

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Київський національний університет будівництва і архітектури

ГОРОДЖА КОСТЯНТИН АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.314:621.391

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СТАТИСТИЧНОЇ ВІБРОУДАРНОЇ
ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2013

Дисертацію є рукопис

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури міністерства освіти і науки, молоді та спорту України на кафедрі автоматизації технологічних процесів

Науковий керівник доктор технічних наук, професор **Мислович Михайло Володимирович**, Київський національний університет будівництва і архітектури, Міністерства освіти і науки, молоді та спорт України, м. Київ, професор кафедри автоматизації технологічних процесів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, **Лантух-Лященко Альберт Іванович** Національний транспортний університет, Міністерства освіти і науки, молоді та спорт України, м. Київ, професор кафедри Мости і тунелі.

доктор технічних наук, професор, **Сахно Євгеній Юрійович**, Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Міністерства освіти і науки, молоді та спорт України, професор кафедри управління якістю та проектами

Захист відбудеться “___” _____ 2013 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.01 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03680, м.Київ-037, Повітрофлотський проспект, 31.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури: 03680, м.Київ-037, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий “___” _____ 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

Цюцюра С.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Згідно з оцінками спеціалістів, майже у половині випадків (48%) причинами виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що трапилися в Україні за останні роки, був незадовільний технічний стан споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж, їх значна зношеність унаслідок закінчення нормативного строку експлуатації – нормативного ресурсу. Спрацювання зазначених об'єктів у різних галузях економіки становить 50...70 відсотків і має тенденцію до зростання внаслідок майже повного припинення оновлення основних фондів. У галузі електроенергетики спрацювання обладнання ще більше і сягає 60...80 відсотків. Одночасна заміна цього обладнання потребує величезних матеріальних коштів, які в Україні відсутні.

У зв'язку з цим, особливої актуальності набуває питання управління експлуатаційним строком надійного та безпечного використання зазначених об'єктів шляхом визначення їх фактичного технічного стану і залишкового ресурсу, встановлення нових строків експлуатації, що ґрунтуються на їхньому фактичному стані, а також гарантування безпеки та надійності їх використання протягом цього строку.

Частково вирішити вказану проблему можна шляхом створення нових сучасних систем контролю і діагностики, що надасть можливість визначати фактичний технічний стан обладнання та забезпечувати надійну його експлуатацію протягом строку понад нормативний ресурс.

Існують різні методи та засоби діагностики технічного стану вузлів електротехнічного обладнання, які достатньо повно описані у відомих літературних джерелах. Останнім часом з'явився ряд нових напрямків і методів, які використовуються при розв'язуванні задач діагностики. Між ними найбільшого розповсюдження набули методи та інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) функціональної та тестової діагностики. Серед останніх можна виділити ІВС ударної діагностики, які дозволяють відносно просто і оперативно визначати технічний стан окремих вузлів електротехнічного обладнання (ЕО), таких як шихтовані магнітопроводи потужних електричних машин, підшипникові вузли обертових машин, фундаменти, платформи та станини, тощо.

Суть ударної вібродіагностики полягає в збудженні вібрацій досліджуваного вузла за допомогою зовнішнього ударного імпульсу і в подальшому вимірюванні та аналізі отриманого відгуку. При цьому спектр відгуку визначається, в основному, резонансними властивостями об'єкта досліджень, тоді як спектр вібрацій, що вимірюються при функціональній вібродіагностиці, залежить від режиму роботи досліджуваного обладнання в даний момент часу і може містити сильні додаткові частотні складові, що

не пов'язані з технічними характеристиками самого об'єкта досліджень. Таким чином, основною перевагою ударної діагностики є те, що вона дає можливість визначити основні резонансні характеристики досліджуваного вузла. Крім власне діагностики, інформація про резонансні властивості вузлів ЕО може використовуватися, наприклад, для оцінки рівня його сейсмічної стійкості.

Суттєвим є вибір методів (детерміновані або статистичні), які покладено в основу роботи ІВС діагностики. На даний час відомі та ефективно використовуються окремі прилади ударної діагностики, що базуються на використанні детермінованих методів. Але головний недолік таких приладів – відносно невисока достовірність діагностики, оскільки ударна хвиля, що поширюється у вузлі, який діагностується, є випадковим процесом за своєю природою, внаслідок чого використання детермінованих методів для її аналізу приводить до значних похибок. Використання статистичних методів у ІВС діагностики дає можливість підвищити достовірність діагностичних рішень, оскільки повністю враховується стохастична природа діагностичних сигналів.

Отже, необхідність подальшого вдосконалення і розвитку методів та засобів технічної діагностики ключового ЕО електростанцій та підстанцій як під час експлуатації, так і при проведенні технічного обслуговування, є однією з актуальних проблем в електроенергетиці України, які потребують першочергового вирішення.

Таким чином, побудова інформаційно-виміральної системи ударної діагностики, що дає можливість визначати технічний стан окремих вузлів електротехнічного обладнання, є актуальною задачею, яка і обумовила тему даної дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження по темі дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі автоматизації технологічних процесів факультету автоматизації і інформаційних технологій Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) у відповідності з планами держбюджетних тем:

– по проекту «Створення банку даних та технології його практичного використання для діагностики будівельних конструкцій та технологічного обладнання» за договором №НЧ/434-2007 від 31 липня 2007 р. між Міністерством освіти і науки України та КНУБА (№ держреєстрації 0107U006533);

– по проекту «Розроблення комп'ютерної системи вібродіагностики вітроелектричних агрегатів з прогнозуванням технічного стану їх вузлів» за договором № ДЗ/481-2009 від 17 липня 2009 р. між Міністерством освіти і науки України та КНУБА (№ держреєстрації 0109U006072);

– по проекту «Виготовлення та налагодження макету інформаційно-виміральної системи контролю віброакустичних параметрів

вітроагрегату» в рамках договору №67-02НК від 29 листопада 2002 р. між Інститутом електродинаміки НАН України та КНУБА.

Крім того, автор дисертаційної роботи приймав участь у виконанні досліджень, що проводилися в Інституті електродинаміки НАН України по проекту «Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій» за договорами № P7.13-2010 (1232-10) від 15.06.2010 р., № P7.13-2011/1235-11 від 01.03.2011 р. та № P7.13-2012/1238-12 від 01.03.2012 р. між Національною академією наук України та Інститутом електродинаміки НАН України (№ держреєстрації 0110U003666), що виконується відповідно до цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)".

