

ВІДГУК

офіційного опонента, завідувача відділу теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки Національної академії наук України, доктора технічних наук, професора **Мисловича Михайла Володимировича**, на дисертаційну роботу Юзефовича Романа Михайловича на тему **“Моделювання та статистичний аналіз взаємопов’язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів для виявлення дефектів механізмів”**, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми. Під час експлуатації різного виду механізмів циклічної дії, як вітчизняного, так і закордонного виробництва, використовують рекомендації заводів-виробників, науково-дослідних установ, готові програмні засоби. Таким чином, завдання експлуатаційників зводяться до правильної організації системи підтримання працездатності елементів механізмів, корегуючи рекомендації виробників і постачальників техніки з урахуванням реальних умов експлуатації.

Вирішення загальної проблеми щодо ефективності експлуатації різного виду механізмів потребує певного підходу до їх обслуговування за фактичним технічним станом.

Важливим є те, що на основі встановлення нових залежностей зміни технічного стану, а саме для виявлення дефектів у механізмах циклічної дії, необхідно розробити новий підхід для управління їх ресурсом шляхом корегування періодичності технічного обслуговування, що рекомендовані виробниками, з урахуванням фактичних умов експлуатації.

Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційної роботи Р.М.Юзефовича, яка присвячена розробці теорії та методів спектрально-кореляційної теорії взаємопов’язаних періодично корегованих випадкових процесів, як математичної моделі двовимірних вібраційних сигналів, створенню та обґрунтуванню методів оцінювання їх взаємокореляційних і взаємоспектральних характеристик на основі експериментальних даних, що характеризують технічний стан механізмів, не викликає сумніву.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел із 251 найменування та додатку на 7 сторінках. Зміст роботи викладено на 414 сторінках, з яких 330 містять основний текст, 255 рисунків та 14 таблиць.

У *вступі* проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження і наукову новизну. Показаний зв'язок з науковими програмами і планами НДР, а також особистий внесок дисертанта.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел, розглянуті основні задачі багатомірної вібраційної діагностики. Дисертантом переконливо показано, що використання для контролю технічного стану механізмів багатовимірної діагностики дозволяє значно підвищити ефективність результатів діагностики, а також спланувати поточні ремонти. За результатами проведеного автором дослідження висвітлено важливу проблему побудови та використання віброперетворювачів, які дозволяють одночасно вимірювати різні складові сигналу.

У *другому розділі* розглянуто основи спектрально-кореляційної теорії взаємопов'язаних ПКВП – математичних моделей вібраційних сигналів. Дисертантом обґрунтована інтегральна функція когерентності, яка кількісно характеризує стохастичний взаємозв'язок між властивостями нестационарності двох ПКВП-сигналів, що проявляються в періодичній зміні за часом їх взаємних спектральних характеристик. У цьому розділі переконливо доведено, що введена функція когерентності взаємозв'язку сигналів не змінюється при лінійних перетвореннях. За важливим результатом можна вважати обґрунтовані автором алгоритми виділення за допомогою відповідного переносу частот і низькочастотної фільтрації.

У *третьому розділі* подано основи когерентного взаємокореляційного аналізу ПКВП-сигналів, який ґрунтується на усередненні відліків їх реалізацій, що відбираються через період нестационарності. На основі проведеного аналізу дискретних оцінок взаємокореляційних компонентів, які знаходяться на основі інтегральних сум, дисертантом обґрунтовано вибір інтервалу дискретизації.

Четвертий розділ присвячений аналізу компонентних оцінок взаємокореляційної функції, що має вигляд тригонометричного полінома, коефіцієнти якого знаходяться на основі інтегральних перетворень скінченних відрізків сигналів. Дисертантом показано, що періодична залежність від зсуву похибок оцінювання зумовлена нестационарністю сигналів, а амплітуда періодичних осциляцій може бути зменшена відповідним вибором довжини реалізації та кроком дискретизації.

Теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємоспектрального аналізу взаємозв'язаних ПКВП-сигналів розглядаються у *п'ятому розділі*. Дисертантом розвинуто компонентний метод взаємоспектрального аналізу, при якому оцінка взаємокореляційної функції подається у вигляді тригонометричного полінома. Такий підхід надав можливість виконати

порівняльний аналіз ефективності когерентних оцінок, а також дискретного й компонентного оцінювання.

У шостому розділі викладено методи взаємного статистичного аналізу ПКВП-сигналів при невідомому періоді нестационарності. Дисертантом показано, що взаємкореляційні статистики мають селективні властивості по відношенню до періоду нестационарності і точки екстремальних значень можуть розглядатися як оцінки періоду.

Автором отримано формули, що визначають статистичні характеристики оцінок від числа відліків, кроку дискретизації та параметрів модульованих сигналів, які дають змогу оцінити статистичні похибки обробки, а також вирішити обернену задачу, тобто вибрати такі параметри обробки, що забезпечують наперед задану похибку.

У сьомому розділі аналізуються результати взаємної статистичної обробки вертикальної та горизонтальної вібрацій підшипника кочення, які отримані на основі чисельних розв'язків системи двох нелінійних диференціальних рівнянь, що їх описують. Дисертантом встановлено, що випадкові процеси вертикальної складової вібрації, які виникають в процесі взаємодії присутнього на рухомому кільці дефекту з тілами кочення не корелюють з випадковими процесами, що формують горизонтальну складову вібрації.

