

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЕРЦИК СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 681.518.5:621.31

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ
РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ**

05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти

Технічні науки

Подається на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

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

_____ С.М. Герцик

Науковий керівник - Мислович Михайло Володимирович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Герцик С.М. Комп'ютеризована система діагностики вузлів електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «комп'ютерні системи та компоненти», Інститут електродинаміки НАН України. Київ, 2019.

За даними багатьох джерел на сьогодні за різними оцінками від 70 до 90% основного обладнання та 80% обладнання власних потреб в енергетиці України вже відпрацювали свій ресурс. Для подальшої надійної експлуатації цього обладнання необхідно або повністю його замінити, або оснастити ці об'єкти сучасними засобами моніторингу і, тим самим, з високою вірогідністю визначити залишковий ресурс і забезпечити загальне підвищення їх експлуатаційної надійності. Перший шлях вирішення такої проблеми – заміна, вимагає величезних коштів (близько 50 млрд. \$). Другий шлях передбачає систематичне визначення фактичного технічного стану і залишкового ресурсу ЕО, що знаходиться в експлуатації, на основі створення та використання сучасних методів і засобів моніторингу та діагностики.

Показники надійності роботи енергетичного обладнання визначаються результатом спільного впливу як факторів, що визначають умови експлуатації, так і внутрішніх чинників, що визначають властивості енергетичного обладнання. Поєднання таких факторів носить випадковий характер. Тому застосування статистичних методів для вирішення таких завдань доцільно в багатьох практичних випадках.

Найбільш ефективними методами контролю і діагностики є так звані неруйнівні методи [49, 87], які зазвичай реалізуються за допомогою спеціалізованих комп'ютерних систем.

Згідно з оцінками спеціалістів [89, 98], 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 [12, 95]. 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 [12, 95, 96].

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 добре викладені 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 них можна виділити ІВС вібраційної, акустоемісійної, теплової та 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. Перші три види діагностики відносяться до функціональної, а останній – до тестової.

Одним із основних моментів при виборі того чи іншого виду діагностування є вибір методів обробки діагностичних сигналів, які у свою чергу базуються на математичній моделі, що покладена в основу інформаційно-вимірювальної діагностичної системи (ІВДС), яку необхідно розробити. Крім того, при розробці такої ІВДС необхідно враховувати можливість проведення діагностики різних видів електротехнічного обладнання, яке під час експлуатації може працювати в різних режимах (холостий хід, різні ступені навантаження, швидкість та ін.). Саме врахування

режиму роботи обладнання, що діагностується в процесі його експлуатації, значно підвищує точність та вірогідність діагностики.

У дисертаційній роботі визначена та розв'язана **актуальна науково-технічна задача** підвищення точності і вірогідності результатів діагностування вузлів електротехнічного обладнання за рахунок врахування режимів його роботи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше розроблено інформаційне забезпечення процесу формування навчаючих сукупностей за діагностичними ознаками технічного стану вузлів і агрегатів ЕО на основі обґрунтованих математичних моделей діагностичних сигналів, алгоритмічно-програмного забезпечення статистичного оцінювання діагностичних ознак і реалізації їх за допомогою ІВДС;
- дістали подальший розвиток математичні моделі діагностичних сигналів, які враховують як властивості об'єкту діагностування, так і режими (швидкісний, електричний, температурний та ін.), у яких працює досліджуваний об'єкт;
- обґрунтовано необхідність врахування режимів роботи ЕО при формуванні навчаючих сукупностей, що, на відміну від відомих методів, підвищує точність результатів діагностування його технічного стану;
- вперше запропоновано і досліджено форми представлення навчаючих сукупностей, що відповідають певним технічним станам вузлів ЕО і які можуть працювати у різних режимах.

У першому розділі розглянуто деякі фізичні процеси, що утворюються при роботі ЕО а також проаналізовано їх можливості як носіїв інформації при проведенні діагностики вузлів цього обладнання. Докладна увага приділена розгляду вібрацій, які є найбільш інформативним процесом, що використовуються при проведенні неруйнівної діагностики ЕО. Розглянуто питання різних режимів роботи ЕО. Проаналізовано вплив режиму роботи електродвигунів на особливості застосування засобів їх діагностування. Коротко розглянуто режими роботи трансформаторів та питання, пов'язані з їх діагностуванням. Проаналізовано існуючі методи і засоби вимірювання діагностичних сигналів в окремих вузлах ЕО. Зроблено короткий огляд технічних та програмних засобів, що можуть бути використані як складові частини систем моніторингу, контролю і діагностики ЕО.

У другому розділі розглянуто питання побудови математичних моделей діагностичних сигналів, які виникають в ЕО. Запропоновано математичні моделі діагностичних сигналів, що водночас враховують як можливі види дефектів, так і режими роботи ЕО. За результатами аналізу математичних моделей діагностичних сигналів обґрунтовано діагностичні ознаки, які надають можливість визначати технічний стан вузлів ЕО. Розроблено моделі формування навчальних сукупностей для ІВДС, які враховують одночасно як припустимі види дефектів у певних вузлах ЕО, так і можливі режими їх роботи.

Третій розділ присвячено розгляду структури експериментального зразку багаторівневої ІВДС, яку у подальшому було використано для обробки експериментальних даних і практичної перевірки розроблених математичних моделей та методів визначення технічного стану вузлів ЕО. Наведено описання основних видів програмного забезпечення, що розроблено для управління роботою створеної ІВДС, обробки експериментальних даних та побудови розв'язуючих правил з діагностування і класифікації можливих дефектів у вузлах ЕО.

Четвертий розділ спрямований на розгляд результатів експериментів, які було проведено на лабораторних стендах ІЕД НАНУ, а також з використанням двигунів власних потреб теплової електростанції. Головна мета експериментальних досліджень - встановити кількісні оцінки запропонованих діагностичних ознак, що відповідають різним технічним станам досліджуваних вузлів ЕО і яке може працювати у різних режимах (швидкісних, температурних, виду навантаження та ін.). Саме наявність в інформаційних базах даних ІВДС навчальних сукупностей, що сформовані по оцінкам діагностичних ознак з урахуванням як видів дефектів вузлів ЕО, так і режимів їх роботи дозволяють проводити моніторинг і діагностування стану ЕО в реальному часі. Запропонований у даній дисертаційній роботі підхід побудови навчальних сукупностей з урахуванням як видів можливих дефектів так і режимів роботи ЕО, забезпечує практичне застосування ІВДС, що реалізують Smart Grid технології.

Теоретичні й практичні результати дисертації впроваджено на ТОВ «ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» (Дарницька ТЕЦ-4, м. Київ) та у Групі компаній «АМІКО», м. Миколаїв, що підтверджено відповідними актами.

ANNOTATION

Hertsyk S.M. Computerized system diagnostics of components of electrical equipment, considering the modes of its operation. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for Candidate of Science Degree in specialty 05.13.05 "Computer Systems and Components", Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Kyiv, 2019.

According to many sources, today, according to various estimates, 70 to 90% of the basic equipment and 80% of the equipment of Ukraine's own energy needs have already been used up. For the continued reliable operation of this equipment, it is necessary to either completely replace it, or equip these facilities with modern monitoring tools and, thus, with high probability to determine the residual life and to ensure an overall increase in their operational reliability. The first way to solve this problem is to replace it, which requires huge funds (about \$ 50 billion). The second path involves the systematic determination of the actual technical status and residual resources of the electrical equipment in operation, based on the creation and use of modern monitoring and diagnostic methods and tools.

Reliability indicators for the operation of power equipment are determined by the joint effect of both factors that determine the operating conditions and internal factors that determine the properties of power equipment. The combination of such factors is random. Therefore, the use of statistical methods to solve such problems is appropriate in many practical cases.

The most effective methods of control and diagnosis are the so-called non-destructive methods [49, 87], which are usually implemented with the help of specialized computer systems.

According to experts [89, 98], in almost half of cases (48%), the causes of accidents and man-made emergencies that occurred in Ukraine in recent years were poor technical condition of structures, structures, equipment and engineering networks, their considerable wear and tear due to the expiration of the regulatory lifetime - the regulatory resource. The triggering of these facilities in various sectors of the economy is 50 ... 70 percent and tends to increase due to the almost complete suspension of the renewal of fixed assets. In the field of electricity, the operation of the equipment is even higher and reaches 60 ... 80 percent [12, 95]. Simultaneous

replacement of this equipment requires huge financial resources that are not available in Ukraine.

In this regard, the issue of managing the operational life of the reliable and safe use of these facilities is particularly relevant, by determining their actual technical condition and residual life, establishing new operating periods based on their actual condition, as well as guaranteeing safety and reliability their use during this period [12, 95, 96].

It is possible to partially solve this problem by creating new modern control and diagnostics systems, which will allow to determine the actual technical condition of the equipment and to ensure its reliable operation over a period of time over a standard resource.

There are various methods and means of diagnostics of the technical condition of units of electrical equipment, which are well enough described in the known literature. Recently, a number of new directions and techniques have emerged, which are used in solving diagnostic tasks. Among them, the most widespread are the methods and information-measuring systems of functional and test diagnostics. Among them are the of vibration, acoustic emission, thermal and shock diagnostics, which allow to determine relatively simply and quickly the technical condition of individual units of electrical equipment, such as the shipped magnetic circuits of powerful electric machines, bearing units of rotating machines, foundations, platforms and platforms etc. The first three types of diagnostics are functional and the last one is test.

One of the main points when choosing a particular type of diagnosis is the choice of methods of processing diagnostic signals, which in turn are based on a mathematical model, which is the basis of the information-measuring diagnostic system, which needs to be developed. In addition, the development of such information-measuring diagnostic system should consider the possibility of diagnostics of different types of electrical equipment, which during operation can operate in different modes (idling, different load levels, speed, etc.). Considering the operating mode of the equipment, which is diagnosed during its operation, greatly increases the accuracy and reliability of diagnostics.

The thesis defines and solves the actual scientific and technical problem of increasing the accuracy and reliability of the results of diagnosing the units of electrical equipment by considering the modes of its operation.

The scientific novelty of the obtained results is the following:

- for the first time information support of the process of formation of training sets on the diagnostic features of the technical condition of the units and units of the electrical equipment was developed on the basis of substantiated mathematical models of diagnostic signals, algorithmic-software software for statistical evaluation of the diagnostic features and their implementation by means of information-measuring diagnostic system;
- have further developed mathematical models of diagnostic signals that consider both the properties of the object of diagnosis and the modes (speed, electrical, temperature, etc.) in which the object under study works;
- the necessity of considering the modes of operation of electrical equipment in the formation of training sets is substantiated, which, unlike the known methods, increases the accuracy of the results of diagnosing its technical condition;
- forms of presentation of training sets corresponding to certain technical states of electrical equipment units and which can operate in different modes were first proposed and investigated.