Результати дисертаційної роботи були використані при виконанні госпдоговірної теми «Розробка ефективних методів та засобів визначення і контролю параметрів та характеристик електричних і віброакустичних процесів, що супроводжують роботу вітроелектричних агрегатів, на базі пересувної лабораторії» (договір №1209-02 від 19 листопада 2002 р. між Інститутом електродинаміки НАН України і Державним науково-промисловим підприємством «Укренергомаш» Міністерства промислової політики України).

Роль дисертанта у виконанні перелічених робіт полягає в тому, що ним були розроблені: математична ймовірнісна модель вібраційних процесів у вузлах ЕО при збудженні коливань ударним методом; методика та програмне забезпечення імітаційного моделювання відгуків вузлів ЕО на ударний вплив; методи визначення оцінок діагностичних параметрів за аналізом відгуку досліджуваних вузлів ЕО на ударний вплив, відповідні алгоритми та програмне забезпечення, які були реалізовані в створених лабораторних зразках ІВС ударної діагностики вузлів ЕО; з використанням методу статистичної лінеаризації проведено визначення метрологічних параметрів вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем ударної діагностики, що містять АЦП.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка нових статистичних методів віброударної діагностики окремих вузлів електротехнічного обладнання та ІВС, що їх реалізує і дозволяє із заданими точністю та достовірністю визначати технічний стан ряду масивних вузлів електротехнічного обладнання (шихтованих магнітопроводів, підшипникових вузлів, фундаментів та станин потужних електричних машин, трансформаторів та роз'єднувачів тощо).

Досягнення поставленої мети ґрунтується на результатах розв'язання наступних наукових задач:

- на основі теорії лінійних випадкових процесів побудувати і проаналізувати математичну ймовірнісну модель відгуку масивного вузла ЕО на ударний вплив;
- виходячи з розробленої моделі створити методи і програмне забезпечення для імітаційного моделювання відгуків вузлів ЕО на ударний вплив;
- за результатами теоретичного ймовірнісного аналізу розробленої моделі та використовуючи результати імітаційного моделювання обґрунтувати можливі діагностичні ознаки технічного стану вузлів ЕО;
- розробити методи чисельного оцінювання діагностичних ознак за вимірними реалізаціями відгуків вузлів ЕО на ударний вплив;
- на основі отриманих оцінок діагностичних параметрів вибрати статистичні методи для побудови діагностичних розв'язуючих правил по виявленню дефектів у досліджуваних вузлах ЕО;
- розробити структурну схему та на її основі виготовити лабораторний зразок і розробити програмне забезпечення для ІВС ударної діагностики вузлів ЕО;
- провести теоретичне та експериментальне дослідження метрологічних параметрів створеного лабораторного зразка ІВС ударної діагностики.

Об'єктом дослідження є процес визначення фактичного технічного стану ЕО на основі вимірювання і аналізу вібраційних сигналів, що характеризують відгук вузлів ЕО на ударний вплив.

Предметом дослідження є ІВС віброударної діагностики вузлів ЕО.

Методи дослідження ґрунтувалися на використанні методів технічної діагностики при виборі методу діагностики та узагальненої структури діагностичної системи, формулюванні основних задач дослідження; методів теорії ймовірностей і теорії випадкових процесів для побудови математичної моделі вібраційних процесів у вузлах досліджуваного обладнання; методів математичної статистики і розпізнавання образів для побудови методів, алгоритмів та програм отримання чисельних оцінок діагностичних параметрів та розробки вирішуючих діагностичних правил; методів теорії ІВС та метрології для розробки автоматизованої ІВС діагностики та перевірки її метрологічних параметрів.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає в тому, що розроблено нові статистичні методи віброударної діагностики електротехнічного обладнання, які знайшли своє практичне застосування в автоматизованій системі, призначеній для виявлення та класифікації дефектів згаданого обладнання.

Вперше:

- розроблено, на основі ймовірнісної математичної моделі вібраційного сигналу, що збуджується у вузлах ЕО ударним способом, методи та лабораторний зразок ІВС віброударної діагностики електротехнічного обладнання, який базується на використанні статистичних методів. При цьому об'єкт, а також ІВС, що здійснює діагностику цього об'єкта, розглядаються як єдине ціле;
- теоретично обґрунтовано можливі діагностичні ознаки окремих вузлів електротехнічного обладнання, що являють собою параметри ймовірнісної математичної моделі ударного вібраційного сигналу;
- розроблені метод та алгоритм, що його реалізує, **які дозволяють** здійснювати імітаційне моделювання вібраційних сигналів, що збуджуються ударним впливом на досліджуваний вузол електротехнічного обладнання. **В основу цього методу покладені елементи** теорії лінійних випадкових процесів.

Отримали подальший розвиток:

- методи, що дозволяють на основі аналізу ударного діагностичного сигналу здійснювати вибір діагностичних просторів, формування в цих просторах навчаючих сукупностей і побудову розв'язуючих правил по діагностиці та класифікації конкретних видів дефектів у певних вузлах електротехнічного обладнання.

Вдосконалено:

- математичну ймовірнісну модель вібрацій діагностованого вузла при збудженні останнього ударним способом за рахунок застосування математичного апарату лінійних випадкових процесів;
- методи оцінки метрологічних параметрів створеного зразка ІВС ударної діагностики, що надало можливість проводити діагностику певних вузлів електротехнічного обладнання з наперед заданою точністю (інструментальна похибка) і достовірністю (методична похибка).

У сукупності отримані результати вирішують важливу науково-технічну задачу розробки статистичних методів та автоматизованої системи віброударної діагностики електротехнічного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів. На базі запропонованих математичних моделей та розробленого лабораторного зразка ІВС ударної діагностики розроблена інженерна методика діагностування деяких вузлів електротехнічного обладнання. Розроблені методи та ІВС, що їх реалізують, дозволять автоматизувати процес діагностування технічного стану вузлів електротехнічного обладнання, забезпечуючи при цьому задані точність і достовірність результатів діагностики.

