаними (рис. 17). Оцінки взаємоспектральних компонентів мають вигляд

зникаючих коливань з малопомітними викидами. Значення нульового та вищих взаємоспектральних компонентів в основному зосереджені в смузі частот до 250 Гц, хоча помітними є вже їх значення у смузі вищих частот біля 1000 Гц.

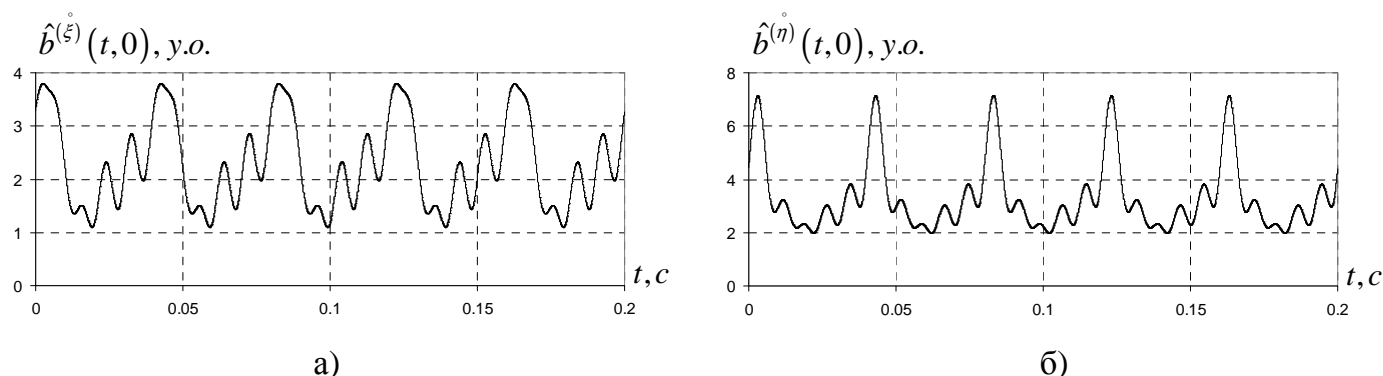


Рис. 16. Дисперсія стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) вібрації електродвигуна

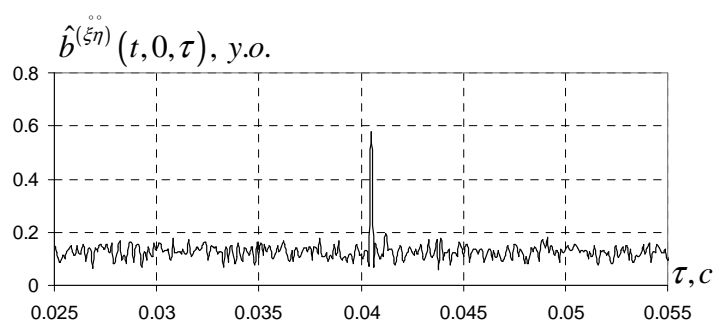


Рис. 17. Залежність функціоналу взаємної нестационарності

Інтегральна функція когерентності (рис. 18) має вигляд гребінки в області низьких частот, яка є помітно зсунутою відносно області частот, що відповідають частотам гармонік обертання вала 24,67 Гц (0.040535). Незначні підвищення значень появляються також у вищій області частот. Частотні залежності покомпонентної функції когерентності (рис. 19) також мають щитоподібний вигляд з найбільшим максимумом біля частоти, яка відповідає $1/4$ частоти обертання вала. Такі властивості функцій когерентності можна пояснити наявністю розподіленого дефекту – нерівномірного навантаження на зовнішнє кільце, а також появи його локального руйнування.

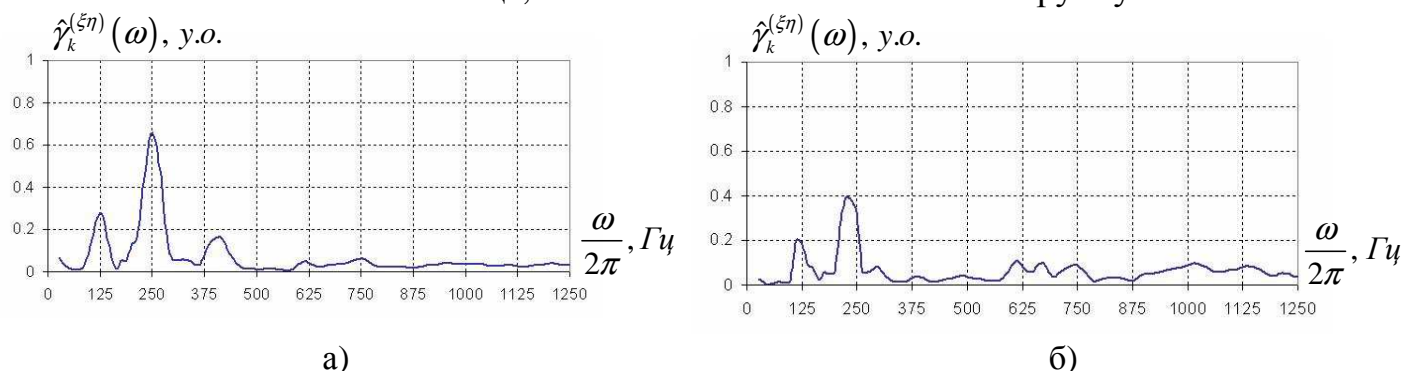


Рис. 18. Оцінка інтегральної функція когерентності $k=0$ (а) і $k=1$ (б)

Використання функцій когерентності виявилось також ефективним при виявленні та встановленні типів дефектів підшипникових вузлів турбогенераторів ТЕЦ. На рис. 20 представлено графіки часової залежності оцінки дисперсії однієї зі складових вібрацій, відібраних при обстеженні одного з вузлів турбогенератора від початку експерименту до розвинутого дефекту.