The first section discusses some of the physical processes that are formed during the operation of the electrical equipment, and also analyzes their capabilities as information carriers in the diagnostics of the units of this equipment. Particular attention is paid to the consideration of vibrations, which is the most informative process used in the non-destructive diagnosis of electrical equipment. The different modes of operation of electrical equipment are considered. The influence of the mode of operation of electric motors on the peculiarities of the use of their means of diagnosis is analyzed. The modes of operation of the transformers and issues related to their diagnosis are briefly discussed. Existing methods and means of measuring diagnostic signals in individual electrical equipment units are analyzed. A brief overview of the hardware and software tools that can be used as an integral part of the monitoring, control and diagnostics systems of electrical equipment is made.

The second section deals with the construction of mathematical models of diagnostic signals that arise in electrical equipment. Mathematical models of diagnostic signals that consider both possible types of defects and modes of operation of electrical equipment are proposed. The results of the analysis of mathematical models of diagnostic signals substantiate the diagnostic features that make it possible to determine the technical condition of the nodes of the electrical

equipment. Models of formation of training aggregates for information-measuring diagnostic systems have been developed, which consider both the permissible types of defects at certain electrical equipment sites and the possible modes of their operation.

The third section is devoted to the consideration of the structure of the experimental sample of the multilevel information-measuring diagnostic systems, which was subsequently used for processing the experimental data and practical verification of the developed mathematical models and methods for determining the technical condition of the nodes of the electrical equipment. The description of the main types of software developed to manage the work of the created information-measuring diagnostic systems, processing of experimental data and construction of decision rules for the diagnosis and classification of possible defects in the nodes of the electrical equipment.

The fourth section is aimed at reviewing the results of experiments conducted at the laboratory booths of the IED of NAS of Ukraine, as well as using the engines of the own needs of the thermal power plant. The main objective of the experimental studies is to establish quantitative estimates of the proposed diagnostic features, which correspond to different technical states of the investigated electrical equipment units and which can operate in different modes (speed, temperature, load type, etc.). It is the presence in the databases of the information-measuring diagnostic systems training sets, formed on the assessment of diagnostic features, considering both the types of defects of the electrical equipment units, and their modes of operation make it possible to monitor and diagnose the condition of electrical equipment in real time. The approach of constructing training sets, considering both types of possible defects and modes of work of electrical equipment, is offered in this dissertation, provides practical application of information-measuring diagnostic systems implementing Smart Grid technologies.

The theoretical and practical results of the dissertation have been implemented at EURO-RECONSTRUCTION LLC (Darnytska CHP-4, Kyiv) and at the AMIKO Group of Companies in Mykolaiv, which has been confirmed by the relevant acts.

Keywords: *electrical equipment, diagnostics systems, operating modes of electrical equipment.*

Список публікацій здобувача

1. С.М. Герцик, Ю.І. Гижко, М.В. Мислович, Л.Б. Остапчук, Р.М. Сисак. Алгоритми функціонування та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування обладнання об'єктів електроенергетики. *Технічна електродинаміка*. 2016. №4. С. 86-88. (Особистий внесок – розроблено, відлагоджено та експериментально перевірено алгоритм і відповідну програму опитування вимірювальних сенсорів, що встановлені на окремих вузлах ЕО електростанцій)
2. Герцик С.М. Моделі формування навчаючих сукупностей для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Метрологія та прилади*. №5-1(67). 2017. С. 94-97. (Особистий внесок – обґрунтовано матричну форму представлення просторів діагностичних ознак, що, водночас, враховує як можливі дефекти, так і режими роботи ЕО)
3. Герцик С.М., Городжа А.Д., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М., Трощинський Б.О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їх використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. №2. С. 86-94. (Особистий внесок – досліджено багаторезонансні моделі вібраційних діагностичних сигналів, що виникають в результаті ударного збудження у шихтованому магнітопроводі та у корпусі високовольтних електровимикачів)
4. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М.. Особливості використання автономних вимірювальних перетворювачів для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 116-120. (Особистий внесок – проведено експерименти з вимірювання та дослідження вібраційних сигналів на шихтованому магнітопроводі при різних режимах електричного навантаження його обмотки та ступенях механічного пресування пакету пластин заліза)
5. Герцик С.М. Формування навчаючих сукупностей для систем діагностування електроенергетичного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 52. С. 54-61.

6. Герцик С.М., Мислович М.В. Математичні моделі діагностичних сигналів, що характеризують технічний стан електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Праці XI Міжнародної науково технічної конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки»*. Київ. 13-14 квітня 2017 року. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». С. 97-99. (Особистий внесок – обґрунтовано вибір діагностичних ознак, що характеризують технічний стан об'єктів з урахуванням режимів їх роботи)
7. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М. Автономні діагностичні комплекси моніторингу стану вітроелектричних агрегатів. *Праці XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювальна енергетика XXI століття»*. м. Київ. 27 – 29 вересня 2017 р. С. 574-579. (Особистий внесок – запропоновано способи врахування впливу режимів роботи ЕО при визначенні діагностичних ознак)
8. Герцик С.М., Мислович М.В. Особливості побудови систем технічної діагностики електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Збірка тез XXII Міжнародної конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики»*. м. Одеса. 10 – 14 вересня 2018. С. 29. (Особистий внесок – розроблено структуру схему дослідного зразка системи діагностики ЕО, що працює у різних режимах)
9. Zvaritch V., Gyzhko Yu., Myslovych M., Sysak R., Gertsyk S. Linear Processes in Some Simulation Problems of Electric Drivers Information Signals. *Збірка праць Міжнародної конференції «Моделювання-2018» («Simulation-2018»)*. м. Київ. 12 – 14 вересня 2018 р. С. 139 – 142. (Особистий внесок – отримано аналітичні співвідношення для визначення імовірнісних характеристик діагностичних ознак)
10. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М. Принципи побудови систем моніторингу вітроелектричних агрегатів з автономними вимірювальними перетворювачами. *Праці XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювальна енергетика XXI століття»*. м. Київ. 26 – 28 вересня 2018 р. С. 430-433. (Особистий внесок – розроблено та експериментально випробувано блок дистанційних сенсорів вібрацій)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 ІСНУЮЧІ МЕТОДИ І СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЙОГО РОБОТИ	22
1.1 Інформаційні сигнали, що характеризують технічний стан вузлів електротехнічного обладнання	22
1.2 Основні режими роботи електротехнічного обладнання	29
1.3 Методи та засоби вимірювання діагностичних сигналів в окремих вузлах електротехнічного обладнання	38
1.4 Системи, що забезпечують визначення технічного стану вузлів ЕО	41
Висновки до розділу 1	49
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДІАГНОСТИЧНИХ СИГНАЛІВ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ РОБОТУ ВУЗЛІВ ЕО В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЙОГО РОБОТИ	51
2.1 Аналіз детермінованих та стохастичних моделей, що характеризують діагностичні сигнали, які виникають у працюючому ЕО при різних режимах його роботи	51
2.2 Представлення діагностичних сигналів, що виникають у різних вузлах і режимах роботи ЕО з використанням лінійних та лінійних періодичних випадкових процесів	56
2.3 Математичні моделі вібрацій, що супроводжують роботу вузлів електричних машин у різних режимах роботи та обґрунтування на їх основі діагностичних ознак	68

		13
2.4	Моделі формування навчаючих сукупностей, що характеризують стан вузлів ЕО	79
	Висновки до розділу 2	86
РОЗДІЛ 3	ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ (ІВДС) ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕО, ЩО ПРАЦЮЄ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ	88
3.1	Експериментальний зразок ІВДС вібродіагностики вузлів ЕО, що працює у різних режимах	88
3.1.1	Описання дротових каналів вимірювання і передачі даних, що використано у створеному зразку ІВДС	99
3.1.2	Використання бездротових каналів вимірювання і передачі інформаційних сигналів у створеному зразку ІВДС	102
3.2	Програмне забезпечення для створеного зразку ІВДС	105
3.2.1	Програмне забезпечення для управління роботою експериментального зразку ІВДС статистичної діагностики вузлів ЕО	105
3.2.2	Програмне забезпечення для статистичної обробки діагностичних сигналів	113
3.2.2.1	Програмне забезпечення на основі методів спектрально-кореляційного аналізу діагностичних сигналів	113
3.2.2.2	Програмне забезпечення на основі методів гістограмного аналізу діагностичних сигналів з використанням згладжуючих кривих за системою Пірсона	119
3.2.2.3	Програмне забезпечення на основі методів перевірки статистичних гіпотез для діагностики і класифікації технічного стану ЕО	124

		14
3.3	Перевірка метрологічних характеристик дослідного зразку ІВДС	132
3.3.1	Визначення метрологічних характеристик аналогової частини дослідного зразку ІВДС	132
3.3.2	Визначення метрологічних характеристик цифрової частини лабораторного зразку ІВДС	135
	Висновки до розділу 3	138
РОЗДІЛ 4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕО ЗА ДОПОМОГОЮ СТВОРЕНОГО ЗРАЗКУ ІВДС	139
4.1	Опис експериментальних об'єктів та режимів їх роботи	139
4.1.1	Стенд вібродіагностики підшипників кочення	140
4.1.2	Стенд вібровипробувань шихтованого магнітопроводу при різних режимах його роботи	142
4.1.3	Двигуни власних потреб теплової електростанції	143
4.2	Експериментальна перевірка діагностичних ознак технічного стану вузлів ЕО, що працює у різних режимах	145
4.2.1	Експериментальна перевірка діагностичних ознак з використанням даних, отриманих на стенді вібродіагностики підшипників кочення	145
4.2.2	Експериментальна перевірка діагностичних ознак, здійснена за допомогою стенду вібровипробувань шихтованого магнітопроводу	148
4.2.3	Перевірка функціонування ІВДС на електродвигунах власних потреб теплових електростанцій	151
4.3	Формування навчальних сукупностей, що відповідають певним технічним станам та певним режимам роботи досліджуваних вузлів ЕО	152

	15
4.3.1 Побудова навчальних сукупностей за результатами випробувань підшипників кочення на стенді	153
4.3.2 Побудова навчальних сукупностей за результатами випробувань шихтованого магнітопроводу на стенді	156
4.3.3 Побудова навчальних сукупностей за результатами випробувань підшипникових вузлів двигунів власних потреб теплової електростанції	160
4.4 Приклад побудови розв'язуючих правил з діагностики стану підшипників кочення електричних машин	162
Висновки до розділу 4	165
ВИСНОВКИ	167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	169
ДОДАТКИ	179

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕО – електротехнічне обладнання

АЕС – атомна електростанція

ІВДС – інформаційно-вимірювальна діагностична система

ЕМ – електрична машина

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння

ТЕС – теплова електростанція

ГЕС – гідроелектростанція

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач

ГЦН – головний циркуляційний насос

ТЕЦ - теплоелектроцентрально

ПЗ – програмне забезпечення

ПГА – програма гістограмного аналізу

ПСКА – програма спектрально-кореляційного аналізу

ППС – програма перевірки на стаціонарність

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. За результатами статистичних досліджень значної кількості джерел, на сьогодні, за різними оцінками, від 70 до 90% електротехнічного обладнання в енергетиці України вже відпрацювали свій ресурс. Для подальшої надійної експлуатації цього обладнання необхідно повністю його замінити, або оснастити ці об'єкти сучасними засобами моніторингу, контролю та діагностики і з високою вірогідністю визначити залишковий ресурс та забезпечити підвищення їх експлуатаційної надійності. Заміна обладнання потребує великих коштів (близько 50 млрд. \$), яких в Україні просто бракує. Другий шлях передбачає визначення фактичного технічного стану і залишкового ресурсу енергообладнання, що знаходиться в експлуатації, на основі створення та використання сучасних методів і засобів моніторингу та діагностики.