Розроблено програмне забезпечення для цифрових ІВС, що базується на методах теорії розпізнавання образів. Проведено метрологічне

дослідження основних характеристик таких ІВС та проаналізована ефективність розроблених методів з використанням імітаційного моделювання. Практичне випробування розробленого лабораторного зразка ІВС діагностики здійснено для двох варіантів побудованої ІВС (стаціонарного і переносного). Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в Державному науково-виробничому підприємстві «Укренергомаш» (акт впровадження від 04 січня 2004 року).

Практична придатність створеного лабораторного зразка ІВС вібродіагностики для проведення експериментальних досліджень підтверджена його експериментальними випробуваннями на:

- стендах Державного підприємства «ВО ПМЗ ім. О.М.Макарова» (акт експериментальних випробувань від 17 листопада 2003 року);
- діючих вітроагрегатах типу USW 56-100 на території Мирновської вітроелектричної станції, с.м.т. Мирний, АР Крим (акт експериментальних випробувань від 18 листопада 2010 року).

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, розробки та висновки дисертаційної роботи є результатом самостійно проведеного дослідження здобувача. Основні наукові результати, представлені в дисертації, отримані здобувачем особисто.

Робота [9] написана автором самостійно. В наукових роботах, опублікованих у співавторстві, дисертантом виконано наступне: в [1, 3, 5] розроблено удосконалену математичну ймовірнісну модель вібраційних процесів у вузлах електротехнічного обладнання при збудженні коливальним ударним методом; в роботах [4, 7, 10, 12] автором запропоновано методи визначення оцінок діагностичних параметрів за аналізом відгуку досліджуваних вузлів ЕО на ударний вплив; в роботах [2, 11] знайшли відображення відповідні алгоритми та програмне забезпечення, які були реалізовані в створених лабораторних зразках ІВС ударної діагностики вузлів ЕО; в роботах [6, 8] автором з використанням методу статистичної лінеаризації проведено визначення метрологічних параметрів вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем ударної діагностики, що містять АЦП.

Автор дисертації приймав участь у проведенні експериментальних досліджень, обробці дослідних даних, випробуваннях лабораторних зразків ІВС, написанні та налагодженні програмного забезпечення.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні висновки й положення дисертації були апробовані на міжнародних та всеукраїнських наукових і науково-практичних конференціях і семінарах, зокрема: Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки», м. Київ, Україна, 2002, 2004 і 2010 рр.; Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки», м. Язлівець, Україна, 2003 р., м. Алушта, Україна, 2008 р.,

м. Ваплево, Польща, 2009 р., м. Лазне Кинжварт, Чеська республіка, 2010 р., с.м.т. Кострина, Україна, 2011 р.

Результати дисертаційної роботи неодноразово обговорювалися на наукових семінарах кафедри АТП КНУБА, а також на об'єднаних семінарах відділу теоретичної електротехніки та відділу електричних і магнітних вимірювань Інституту електродинаміки НАН України.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 12 наукових роботах, 7 з яких – статті в спеціалізованих наукових виданнях в Україні та за кордоном, 5 – в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, основних висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 182 сторінки, в тому числі 53 малюнки, 9 таблиць, список літератури з 96 найменувань на 11 сторінках і 4 додатки на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету, об'єкт, предмет і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про публікації автора за темою дисертації, апробацію основних результатів на конференціях і семінарах.

У першому розділі розглянуті основні досягнення в галузі вібраційної діагностики, отримані за останні роки. Проаналізовані тенденції розвитку вібровимірювальної апаратури, основні методи діагностики електротехнічного обладнання за вібраціями, що ґрунтуються на детермінованому та статистичному підходах. Проведено порівняльний огляд ряду відомих приладів та систем вібраційної діагностики.

На основі проведеного аналізу зроблено висновки про те, що технічні засоби для вимірювання вібрацій, які на даний час присутні на ринку, мають достатню точність, високу надійність та цілком доступну ціну. Разом з тим, методи діагностування на основі вібраційних сигналів потребують розвитку. Таким чином, основним найбільш актуальним напрямком досліджень слід вважати вдосконалення математичних моделей діагностичних сигналів, методів їх обробки та прийняття діагностичних рішень з метою забезпечення підвищеної точності та достовірності діагностики. Порівняння особливостей детермінованого та статистичного підходів до діагностики показує, що статистичні методи дають можливість отримати вищу достовірність діагностичних результатів, а тому нові методи та системи вібродіагностики слід розробляти на основі саме статистичного підходу.

За результатами аналізу сформульовано мету та основні завдання дисертаційного дослідження, які спрямовані на розробку автоматизованої системи віброударної діагностики ЕО з підвищеними показниками достовірності діагнозу за рахунок застосування нових статистичних методів обробки інформаційних сигналів вібрацій та прийняття діагностичних рішень по виявленню та класифікації дефектів.

У другому розділі розглядаються питання побудови математичної моделі відгуку масивного елемента конструкції досліджуваного ЕО на зовнішній вплив у вигляді механічного удару.

Як показують експериментальні дослідження, вібрації широкого класу технічних об'єктів, а зокрема і багатьох вузлів ЕО, мають чітко виражену багаторезонансну структуру. Тому була поставлена задача побудови математичної моделі, яка б описувала такі багаторезонансні процеси вібрацій. Для її розв'язання було сформульовано припущення, що частотні характеристики досліджуваної механічної системи не змінюються протягом експерименту, коливання в ній не виникають самі по собі, а лише внаслідок деякого впливу, вони стійкі і згасають через певний час після припинення зовнішнього впливу. Крім того, коливання в розглядуваній механічній системі не залежать ні від рівня збудження, ні від типу і форми хвилі збудження. Зроблені припущення дають можливість математично описати досліджуваний вузол ЕО у вигляді деякої лінійної часоінваріантної системи.

Згідно з рядом наукових публікацій вібрації електричних машин та іншого ЕО мають випадковий характер, тому їх математичну модель доцільно побудувати в певному класі випадкових процесів. В дисертації для цієї мети було використано лінійні випадкові процеси (ЛВП), теорія яких була ґрунтовно розроблена Б.Г.Марченком та Л.М.Щербаком. При цьому досліджувана система розглядається як комбінація лінійних систем другого порядку, кожна з яких характеризує якийсь один резонанс, причому кількість цих систем рівна кількості резонансних частот досліджуваної системи, а відгук кожної з них описується ЛВП з певними характеристиками.