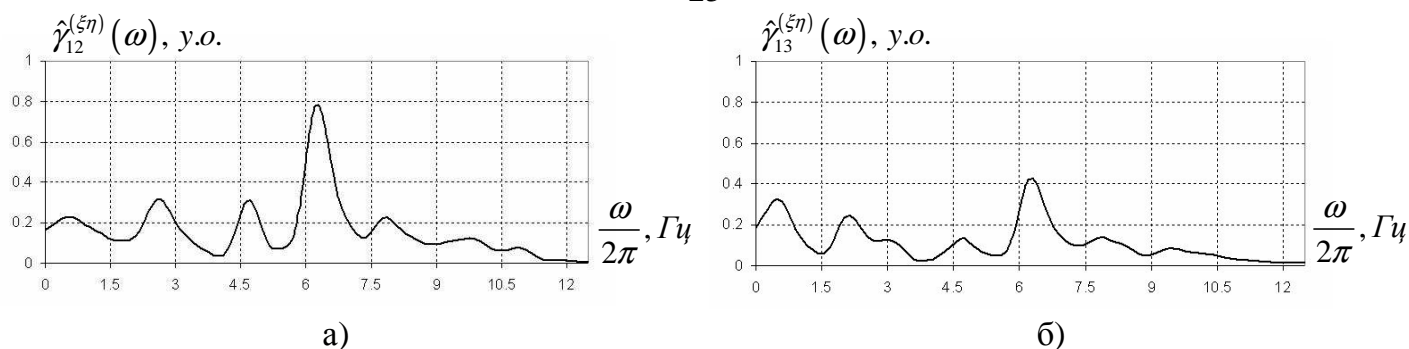


Рис. 19. Покомпонентна функція когерентності 1-го (а) та 2-го (б) порядків

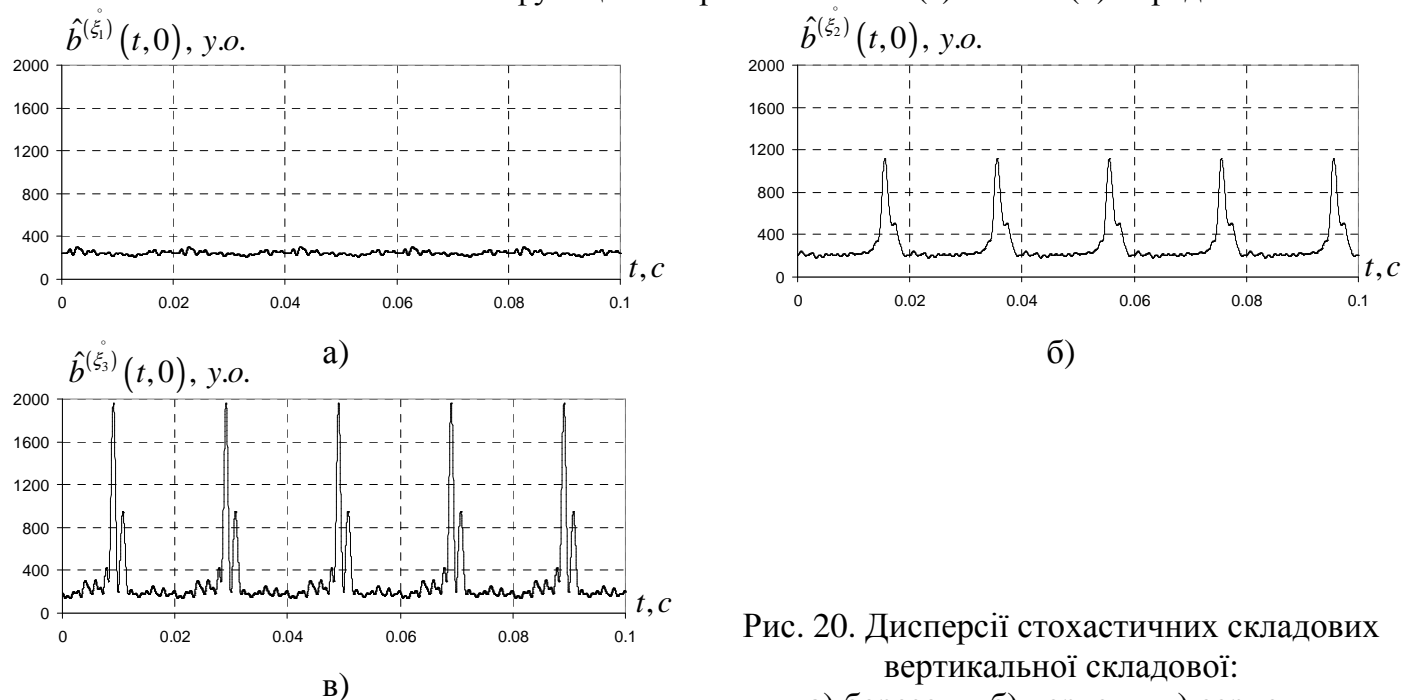


Рис. 20. Дисперсії стохастичних складових вертикальної складової:
а) березень, б) червень, в) серпень

Гармонічний склад оцінки дисперсії виявився досить широким – до 25 значущих гармонік (рис. 21). Оцінки кореляційних компонентів мають вигляд зникаючих коливань з основним періодом, що в 4–5 раз є меншим від періоду нестационарності. Останнє дало змогу зробити висновок про вузькосмугову високочастотну модуляцію несучих гармонік ПКВП-сигналів, провести виділення модулюючих процесів і на основі отриманих реалізацій обчислити їх спектрально-кореляційні характеристики.

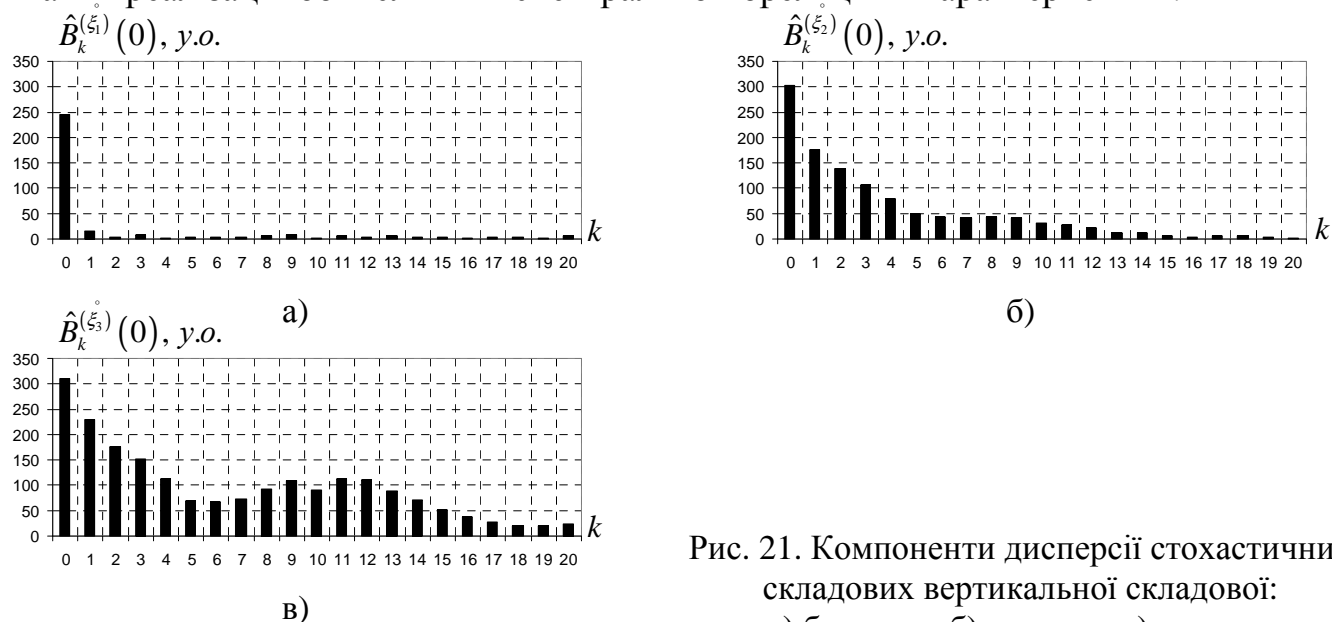


Рис. 21. Компоненти дисперсії стохастичних складових вертикальної складової:
а) березень, б) червень, в) серпень

Результати взаємоспектрального аналізу показано у вигляді сумісних графіків покомпонентних функцій когерентності на рис. 22.