Останнім часом з'явився ряд нових напрямків, методів і систем, які використовуються при розв'язуванні задач діагностики. Так, наприклад, електроенергетичні системи (ЕЕС) розвинутих країн світу переходять до використання інтелектуальних мереж побудованих на основі технології Smart Grid. Практична реалізація такої концепції передбачає створення багаторівневої системи керування, яка забезпечує високий рівень автоматизації всієї ЕЕС, охоплює виробників електроенергії, її споживачів, а також передавальні та розподільчі мережі.

З іншого боку, при створенні багаторівневої системи діагностики для отримання достовірної інформації про технічний стан вузлів електротехнічного обладнання (ЕО), необхідно, як свідчить аналіз ряду опублікованих робіт, враховувати і різноманітні режими його роботи.

Вагомий внесок у розробку моделей, методів та систем моніторингу і діагностики ЕО внесли вітчизняні та іноземні вчені: В.П. Бабак, О.В. Барков, О.Ф. Буткевич, В.А. Гуляєв, В.В. Ключев, Б.Г. Марченко, М.В. Мислович, В.Ю. Кучерук, З.Т. Назарчук, Б.С. Стогній, М.Г. Шульженко, J. Antoni, P.A. Boto, W.A. Gardner, J.I. Teylor та інші.

Крім того, активно працюють у напрямку створення різноманітних засобів і систем діагностики ЕО дослідницькі центри і відомі підприємства Brüel & Kjaer, Westinghouse, National Instruments, ABB та ін.

В той же час, детальний аналіз відомих інформаційних джерел показав, що в них недостатньо приділено уваги впливу динаміки різноманітних режимів роботи ЕО (швидкісних, електричних, температурних та ін.) на результати його діагностування.

Таким чином, розроблення та впровадження моделей, методів і систем діагностування технічного стану вузлів ЕО з урахуванням режимів його роботи є актуальною науково-прикладною задачею, розв'язку якої присвячена дана дисертаційна робота.

Мета і завдання дослідження Метою дисертаційного дослідження є розробка моделей, методів та комп'ютеризованої системи, що їх реалізує для діагностування технічного стану вузлів електротехнічного обладнання з одночасним урахуванням як режимів їх роботи, так і певних видів дефектів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз стандартизованих режимів роботи електротехнічного обладнання, а саме, генераторів, електричних двигунів, трансформаторів з метою вибору прийнятних умов для вимірювання діагностичних сигналів і подальшого проведення їх діагностування з використанням інформаційно-вимірювальних діагностичних систем (ІВДС);
- огляд і аналіз існуючих методів та систем діагностування електроенергетичного обладнання, які використовуються на енергетичних підприємствах;
- розробка математичних моделей діагностичних сигналів, які б враховували як технічний стан об'єктів діагностування, так і режими їх роботи;
- створення моделей формування навчаючих сукупностей для банку даних, що входять до складу ІВДС і які одночасно враховують як можливі види дефектів, так і режими роботи об'єктів діагностування;
- обґрунтування та експериментальна перевірка діагностичних ознак, які дозволяють визначати технічний стан вузлів, що діагностуються;
- розробка дослідного зразку ІВДС, до складу якої входив би блок, що містив би навчаючі сукупності одночасно враховуючі як конкретні види дефектів, так і режими роботи досліджуваних вузлів ЕО;

- проведення випробувань розробленого зразку ІВДС на експериментальних стендах електротехнічного обладнання ІЕД НАНУ, а також на електротехнічному обладнанні діючих енергопідприємств;
- аналіз отриманих результатів дослідження і формування рекомендацій для їх практичного використання і впровадження.

Об'єктом дослідження процес визначення технічного стану вузлів ЕО на основі вимірювання і аналізу діагностичних сигналів, що утворюються у працюючому ЕО з урахуванням режимів його роботи.

Предметом дослідження є системи та методи діагностування електротехнічного обладнання.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використувались методи теорії ІВС, теорії діагностики об'єктів і систем, теорії ймовірностей, а також методи статистичної обробки діагностичних сигналів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше розроблено інформаційне забезпечення процесу формування навчаючих сукупностей за діагностичними ознаками технічного стану вузлів і агрегатів ЕО на основі обґрунтованих математичних моделей діагностичних сигналів, алгоритмічно-програмного забезпечення статистичного оцінювання діагностичних ознак і реалізації їх за допомогою ІВДС;

- дістали подальший розвиток математичні моделі діагностичних сигналів, які враховують як властивості об'єкту діагностування, так і режими (швидкісний, електричний, температурний та ін.), у яких працює досліджуваний об'єкт;

- обґрунтовано необхідність врахування режимів роботи ЕО при формуванні навчаючих сукупностей, що, на відміну від відомих методів, підвищує точність результатів діагностування його технічного стану;

- вперше запропоновано і досліджено форми представлення навчаючих сукупностей, що відповідають певним технічним станам вузлів ЕО і які можуть працювати у різних режимах.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено структуру схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок багаторівневої ІВДС, у який, на відміну від відомих систем, передбачено блок, що забезпечує вибір відповідної навчаючої

сукупності для проведення діагностування вузлів ЕО, котре може працювати у різних режимах;

- запропоновано метод представлення навчаючих сукупностей у вигляді матриці, елементи якої представляють собою еліпси розсіяння, що відповідають як певним видам дефектів окремих вузлів ЕО, так і режимам його роботи.

- запропоновано схему побудови навчаючих сукупностей за об'ємною (3D) матрицею, елементи якої містять сукупності, що відповідають окремим вузлам ЕО, а їх поєднання утворює окремий електротехнічний агрегат. Такий підхід надає можливість практично використати багаторівневу ІВДС для вибору певної навчальної сукупності при визначенні технічного стану вузлів ЕО з урахуванням режимів його роботи.

Теоретичні й практичні результати дисертації впроваджено на ТОВ «ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» (Дарницька ТЕЦ-4, м. Київ) та у Групі компаній «АМІКО», м. Миколаїв, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Представлені в дисертаційній роботі результати отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1] – розроблено, відлагоджено та експериментально перевірено алгоритм і відповідну програму опитування вимірювальних сенсорів, що встановлені на окремих вузлах ЕО електростанцій; [2] – обґрунтовано матричну форму представлення просторів діагностичних ознак, що, водночас, враховує як можливі дефекти, так і режими роботи ЕО; [3] – досліджено багаторезонансні моделі вібраційних діагностичних сигналів, що виникають в результаті ударного збудження у шихтованому магнітопроводі та у корпусі високовольтних електровимикачів; [4] – проведено експерименти з вимірювання та дослідження вібраційних сигналів на шихтованому магнітопроводі при різних режимах електричного навантаження його обмотки та ступенях механічного пресування пакету пластин заліза; [6] – за результатами дослідження математичних моделей діагностичних сигналів обґрунтовано вибір діагностичних ознак, що характеризують технічний стан об'єктів з урахуванням режимів їх роботи; [7] – запропоновано способи врахування впливу режимів роботи ЕО при визначенні діагностичних ознак за результатами вимірювання діагностичних сигналів; [8] – розроблено структуру

схему дослідного зразка системи діагностики ЕО, що працює у різних режимах; [9] – отримано аналітичні співвідношення для визначення імовірнісних характеристик діагностичних ознак; [10] – розроблено та експериментально випробувано блок дистанційних сенсорів вібрацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи були представлені на:

- Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки», Україна, Київ, 2016 р. та 2018 р.;

- Міжнародній науково-технічній конференції «Гіротехнології, навігація керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки», Київ, 13-14 квітня 2017 року, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського;

- Міжнародній науково-практичній конференції "Відновлювана енергетика XXI століття", м. Київ, Україна, 27 – 29 вересня 2017 р. та 26 – 28 вересня 2018 р..

- Міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» м. Одеса, 10–14 вересня 2018 р. – С. 29.

- Міжнародній конференції «Моделювання-2018» («Simulation-2018»), м. Київ, 12 – 14 вересня 2018 р.

- Науковій конференції КПІ ім. Ігоря Сікорського «Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка». Орнатському П.П. 100 років, 22 листопада 2017 року.

Окремі результати дисертаційної роботи обговорювались на наукових семінарах відділів №№5 та 12 ІЕД НАН України.

Публікації. Основні положення і результати роботи викладено в 10 друкованих працях, з них 5 статей – у наукових фахових виданнях України, а також у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus, Compendex, ELIBRARY, 5 тез доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 115 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 182 сторінки, що містить: 168 сторінок основного тексту, 49 рисунків, 8 таблиць, та 2 додатків.

РОЗДІЛ 1

ІСНУЮЧІ МЕТОДИ І СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЙОГО РОБОТИ

Розглянуто деякі фізичні процеси, що утворюються при роботі ЕО а також проаналізовано їх можливості як носіїв інформації при проведенні діагностики вузлів цього обладнання. Більш докладна увага приділена розгляду вібрацій, які є одним із найбільш інформативних процесів, що використовуються при проведенні неруйнівної діагностики ЕО. Розглянуто питання, пов'язані із різними режимами роботи ЕО. Проаналізовано вплив режимів роботи електродвигунів на особливості застосування засобів їх діагностування. Коротко розглянуто режими роботи трансформаторів та деякі питання, пов'язані з їх діагностуванням. Проаналізовано існуючі методи і засоби вимірювання діагностичних сигналів в окремих вузлах ЕО. Зроблено короткий огляд технічних та програмних засобів, що можуть бути використані як складові частини систем моніторингу, контролю і діагностики ЕО.