Враховуючи вищесказане, модель багаторезонансного вібраційного процесу, викликаного деяким ударним впливом і виміряного у вибраній точці на поверхні досліджуваного вузла, представляється таким чином:

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \xi_j(t), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (1)$$

де n – ціле число, яке характеризує кількість резонансних частот; a_j – вагові коефіцієнти, що відображають співвідношення енергій між відповідними резонансними частотами; $\xi_j(t)$ – компонента, що враховує

характеристики процесу на частотах, близьких до j -го резонансу, причому

$$\xi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(t - \tau) d\eta_j(\tau), \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in (-\infty, \infty),$$

де $\{\eta_j(\tau), j = \overline{1, n}\}$ – вектор процесів з незалежними приростами, що моделюють вхідний ударний вплив, а функції $\varphi_j(\tau)$ описуються так:

$$\varphi_j(\tau) = \frac{\omega_j^2}{\psi_j} e^{-\beta_j \tau} \sin(\psi_j \tau) U(\tau), \quad j = \overline{1, n}, \quad \tau \in (-\infty, \infty), \quad (2)$$

де ω_j – резонансні частоти; β_j – коефіцієнти, що характеризують згасання коливань j -ї компоненти; $\psi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2}$, $j = \overline{1, n}$; $U(\tau)$ – нормалізована функція Хевісайда (одиничний стрибок).

На основі теоретичного аналізу моделі (1) запропоновано ряд параметрів, що можуть бути використані в якості діагностичних ознак для визначення фактичного технічного стану досліджуваних вузлів ЕО, серед яких найбільш важливі наступні: кількість резонансних піків n ; резонансні частоти ω_j , $j = \overline{1, n}$; коефіцієнти згасання β_j , $j = \overline{1, n}$; величини початкових і центральних моментів розподілу ймовірностей.

У третьому розділі розроблені статистичні методи кількісного оцінювання діагностичних параметрів, що використовуються при віброударній діагностиці. Вони ґрунтуються на вибірковому методі і методах спектрально-кореляційного аналізу випадкових часових рядів.

Для отримання оцінок початкових та центральних моментів розподілу ймовірностей використовуються загальновідомі вирази, побудовані на усередненні по вибірці. Для знаходження чисельних значень діагностичних параметрів багаторезонансної моделі n , β_j , ω_j (або $\psi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2}$), $j = \overline{1, n}$ в дисертації отримано нові оригінальні вирази, при виводі яких враховано, що нормалізована кореляційна функція процесу (1) при умові (2) і наявності одного резонансу має вигляд

$$\dot{R}_1(s) = e^{-\beta_1 s} \left[\cos(\psi_1 s) + \frac{\beta_1}{\psi_1} \sin(\psi_1 s) \right], \quad s \geq 0, \quad (3)$$

а нормалізована спектральна щільність потужності при тих же умовах

$$\dot{S}_1(\omega) = \frac{4\psi_1^2 \beta_1^4}{(\omega_1^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_1^2}, \quad (4)$$

де κ_2 — другий кумулянт випадкової величини $\eta_1(1)$.

З врахуванням (3) вираз для оцінки параметра ψ_1 має вигляд

$$\tilde{\psi}_1 = \frac{\pi}{N} \sum_{k=1}^N \frac{k}{\tilde{s}_{m,k}}, \quad (5)$$

де: $\tilde{\psi}_1$ — оцінка ψ_1 ; $\tilde{s}_{m,k}$ — експериментально отримані оцінки для значень $s_{m,k}$ — тобто значень аргументу s нормалізованої кореляційної функції $\dot{R}_1(s)$, при яких вона має екстремуми (рис. 1); N — фіксоване ціле число, більше нуля.

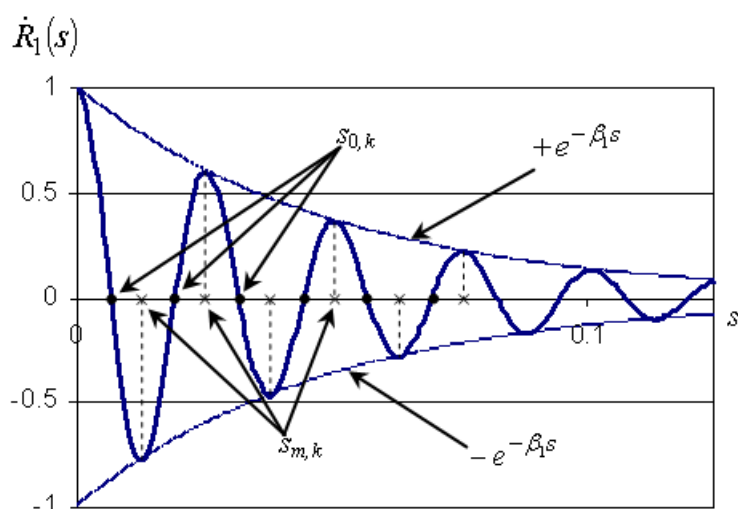


Рисунок 1 – Нормалізована кореляційна функція $\dot{R}_1(s)$ у випадку однієї резонансної частоти

Альтернативний підхід полягає у використанні точок $s_{0,k}$, де $\dot{R}_1(s) = 0$. При цьому оцінка параметра β_1 має вигляд

$$\tilde{\psi}_1 = \frac{\pi}{N} \sum_{k=1}^N (\tilde{s}_{0,k+1} - \tilde{s}_{0,k})^{-1},$$

де: $\tilde{s}_{0,k}$ — експериментально отримані оцінки для значень $s_{0,k}$; N — таке ж, як у (5).

Аналогічно, виходячи з (3), вираз для оцінки параметра β_1 має вигляд

$$\tilde{\beta}_1 = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\ln |\tilde{R}_{1,k}| \cdot \tilde{s}_{m,k}^{-1} \right),$$

де: $\tilde{\beta}_1$ — оцінка для β_1 ; $\tilde{R}_{1,k}$ — експериментальні значення функції $\dot{R}_1(s)$ у k -й точці екстремуму; N і $\tilde{s}_{m,k}$ — такі ж, як у (5).