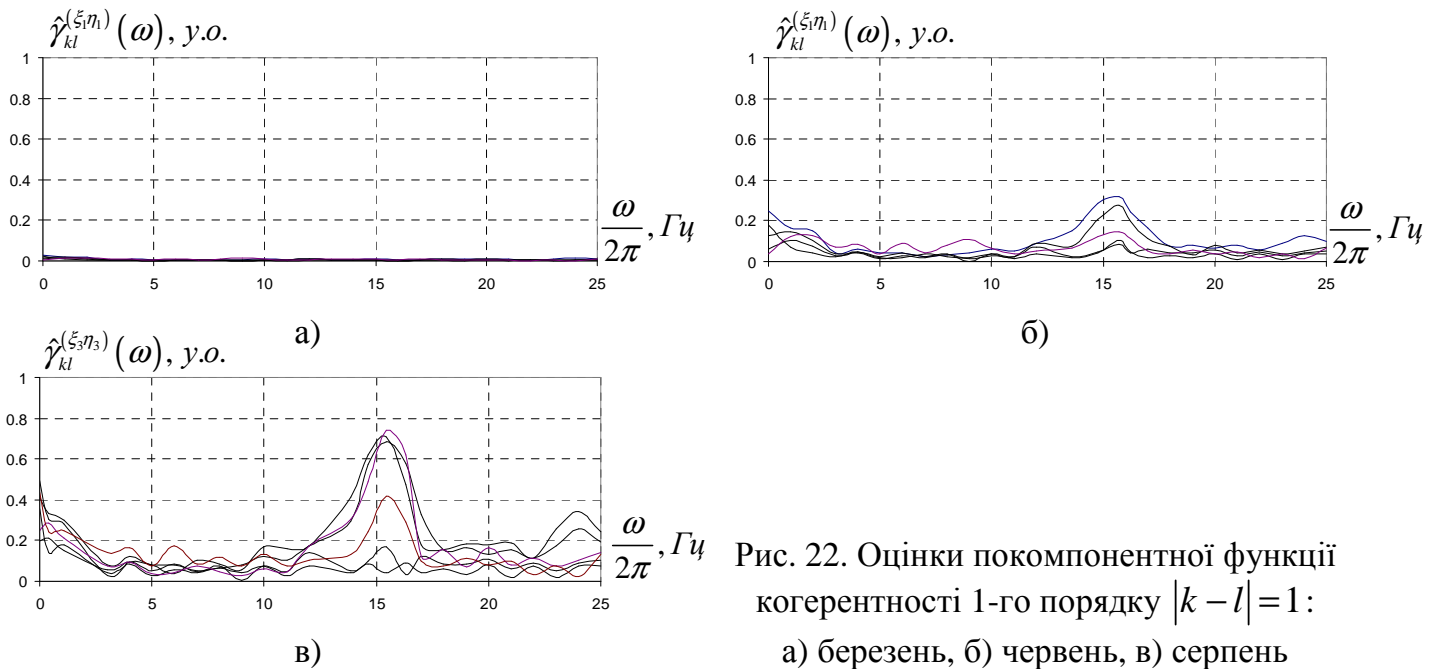


Рис. 22. Оцінки покомпонентної функції когерентності 1-го порядку $|k - l| = 1$: а) березень, б) червень, в) серпень

З рис. 22 видно, що більшість стаціонарних компонентів корелюють в смузі 13–16 Гц, максимуму функцій когерентності досягають у точці, близькій до 16 Гц. Цей факт дає змогу стверджувати про наявність дефекту “обертовий зрив”. Характеристики сигналів, використані вище, показали свою ефективність при виявленні й інших дефектів підшипникових вузлів: “вихрова змазка”, збільшення зазорів між валом та бабітовою прокладкою, відколювання бабіту.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено нову науково-прикладну проблему – розроблено методи взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів, що дало можливість виявляти дефекти механізмів на ранніх стадіях їх розвитку, проводити їх локалізацію та встановлювати типи.

Отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Розвинуто спектрально-кореляційну теорію зв'язаних ПКВП-сигналів – математичних моделей двовимірних вібраційних сигналів. Проаналізовано представлення рядами Фур'є взаємокореляційної та взаємоспектральної функцій, встановлено властивості їх коефіцієнтів Фур'є. Отримано формули, які пов'язують ці величини з взаємокореляційними та взаємоспектральними густинами стаціонарних випадкових процесів, що описують стохастичну амплітуду й фазову модуляцію несучих гармонік вібросигналів. З такою модуляцією безпосередньо пов'язані відомості про ті чи інші дефекти обертових вузлів. Розглянуто окремі випадки взаємокореляційних і взаємоспектральних залежностей та встановлено їх характерні особливості. Обґрунтовано доцільність використання спектрально-кореляційних характеристик для виявлення та встановлення типів дефектів.

2. Для кількісного опису взаємозв'язку між властивостями нестационарності двох ПКВП-сигналів, який проявляється в періодичній зміні за часом їх взаємних спектральних характеристик, обґрунтовано формулу для інтегральної функції когерентності. Визначення цієї величини зводиться до знаходження характеристик корельованості гармонічних складових двох ПКВП-сигналів – взаємоспектральних компонентів. Показано, що введена функція когерентності не змінюється при лінійних перетвореннях. Така інваріантність зумовлена відповідними зсувами за частотою як нульових спектральних компонентів кожного з сигналів, так і вищих взаємоспектральних компонентів, які характеризують корельованість гармонік різних сигналів. Властивість інваріантності дає можливість використовувати введenu величину при виявленні нелінійних спотворень сигналів, які мають місце при виникненні дефектів.

3. Введено покомпонентну функцію когерентності, яка визначається взаємоспектральними густинами окремих модулюючих процесів, що дає можливість детальніше проаналізувати взаємозв'язок ПКВП-сигналів, уникаючи при цьому впливу переносу частот, який виникає при модуляції. Доведено інваріантність цієї величини по відношенню до лінійних перетворень. Показано, що покомпонентна функція когерентності, побудована на основі спектральних густин модулюючих процесів однакових номерів, має такі ж властивості, як функція когерентності стаціонарних випадкових сигналів. Встановлені властивості покомпонентної функції когерентності є переконливим доказом доцільності її використання при розв'язанні задач вібродіагностики.