1.1. Інформаційні сигнали, що характеризують технічний стан вузлів електротехнічного обладнання

При розв'язуванні задачі діагностування технічного стану ЕО основним джерелом інформації виступають фізичні процеси, що супроводжують роботу цього обладнання. Тобто, ці фізичні процеси і виступають у ролі інформаційних діагностичних сигналів, параметри і характеристики яких відтворюють технічний стан певних вузлів ЕО.

Коротко зупинимось на розгляді основних фізичних процеси, які виступають у ролі інформаційних діагностичних сигналів, що використовуються при діагностиці ЕО.

Перш за все зазначимо, що при експлуатації ЕО до його складу входять як рухомі, так і нерухомі вузли. Це впливає і на способи вимірювання діагностичних сигналів, і на методи їх обробки (фільтрація, врахування циклічності, обумовленої частотою обертового електромагнітного поля та ін.). Ця обставина має обов'язково враховуватися при виборі математичної моделі для опису досліджуваних фізичних процесів в вузлах ЕО. Детально ці питання

викладено в [5, 26, 27, 35, 62, 100, 113]. Надалі же зупинимось на розгляді особливостей формування різних діагностичних сигналів, які виникають про роботі окремих вузлів електричних машин.

Вібрації вузлів електричних машин. У роботах [5, 15, 19, 31, 41, 42, 61, 81, 97, 98, 99, 103, 104, 106] показано, що механічні переміщення або вібрації є одним з найбільш інформативних процесів, який може використовуватися при діагностиці ЕО. Виходячи з цього, зупинимось на розгляді сил, що призводять до виникнення вібрацій в різних вузлах ЕМ.

До числа збуджуючих впливів, що викликають вібрації ЕМ, відносяться:

- електромагнітні сили;
- сили, обумовлені роботою підшипників кочення;
- аеродинамічні сили;
- сили, обумовлені механічною незбалансованістю роторів;
- сили, обумовлені роботою щітково-колекторного вузла.

Згідно із [5, 9, 20, 31, 90], інтенсивність *вібрацій за рахунок електромагнітних сил* обумовлена головним чином основною частотою обертового магнітного поля. Частоти їх вібрацій зосереджені в області, яка дорівнює подвоєній частоті мережі живлення. Збуджуючі електромагнітні сили, що діють в повітряному проміжку ЕМ, можуть бути представлені у вигляді силових хвиль синусоїдальної форми, кожна з яких має свою частоту і амплітуду, тобто система збуджуючих сил має полігармонічний характер і є детермінованою.

Особливий вплив на характер вібрацій всієї ЕМ надають *вібрації підшипників кочення*. При установці акселерометрів на досліджуваних вузлах ЕМ (корпус, підшипниковий щит, щітково-колекторний вузол та ін.) вимірюються реалізації випадкового процесу, який являє собою адитивну суміш вібрацій, породжуваних різними збуджуючими силами в ЕМ. Тому істотним моментом при діагностиці того чи іншого вузла ЕМ є вибір місця розташування акселерометра.

Основні моменти, пов'язані з виникненням вібрацій в підшипниках кочення докладно розглянуто [5, 31, 34, 37, 61, 81, 97, 109, 115]. У відповідності з цими роботами, вібрації працюючого підшипника кочення обумовлені чотирма основними факторами:

- резонансами елементів підшипника і його кріплення;

- роботою елементів власне підшипника;
- акустичним випромінюванням;
- зовнішніми вібраціями.

Резонанси елементів підшипника обумовлені коливальними властивостями кожного з елементів підшипника. Дані резонанси виникають на основних частотах під впливом навантаження, а також при наявності дефекту.

Робота основних елементів підшипника (внутрішнє і зовнішнє кільця, тіла кочення і сепаратор) викликає збудження вібраційної енергії за рахунок циклічних напружень або зіткнень на дефекті. Причому кожен з перерахованих елементів має свою характерну частоту, на якій відбувається порушення такої енергії. Існують аналітичні вирази [7, 15, 19, 61, 97], за якими можуть бути визначені ці смуги частот.

При роботі підшипників кочення в місцях контакту кульок або роликів з зовнішнім і внутрішнім кільцем виникають значні напруження. В цьому випадку в місцях контактів кульок, які перебувають в крайньому нижньому положенні, за рахунок дії маси ротора ЕМ створюються великі напруги. Це, в свою чергу, призводить до переміщення матеріалу в атомарному масштабі і утворення пружних хвиль механічної напруги, що викликають *акустичну емісію і вібрацію підшипника*.

Зовнішня вібрація підшипника обумовлена тим, що він є єдиною природною зв'язком між обертовими і нерухомими частинами ЕМ. Отже, підшипниковий вузол може розглядатися як основне місце передачі вібрацій від рухомих вузлів до нерухомих.

Виходячи з результатів робіт [5, 13, 31, 37, 47, 61, 86, 115], елементи підшипника кочення при його обертанні викликають потік імпульсів, характер яких залежить від технічного стану доріжок і тіл кочення, наявності та стану мастила, якості установки підшипника та ін. Саме у цих роботах проведено фізико-математичне обґрунтування моделі вібрацій, породжуваних підшипниковий вузлом. Згідно з цією моделлю вібрації підшипника кочення можна розглядати як імпульсний білий шум зі смугою з верхньою граничною частотою, яка може досягати границі порядку $\approx 2,7$ МГц. У більшості випадків вібрації підшипників кочення досліджуються в частотному діапазоні 0,001 ... 50 кГц [1.5]. Тому очевидно, що в якості моделі такого імпульсу можна вибрати дельта-функцію. Інтенсивність окремих імпульсів залежить від

розмірів нерівностей на металевих поверхнях доріжок колець або тіл кочення, а також від ступеня дефекту і є випадковою. Таким чином, по своїй фізичній природі процес, що викликає вібрації підшипника, являє собою потік випадкових у часі і по інтенсивності імпульсів.

Аеродинамічний шум. Цей процес прямо пропорційно пов'язаний з збільшенням кількості охолоджуючого повітря, що підводиться до ЕМ для відводу тепла, що виділяється. Виникнення аеродинамічного шуму обумовлено [5, 15, 97]:

- вентилятором, в якому відбувається розсічення повітряного струменя крайками лопаток і диском вентилятора;
- обертанням ротора, в результаті чого відбувається зрив вихорів з його поверхні від розтину повітряного струменя головками обмоток ротора;
- повітряним потоком, викликаним зривом вихорів з нерухомих перешкод в вентиляційних шляхах;
- періодичним коливанням тиску на окремих ділянках аеродинамічного ланцюга, а також пульсаціями потоку повітря, що виходить з радіальних вентиляційних каналів ротора і входить в радіальні вентиляційні канали статора.

При вирішенні завдань діагностики особлива увага повинна приділятися визначенню областей частот віброакустичних процесів, порушуваних аеродинамічним шумом, з метою їх подальшої фільтрації.

Вібрації ЕМ, порушені дисбалансом ротора, проявляються на частотах, кратних частоті обертання, і носять, в основному, детермінований характер. Основні причини, що породжують дисбаланс ротора, такі [5, 15, 97]:

- неякісне балансування ротора в зборі;
- тепловий перегрів;
- наявність внутрішніх залишкових напружень в бочці ротора від термо-механічної обробки поковки;
- роз'єднання кріплення посадки заліза ротора на вал.

У свою чергу теплової дисбаланс може виникнути через міжвиткове замикання в обмотці ротора, а також при нерівномірній товщині пазової ізоляції обмотки ротора, внаслідок чого перепади температур в пазах будуть відрізнятися;

Згідно із [15, 97], вібрації, зумовлені дисбалансом ротора, носять, в основному, детермінований характер. Їх частота визначається частотою обертання валу ЕМ. Основні частотні складові, породжувані дисбалансом, знаходяться в низькочастотній області загального спектра частот, порушуваних в ЕМ різними джерелами.

Шум і вібрації щітково-колекторного апарату обумовлені, в основному, наступними причинами технологічного і конструктивного характеру [67]:

- технічним станом колектору, пов'язаним з виступом окремих пластин і прокладок, биттям колектору;
- поганим станом щіток і щіткотримача;
- фізичними процесами, що відбуваються в ковзному контакті;
- режимом роботи ЕМ.

Результати досліджень, наведені в [67], показують, що частотний діапазон віброакустичних процесів, обумовлених роботою щітково-колекторного апарату, розташовується в смузі від 1000 до 8000 Гц, а спектральний склад цих процесів майже не залежить від частоти обертання.

Виходячи з цих даних, можна вважати, що віброакустичні процеси, які виникають в щітково-колекторному апараті ЕМ, носять, в основному, випадковий характер. Це обумовлено механічними контактами поверхонь щіток і пластин колектору, виникненням електричного іскріння в місцях контакту щіток і колектору, шорсткістю поверхні колектору та ін.

Акустична емісія. Акустичні коливання, що виникають в твердому тілі при його навантаженні, використовуються в якості носія інформації про стан об'єкта, що діагностується. Природно, що ці моделі будуються із застосуванням апарату теорії ймовірностей і статистики, оскільки процеси акустичної емісії носять випадковий характер за своєю природою.

В роботі [91] показано, що найбільш часто використовуваними математичними моделями електричного сигналу акустичної емісії є пуассоновський і гауссовський білі шуми [55, 76, 91]. Згідно з цими моделями, а також базуючись на деяких передумовах, вказаних в цих роботах, для подальшого дослідження процесів акустичної емісії слід використовувати квантовий підхід з відповідним вибором класу випадкових процесів, які

найбільш адекватно враховують фізичну природу виникнення вказаних процесів.

Процеси акустичної емісії при роботі ЕО виникають в місцях кріплення даного обладнання до фундаменту, при скручуванні валів ЕМ, що перебувають під навантаженням, при пресуванні пакетів заліза ротора і статора та ін.

Електричний пробій ізоляції. Як приклад таких процесів можна навести розвиток лавиноподібного пробію в повітряному ізольованому проміжку.

Згідно [94], виникнення лавини обумовлюється початковим електроном, який може бути утворений внаслідок однієї з таких причин: розпад негативного іона; емісія з катоду; космічне випромінювання. Такі процеси залежать від часу і напруженості електричного поля, носять чисто випадковий характер і можуть бути описані випадковими процесами з пуассоновским законом розподілу.