У випадку, коли досліджувані вібрації містять більш ніж одну резонансну частоту, вхідний процес піддається попередній фільтрації деяким смуговим фільтром, смуга пропускання якого підібрана так, що відфільтрований процес на його виході містить лише одну резонансну частоту.

Для визначення параметрів багаторезонансної моделі без необхідності застосування попередньої фільтрації в дисертації отримані вирази, що ґрунтуються на формулі (4) для спектральної щільності потужності. Крива, що описується виразом (4), має максимум в точці $\omega_{\max} = \sqrt{\psi_1^2 - \beta_1^2}$, а рівень $\dot{S}_1(\omega) = h$ перетинає в точках ω_{h-} і ω_{h+} (рис. 2).

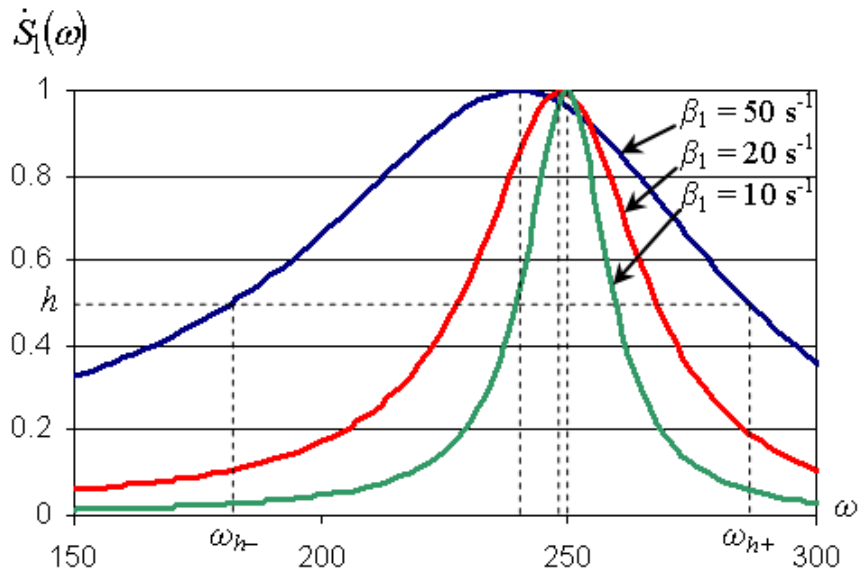


Рисунок 2 – Фрагменти нормалізованих енергетичних спектрів для різних значень β_1 . Значення $\omega_1 = 250$ рад/с для всіх кривих

З урахуванням цього оцінки величин β_1 і ψ_1 знаходяться з виразів

$$\tilde{\beta}_1 = \tilde{\omega}_{\max} \cdot \sqrt{\delta_h}, \quad \tilde{\psi}_1 = \tilde{\omega}_{\max} \cdot \sqrt{1 + \delta_h}, \quad (6)$$

де $\tilde{\beta}_1, \tilde{\psi}_1$ — оцінки для β_1 і ψ_1 ;

$$\delta_h = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{(\tilde{\omega}_{h+}^2 - \tilde{\omega}_{h-}^2)^2}{4\tilde{\omega}_{\max}^4 (h^{-1} - 1)}} - 1 \right);$$

$\tilde{\omega}_{\max}, \tilde{\omega}_{h+}, \tilde{\omega}_{h-}$ — експериментальні значення $\omega_{\max}, \omega_{h-}$ і ω_{h+} .

Вирази (6) можуть використовуватися і у випадку, якщо енергетичний спектр досліджуваного процесу містить кілька резонансів, але при умові, що коефіцієнти згасання малі і всі резонансні частоти розташовані достатньо далеко одна від одної.

У четвертому розділі розглядається програмне забезпечення, створене на основі розроблених статистичних методів діагностики, а також описано загальну структуру та основні технічні параметри лабораторних зразків ІВС діагностики, котрі були виготовлені під час виконання досліджень за темою дисертації.

За час проведення досліджень було виготовлено 4 лабораторних зразки системи статистичної діагностики вузлів ЕО на основі аналізу їхніх вібрацій. Ці зразки відрізняються використаною при їх виготовленні елементною базою та призначенням, але узагальнена структура програмно-технічного забезпечення у них однотипна і, в основному, відповідає рис. 3.

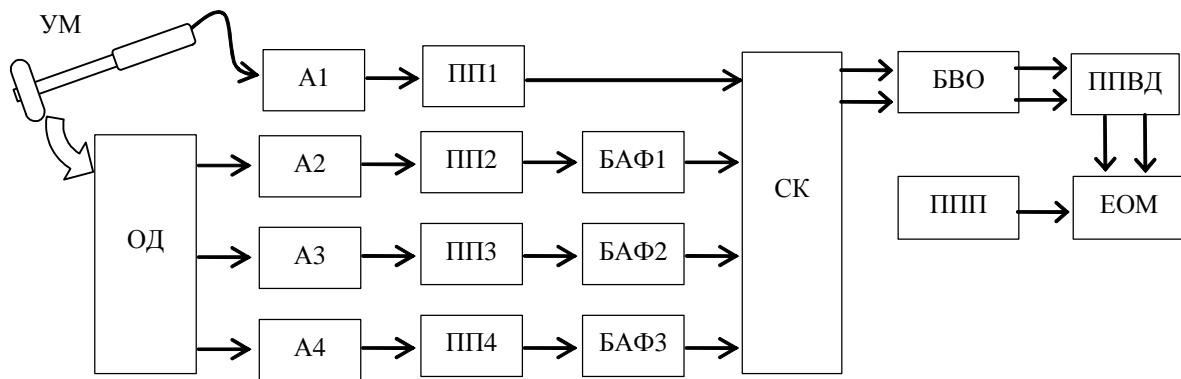


Рисунок 3 – Схема лабораторного зразка системи віброударної діагностики
 ОД – об'єкт діагностики; УМ – ударний молоток; А1...А4 – акселерометри;
 ПП1...ПП4 – попередні підсилювачі; БАФ1...БАФ3 – блоки аналогової фільтрації; СК – селектор каналів; БВО – блок вторинної обробки; ППВД – пристрій перетворення і вводу даних; ППП – пакет прикладних програм;
 ЕОМ – електронна обчислювальна машина

Технічне забезпечення лабораторного зразка ІВС віброударної діагностики на даний час складається на основі серійних компонентів. Програмне забезпечення (ПЗ) складається з системних компонентів та прикладних компонентів, які були розроблені спеціально для цієї системи і є унікальними. До складу ПЗ входять такі обчислювальні модулі:

- модуль гістограмного аналізу на основі системи кривих Пірсона;
- модуль кореляційного аналізу;
- модуль статистичного спектрального аналізу;
- модуль оцінювання параметрів багаторезонансної моделі вібрацій на основі результатів кореляційного і спектрального аналізу;
- модуль навчання (накопичення навчальних сукупностей та побудова вирішуючих правил на основі методу Неймана-Пірсона);
- модуль діагностування.