4. Розвинуто методи когерентного взаємкореляційного аналізу ПКВП-сигналів. Отримано умови асимптотичної незміщеності та слухності оцінок взаємкореляційної функції та її коефіцієнтів Фур'є, які визначаються на основі відліків, що відбираються через період нестационарності. Для можливих оцінок взаємкореляційних характеристик, які відрізняються способами центрування на когерентні оцінки математичних сподівань сигналів, виведено асимптотичні формули для коефіцієнтів Фур'є зміщення й дисперсії оцінок, які описують залежності цих величин від довжини відрізка реалізації та кореляційних компонентів сигналу. Показано, що обчислення статистичної похибки оцінювання навіть нульового взаємного кореляційного компонента не може бути проведене без врахування вищих компонентів. Це підкреслює ту важливу роль, яку відіграє вибір моделей сигналів при їх статистичних дослідженнях.

5.3 метою обґрунтованого вибору інтервалу дискретизації проведено аналіз дискретних оцінок взаємкореляційних компонентів, які знаходяться на основі інтегральних сум. Показано, що дискретизація приводить до збільшення як регулярної, так флуктуаційної складової похибок оцінювання, які зумовлені ефектами накладання першого та другого роду. Формули для зміщення й дисперсії в загальному випадку містять додаткові члени, величини яких є одного порядку малості зі значеннями основних. Отримано умови відсутності ефектів накладання першого й другого роду, які не співпадають з умовами теореми про дискретизацію Котельникова-Шеннона. При їх виконанні похибки дискретизації визначаються різницями між відповідними інтегралами та їх інтегральними сумами.

6. Когерентні оцінки взаємокореляційних характеристик проаналізовано для амплітудномодульованих сигналів. Для вибраних апроксимацій авто- та взаємокореляційних функцій модулюючих процесів отримано залежності статистичних характеристик оцінок від довжини відрізка реалізації, кроку дискретизації і параметрів сигналів. На основі таких залежностей проаналізовано вплив нестационарності на похибки оцінювання. Показано, що відносні середньоквадратичні похибки ростуть зі збільшенням зсуву, тому їх апіорі вибрані величини можуть бути отримані тільки для зсувів, менших від деякої заданої величини u_m – точки усікання корелограми. Така точка усікання може бути вибрана виходячи з розрахунків проведених для вибраних параметрів обробки та параметрів сигналів.

7. Досліджено компонентні оцінки взаємокореляційної функції, що знаходяться на основі тригонометричного полінома, коефіцієнти якого обчислюються за допомогою інтегральних перетворень Фур'є скінчених відрізків реалізацій сигналів. Показано, що компонентні оцінки є ефективнішими від когерентних, особливо при малому числі гармонік. З ростом числа гармонік ефективність компонентних оцінок спадає і в асимптотиці компонентні оцінки переходять у когерентні. Для порівняння ефективності когерентних і компонентних оцінок отримано представлення зміщення й дисперсії оцінок у вигляді рядів Фур'є, коефіцієнти яких визначаються інтегральними перетвореннями кореляційних компонентів. Встановлено, що відносні значення як зміщення, так і дисперсії компонентних оцінок збільшуються з ростом зсуву, тому точка усікання корелограми повинна вибиратися з використанням формул для статистичних характеристик як першого, так і другого порядків.

8. Отримано та проаналізовано формули для статистичних характеристик дискретних компонентних оцінок взаємокореляційної функції. Показано, що вирішальний вплив на ефективність дискретних компонентних оцінок має гармонічний склад тієї чи іншої характеристики та швидкість зникання кореляційних зв'язків. Досліджено ефекти накладання першого й другого роду та отримано умови їх відсутності. Виведено формули для коефіцієнтів Фур'є зміщення та дисперсії, які за виконання таких умов дають можливість обчислити середньоквадратичну похибку оцінок у залежності від величини вибірки K , кроку дискретизації h , точки усікання корелограми u_m , а також параметрів сигналів і на цій основі провести обґрунтований вибір параметрів обробки.

9. Розроблено теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємоспектрального аналізу ПКВП-сигналів. Для оцінювання взаємоспектральної густини і взаємоспектральних компонентів обґрунтовано корелограмний метод, який є узагальненням методу Блекмана-Т'юкі на випадок зв'язаних ПКВП. Доведено асимптотичну незміщеність і слушність оцінок. Для когерентного й компонентного методів оцінювання взаємокореляційної функції отримано асимптотичні формули для коефіцієнтів Фур'є зміщення й дисперсії оцінок взаємоспектральних характеристик, які виражають залежності цих величин від спектральних компонентів, довжини реалізації, форми вибраного вікна, точки усікання корелограми. Показано, що середньоквадратична похибка оцінювання

містить дві складові, одна з яких зменшується, а друга збільшується при розширенні спектрального вікна. Тому точку усікання корелограми слід вибирати виходячи з вимог як до роздільної здатності, так і похибки оцінювання. Обчислення, проведені з використанням отриманих формул для конкретних параметричних моделей сигналів, дають змогу знайти обидві складові похибки і на цій основі зробити обґрунтований вибір параметрів взаємоспектральної обробки. Такі обчислення також дають змогу порівняти ефективність когерентного й компонентного взаємоспектрального аналізу.

10.3 метою дослідження впливу кроку дискретизації на якість оцінювання проведено аналіз оцінок взаємоспектральних характеристик, які знаходяться за дискретними даними. Встановлено, що як систематичні похибки, так і середньоквадратичні відхилення оцінок містять додаткові складові, які залежать від значень характеристик, що оцінюються, на кратних до $2\pi/\Delta u$ частотах, де Δu – крок дискретизації за зсувом, тобто мають місце ефекти накладання. Ефектів накладання можна позбутися тільки у випадку, коли взаємоспектральні характеристики сигналів відрізняються від нуля в обмеженій смузі $[-\omega_m, \omega_m]$ за умови $\Delta u < \pi/\omega_m$. Статистичні похибки дискретних оцінок тоді мало відрізнятимуться від похибок неперервних, а їх числові значення можуть бути обчислені на основі отриманих формул для конкретних апроксимацій спектральних компонентів і вибраного вікна.

11. Когерентний метод взаємкореляційного аналізу ПКВП-сигналів узагальнено на випадок, коли період їх взаємної нестационарності є невідомим. Показано, що когерентні статистики, сформовані на основі взаємкореляційного добутку значень реалізацій сигналів, які відбираються через так званий пробний період, мають по відношенню до періоду нестационарності селективні властивості, і точки їх екстремальних значень можна розглядати як його оцінки, а величини цих екстремумів як оцінки взаємкореляційних функцій. На основі аналізу оцінок періоду як розв'язків певного типу нелінійних рівнянь, отриманих за методом малого параметра, доведено їх асимптотичну незміщеність і слухність та показано, що зміщення має порядок $O(N^{-2})$, а дисперсія – $O(N^{-3})$. У першому наближенні отримані формули для зміщення й дисперсії оцінок періоду дають можливість обчислити середньоквадратичну похибку оцінювання у залежності від довжини реалізації і параметрів, які описують авто- та взаємкореляційну структуру сигналу.