Сам процес розвитку лавини також носить випадковий характер, через те, саме він може приймати лавиноподібний характер в результаті утворення великої кількості нових електронів, що виникли внаслідок взаємних зіткнень початкових електронів з молекулами газу (іонізація), або може відбутися втрата електрона (прилипання) і процес не отримає подальшого розвитку. У першому випадку відбувається пробій повітряного проміжку.

В [94] отримано вирази для визначення ймовірності досягнення критичного числа електронів в лавині в залежності від напруженості поля і числа початкових електронів. Там же розглянуті ймовірнісні моделі пробію ізоляції, які враховують також багато зовнішніх факторів, що впливають на напругу пробію (наявність пилу, вологість і т.д.).

В роботі [94], поряд з розглянутими вище процесами електричного пробію повітряного проміжку, описані питання утворення процесів електричного пробію в рідинах і твердих тілах. Показано, що ці процеси носять квантовий випадковий характер.

Нерівномірність кутової швидкості обертання валу. Застосування цього процесу дуже вдало підходить для розв'язку задачі діагностики дизель-електричного агрегату, оскільки даний об'єкт складається з пов'язаних один з одним двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) і електричного генератора. На

сьогоднішній день є безліч методів і засобів, що реалізують технічну діагностику як ДВЗ, так і електричного генератора, однак виникають певні особливості при їх діагностуванні як єдиного електроенергетичного об'єкту.

Як відомо [5], в якості носіїв інформації про технічний стан дизель-електричних агрегатів можуть використовуватися різні фізичні процеси (вібрації, температура, газоаналітичний склад вихлопних газів, нерівномірність кутової швидкості обертання валу дизель-електричного генератора і т. д.). Разом з тим, саме фізичний процес нерівномірності кутової швидкості обертання валу дизель-електричного генератора відтворює достатньо інформації про технічний стан як про вузли власне ДВЗ, так і про електричний генератор. У процесі робочого циклу на валу дизель-електричного генератора розвивається певна потужність, яка для багатоциліндрових дизелів може розглядатися як сумарний результат дії потужностей, що розвиваються при роботі кожного циліндра. Природно, що дискретність робочих циклів в кожному циліндрі, в свою чергу, призводить до нерівномірності обертання колінчастого валу дизеля. Слід зазначити, що основні елементи теорії діагностики обертових вузлів дизель-електричних агрегатів розглянуті в роботах [5].

При роботі циліндро-поршневої групи колінчастий вал дизель-генератора знаходиться під впливом багатьох сил [5], а спостерігається його результуючий рух. Основні з цих сил наступні: сили інерції валу; сили інерції приєднаних до валу частин; моменти сил, викликані роботою циліндрів; моменти сил, викликані навантаженням генератора. Під впливом цих сил кожна точка колінчастого валу приймає участь в обертальному русі навколо деякої осі (надалі вал розглядається як жорстка механічна система). При цьому вал здійснює як обертальний рух навколо осі, так і здійснює коливальні рухи, які супроводжуються його деформаціями (крутильні коливання, поздовжній вигин).

Потужність, що розвивається на валу дизель-генератора a , отже, і крутний момент коливаються в деяких межах біля середнього значення. У цьому випадку основна частота пульсацій, що накладаються на середній момент, дорівнює $f_{\pi} = n_b h / 60$, де n_b - частота обертання об/хв, h - число імпульсів вимушених коливань за один оборот валу, яке залежить від числа циліндрів дизеля, числа тактів роботи, порядку займання палива та ін.

Виходячи з цього, для процесу нерівномірності обертання колінчастого валу дизеля, а, отже, і для зміни збільшень циліндрових потужностей властива стохастична періодичність [5, 43, 57, 85], тобто коли деякі імовірнісні характеристики сигналів поведуться періодично, хоча самі їх реалізації періодичними бути не зобов'язані. Підходячи до побудови математичної моделі такого процесу слід одразу зазначити, що незважаючи на величезну кількість різного роду сигналів кількість математичних стохастичних моделей, за допомогою яких їх можна було б описати, досить обмежена. Для врахування зазначених властивостей сигналів і кількісних оцінок їх імовірнісних характеристик, які періодично змінюються необхідні якісно нові моделі і відповідні методи їх статистичної обробки, що у значній мірі зроблено у роботах [5, 43, 57, 68, 100, 102].

Таким чином, розглянуті у даному підрозділі деякі фізичні процеси, що виникають у працюючому електротехнічному обладнанні, використовуються як носії інформації про технічний стан його певних вузлів. Істотно, що у цьому випадку саме кількісні оцінки параметрів і характеристик використовуються в якості діагностичних ознак, які характеризують технічні стани різних вузлів ЕО.

Одним із визначальних моментів при побудові інформаційно-вимірювальних діагностичних систем (ІВДС) є проведення навчання цієї системи під певні об'єкти діагностування, а також під можливі види дефектів, що найчастіше трапляються у цих вузлах. При проведенні такого навчання особливо важливо врахувати режими роботи ЕО, оскільки режим роботи цього обладнання суттєво впливає на кількісні оцінки параметрів і функціональних залежностей діагностичних ознак.

У наступному підрозділі коротко зупинимось на визначеннях, пов'язаних з режимами роботи ЕО.

1.2. Основні режими роботи електротехнічного обладнання

Для будь-якого електротехнічного об'єкту бажаною є робота у базовому режимі навантаження. Це пов'язано з тим, що робота в змінному графіку неминуче знижує сумарне число годин використання встановленої потужності і, як наслідок, погіршує ключові показники надійності та економічної ефективності. Згідно з [89, 90], саме експлуатація в маневрених режимах

енергетичних електричних машин ТЕС і ГЕС (турбо і гідрогенераторів, електродвигунів власних потреб електростанцій, силових трансформаторів) потребує проведення окремих досліджень фізичних процесів, що утворюються і супроводжують роботу у вказаних електротехнічних об'єктах.

Такі режими спряжені із частими пусками, зупинками, режимами синхронізації, змінами активного і реактивного навантажень, перехідними процесами, змінами швидкісних та температурних режимів окремих вузлів ЕО. Згідно з [79, 89, 90, 95], в останні роки майже всі енергоблоки ТЕС працюють в маневрених режимах. У свою чергу змінні режими призводять до прискореного спрацювання обладнання електроенергетичних машин. Як наслідок такого спрацювання за останні роки спостерігається зростання динаміки виникнення дефектів у різних вузлах основного і допоміжного електроенергетичного обладнання: наприклад, через пошкодження стяжних призм (більш, ніж у 6 разів), через старіння ізоляції обмоток (у 7 разів).

Окрім основного генеруючого електроенергетичного обладнання на ТЕС і ГЕС знаходиться в експлуатації велика кількість (до кількох тисяч одиниць) двигунів власних потреб і трансформаторів, які можуть працювати у різних режимах (швидкісних, температурних, при різному навантаженні та ін.). Так, у відповідності з [12, 89, 96], функціонування енергоблоку 300 МВт на двох корпусах (Трипільська ТЕС) забезпечують 13 різних за потужністю і призначенням двигунів власних потреб, які наведено у таблиці 1.1.

Надійне і безпечне функціонування такої кількості різноманітного електроенергетичного обладнання може бути реалізовано, в основному, двома шляхами. Перший з них передбачає використання засобів планово-попереджувальних ремонтів, що здійснюється ремонтними службами у відповідності із спеціально складеними графіками. Другий шлях – технічне обслуговування і ремонт вказаного обладнання за фактичним його станом. Цей шлях передбачає створення і застосування методів і засобів моніторингу, контролю і діагностики ЕО. Найчастіше практична реалізація вказаних методів і засобів полягає у розробці спеціалізованих ІВДС. Деякі автори називають такі системи – експертними системами [9, 54, 73, 74].

Технічні характеристики деяких двигунів власних потреб ТЕС

Таблиця 1.1.

№ п/п	Призначення двигуна	Потужність, кВт	Кількість на двох корпусах енергоблоку
1.	Конденсаторний насос обезсолюючої установки	200	2
2.	Конденсаторний насос	500	2
3.	Зливний насос підігрівання низького тиску	250	1
4.	Бустерний живильний насос	500	2
5.	Насоси млина	2000	3
6.	Вентилятор млина	630	3
7.	Димосмок	1700	2
8.	Дуттєвий вентилятор (двошвидкісний)	400/800	2
9.	Циркуляційний насос	1000	2
10.	Вентилятор гарячого дуття	320	2
11.	Насос регулювання турбіни	160	2
12.	Маслонасос турбіни	110	1
13.	Насос газоохолоджувача	75	1

Динамічні навантаження генеруючого обладнання суттєво впливають на надійність та ефективність експлуатації допоміжного обладнання, переважну більшість з яких складають двигуни власних потреб. Деякі з цих двигунів, що призначені для забезпечення функціонування енергоблоків ТЕС, наведено у таблиці 1.1.

Таким чином, посиляючись на результати робіт [12, 51, 89, 90, 95, 96], можна стверджувати, що змінні режими робіт електричних машин є проблемними оскільки вони завдають для них підвищених циклічних і електромеханічних навантажень та вібрацій. Тобто, саме ця проблема, пов'язана з експлуатацією ЕО потребує створення та практичну реалізацію відповідних методів і засобів моніторингу, контролю і діагностики. Найбільш придатними для розв'язку таких задач є, як вже вище було підкреслено, ІВДС. Різні види таких систем [5, 7, 9, 30, 35, 42, 54, 61, 69, 70, 71, 73, 74, 80, 82, 87, 101] вже понад 30 років використовуються для вирішення задач контролю і діагностики ЕО.

Як відомо [3, 5, 7, 30, 35, 41, 61], побудова таких систем базується, в основному, на використанні двох принципових підходів:

- з блоком попередньо сформованих навчальних сукупностей, що побудовані із застосуванням кількісних оцінок діагностичних ознак і які відповідають різним видам дефектам певних вузлів ЕО;
- з використанням різних видів нейронних мереж.

В подальшому у даній дисертаційній роботі будемо використовувати саме перший підхід. Однак, перш ніж перейти до викладення подальшого матеріалу, необхідно відмітити суттєвий момент, який зумовив тему даної дисертаційної роботи.

