

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОНДРАТЬЄВА ІННА ЮРІЇВНА

УДК 681.5.015:519.246.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЮ
ДІАГНОСТИКОЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

І.Ю. Кондратьєва

Науковий керівник

Рудакова Ганна Володимирівна

доктор технічних наук, професор

Херсон – 2021

АНОТАЦІЯ

Кондратьєва І.Ю. Оптимізація процесів керування функціональною діагностикою технологічного обладнання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Херсонський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Херсон 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми підвищення ефективності процесів керування функціональною діагностикою технологічного обладнання у режимі реального часу за рахунок розробці та практичній реалізації методів оцінки параметрів технічних станів та виявленні аварійних режимів роботи електромеханічних вузлів без їх розбирання за характеристиками вібраційних процесів, які супроводжують їх функціонування. Це дозволяє розширити можливості моніторингу й керування роботою складних технічних систем.

У роботі здійснено ретельний огляд моделей і методів керування процесом функціональної діагностики технологічного обладнання, приведено класифікацію методів діагностики технічного стану електромеханічних систем (ЕМС). Проаналізовано існуючі системи функціональної діагностики обладнання виявлені переваги і недоліки кожного класу. Надається характеристика станів технологічного обладнання та вибір домінантних діагностичних ознак. Проведено огляд математичних моделей, що застосовуються для аналізу роботи технологічного обладнання. Обґрунтовано доцільність використання для функціональної діагностики акустичних сигналів, що генеруються працюючим обладнанням.

Ефективність методів акустичної діагностики обумовлена не тільки органічним зв'язком інформації, що міститься в сигналі вібрації, з динамічними

процесами збудження і поширення коливань в конструкції, але і можливістю автоматизації процесів знімання та обробки інформації за допомогою сучасної техніки і організації процедур діагностування на основі математичного апарату теорії розпізнавання образів. Сутність проблеми акустодіагностики полягає в розробці та практичній реалізації алгоритмів оцінки параметрів технічних станів електромеханічних вузлів, без їх розбирання за характеристиками вібраційних процесів, які супроводжують їх функціонування.

У другому розділі 2 «Методи цифрової обробки акустичних сигналів» розглянуто особливості характерних шумових сигналів електромеханічного обладнання, які мають періодичні й неперіодичні складові. Параметри шумових сигналів змінюються в часі – у бездефектного обладнання повільно, а в обладнанні, що наближається до стану руйнування, дуже швидко. Вважається, що в межах усього терміну служби обладнання його характерний шумовий сигнал є інтервально-стаціонарним процесом за умови, що інтервали спостережень вибираються для кожного типу обладнання, а сигнали розглядаються як реалізації випадкового процесу з нормальним розподілом. Визначено, що для підвищення ефективності систем функціональної діагностики ЕМС необхідно застосовувати методи цифрової обробки сигналів.

Запропоновано етапи, за якими необхідно здійснювати аналіз акустичних сигналів, що генеруються під час функціонування ЕМС, для побудови та налаштування системи функціональної діагностики. Першочерговою задачею є дослідження статистичних властивостей акустичних сигналів. Визначено низку умов щодо якості процесу їхнього вимірювання, яких необхідно дотримуватись під час аналізу.

Наступним кроком є спектральний аналіз акустичних сигналів. Шуми апаратів і машин характеризують як загальні властивості системи, так і властивості їх частин. Досвід застосування акустичних методів показує, що в стані нормального функціонування енергія шуму в основному концентрується в області низьких частот, а енергія дефектів розташовується на більш високих частотах. У процесі перетворення акустичного сигналу після його апаратної

обробки доцільно визначати межі інформативної частини сигналу на базі спектрального аналізу, суть якого заснована на первинному Фур'є-перетворенні сигналу.

Запропоновано для визначення частотного діапазону інформативної частини сигналу застосовувати логіко-часову обробку на основі оцінювання нормованого енергетичного спектру та спектральній ентропії. Такий підхід дозволяє визначити межі частотних діапазонів для налаштування процедури фільтрації сигналів з метою усунення «шумових» складових сигналу, які не несуть корисну інформацію.