12. Досліджено селективні властивості неперервного й дискретного перетворень Фур'є, де замість істинного значення періоду використовується деяка пробна величина. За допомогою методу малого параметра доведено, що точки екстремальних значень таких перетворень є асимптотично незміщеними й слухними оцінками періоду, а самі екстремуми – оцінками взаємкореляційних компонентів. Їх зміщення має порядок $O(\theta^{-2})$, а дисперсія – $O(\theta^{-3})$. У першому наближенні отримано асимптотичні формули для цих величин, які описують їх залежності від довжини реалізації авто- та взаємкореляційних компонентів. Встановлено, що дисперсії оцінок є обернено пропорційними до добутку номера кореляційного компонента, який оцінюється, і його

абсолютної величини. Показано, що за будь-якого кроку дискретизації оцінки періоду залишаються збіжними, однак величина кроку дискретизації суттєво впливає на швидкість збіжності, яка значно зменшується при наявності ефектів накладання першого й другого роду. Виведено умови відсутності ефектів накладання.

13. Обґрунтовано алгоритми та створено програмне забезпечення взаємокореляційного й взаємоспектрального аналізів ПКВП-сигналів, яке дає можливість знаходити період взаємної нестационарності, обчислювати взаємокореляційну функцію, взаємоспектральну густину, взаємокореляційні і взаємоспектральні компоненти, а також інтегральну та покомпонентну функції когерентності. Це програмне забезпечення було верифіковане на основі комп'ютерних симуляційних моделей і стало однією зі складових розроблених у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України вібродіагностичних систем, з використанням яких за безпосередньої участі автора було успішно проведено цілий ряд діагностичних робіт на підприємствах України, що підтверджено відповідними актами.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Javorskyj I. Methods of periodically correlated random processes and their generalizations / Ihor Javorskyj, Roman Yuzefovych, Ihor Kravets, Ivan Matsko // Cyclostationarity: Theory and Methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering / Eds. F. Chaari, J. Leskow, A. Sanches-Ramirez. – New York : Springer International Publishing Switzerland, 2014. – P. 73–93.
2. Javorskyj I. The stochastic recurrence structure of geophysical phenomena / Ihor Javorskyj, Roman Yuzefovych, Ivan Matsko, Ihor Kravets. // Cyclostationarity: Theory and Methods II. / Eds. F. Chaari, J. Leskow, A. Napolitano, R. Zimroz, A. Wylomanska, A. Dudek. – New York : Springer International Publishing Switzerland, 2015. – P. 55–88.
3. Javorskyj I. Component covariance analysis for periodically correlated random processes / Ihor Javorskyj, Ihor Isayev, Jacek Majewski, Roman Yuzefovych // Signal Processing. – 2010. – Vol. 90, Is. 4. – P. 1083–1102.
4. Javorskyj I. Discrete estimators of characteristics for periodically correlated time series / Ihor Javors'kyj, Ivan Matsko, Roman Yuzefovych, Zbignev Zakrzewski // Digital Signal Processing. – 2016. – 53. – P. 25–40.
5. Яворский И. Н. Когерентные оценки корреляционных характеристик взаимосвязанных периодически коррелированных случайных процессов / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Й. Мацько, З. Закжевски // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 9. – С. 26–36.
6. Юзефович Р. М. Оцінювання взаємоспектральних компонентів періодично нестационарних випадкових сигналів / Р. М. Юзефович // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія : Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. пр. – 2014. – № 796. – С. 14–21.

7. Яворський І. М. Інформаційно-вимірювальна система для багатовимірної вібраційної діагностики / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 3. – С. 45–50.
8. Яворский И. Н. Стохастические модели вибросигналов и их анализ для исследования состояния механических систем / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Й. Мацько, П. А. Семенов // Управляющие системы и машины. – 2015. – № 6 (260). – С. 34–42.
9. Яворський І. М. Взаємозв'язані періодично корельовані випадкові процеси / І. М. Яворський, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович // Відбір і обробка інформації. – 2011. – № 34 (110) – С. 69–77.
10. Jaworski I. Funkcja koherencji łącznie okresowo niestacjonarnych sygnałów losowych / Ihor Jaworski, Roman Juzefowycz, Zbignev Zakrzewski, Jacek Majewski // Przegląd Telekomunikacyjny. – Poland, 2015. – № 8–9. – S. 1396–1401.
11. Яворський І. М. Взаємкореляційний когерентний аналіз періодично нестационарних випадкових сигналів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько // Відбір і обробка інформації. – 2012. – № 36 (112). – С. 5–13.
12. Яворский И. Н. Дискретные оценки взаимокорреляционных компонентов периодически коррелированных случайных сигналов / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Й. Мацько, З. Закжевски // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 2. – С. 29–42.
13. Яворський І. М. Обґрунтування величини кроку дискретизації у процесі компонентного взаємкореляційного аналізу періодично нестационарних випадкових сигналів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Відбір і обробка інформації. – 2013. – № 38 (114). – С. 22–31.
14. Яворський І. М. Когерентний взаємспектральний аналіз періодично нестационарних вібраційних сигналів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, В. Б. Шевчик // Відбір і обробка інформації. – 2014. – № 41 (117). – С. 12–19.
15. Яворський І. М. Когерентний взаємспектральний аналіз часових рядів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Відбір і обробка інформації. – 2016. – № 43 (119). – С. 32–38.
16. Яворський І. М. Дослідження динаміки зміни взаємкореляційних зв'язків стаціонарних компонентів вібраційних сигналів тонкої деталі при розвитку тріщини / І. М. Яворський, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – № 3. – 2010. – С. 103–106.
17. Яворський І. М. Виділення детермінованої складової періодично нестационарних випадкових процесів методом найменших квадратів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець // Відбір і обробка інформації. – 2010. – № 32 (108). – С. 16–25.
18. Яворський І. М. Компонентний взаємкореляційний аналіз періодично нестационарних випадкових сигналів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець // Відбір і обробка інформації. – 2012. – № 37 (113). – С. 10–18.