Крім того, описано методику експериментальної перевірки метрологічних параметрів створеного лабораторного зразка ІВС

діагностики. Методика ґрунтується на застосуванні методу статистичної лінеаризації, що передбачає заміну досліджуваної нелінійної системи деякою лінійною, такою, що при надходженні на вхід обох систем однакового вхідного впливу у вигляді випадкового процесу математичне сподівання та дисперсія процесів на їх виходах співпадають.

Процес перевірки метрологічних параметрів за допомогою даної методики полягає в тому, що на вхід вимірювального каналу системи послідовно подаються сигнали з відомими статистичними параметрами, які змінюються в певному діапазоні, а відповідні значення на виході оцінюються системою. Після цього будується лінійна залежність між вхідними та вихідними значеннями, на основі чого визначаються коефіцієнти передачі по математичному сподіванню та по дисперсії.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальної перевірки розроблених методів та засобів віброударної діагностики ЕО за допомогою натурального та імітаційного моделювання, а також експериментальних досліджень із використанням лабораторного зразка системи.

Імітаційне моделювання віброударних сигналів здійснювалося на основі використання властивостей ЛВП з дискретним часом, а саме – методом цифрової фільтрації вхідного випадкового процесу $\zeta(t)$, що являє собою дзвоноподібний імпульс $a(t)$ з адитивно накладеним на нього гаусовим білий шумом $\varepsilon(t)$ із заданими параметрами, за допомогою цифрового фільтра, імпульсна реакція якого розраховується по заданій функції $\varphi(\tau)$ ядра ЛВП, який потрібно змодельовати (рис. 4).

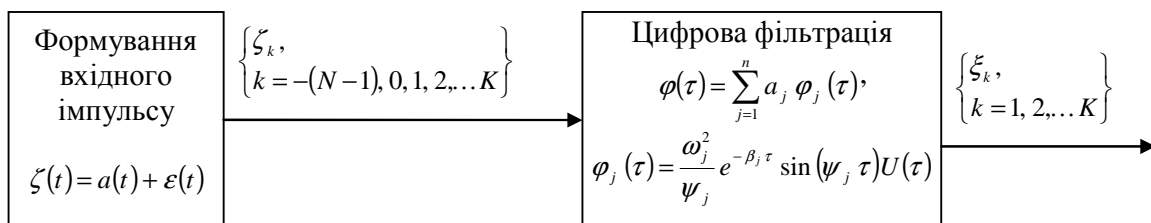


Рисунок 4 – Структурна схема процесу моделювання віброударних сигналів

Для перевірки розроблених методів було проведено ряд вимірювань вібраційних сигналів на реальних об'єктах (макетах вузлів ЕО), на основі чого оцінювалися значення спектральних діагностичних параметрів у кожному випадку. Після цього здійснювалося комп'ютерне моделювання сигналів з тими ж параметрами. Остаточо, результати моделювання піддавалися аналогічній обробці для визначення діагностичних параметрів.

Результати, отримані шляхом моделювання, виявилися достатньо близькими до результатів вимірювань. Це свідчить про адекватність

розробленої моделі вібраційних сигналів та коректність створених методів їх статистичної обробки.

Наведено також результати експериментальних досліджень, проведених на макеті шихтованого магнітопровода з використанням розробленого лабораторного зразка ІВС віброударної діагностики, на основі яких було побудовано вирішуючі правила для діагностики ступеня пресування пакету електротехнічної сталі шихтованих магнітопроводів.

У додатках наведено таблицю порівняння характеристик різних засобів прикладення ударного впливу, акти експериментальних випробувань лабораторних зразків системи діагностики, а також акт впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі, яка полягає у розробці та дослідженні ймовірнісних моделей та статистичних методів віброударної діагностики, а також створенні на їх основі діючого лабораторного зразка автоматизованої системи, що дозволяє з наперед заданою точністю і вірогідністю виявляти та класифікувати дефекти вузлів електротехнічного обладнання.

Побудована ймовірнісна модель та створені на її основі методи і система віброударної діагностики дозволяють проводити оцінку фактичного технічного стану масивних вузлів електротехнічного обладнання, таких як станини, платформи, магнітопроводи, кожухи, підшипникові щити, рамні конструкції тощо.

В ході виконання дисертаційної роботи одержано наступні наукові і практичні результати:

1. Удосконалено математичну ймовірнісну модель вібрацій, що утворюються у досліджуваному вузлі, для побудови якої використано елементи теорії лінійних випадкових процесів. Удосконалення цієї моделі полягає в обґрунтуванні можливості використання цієї моделі для тестової віброударної діагностики та встановленні характеристик ударного імпульсу, який збуджується у досліджуваному вузлі електротехнічного обладнання. На основі досліджуваної моделі обґрунтовано нові інформативні діагностичні ознаки, які встановлюються за результатами статистичного спектрального аналізу, що забезпечило можливість із наперед заданою точністю та вірогідністю діагностувати такі дефекти вузлів електротехнічного обладнання як тріщини, несучільність матеріалу вузла, що діагностується, недостатнє зусилля пресування (для шихтованого магнітопровода осердя ротора або статора електричної машини).

2. **Запропоновано математичну** модель виникнення і розповсюдження ударних вібрацій у тілі досліджуваного вузла

електротехнічного обладнання. Розроблено метод, алгоритм і програму, що його реалізує, які забезпечують проведення імітаційного моделювання ударних вібраційних сигналів.