Розробка ІВДС ЕО передбачає проведення циклу досліджень і наступну побудову банку навчальних сукупностей, що відповідають певним технічним станам досліджуваних вузлів ЕО. Як показано у [5, 20, 36, 61], формування вказаних навчальних сукупностей здійснюється за кількісними оцінками діагностичних ознак, вибір яких ґрунтується на результатах побудови та аналізу математичних моделей інформаційних діагностичних сигналів. Разом з тим побудова вказаних навчальних сукупностей здійснювалась, як правило, з урахуванням виключно видів дефектів вузлів ЕО. Але, як вказано у роботах [5, 61], на кількісні показники навчаючих сукупностей суттєвий вплив оказує режим роботи ЕО. Тобто, при проведенні діагностування вузлів ЕО, з використанням ІВДС, необхідно, щоб банки даних таких систем, окрім навчаючих сукупностей, які відповідають певним дефектам ЕО враховували б і режими роботи цього обладнання.

Режими роботи електродвигунів. Як відомо, режими роботи електроенергетичного обладнання регламентуються різноманітними нормативними документами [16, 18, 66]. Що стосується режимів роботи електротехнічного обладнання, то тут слід окремо зупинитись на визначеннях, які стосуються режимів роботи електричних двигунів та трансформаторів.

Так, діючим стандартом ГОСТ Р52766-2007 (МЭК 60034 – 1 – 2004) «Машины электрические вращающиеся» [66] передбачається 8 номінальних режимів, які у відповідності з міжнародною класифікацією мають умовні позначення S1 – S8. Під цими позначеннями розуміється:

- S1 – тривалий режим роботи;
- S2 – короткотерміновий режим роботи;

- S3 – повторно - короткотерміновий режим роботи;
- S4 – повторно - короткотерміновий режим роботи зі впливом пускових процесів;
- S5 – повторно - короткотерміновий режим роботи зі впливом пускових процесів та електричним гальмуванням;
- S6 – межуючий режим роботи;
- S7 – межуючий режим зі впливом пускових процесів та електричним гальмуванням;
- S8 – межуючий режим з періодично змінною частотою обертання.

При виборі засобів діагностування та умов їх застосування для визначення технічного стану електродвигуна суттєве значення мають багато факторів: призначення двигуна, режим роботи, потужність, температура експлуатації та ін. Врахування режиму роботи двигуна має важливе значення при підборі електродвигуна. Потужності двигунів, які вказують в їх технічних характеристиках, приводять для режиму S1 та номінальних умов роботи, крім двигунів із підвищеним ковзанням. Якщо двигун працює у режимі S2 або S3, він нагрівається менше, ніж у режимі S1 і тому припускає більшої потужності на валу.

При роботі у режимі S2 припустима потужність може бути підвищена на 50% при подовженні навантаження 10 хвилин, на 25% - при подовженні на 30 хвилин, на 10% - при подовженні навантаження 90 хвилин.

Для режиму S3 рекомендуються двигуни із підвищеним ковзанням. Крім того, для режиму S3 номінальні дані відповідають тільки певному значенню подовження включення і відносяться до робочого періоду.

Слід також зазначити, що режими S1 - S3 на даний час є основними, номінальні дані на які включаються електромашинобудівними заводами в технічні каталоги. Номінальні режими S4 - S8 введені для того, щоб надалі спростити задачу еквівалентування довільного режиму номінальним, розширив номенклатуру останніх.

Оскільки переважна більшість електродвигунів власних потреб, що забезпечують функціонування генеруючих потужностей електростанцій працюють саме у режимах S1 - S3, коротко розглянемо особливості роботи таких двигунів.

На рис.1.1 представлено графічну залежність, що характеризує роботу електродвигунів у режимі S1.

Як видно з представлених залежностей, електродвигун у момент часу t_1 підключається під незмінне навантаження P_n і тривалий час працює під цим навантаженням. За час від t_1 до t_2 під дією навантаження P_n температура усіх частин електродвигуна досягає температури $T_{ном}$, яка утримується протягом усього часу його експлуатації, при умові, що у цього двигуна не виникне будь яких дефектів (наприклад, втрати мастила у підшипниковому вузлі, виникнення локального короткого замкнення між витками обмотки двигуна та ін.). Такі дефекти можуть призводити до перегріву цих вузлів і наступного виходу із ладу всього двигуна.

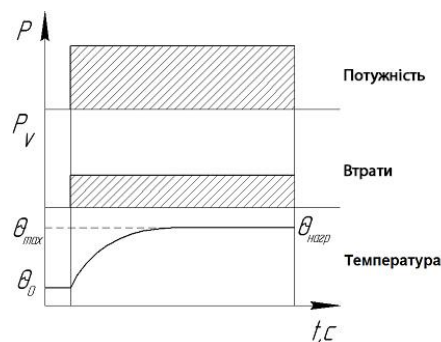


Рис. 1.1 Режим роботи двигуна S1

З точки зору проведення діагностування, режим S1 виявляється найбільш зручним, оскільки, починаючи від моменту часу t_2 електродвигун буде мати параметри характеристик, які передбачені технічними умовами його експлуатації.

При короткочасному режимі роботи електродвигуна S2 (рис.1.2) тривалість включення $\Delta t_{вкл}$ (цикл навантаження) визначається початком t_1 і закінченням t_2 цього циклу навантаження.

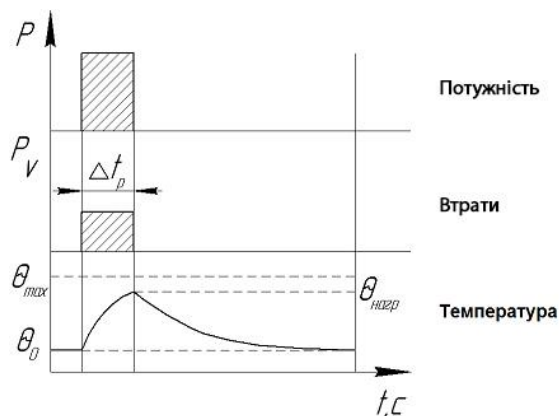


Рис. 1.2 Режим роботи двигуна S2

Під час роботи у цьому режимі тривалості циклу навантаження $\Delta t_{\text{вкл}}$ виявляється недостатньо для досягнення усіма частинами встановленої температури Θ_{max} . Після моменту часу t_2 відбувається зупинка електродвигуна на час достатній для його охолодження до температури не більшу, ніж на 2°C перевищуючу температуру оточуючого середовища.

Повторно – короткочасовий режим роботи S3 (рис. 1.3.) являє собою послідовність ідентичних циклів роботи, кожний з яких включає в себе час роботи при незмінному навантаженні, за який електродвигун не встигає нагрітися до сталої температури і час зупинки, за котрий він не охолоджується до температури оточуючого середовища.

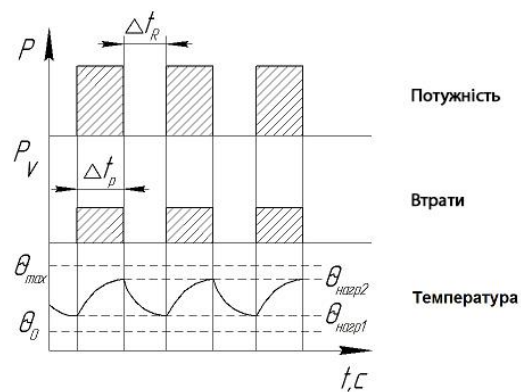


Рис.1.3 Режим роботи двигуна S3

У цьому режимі цикл роботи електродвигуна такий, що пусковий струм не впливає суттєво на перевищення температури. Тривалість циклу навантаження $\Delta t_{\text{вкл}}$ недостатня для досягнення теплової рівноваги і не перевищує 10 хвилин.

Режим S3 характеризується величиною тривалості включення $\Delta t_{\text{вкл}}$, яка у відсотках визначається згідно співвідношенню

$$\Delta t_{\text{вкл}} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \cdot 100\%,$$

де: t_1 - момент часу включення двигуна під навантаження; t_2 - момент відключення електродвигуна від навантаження.

Нормовані значення тривалості включення $\Delta t_{\text{вкл}}$ приймаються такі: (15; 25; 40; 60)%. Саме із цих значень треба виходити при налаштуванні діагностичних систем під час проведення моніторингу, контролю і діагностики електродвигунів.

Як видно із наведеного вище, для діагностування електродвигунів, що працюють у режимах S2 - S3, вимірювання і статистичну обробку діагностичних сигналів (вібрації, акустична емісія, електричні струм і напруга та ін.) слід проводити під час тривалості циклу включення $\Delta t_{\text{вкл}}$. Це забезпечить отримання найбільш достовірних результатів щодо технічного стану досліджуваних вузлів електродвигунів.

Окремої уваги і дослідження при побудові систем діагностування потребує урахування температурного стану окремих вузлів досліджуваних електродвигунів. Що стосується режиму S1, то питань, відносно врахування температурного стану досліджуваних об'єктів, не виникає, оскільки після моменту часу t_2 він лишається незмінним. У свою чергу, при роботі двигунів у режимах S2 - S3, виникає задача врахування зміни параметрів оцінок діагностичних ознак, які визначаються за результатами вимірювання діагностичних сигналів, що представлені процесами різної фізичної природи (вібрації, акустична емісія, електричні струм і напруга та ін.).

Режими роботи електродвигунів S4 - S8 на підприємствах електроенергетики зустрічаються не так часто у порівнянні з режимами S1 - S3, тому у даній дисертаційній роботі їх аналіз проводити не будемо.

Коротко зупинимось на розгляді режимів роботи електричних трансформаторів.

Режими роботи трансформаторів. Функціонування (і у тому числі режими роботи) і перевірка технічного стану трансформаторів регламентуються багаточисельними нормативними документами і Державними стандартами України, наприклад [46], а також Міжнародними стандартами і нормами (МЕК, IEEE, СІПРЕ, ASTM та ін.). На даний час у цьому напрямку найбільш систематизованим документом, який представляє різноманітні (функціональна або тестова) системи діагностичних випробувань і оцінки технічного стану трансформаторів, регуляторів і реакторів є керівництво IEEE Std 62-1995.

У відповідності із цими документами зазвичай розрізняють наступні основні режими трансформаторів:

- робочий режим;
- номінальний режим;
- оптимальний режим;

- режим холостого ходу;
- режим короткого замкнення.

На даний час застосовуються моніторинг силових трансформаторів у їх робочому стані, що надає можливість визначати наявність дефектів на ранніх стадіях їх виникнення. Передбачається також, що моніторинг і діагностика деяких вузлів трансформаторів може проводитись без відключення останніх від електричної мережі.

Саме ця обставина вимагає враховувати під час проведення моніторингу і діагностики режими роботи трансформаторів, оскільки вони суттєво впливають на кількісні оцінки діагностичних ознак. Крім того, при визначенні пріоритетів серед електротехнічного обладнання, відносно їх діагностування, слід враховувати, що у порівнянні з обертовими електричними машинами, трансформатори можна умовно вважати статичними електричними машинами.