Обґрунтовано доцільність використання як моделі сигналу авторегресійну модель ковзного середнього для аналізу звукових сигналів, у яких порушуються стаціонарні властивості. На основі аналізу даних, що фіксуються за результатами вимірів, можна виявити рівень напруженості стану обладнання та оцінити складність оперативної ситуації.

Вирішено задачу побудови математичних моделей, на основі яких можна адекватно ідентифікувати напруженість роботи та стан обладнання. Приведено процедуру для ідентифікації параметри моделі сигналів рекурентним методом найменших квадратів, що дозволяє проводити аналіз стану обладнання в режимі реального часу. Автором запропоновано для прискорення процесу аналізу сигналів та зменшення обсягу обчислень при побудові математичної моделі процесу й ідентифікації режиму роботи обладнання та усунення надлишковості інформації використати кратно-масштабний аналіз для агрегації даних, яка дозволяє стискати часову шкалу (зменшувати кількість даних) шляхом усереднення найближчих значень.

В третьому розділі приведено комп'ютерне моделювання методів обробки акустичного сигналу. Було проведено серію експериментів з електромеханічним обладнанням, працюючим в різних режимах роботи (з різною швидкістю обертання) та з різним ступенем навантаження.

Проведений аналіз статистичних властивостей акустичних сигналів виявив нормальність закону розподілу зареєстрованих часових рядів та

залежність числових характеристик процесу від режимів роботи та ступеня навантаження обладнання.

Було здійснено аналіз зміни властивостей за частотою акустичного сигналу при нормальному та збійному режимах роботи. При порушенні нормального режиму роботи електромеханічного обладнання дисперсія акустичного сигналу збільшується. На спектральній діаграмі сигналу у режимі роботи обладнання з порушеннями спостерігається наявність потужних високочастотних коливань.

За допомогою логіко-часової обробки здійснено оцінку інформативності сигналу в деяких діапазонах частот. При визначенні частотних діапазонів інформативності шляхом проведення низки обчислень було виявлено доцільне значення довжини фрейму та параметру налаштування порогу.

Складові сигналу у визначених діапазонах частот отримано завдяки фільтрації за допомогою фільтра низьких частот та смугового фільтра, для реалізації яких застосовано фільтр Батерворта 5-го порядку. Проведено аналіз оригінального акустичного сигналу та його складових у фазовому просторі.

При побудові авторегресійних моделей ковзного середнього було проведено аналіз щодо визначення порядку (глибини) вікна. Попередні дослідження виявили, що можна обмежитися четвертим порядком моделей та, відповідно, й ширини ковзного вікна. Аналіз отриманих моделей для акустичних сигналів, записаних при роботі електромеханічного обладнання з різними частотами обертання й ступенем навантаження, показала наявність істотної залежності коефіцієнтів моделі від зміни умов функціонування, що відкриває перспективи ідентифікації напружених режимів у роботі обладнання.

Результати застосування кратномасштабного аналізу (розрахунок дисперсії, параметра самоподоби, параметра Херста) залежно від ступеня агрегації дозволили визначити граничний ступінь агрегації для досліджуваного сигналу.

В четвертому розділі наведено обґрунтування структури системи керування функціональною діагностикою технологічного обладнання та

розробка комплексу рекомендацій щодо практичної реалізації її складових. В автоматизованій системі керування функціональною діагностикою, яка будується на основі аналізу властивостей акустичних сигналів, що генеруються працюючим електромеханічним обладнанням, необхідне здійснювати цифрову обробку сигналів за запропонованою послідовністю етапів з попереднім налаштуванням параметрів.