3. Удосконалено методи оцінки метрологічних параметрів ІВС ударної діагностики. На відміну від існуючих, створені методи дозволяють оцінювати загальну похибку вимірювального каналу створеного зразка ІВС, що зумовлена наявністю в ній аналогової і цифрової частин. Для оцінки останньої складової, що зумовлена наявністю в ІВС аналого-цифрового перетворювача, запропоновано використовувати метод статистичної лінеаризації, застосування якого дозволяє з більш високою достовірністю оцінити точність перетворення аналогового сигналу у цифровий код.

4. На основі виконаних досліджень було розроблено дослідний зразок ІВС вібродіагностики, методика лабораторних досліджень, а також програмне забезпечення для інформаційно-вимірювальної системи статистичної діагностики окремих вузлів вітроелектричних агрегатів.

На відміну від програмного забезпечення, що використовується для обробки діагностичних сигналів у відомих ІВС діагностики, розроблені програми дають можливість отримувати оцінки спектрально-кореляційних характеристик досліджуваних процесів, а також чисельні значення параметрів розподілу. Крім того, програма PIRSON дає можливість згладжувати емпіричні гістограми, в результаті чого отримується аналітичний вираз щільності розподілу.

Описані програми далі були використані в складі дослідного зразка інформаційно-вимірювальної системи статистичної діагностики вітроелектричних агрегатів.

5. З використанням створеного зразка ІВС ударної діагностики було проведено низку експериментів з вимірювання, статистичної обробки та побудови розв'язуючих правил з діагностики та класифікації можливих дефектів у певних вузлах електротехнічного обладнання. Завдяки тому, що створений зразок ІВС працює у двох режимах (навчання і діагностики), були побудовані навчаючі сукупності, що відповідають певним технічним станам досліджуваних вузлів ЕО і, в решті решт, інженерна методика з визначення технічного стану вузлів ЕО, що діагностуються. На відміну від відомих методів, запропонована методика надає можливість планувати вимірювально-діагностичні експерименти таким чином, щоб приймати діагностичні рішення з наперед заданими показниками точності та вірогідності.

6. Результати дисертаційної роботи, а саме математична ймовірнісна модель ударного вібраційного сигналу та створений на її базі лабораторний зразок ІВС ударної діагностики вузлів ЕО; методика ударної діагностики вузлів ЕО, що передбачає роботу створеного зразку ІВС у двох режимах – навчання і діагностики, – можуть бути використані в

установах і підприємствах, які займаються розробкою і практичним використанням ІВС, призначених для діагностики вузлів ЕО. Низка теоретично-прикладних результатів дисертації може бути використана в учбовому процесі вищих навчальних закладів, наприклад, при викладанні навчальних дисциплін «Діагностика технічних об'єктів», «Автоматизовані діагностичні системи», «Методи та засоби неруйнівного контролю і діагностики» та інших.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Городжа К. А. Аналіз коливань відгуків електротехнічного обладнання на ударний вплив / К. А. Городжа, М. В. Мислович // Техн. електродинаміка. Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. Ч. 5. – 2002. – С. 108 – 111.

2. Городжа К. А. Моделювання відгуків електротехнічного обладнання на ударний вплив та використання його результатів при створенні автоматизованих систем діагностики / К. А. Городжа, М. В. Мислович, Р. М. Сисак // Вісник Нац-го ун-ту “Львівська політехніка”. – 2009 – № 654. – С. 65 – 70.

3. Городжа К. А. Особливості побудови та практичного використання інформаційно-вимірювальної системи діагностики вітроелектричних агрегатів / К. А. Городжа, М. В. Мислович, Р. М. Сисак, О. В. Улітко // Техн. електродинаміка. Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Ч. 3. – 2004. – С. 111 – 116.

4. Городжа К. А. Чисельне оцінювання спектральних діагностичних параметрів при ударній діагностиці електротехнічного обладнання / К. А. Городжа, Р. М. Сисак // Техн. електродинаміка. – Тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Ч. 2. – 2010. – С. 252 – 253.

5. Мислович М. В. Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій / М. В. Мислович, А. Д. Городжа, Л. Б. Остапчук, Р. М. Сисак, К. А. Городжа, Ю. О. Новотарський, Б. О. Трощинський // Збірник наукових статей з цільової програми «Ресурс». – К.: Вид-во Ін-ту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 456 – 463.

6. Gorodzha K. A. Singularities of Metrological Characteristics Determination of Measuring Channel in Diagnostic Systems for Electrical Engineering Equipment / K. A. Gorodzha, M. V. Myslovich, R. M. Sysak, O. V. Ulitko // Institute of Electrical Engineering Acad. Sci. Czech Republic. Acta Techn. CSAV. – Vol. 49. – 2004. – No 2. – Pp. 215 – 221.

7. Gorodzha K. Analysis of spectral diagnostic parameters based on mathematical model of electrical equipment's responses due to impact excitation

/ K. Gorodzha, M. Myslovich, R. Sysak // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2010. – No 1. – Pp. 38 – 40.

8. Gorodzha K. A. Singularity for Determination of Metrological Features of Measuring Channel in Diagnostic System of Electrical Engineering Equipment / K. A. Gorodzha, M. V. Myslovich, R. M. Sysak, O. V. Ulitko // V-th International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, August 26–29, 2003, Jazleevets, Ukraine: proceedings.– Lviv: Lviv polytechnic national university, 2003. – Pp. 78 – 80.

9. Gorodzha K. Analysis of response of power electrical equipment due to impact excitation / K. Gorodzha // IX-th International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, Sep. 16 – 20, 2008, Alushta, Ukraine: proceedings. – Lviv: Lviv polytechnic national university, 2008. – PP. 41 – 43.

10. Gorodzha K. Analysis of spectral diagnostic parameters based on mathematical model of electrical equipment’s responses due to impact excitation / K. Gorodzha, M. Myslovich, R. Sysak // Xth International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, 16th – 19th September, 2009, Waplewo, Poland: proceedings. – Електрон. дані. – 1 електрон, опт. диск (CD-ROM). – Назва з екрану.

11. Gorodzha K. The Methods and Software for Computer-Based System of Statistical Impact Diagnostics of Electrical Equipment / K. Gorodzha, M. Myslovich, R. Sysak // Матеріали XII міжнародного симпозиуму “Обчислювальні проблеми електротехніки” СРЕЕ'2011, Кострино, Закарпатська обл., Україна, вересень 5-7, 2011 [Текст] / Нац. ун-т "Львів. політехніка", Каф. теорет. та заг. електротехніки [та ін.]. – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2011. – С. 56.