19. Яворський І. М. Дослідження методів виділення стаціонарних компонентів періодично корельованих випадкових процесів на основі комп'ютерного моделювання / І. М. Яворський, І. Ю. Ісаєв, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович // Відбір і обробка інформації. – № 29 (105). – 2008. – С. 37–42.
20. Яворський І. Н. Свойства оценок характеристик периодически коррелированных случайных процессов при предварительном определении периода коррелированности / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Б. Кравец, И. Й. Мацько // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 3–14.
21. Юзефович Р. М. О свойствах оценок корреляционных характеристик нестационарных модулированных сигналов / Р. М. Юзефович // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 6. – С. 36–44.
22. Яворський І. Н. Метод наименьших квадратов при статистическом анализе периодически коррелированных случайных процессов / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Б. Кравец, З. Закжевски // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 1. – С. 54–64.
23. Мацько І. Й. Стохастична динамічна модель сигналів вібрації підшипника кочення та їх аналіз / І. Й. Мацько, І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, З. Закжевські // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 119–128.
24. Яворський І. М. Віброакустична система ВАС-1 для ранньої вібраційної діагностики обертових механізмів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько, П. П. Луферчик // Наука та інновації. – Київ : НАН України, 2013. – № 3. – С. 19–26.
25. Яворський І. М. Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 4. – С. 36–41.
26. Яворський І. М. Стохастична модель вібраційного сигналу бездефектного підшипника кочення / І. М. Яворський, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович // Відбір і обробка інформації. – № 28 (104). – 2008. – С. 23–29.
27. Мацько І. Й. Аналіз вібраційного стану стрижня з тріщиною під дією стохастичних циклічних навантажень / І. Й. Мацько, І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, Я. Маєвські // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 128–136.
28. Яворський І. М. Схема Бюй-Балло для виявлення періодичних змін кореляційних характеристик стохастичних коливань / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Відбір і обробка інформації. – № 30 (106). – 2009. – С. 12–19.
29. Мацько І. Й. Вплив розміру тріщини на кореляційну структуру вібраційного сигналу / І. Й. Мацько, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович, І. М. Яворський // Відбір і обробка інформації. – № 31 (107). – 2009. – С. 39–46.

30. Jaworski I. Koherentny estymator okresu regularnej składowej okresowo niestacjonarnych sygnałów losowych / Ihor Jaworski, Roman Juzefowych, Ivan Maćko, Zbignev Zakrzewski // Przegląd Telekomunikacyjny. – Poland, 2008. – № 8–9. – S. 1032–1038.
31. Jaworski I. Metoda najmniejszych kwadratów w statystycznej analizie okresowo niestacjonarnych sygnałów losowych / Ihor Jaworski, Roman Juzefowycz, Ihor Kraweć, Zbignev Zakrzewski // Przegląd Telekomunikacyjny. – Poland, 2010. – № 8–9. – S. 1451–1460.
32. Jaworski I. Wzajemna kowariacyjna analiza okresowo niestacjonarnych sygnałów losowych / Ihor Jaworski, Roman Juzefowych, Zbignev Zakrzewski // Przegląd Telekomunikacyjny. – Poland, 2012. – № 8–9. – S. 737–745.
33. Jaworski I. Wzajemna analiza widmowa okresowo niestacjonarnych sygnałów losowych / Ihor Jaworski, Roman Juzefowych, Zbignev Zakrzewski, Jacek Majewski // Przegląd Telekomunikacyjny. – Poland, 2014. – № 8–9. – S. 900–904.
34. Яворський І. М. Імовірнісна структура сигналів вібрації тіла з тріщиною / І. М. Яворський, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – № 45. – С. 452–459.
35. Мацько І. Й. Вплив параметрів демпфування та стохастичного навантаження на властивості повздовжніх коливань стрижня з тріщиною / І. Й. Мацько, І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, З. Закжевські // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 118–125.
36. Яворський І. М. Оцінювання кореляційних інваріантів періодично нестационарних вібраційних сигналів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, В. Б. Шевчик // Відбір і обробка інформації. – 2013. – № 39 (115) – С. 15–23.
37. Яворський І. М. Дослідження ритміки природних явищ та її характерних особливостей в системах різного походження / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Відбір і обробка інформації. – 2014. – № 40 (116). – С. 59–72.
38. Яворський І. М. Інваріантний кореляційний аналіз векторних періодично корельованих випадкових процесів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець // Відбір і обробка інформації. – 2011. – № 35 (111). – С. 22–31.
39. Яворский И. Н. Компонентный корреляционный анализ векторных периодически нестационарных случайных процессов / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Й. Мацько, В. Б. Шевчик // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 9. – С. 29–41.
40. Яворський І. М. Векторна діагностика підшипника кочення при розвитку дефекту на зовнішньому кільці / І. М. Яворський, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 2 (74). – С. 101–110.
41. Яворський І. М. Гармонічний аналіз кореляційних інваріантів векторних періодично нестационарних вібраційних сигналів / І. М. Яворський, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович, В. Б. Шевчик // Відбір і обробка інформації. – 2015. – № 42 (118). – С. 11–18.
42. Пат. 102759 Україна, МПК G01M 13/04, H03K 3/84, G01V 1/40. Вібраційна діагностична система / І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович, І. Г. Стецько, П. Б. Дуб, І. М. Яворський;

- власник Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України. – № а 2012 00639, заявл. 20.01.2012 ; опублік. 12.08.2013, Бюл. № 15.
43. Пат. 103105 Україна, МПК G01H 11/00, G01M 7/02, G01M 13/04. Вібромеханічний стенд / Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Г. Стецько, П. Б. Дуб, І. М. Яворський; власник Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України. – № а 2012 02316, заявл. 27.02.2012 ; опублік. 10.09.2013, Бюл. № 17.
44. Яворский И. Н. Функция когерентности взаимосвязанных периодически нестационарных случайных процессов / И. Н. Яворский, Р. М. Юзефович, И. Й. Мацько, З. Закжевски // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 40–51.
45. Яворський І. М. Методи та засоби ранньої діагностики підшипникових вузлів турбоагрегатів ТЕС / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько // Енергетика та електрифікація. – 2012. – № 8. – С. 58–67.
46. Яворський І. М. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для багатомірної діагностики обертових вузлів машинних комплексів / І. М. Яворський, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович, І. Г. Стецько, І. Й. Мацько // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ : Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 50–56.
47. Яворський І. М. Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ : Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. – С. 135–142.
48. Isayev I. Comparison of the coherent and the component methods for estimating the characteristics of the periodically correlated random processes / Ihor Isayev, Ihor Javorskyj, Roman Yuzefovych // Proceedings of 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2007). – Poznań, Poland, 2007. – P. 1862–1866.
49. Юзефович Р. М. Дослідження властивостей компонентної оцінки взаємкореляційної функції періодично нестационарних випадкових сигналів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько // Праці одинадцятої Всеукраїнської міжнародної конференції “Оброблення сигналів, зображень та розпізнавання образів”, УкрОбраз-2012. – Київ : Інститут кібернетики НАН України, 2012. – С. 31–34.
50. Юзефович Р. М. Дослідження властивостей оцінок взаємспектральних компонентів періодично нестационарних випадкових сигналів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Й. Мацько, В. Б. Шевчик // Праці дванадцятої Всеукраїнської міжнародної конференції “Оброблення сигналів, зображень та розпізнавання образів”, УкрОбраз-2014. – Київ : Інститут кібернетики НАН України, 2014. – С. 47–50.
51. Яворський І. М. Аналіз сигналів вібрації при дослідженні зразків бурильних труб / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько // Матеріали 5-ї міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні комп’ютерні системи та мережі:

розробка та використання”. – Львів : Національний університет “Львівська політехніка”, 2011. – С. 169–172.