Використання стислої часової шкали при аналізі акустичного сигналу дозволяє значно зменшити обсяги інформації, що обробляється, та реалізувати системи підтримки прийняття рішень у режимі реального часу з автоматичним визначенням (постановкою діагнозу в темпі вимірювання діагностичних сигналів) несправностей вузлів машинного обладнання, ступеня їх небезпеки й формуванням переліку компенсуючих заходів.

Інтеграція систем функціональної діагностики, що базуються на аналізі акустичних сигналів, в системи управління складними багатоприводними установками відкриває можливість в реальному часі оцінювати і виявляти критичні режими роботи електромеханічного обладнання, і своєчасно формувати керуючі впливи, що дозволяють стабілізувати функціонування виробничих комплексів.

Ключові слова: автоматизована система керування, функціональна діагностика, акустичні сигнали, часові ряди, авто регресійна модель ковзного середнього, МНК, агрегація даних, кратномасштабний аналіз.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях України:

1. Кондратьєва И.Ю., Рудакова А.В., Поливода О.В. Моделирование акустических сигналов электрооборудования методом авторегрессии скользящего среднего. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2018. №3 (66). Т.1. С.79-84. (Здобувачкою запропоновано

ідентифікувати параметри авторегресійної моделі за допомогою методу найменших квадратів)

2. Кондратьева И.Ю., Рудакова А.В., Поливода О.В., Сарафанникова Н.В. Анализ акустических сигналов в приращениях для функциональной диагностики многоприводных установок. Системні технології. 2019. № 4(123). С.77-85. (Здобувачкою досліджено спектри амплітуд сигналів до і після фільтрації, а також динаміка сигналів в фазовому просторі, розраховано авторегресійні моделі ковзного середнього)
3. Поливода О.В., Рудакова А.В., Кондратьева И.Ю. Анализ акустического шума электрооборудования в фазовом пространстве. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2019. №2(69). С.214–221. (Здобувачка запропонувала алгоритм обробки сигналів смуговим фільтром та фільтром низьких частот, а також провела дослідження спектрів амплітуд сигналів)

Статті у наукових виданнях інших держав:

4. Kondratieva I.U., Rudakova H.V., Polyvoda O.V. Using Acoustic Methods for Monitoring the Operating Modes of the Electric Drive. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) Proceedings October 16-18, 2018, Kyiv, Ukraine. P. 218-221. (Scopus) (Здобувачкою запропонована методика прискорення процесу аналізу сигналів і усунення їх надмірності шляхом застосувати методу агрегації даних)
5. Polyvoda O., Rudakova H., Kondratieva I., Rozov Y., Lebedenko Y. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. In: Lytvynenko V., Babichev S., Wójcik W., Vynokurova O., Vyshemyrskaya S., Radetskaya S. (eds) Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1020. Springer, Cham, pp.97-109. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7. (Scopus) (Здобувачкою запропоновано метод аналізу агрегованих акустичних сигналів в збільшеннях в фазовому просторі)

6. Kondratieva I.U., Rudakova H.V., Polyvoda O.V., Lebedenko Yu.O., Polyvoda V.V. Using Entropy Estimatin to Detect Moving Objects. // 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Proceedings October 22-24, 2019, Kyiv, Ukraine. P.270-299. (Scopus)

Публікації в інших наукових виданнях України:

7. Кондратьева І.Ю., Рудакова Г.В. Аналіз акустичних сигналів у системах функціональної діагностики електромеханічного обладнання. Комп'ютерно-інтегровані технології у сьогоденні. 2019. №3. С.29-34. (Здобувачкою запропоновано алгоритм виявлення діагностичних параметрів акустичного сигналу шляхом статистичного аналізу)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Кондратьева І.Ю., Рудакова Г.В. Проблемы функциональной диагностики электромеханических систем в реальном времени. Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління. м. Херсон, 11-13 квітня 2018 р. Херсон. С.11. (Здобувачем визначено шляхи підвищення ефективності керування функціональною діагностикою електромеханічних систем в режимі реального часу)
9. Кондратьева И.Ю., Рудакова А.В., Поливода О.В. Моделирование акустических сигналов электрооборудования методом авторегрессии скользящего среднего. Матеріали XIX Міжнародної конференції з математичного моделювання (МКММ-2018), м. Херсон, 17-21 вересня 2018 р. Херсон, 2018. С. 15. (Здобувачем запропоновано ідентифікувати параметри авторегресійної моделі за допомогою методу найменших квадратів)
10. Кондратьева И.Ю., Рудакова А.В., Прспективы применения виброакустических методов для контроля режимов работы многоприводной установки. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні

технології промислового комплексу -2018», м. Херсон, 12-16 вересня, 2018 р. Херсон, 2018. С.32-34. (Здобувачем обгрунтовано доцільність використання віброакустичних методів для функціональної діагностики багатопровідного устаткування)

11. Кондратьєва І.Ю., Рудакова Г.В., Поливода О.В., Методы предварительной обработки акустических сигналов в системах технической диагностики электромеханического оборудования. Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління. м. Херсон, 10-12 квітня 2019 р. Херсон, 2019. С.19-20. (Здобувачкою запропоновано алгоритм процедури попередньої обробки акустичного сигналу, генеруємого працюючим обладнанням, для виділення домінантних ознак для подальшої обробки інформаційного масиву).
12. Поливода О.В., Рудакова А.В., Кондратьєва И.Ю. Анализ акустического шума электрооборудования в фазовом пространстве Матеріали XX Міжнародної конференції з математичного моделювання (МКММ-2019). м. Херсон, 16-20 вересня 2019 р. Херсон, 2019. С.83. (Здобувачкою досліджено спектри амплітуд сигналів до і після фільтрації, а також динаміка сигналів в фазовому просторі, розраховано авторегресійні моделі ковзного середнього).
13. Кондратьєва І.Ю., Рудакова Г.В. Методи обробки акустичних сигналів у системах функціональної діагностики електромеханічного обладнання. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління 08-10 квітня 2020 р. Херсон, 2020. С.20-22. (Здобувачкою запропоновано алгоритм ідентифікації інформаційних ознак у виробничому шумі, який складається з 6 етапів та дозволяє приймати оперативні рішення в режимі реального часу)
14. Polyvoda O., Rudakova H., Kondratieva I., Rozov Y., Lebedenko Y. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. Матеріали Міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI 2019)». м. Херсон, 21-25 травня 2019 р., Херсон, 2019. С.42-43. (Здобувачкою

запропоновано метод аналізу агрегованих акустичних сигналів в збільшеннях у фазовому просторі)

- 15.Рудакова Г.В, Кондратьєва І.Ю, Поливода О.В. Аналіз інформативності акустичних сигналів в системі технічної діагностики мехатронних систем. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу -2019». 09-13 вересня 2019 р. Херсон, С.49-52. (Здобувачкою запропоновано алгоритм, який дозволяє для вилучення інформаційно значущих характеристики застосовувати метод найменших квадратів, а також виявляти наявність залежності коефіцієнтів моделі від ступеня навантаження об'єкта та від режиму роботи двигуна).
- 16.Кондратьєва І.Ю., Рудакова А.В., Поливода О.В., Сарафанникова Н.В. Анализ акустических сигналов в приращениях для функциональной диагностики многоприводных установок. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ'2019). м. Дніпро, 26–28 березня 2019 р. Дніпро, 2019. С.120. (Здобувачем запропоновано використання акустичних сигналів, що генеруються електромеханічним обладнанням, у фазовому просторі для контролю режимів роботи електроприводів).
- 17.Рудакова Г.В., Кондратьєва І.Ю., Поливода О.В. Аналіз інформативності акустичних сигналів в системі технічної діагностики мехатронних систем. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». м. Київ, 10-13 вересня 2019 р. Київ, 2019. С.179-182. (Здобувачкою запропоновано застосовувати логіко-часову обробку акустичних сигналів для виявлення інформативності певних частотних діапазонів спектру)