12. Gorodzha K. Statistical methods for estimation of spectral diagnostic parameters in electrical equipment diagnostics / K. Gorodzha, R. Sysak // XIth International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, 13th – 16th September, 2010, Lázně Kynžvart, Czech Republic: proceedings. – Електрон. дані. – 1 електрон, опт. диск (CD-ROM). – Назва з екрану.

АНОТАЦІЯ

Городжа К. А. **Автоматизована система статистичної віброударної діагностики електротехнічного обладнання.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2013.

Дисертація присвячена питанням розробки статистичних методів визначення фактичного технічного стану електротехнічного обладнання на основі вимірювання та аналізу сигналів вібрацій, збуджених ударним способом у їх конструктивних елементах, а також автоматизованої системи діагностики, в яких ці методи знайшли практичну реалізацію.

У роботі на основі застосування елементів теорії лінійних випадкових процесів удосконалено ймовірнісну модель діагностичних вібраційних сигналів, що виникають у конструктивних елементах електротехнічного обладнання внаслідок прикладення до них ударного збудження; створено методику та програму їх імітаційного моделювання; обґрунтовано використання параметрів цієї моделі як діагностичних ознак для визначення фактичного стану такого обладнання. Розроблено нові методи віброударної діагностики, які базуються на точковому оцінюванні спектральних діагностичних параметрів та методах теорії розпізнавання образів, а також реалізує їх програмне забезпечення.

На основі отриманих результатів створено та експериментально перевірено діючий лабораторний зразок автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи, що дозволяє з наперед заданою точністю і вірогідністю виявляти та класифікувати дефекти вузлів електротехнічного обладнання.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, віброударний сигнал, спектральний діагностичний параметр, статистична діагностика.

АННОТАЦИЯ

Городжа К. А. **Автоматизированная система статистической виброударной диагностики электротехнического оборудования.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры. – Киев, 2013.

Диссертация посвящена вопросам разработки статистических методов определения фактического технического состояния электротехнического оборудования на основе измерения и анализа сигналов вибраций, возбужденных ударным способом в их

конструктивных элементах, а также автоматизированной системы диагностики, в которых эти методы нашли практическую реализацию.

В работе на основе применения элементов теории линейных случайных процессов усовершенствована вероятностная математическая модель диагностических вибрационных сигналов, возникающих в исследуемых узлах электротехнического оборудования в результате приложения ударного возбуждения. Была обоснована возможность использования этой модели при разработке методов и технических средств тестовой виброударной диагностики, установлены параметры ударного импульса, который возбуждается в исследуемом узле вследствие механического удара, и вероятностные характеристики порожденных им колебаний в теле исследуемого узла.

На основании исследуемой вероятностной модели обоснованы новые информативные диагностические признаки, которые устанавливаются по результатам статистического спектрального анализа, а также разработаны новые методы виброударной диагностики, основанные на точечном статистическом оценивании спектральных диагностических параметров, которые позволяют с наперед заданной точностью и достоверностью определять такие дефекты узлов электротехнического оборудования как трещины, несплошности материала диагностируемого узла (в станинах, платформах, рамных конструкциях), недостаточное усилие прессования (в шихтованных магнитопроводах трансформаторов, сердечников ротора или статора электрической машины) и др.

По результатам предложенной математической модели возникновения и распространения ударных вибраций в теле исследуемого узла электротехнического оборудования разработан метод и реализующая его компьютерная программа, которые обеспечивают проведение имитационного моделирования ударных вибрационных сигналов.

На основе вышеуказанных методов были разработаны соответствующие компьютерные программы, а также создан и экспериментально проверен действующий лабораторный образец автоматизированной информационно-измерительной системы статистической диагностики ветроэлектрических агрегатов, которая позволяет с наперед заданной точностью и достоверностью выявлять и классифицировать дефекты его узлов. Метрологические параметры этого образца были экспериментально исследованы с помощью специально разработанной методики, основанной на применении метода статистической линеаризации. В отличие от существующих, методика позволяет экспериментально определять общую погрешность измерительного канала образца системы с учетом наличия в ней аналоговой и цифровой частей.

С использованием созданного образца системы ударной диагностики был проведен ряд экспериментов по измерению и статистической

обработке виброударных сигналов, построению решающих правил для определения и классификации возможных дефектов в ряде узлов электротехнического оборудования. Благодаря тому, что созданный образец системы работает в двух режимах (обучения и диагностики), были построены обучающие совокупности, соответствующие определенным техническим состояниям исследуемых узлов ЭО и, в конце концов, инженерная методика по определению технического состояния узлов ЭО, диагностируемых. В отличие от известных методов, предложенная методика позволяет планировать измерительно-диагностические эксперименты таким образом, чтобы принимать диагностические решения с заданными показателями точности и достоверности.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, виброударный сигнал, спектральный диагностический параметр, статистическая диагностика.

ABSTRACT

Gorodzha K. A. Automated system for statistical impact diagnostics of electrical equipment. – Manuscript.

Thesis for Candidate Degree of Engineering Sciences on specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Kyiv National University of Construction and Architecture. – Kyiv, 2013.

The thesis is dedicated to the development of statistical methods for determining the actual technical status of electrical equipment based on the measurement and analysis of vibration signals, excited in the elements of their construction by impact method, as well as automated diagnostic system where these methods are implemented.

In this thesis, on the basis of elements of the theory of linear stochastic processes the probabilistic models of diagnostic vibration signals arising in structural elements of electrical equipment as a result of impact excitation applied to them were improved; methodology and application of their simulation were developed; the use of the model parameters as diagnostic parameters to determine the actual status of such equipment was proven. New methods of impact diagnostics based on statistical estimation of spectral diagnostic parameters and methods of object identification theory as well as the software where they are implemented were developed.

Based on the above results, the laboratory sample of automated information-measuring system was constructed and experimentally verified. The sample allows detection and classification of defects in components of electrical equipment with predetermined accuracy and reliability.

Keywords: electrical equipment, impact vibration signal, spectral diagnostic parameter, statistical diagnostics.