52. Яворський І. М. Дослідження причин підвищеної вібрації турбогенераторів № 4 та № 5 типу ТГВ-200 Бурштинської ТЕС / І. М. Яворський, Я. В. Сторожук, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець, І. Г. Стецько // Матеріали V міжнародної конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів : Національний університет “Львівська політехніка”, 2014. – С. 829–834.
53. Юзефович Р. М. Компонентний аналіз взаємкореляційних функцій циклостаціонарних багатомірних процесів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько // Праці II науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2012. – С. 144–146.
54. Юзефович Р. М. Взаємкореляційний когерентний аналіз циклостаціонарних процесів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, П. О. Семенов // Матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ-2012). – Тернопіль : Тернопільський національний економічний університет, 2012. – С. 62.
55. Яворський І. М. Когерентне оцінювання взаємспектральної густини циклостаціонарних багатовимірних процесів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Праці III науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2014. – С. 76–79.
56. Шевчик В. Б. Взаємкореляційний аналіз періодично нестационарних випадкових сигналів / В. Б. Шевчик, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович // Матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ-2013). – Тернопіль : Тернопільський національний економічний університет, 2013. – С. 62.
57. Юзефович Р. М. Дослідження оцінки зміщення взаємспектральної густини при когерентному спектральному аналізі вібраційних сигналів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Й. Мацько, В. Б. Шевчик // Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ-2015). – Тернопіль : Тернопільський національний економічний університет, 2015. – С. 39–41.
58. Юзефович Р. М. Дослідження покомпонентної функції когерентності взаємзв’язаних періодично корельованих випадкових процесів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Й. Мацько, О. Ю. Дзерин // Праці IV науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2016. – С. 128–132.
59. Мацько І. Й. Діагностування стану стержня з тріщиною за параметрами вібраційних сигналів / І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, В. Б. Шевчик, І. Б. Кравець // Праці VI українсько-польської науково-технічної конференції “Електроніка та

інформаційні технології” (ELIT-2014). – Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2014. – С. 128–131.

60. Яворський І. М. Інформаційно-вимірвальна система ранньої вібраційної діагностики / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько // Матеріали 7-ї Національної науково-технічної конференції “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ : Інститут електрозварювання ім. О. Б. Патона НАН України, 2012. – С. 373–377.
61. Яворський І. М. Оцінювання характеристик періодично нестационарних випадкових сигналів методом найменших квадратів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець // Праці І науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2010. – С. 143–146.
62. Яворський І. М. Визначення періоду регулярної складової періодично нестационарних випадкових процесів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Тези IV міжнародної науково-технічної конференції “Датчики, прилади та системи” (ДПС–2008). – Ялта, 2008. – С. 59–60.
63. Юзефович Р. М. Застосування когерентного функціоналу для визначення періоду регулярної складової періодичного нестационарного сигналу / Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. М. Яворський // Праці дев'ятої Всеукраїнської міжнародної конференції “Оброблення сигналів, зображень та розпізнавання образів”, УкрОбраз-2008. – Київ : Інститут кібернетики НАН України, 2008. – С. 11–14.
64. Юзефович Р. М. Використання схеми Бюй-Балло для виявлення періодичних змін властивостей флуктуаційної складової коливань / Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. М. Яворський // 5-а міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів “Зварювання та суміжні технології”. – Київ, 2009. – С. 170.
65. Javorskyj I. Coherent estimation of probabilistic characteristics for periodically correlated random processes in the case of preliminary determination of period / Ihor Javorskyj, Roman Yuzefovych, Ihor Kravets, Ivan Matsko // Proceedings of the XIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012) Dedicated to 60th Anniversary of the Radio Department at the Lviv Polytechnic National University. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2012. – P. 60.
66. Яворський І. М. Методи і засоби ранньої вібраційної діагностики механізмів циклічної дії / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько // Праці III міжнародної науково-технічної конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій”. – Львів, 2012. – С. 13.
67. Юзефович Р. М. Дослідження властивостей оцінки найменших квадратів характеристик періодично нестационарних випадкових сигналів / Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець // Праці десятої Всеукраїнської

- міжнародної конференції “Оброблення сигналів, зображень та розпізнавання образів”, УкрОбраз-2010. – Київ : Інститут кібернетики НАН України, 2010. – С. 93–96.
68. Yuzefovych R. Selection of sampling step for correlation analysis of cyclostationary processes / Roman Yuzefovych // Proceedings of the XIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012) Dedicated to 60th Anniversary of the Radio Department at the Lviv Polytechnic National University. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2012. – P. 68.
69. Юзефович Р. М. Визначення періоду регулярної складової періодично нестационарних випадкових процесів / Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. М. Яворський // Праці проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання”. – Тернопіль-Бучач, 2009. – С. 238–242.
70. Мацько І. Й. Аналіз коливань стержня з тріщиною під дією стохастичної вимушувальної сили / І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець // Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ-2014). – Тернопіль : Тернопільський національний економічний університет, 2014. – С. 100–102.
71. Мацько І. Й. Моделювання вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами періодично корельованих випадкових процесів / І. Й. Мацько, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович // Матеріали ХІХ відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів, 2007. – С. 202–205.
72. Юзефович Р. М. Оцінка періоду кореляційної функції з використанням схеми Бюй-Балло / Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. Б. Кравець // Матеріали ХХ відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів, 2009. – С. 380–383.
73. Мацько І. Й. Моделювання коливань пружної пластини з тріщиною / І. Й. Мацько, І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович, І. М. Яворський // Матеріали конференції молодих учених із сучасних проблем механіки і математики ім. акад. Я. С. Підстригача. – Львів, 2009. – С. 67–68.
74. Мацько І. Й. Векторна вібраційна діагностика підшипників кочення / І. Й. Мацько, І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець // Праці міжнародної науково-технічної конференції “Конструкційна міцність матеріалів та ресурс обладнання АЕС” (РЕСУРС-2012). – Київ : Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 2012. – С. 133–135.
75. Шевчик В. Б. Методи статистичного аналізу векторних періодично корельованих випадкових процесів у вібродіагностиці / В. Б. Шевчик, І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько // Друга міжнародна наукова конференція пам’яті професора Володимира Поджаренка “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах” (ВКДТС-2013). – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2013. – С. 20.