За результатами дослідження симульованих вібраційних сигналів доведено, що вібрації справного підшипника кочення мають стаціонарний характер, а поява дефекту на одному з його кільців призводить до появи нестационарних складових у цих вібраціях.

У восьмому розділі наведені результати взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібрацій обертових вузлів центрифуги, електродвигуна вугільного конвеєра, турбоагрегату ТЕС, зроблені висновки про дефекти. Знайшли експериментальне підтвердження основні теоретичні положення, що стосуються взаємопов'язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів. Отримані експериментальні результати показали високу ефективність багатоканальної системи ПУЛЬС при проведенні діагностики електромеханічних об'єктів на багатьох промислових підприємствах України.

У висновках сформульовано основні наукові результати.

У додатках до дисертаційної роботи наведено акти впровадження результатів роботи.

Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній:

1) розвинута спектрально-кореляційна теорія зв'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) для кількісного опису взаємозв'язку між властивостями нестационарності двох ПКВП-сигналів обґрунтовано інтегральну та покомпонентну функції когерентності. Доведено, що введені функції не змінюються при лінійних перетвореннях;

3) розвинуто методи когерентного взаємкореляційного аналізу ПКВП-сигналів, що ґрунтується на усередненні відліків їх реалізацій через період нестационарності, виведено умови асимптотичної незміщеності та слушності неперервних і дискретних оцінок взаємкореляційної функції та взаємкореляційних компонентів, встановлено умови відсутності ефектів накладання першого й другого роду;

4) запропоновано компонентні оцінки взаємкореляційної 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) створено теоретичні основи емпіричного непараметричного взаєм-спектрального аналізу ПКВП-сигналів, для оцінювання взаємспектральної густини і взаємспектральних компонентів, обґрунтовано корелограмний метод, який є узагальненням метода Блекмана-Тьюкі, та доведено асимптотичну незміщеність і слушність оцінок;

6) методи когерентного і компонентного взаємкореляційного аналізу узагальнено на випадок, коли період нестационарності 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 взаємкореляційних функцій чи взаємкореляційних компонентів;

7) виявлено наявність характерних особливостей взаємкореляційної та взаємспектральної структур вібраційних сигналів, що спостерігаються в обертових вузлів промислових об'єктів при наявності дефектних елементів; показано, що введені інтегральна та покомпонентна функції когерентності надають можливість виявити дефекти на ранніх стадіях їх зародження, розділити та локалізувати їх, а також встановити види цих дефектів.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в наступному:

Отримані при виконанні дисертаційної роботи наукові результати, що базуються на розроблених здобувачем положеннях спектрально-кореляційної теорії взаємопов'язаних ПКВП-сигналів, введених інтегральних та покомпонентних функцій когерентності, надали можливість створити вібродіагностичну систему ПУЛЬС, алгоритми та програмне забезпечення для розв'язання низки прикладних задач.

Програмне забезпечення надає можливість обчислювати весь комплекс спектрально-кореляційних характеристик коливань, які досить повно описують їх структуру. 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 (спеціалізований експертно-технічний центр ТОВ фірма "ДІАЛАБ", приватне науково-виробниче підприємство "Інститут новітніх технологій", підприємство "Кипер-пласт", ТОВ "Порттехексперт"), що підтверджено відповідними актами.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням фундаментальних законів класичної теорії та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, численними експериментами. Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якійсній та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 79 наукових публікаціях, серед яких 2 закордонні колективні монографії, 7 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз, 32 статті у наукових фахових виданнях України, а також 32 публікації у збірниках матеріалів і праць конференцій. Дисертантом отримано 2 патенти України на винаходи.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на більш ніж 15 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.
Оформлення автореферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Основний зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

1. У другому розділі, на мою думку, не вистачає конкретних приладів, які би ілюстрували структуру взаємозалежностей нестационарних властивостей типових ПКВП-моделей вібраційних сигналів.

2. При описі властивостей введених функцій когерентності слід було детальніше охарактеризувати нові риси таких функцій, які відрізняють їх від функцій когерентності, введених для опису взаємоспектральних зв'язків стаціонарних випадкових сигналів.

3. У роботі показано, що як відносна систематична похибка статистичної обробки реалізації сигналів, так і відносна середньоквадратична похибка збільшуються зі збільшенням зсуву, однак недостатньо висвітлені питання вибору максимального зсуву – точка усікання корелограми при обробці конкретних сигналів.

4. У роботі наведені залежності від пробного періоду тільки когерентних взаємкореляційних статистик і не пояснено, чому не використані компонентні статистики.

5. З шостого розділу, не зовсім зрозуміло, як досягається потрібна точність визначення періоду нестационарності, адже точність когерентних статистик залежить від кроку дискретизації.

Загальні висновки

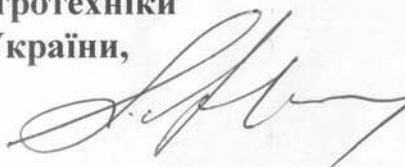
Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота Р. М. Юзефовича *“Моделювання та статистичний аналіз взаємопов'язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів для виявлення дефектів механізмів”*, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, є завершеною науковою працею, в якій вирішено нову 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. Дисертаційна робота відповідає вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а також вимогам пунктів щодо “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р., а її автор, **Роман Михайлович Юзефович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

**Офіційний опонент,
завідувач відділу теоретичної електротехніки
Інституту електродинаміки НАН України,
доктор технічних наук, професор**

15.03.2017 р.



Мислович М. В.