У відповідності із керівництвом IEEE Std 62-1995 на сьогодні чітко регламентуються основні вузли та елементи трансформаторів, які підлягають діагностуванню, а також описуються методи випробування, які можуть бути використані при проведенні таких експериментів. Слід також зазначити, що передбачається застосування певних методів діагностування трансформаторів і в разі відключення його від електричної мережі.

Згідно із рекомендаціями Комітетів IEEE, СІПРЕ та DOBLE останнім часом склалася і практично використовується ціла низка методів контролю стану і діагностування трансформаторів, основними з яких є:

- Методи неперервного контролю домішок трансформаторного масла (пошук продуктів деградації);
- Методи віброакустичної діагностики окремих вузлів трансформаторів (бак, шихтований магнітопровід, обмотка та ін.);
- Методи контролю температурного стану вузлів трансформатора.

Серед вказаних методів контролю і діагностики трансформаторів та його обладнання у даній дисертаційній роботі зупинимось на використанні методів вібраційної діагностики для визначення стану пресування шихтованого магнітопроводу із урахуванням різних режимів електричного навантаження його обмоток.

Перейдемо до розгляду існуючих методів і засобів вимірювання діагностичних сигналів, які утворюються під час роботи окремих вузлів електротехнічного обладнання.

1.3. Методи та засоби вимірювання діагностичних сигналів в окремих вузлах електротехнічного обладнання

На сьогодні створення і практичне використання методів та засобів контролю і діагностики ЕО орієнтовано на вирішення задач підвищення його надійності та подовження ресурсу. При застосуванні цих засобів визначальним моментом є вибір фізичних процесів (електромагнітні, теплові, вібраційні, акустоемісійні та ін.), що супроводжують роботу окремих вузлів ЕО і, водночас, є діагностичними сигналами, які підлягають вимірюванню і наступній обробці. Відомі і практично використовуються різні методи діагностування ЕО [5, 7, 10, 20, 31, 34, 35, 36, 41, 47, 61, 63 та ін.]. Ці методи визначаються вимірюваним фізичним процесом, який використовується в якості діагностичного сигналу для отримання інформації про технічний стан досліджуваного вузла.

При проведенні технічного діагностування об'єктів електроенергетики перевага віддається методам неруйнівного контролю, після застосування яких ці об'єкти можуть використовуватися за прямим призначенням. Як відомо [49], неруйнівний контроль в залежності від фізичних явищ, покладених в його основу, поділяють на основні види: магнітний; електричний; вихрострумний; радіохвильовий; тепловий; оптичний; радіаційний; акустичний; проникаючими речовинами.

У даній дисертаційній роботі в якості основних джерел отримання діагностичної інформації розглядаються вібраційний діагностичний сигнал, який виникає у досліджуваних вузлах ЕО. Ці сигнали вимірюються безпосередньо на працюючому обладнанні (функціональна діагностика). Методи тестової діагностики ЕО в даній роботі не застосовувались.

Згідно [5, 7, 40, 51, 52, 75, 88], головною причиною аварій і ремонтів ЕМ є порушення ізоляції як між витками, так і між обмоткою і корпусом. Другим після обмотки за кількістю відмов є підшипниковий вузол. На інші вузли (щітково-колекторний вузол, система вентиляції та ін.) припадає усього 1 ...

2% відмов. У даній роботі основна увага приділена питанням діагностування підшипників кочення та шихтованого магнітопроводу ЕМ.

Для отримання інформації про технічний стан вузлів електро-технічного обладнання використовуються різні процеси, що виникають у ньому під час роботи, а саме - їх чисельні характеристики (параметри). Для проведення діагностики конкретних вузлів ЕМ зазвичай використовують такі параметри [5, 61, 67, 87]:

обмотки: електричний опір міжвиткової ізоляції; температура поверхні обмоток; величина магнітної індукції;

шихтований магнітопровід: вібрації (переміщення, швидкість, прискорення) лобових частин; величина магнітної індукції; температура поверхні магнітопроводу;

підшипниковий вузол: вібрації (переміщення, швидкість, прискорення) підшипникового щита; температура підшипникового щита;

станина і місця її кріплення до фундаменту: акустична емісія; вібрація станини;

щітково-колекторний вузол: перехідний опір (провідність) ковзаючого контакту; вібрації (переміщення, швидкість, прискорення) щіткотримача; температура щіткотримачів;

елементи системи охолодження ЕМ: аеродинамічний шум власне крилчатки вентилятора; вібрація поверхонь циркуляційних каналів для переміщення холодоагенту ЕМ.

Коротко зупинимося на виборі типових вузлів електричних машин (ЕМ), які нададуть можливість обґрунтувати необхідність врахування режимів роботи ЕМ (швидкісний, електричного навантаження, температурний та ін.) при проведенні вимірювань інформаційних сигналів і наступній діагностиці цих вузлів. Найбільш типові режими у працюючих ЕМ визначаються обертовою швидкістю, потужністю (електричним або механічним навантаженням) та температурою. У відповідності із сформульованою задачею надалі розглянемо питання вимірювання віброприскорення, на підшипникових вузлах ЕМ і на пакеті шихтованого магнітопроводу. У подальшому, результати проведення експериментів на цих об'єктах при різних параметрах вказаних вище режимних процесів, що супроводжують роботу

ЕМ, дозволять встановити залежності вібраційних характеристик досліджуваних вузлів від режимів роботи ЕМ.

Коротко зупинимось на особливостях вимірювання вібрацій на поверхнях підшипникових вузлів і шихтованому магнітопроводі.

Підшипниковий вузол. Згідно [2, 16, 17, 18], вимірювання вібрацій здійснюється за допомогою сенсорів переміщення, швидкості або прискорення, які розміщуються на підшипникових вузлах ЕМ в трьох взаємно ортогональних напрямках (осі X , Y , Z). По осях X і Y вібрації вимірюються в радіальному (по відношенню до обертового валу ЕМ), а по осі Z - в осьовому. Синхронне вимірювання вібрацій за вказаними трьома напрямками дозволяє при використанні відповідної обробки досліджувати поле вібрацій, що істотно розширює можливості діагностики.

Як підкреслено у роботах [5, 7, 61, 81], висока інформативність вібраційного діагностичного сигналу, що вимірюється на підшипниковому вузлу ЕМ, обумовлена тим, що підшипники кочення є єдиним контактним зв'язком між нерухомими і обертовими частинами ЕМ і в них зосереджуються і взаємно накладаються вібрації, що збурюються в різних вузлах досліджуваних машин.

Додаткову інформацію при діагностиці підшипників може дати використання в якості діагностичних сигналів і інших фізичних процесів, наприклад, температури, вимірюваної за допомогою термопар або спеціальних контактних термометрів, які можуть розташовуватися безпосередньо на підшипникових щитах ЕМ.

Шихтований магнітопровід. Згідно з [5, 40, 51, 52, 63, 101], для шихтованих магнітопроводів статора потужних ЕМ одними з найбільш поширених несправностей є дефекти, пов'язані з ослабленням пресування крайніх пакетів лобових частин статора (так звана «розпушовка»), а також механічний обрив стягуючих стрижнів або гайок, що кріплять зовнішній притискний фланець. Результати останніх досліджень [51, 89] показують, що ці дефекти часто пов'язані з проявом «аномальних вібромеханічних явищ» в сердечниках статора потужних ЕМ. Особливо ці явища стають помітними, коли зі збільшенням діаметра сердечника статора ЕМ його власна частота починає наближатись до частоти радіальних сил магнітного тяжіння в повітряному зазорі.

Ефективно виявляти подібні дефекти можна шляхом застосування статистичного спектрального аналізу для обробки вібраційних діагностичних сигналів, які вимірюються за допомогою відповідних вібраційних сенсорів. Вимірювання, реєстрація і подальша обробка цих вібрацій може здійснюється за допомогою автоматизованих ІВДС. Описання деяких з них приведено, наприклад, в [5, 61, 63]. При здійсненні даних експериментів, в разі застосування зазначених ІВДС первинні сенсори розташовуються в торцевих частинах, на притискних фланцях статора (або бочки ротора) ЕМ. Даний підхід [63] дозволяє також встановлювати ступінь пресування шихтованого магнітопроводів статора (а для деяких типів ЕМ і ротора) ЕМ.

Додаткову інформацію про технічний стан сердечника ЕМ можна отримувати і за даними температури, вимірюваної за допомогою різних термопар, розташованих безпосередньо в пазах сердечника магнітопроводу ЕМ.

На сьогоднішній день існує достатня кількість методів, які передбачають використання в якості діагностичних сигналів різноманітні фізичні процеси. Так, наприклад, в роботі [51] для діагностики стану сердечника статора запропоновано спільно використовувати методи контролю міжлистової ізоляції окремих пластин сердечника статора і температурного нагріву зубцової зони. Деякі методи контролю і діагностики шихтованих магнітопроводів ЕМ регламентуються різними інструкціями, наприклад [88].

Певну інформацію про технічний стан магнітопроводів можна отримати, вимірюючи величину електромагнітного поля в повітряному зазорі. Його вимірювання здійснюється за допомогою індукційних сенсорів і подальше дослідження проводиться за допомогою спеціальної ІВДС.

Як відомо [5, 41, 42, 69, 70, 71, 87], вимірювання, обробку та визначення технічного стану досліджуваного ЕО здатні забезпечити різні види ІВДС. У наступному підрозділі розглянемо деякі види таких систем, приділивши увагу системам, що орієнтовані на вібродіагностику вузлів ЕО.

1.4. Системи, що забезпечують визначення технічного стану вузлів ЕО.

На даний час відома і практично використовується велика кількість різноманітних засобів, приладів і систем, призначених для моніторингу, контролю і діагностики ЕО. У подальшому викладенні матеріалу

дисертаційної роботи основну увагу будемо приділяти саме розгляду таких приладів і систем, орієнтованих на використання в якості носія первинної інформації процесу вібрації.

Як відомо [41, 42, 44, 70, 73, 74], системи вібродіагностики досить наукомісткі і дорогі, у багатьох випадках випускалися в одиничних екземплярах або дрібними серіями і призначалися для використання в системах спеціального призначення. Ці фактори на початку 90-х вплинули не тільки на розвиток систем і засобів вібродіагностики в СРСР але і на розвиток цього наукового напрямку в розвинених країнах, таких як Данія, Німеччина, США, та ін.