76. Шевчик В. Б. Виявлення дефектів вузлів механічних систем з використанням векторної діагностики / В. Б. Шевчик, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець // 8-ма міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів “Зварювання та суміжні технології”. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. – С. 192.
77. Юзефович Р. М. Векторна діагностика підшипника кочення з використанням вібромеханічного стенду ВМС-1 / Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, І. М. Яворський, Г. Р. Трохим, І. Б. Кравець, І. Г. Стецько // Матеріали 5-ї міжнародної конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2014. – С. 823–828.
78. Шевчик В. Б. Дослідження оцінок кореляційних інваріантів векторних періодично нестационарних вібраційних сигналів / В. Б. Шевчик, І. Й. Мацько, Р. М. Юзефович // Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ-2014). – Тернопіль: Тернопільський національний економічний університет, 2014. – С. 104–106.
79. Дзерин О. Ю. Метод найменших квадратів для дослідження характеристик вібраційних сигналів / О. Ю. Дзерин, Р. М. Юзефович, І. М. Яворський, І. Й. Мацько // Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ-2016). – Тернопіль: Тернопільський національний економічний університет, 2016. – С. 17–19.

АНОТАЦІЇ

Юзефович Р. М. Моделювання та статистичний аналіз взаємопов’язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів для виявлення дефектів механізмів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2017.

Робота присвячена розробці спектрально-кореляційної теорії взаємопов’язаних періодично корельованих випадкових процесів як математичної моделі двовимірних вібраційних сигналів та методів їх статистичного аналізу.

Обґрунтовано доцільність використання спектрально-кореляційних характеристик взаємопов’язаних ПКВП-сигналів для виявлення дефектів механічних систем та встановлення їх типів. Для кількісного опису взаємозв’язку між властивостями нестационарності ПКВП-сигналів введено інтегральну та покомпонентну функції когерентності. Розвинуто методи когерентного й покомпонентного взаємокореляційного аналізу ПКВП-сигналів. Розроблені теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємоспектрального аналізу. Розвинуто методи оцінювання характеристик пов’язаності сигналів при невідомому періоді нестационарності.

Розроблена і випробувана вібродіагностична система, алгоритми і програмне забезпечення для аналізу стохастичних коливань різного походження на основі експериментальних даних. Статистична обробка вібраційних сигналів цілого ряду дефектних механізмів показала високу ефективність використання для цього частотних залежностей введених функцій когерентності.

Ключові слова: математичне моделювання, статистичний аналіз, вібраційний сигнал, взаємопов'язані періодично корельовані випадкові сигнали, інтегральна функція когерентності, покомпонентна функція когерентності.

Юзефович Р. М. Моделирование и статистический анализ взаимосвязанных периодически нестационарных вибрационных сигналов для обнаружения дефектов механизмов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет “Львівська політехніка”, Министерство образования и науки Украины, Львов, 2017.

Работа посвящена разработке спектрально-корреляционной теории взаимосвязанных периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) как математической модели двумерных вибрационных сигналов и методов их статистического анализа.

Обоснована целесообразность использования спектрально-корреляционных характеристик взаимосвязанных ПКСП для выявления дефектов механических систем и установления их типов. Для количественного описания взаимосвязи между свойствами нестационарности периодически коррелированных случайных сигналов введено интегральную и покомпонентную функции когерентности. Развита методы когерентного и покомпонентного взаимокорреляционного анализа периодически коррелированных случайных сигналов. Разработаны теоретические основы эмпирического непараметрического взаимоспектрального анализа. Развита методы оценивания характеристик связанности сигналов при неизвестном периоде нестационарности.

Разработана и испытана вибродиагностическая система, алгоритмы и программное обеспечение для анализа стохастических колебаний различного происхождения на основе экспериментальных данных. Статистическая обработка вибрационных сигналов целого ряда дефектних механізмів показала высокую эффективность использования для этого введенных функций когерентности.

Ключевые слова: математическое моделирование, статистический анализ, вибрационный сигнал, взаимосвязаны периодически коррелированные случайные сигналы, интегральная функция когерентности, покомпонентная функция когерентности.

Yuzefovych R. M. Modeling and statistical analysis of joint periodically nonstationary vibration signals for the detection of mechanisms faults. – On the rights of manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Engineering Sciences in speciality 01.05.02 – Mathematical modeling and numerical methods. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The spectral and correlation theory of joint periodically correlated random signals is developed, the features of representation of their probabilistic characteristics in the form of Fourier series are defined, the relation between these series and with characteristics of random processes, which describe amplitude and stochastic modulation of vibration signal main harmonics, is analyzed.

Integral and component-wise coherence functions for the quantitative description of connection between properties of nonstationarity of PCRPs-signals are grounded and proposed and it is proved that introduced functions do not change after linear transformations. The coherent method for cross-correlation analysis of PCRPs-processes, which based on averaging of their realizations trough the period of nonstationarity, is developed, the conditions of asymptotic unbiasedness and consistency of discrete and continuous estimators of cross-correlation function and cross-correlation components are derived, the conditions of absence of aliasing effect of the first as well as the second kind are defined. The component estimators of cross-correlation function computed on the base of trigonometric polynomial, which coefficients are calculated using continuous as well as discrete Fourier transformations of finite signals realizations, are obtained, the conditions of their root-square mean convergence are defined.

The theoretical basis for the empirical nonparametric cross-spectral analysis of the periodically correlated random signals is developed. The correlogram method, that is a generalization of Blackman-Tukey method, is grounded for the estimation of cross-spectral densities and cross-spectral components. The asymptotic unbiasedness and consistency of the estimators are proved. Coherent and component methods of cross-correlation analysis are generalized for the case when the period of nonstationarity is unknown, it is shown that points of extremes of the respective statistics with respect to test-period are asymptotically unbiased and consistent estimators of the period. The features of the cross-correlation and cross-spectral structures of the vibration signals of industrial objects rotary units with faulty elements are studied. It is shown that introduced integral and component-wise coherence functions allows one to detect faults on the early stages of their initiation, separate and localize them and define their type.

The vibrodiagnostic system, algorithms and software for the analysis of stochastic oscillations with different origination on the base of real data, are created and verified. The statistical processing of the vibration signals of the series of damaged mechanisms shows the high efficiency of using of introduced coherence functions.

Key words: mathematical modeling, statistical analysis, vibration signal, joint periodically correlated random signals, integral coherence function, component-wise coherence function.

Підписано до друку 27.02.17
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Зам. №27/02-1
Ум. друк. арк. 2,33
Наклад 100 прим.

Друк ФОП Король І.В.
м. Львів, вул. Гнатюка, 17
Ел. пошта: lvivprint@ukr.net, Тел. 096-59-88-924
Код ДРФО 2814706601
Витяг з реєстру платників єдиного податку
№1613073402716 від 26.02.2016