Створення ІВДС, орієнтованих на розв’язок задач моніторингу, контролю та діагностики ЕО передбачає, перш за все, розробку структурної схеми такої системи, яка базується на певному програмно-апаратному забезпеченні. Саме програмне забезпечення визначає призначення і порядок застосування ІВДС. Як правило, до складу такого забезпечення входять 3 основних види програм:

- Управління роботою власне ІВДС;
- Опрацювання вимірних експериментальних даних;
- Прийняття діагностичних рішень.

Розробкою вказаних програмних продуктів займаються як безпосередньо виробники систем вібродіагностування, так і спеціалізовані фірми. Наприкінці 90 – х років минулого сторіччя була створена низка програмних продуктів для дослідження вібрацій і вібродіагностики, які використовувалися в системах спеціального призначення. Серед найбільш відомих розробників програмних продуктів для систем вібродіагностування слід відмітити фірми National Instruments (Advantech), Brüel & Kjær, ABB, Lukas Datalab, Vibra-Metrics Inc., та інші.

Серед розробок перелічених фірм, слід, перш за все, відмітити програмне забезпечення, яке випускається компаніями Advantech і National Instruments. Наприклад, National Instruments випускає програмне забезпечення HiQ 4.0, яке має досить об’ємні бібліотеки математичних функцій та широкі можливості аналізу вібраційних сигналів і даних для побудови системи вібродіагностики, а також спеціалізовані модулі тривимірної візуалізації даних. До подібного програмного забезпечення відносяться програмні пакети LabView, LabWindows, BridgeView компанії National Instruments і Genie, PCLS-81 фірми Advantech.

Фірмою Brüel & Kjær створена і практично використовується ціла низка програм, призначених для різноманітних засобів і систем вібродіагностування ЕО. Спеціалізоване програмне забезпечення Vibroexpert 400, що реалізує алгоритми вібродіагностування різноманітного обладнання використовується не тільки у виробках цієї фірми, а і поставляється разом із продукцією інших виробників засобів діагностування.

Для експертних систем вібродіагностики створений пакет MICA IRIS Power Engineering, який дозволяє формувати бази даних не тільки вібраційних, але і температурних параметрів. Широкі можливості додатків має програмний пакет FAS (Fundamental Acquisition Software), розроблений фірмою Zonic Corporation. Він дозволяє оцінювати функцію когерентності, взаємні енергетичні спектри, проводити трансформацію даних в формати інших пакетів, таких як Spectral Dynamics STAR Modal і Star Acoustics а також формат Matlab.

Спеціалізовані програмні пакети для задач вібродіагностики також були розроблені MJA Dynamics (GridCASE PC) і GenRad Ltd MIDAS (Machinery interactive display analysis software). Як приклад використання пакету MIDAS можна привести використання його на підприємстві Monroe Power Plant в Мічигані. Система вібромоніторингу складалася із 200 сенсорів, встановлених на 20 енергетичних об'єктах, включаючи 4 основні турбіни, 8 бойлерних насосів і їх силових турбін та 8 вентиляторів. Ця система складалася з аналізатора GR 2517 фірми GenRad Ltd, сполученого з DEC Micro Vax за стандартом інтерфейсу IEEE-488 DMA.

Компанія Lukas Datalab розробила пакети прикладних програм Medusa, Spider Package, які можна використовувати для завдань вібродіагностики. Пакети розроблені для операційної системи UNIX і можуть працювати в складі потужних робочих станцій таких як SUN, HP-Apollo, DEC. Програмне забезпечення Pafec Spider може бути розширено програмним пакетом Rotating Machinery package для дослідження підшипників кочення, зубчастих передач, небалансу і модального аналізу валів енергетичного обладнання.

Можна навести ще багато розробок програмних продуктів, призначених для систем вібродіагностування. На сучасному комерційному ринку їх величезна кількість. Але необхідно відзначити, що коштують ці програмні

продукти недешево та підбираються для вирішення конкретного класу задач і під певні апаратні засоби.

Серед систем вібродіагностування, які базуються на використанні вказаних програмних продуктів, слід перш за все, відзначити системи виробництва компаній National Instruments, Brüel & Kjær, ABB, Westinghouse та ін.

Компанія National Instruments спільно з фірмою Advantech випускають високоінтегровані промислові процесорні плати з підтримкою процесорів РСА-6159/Н/Л або серії РХІ-8150, які дозволяють розробляти гнучкі, високотехнологічні і головне, недорогі системи вібродіагностики. Найбільш вдалою є стратегія цих компаній, орієнтована на розробку апаратних засобів, які дають можливість будувати системи вібродіагностики на базі персональних комп'ютерів. Тобто, апаратно система містить плату введення-виведення аналогової інформації АЦП/ЦАП, обчислювального пристрою на базі персонального комп'ютера і спеціального програмного забезпечення.

Компанія Brüel & Kjær має більш ніж 60 річний досвід розробки вібровимірювальної апаратури. У 1998 році Brüel & Kjær уклала стратегічний альянс з корпорацією Schenck. На даний час однією з найбільш поширених систем вібромоніторингу ЕО, побудованих альянсом Brüel & Kjær – Schenck є система Vibrocontrol-4000, яка дозволяє реєструвати вібрації валу, підшипників, зміну робочої частоти і багато інших параметрів. Система має 2-х канальну компоновку для всіх модулів моніторингу та систему сполучення з персональним комп'ютером. На базі системи Vibrocontrol-4000, з використанням програмного забезпечення Vibroexpert CM-400, розроблена потужна система діагностики і моніторингу Vibrosam 4000, яка має 31 канал реєстрації. Ця система застосовується для проведення діагностики і моніторингу блоку парових турбін потужністю 50 МВт. Найбільш потужною системою, що випускається альянсом Brüel & Kjær - Schenck, є система "Compass". Вона має модульну структуру і може бути адаптована для діагностики і моніторингу широкого діапазону машин і механізмів. Система дає можливість проводити вібромоніторинг турбін, компресорів, насосів, коробок передач, підшипників і т.д. Така система встановлена на 3-му блоці Рівненської АЕС для вібромоніторингу головних циркуляційних насосів ГЦН-195М.

Компанія АВВ працює над створенням комп'ютерних систем вібромоніторингу, починаючи з початку 1980, і накопичила величезний досвід в цій області. Однією з останніх її розробок є нове покоління систем вібраційного моніторингу VibroView, яке дозволяє оперувати в реальному масштабі часу з великою кількістю точок вимірювання, аналізувати тренд і формувати сигнал, який вказує на появу несправностей на ранніх стадіях. Система має можливість функціонування з віддаленим терміналом за стандартом TCP/IP. АВВ також розроблена система вібродіагностики ViDiamon, яка в якості вихідних використовує дані, сформовані системою моніторингу VibroView. Система діагностики ViDiamon базується на методах побудови експертних систем і методах розпізнавання образів, заснованого на методі застосування коефіцієнтів впливу.

Остання розробка компанії АВВ - промислова інформаційна система АВВ 800xA для клієнтів як енергогенеруючого так і енергорозподільчих секторів. Система підтримує такі існуючі системи автоматичного управління як Symphony, Procontrol P 14, AC 800M та інші. Застосувавши систему АВВ 800xA, користувачі мають можливість використання більш ранніх інформаційних рішень фірми АВВ і модернізувати їх, використовуючи технології, закладені в цій сучасній системі. Існуючі інженерні дані (бази даних) автоматично інтегруються і використовуються як об'єкти в системі АВВ 800xA.

Вже близько 30 років знаходиться в експлуатації експертна система діагностики компанії Westinghouse [34], яка вимірює і оброблює діагностичну інформацію, що надходить від близько 500 сенсорів встановлених на ЕО 5-ти електростанцій, розташованих у штаті Техас (США). Система здійснює моніторинг рівня вібрацій корпусу підшипників турбогенераторів, двигунів власних потреб, компресорного та іншого обладнання електростанцій. Крім вібрацій вказаного обладнання система здійснює моніторинг технічного стану іншого ЕО за результатами вимірювання діагностичних сигналів іншої фізичної природи (температура, електричні струм і напруга та ін.)

Розробку і виробництво вібродіагностичної апаратури у свій час було налагоджено і у колишньому Радянському Союзі. Так, у 80-ті роки минулого століття на ПО «ВЕДА» (м. Київ) серійно випускались засоби віброконтролю для різних машин і механізмів. У 1996 році дане підприємство було

реорганізовано в ЗАО «ВіброЩіт». Відтоді підприємством серійно випускається апаратура неперервного контролю вібрацій серії ВВК-331 і серії ВСВ, які оснащуються окремими пристроями, призначеними для контролю вібрацій підшипника, валу, вигину валу, швидкості обертання валу, лінійних переміщень.

На цьому ж підприємстві виробляється пристрій ВК-431, який призначений для неперервного вимірювання і контролю рівня вібрацій корпусу підшипників турбогенераторів, компресорного та іншого роторного обладнання. До складу пристрою входить однокомпонентний акселерометр типу ВДТ-131М або двокомпонентний акселерометр ВДТ-231М (робоча смуга частот 10 Гц - 10000 Гц). Пристрій може бути зв'язаний з персональним комп'ютером через інтерфейс RS-232 і використовуватися як складова частина інформаційно-вимірювальної системи вібродіагностики з більш досконалим алгоритмом функціонування.

На даний час у ряді установ НАН України проводяться дослідження зі створення та експериментальної перевірки методів та засобів моніторингу контролю і діагностики електроенергетичного обладнання. Серед таких установ слід перш за все відмітити Інститут електродинаміки НАН України, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Фізико – механічний інститут ім. Г.В. Карпенко НАН України.

Так, в Інститут електродинаміки НАН України створені методи вібродіагностики засновані на статистичному підході. Особливістю даного підходу є те, що завдання побудови системи вібродіагностики вирішується в кілька етапів: вибір математичної моделі вібрацій досліджуваних вузлів, перевірка відповідності математичної моделі експериментальним даним, вибір на базі математичної моделі можливих діагностичних ознак, їх аналіз, вибір найбільш інформативних діагностичних ознак, формування навчаючих сукупностей і побудова розв'язуючих правил із застосуванням перевірки статистичних гіпотез і теорії розпізнавання образів. Створені методи використовуються при розробці алгоритмів функціонування ІВС діагностування. Програмне забезпечення для обробки експериментальних даних включають в себе статистичний спектральний, гістограмного аналіз зі згладжуванням, авторегресійний аналіз. Побудова розв'язуючих правил базується на класичних процедурах Неймана – Пірсона, Байєсових процедурах

та мінімаксному критерії. Було розроблено кілька типів дослідних зразків ІВС вібродіагностики, які успішно пройшли експериментальну перевірку на електроенергетичних підприємствах України. Результати цих досліджень викладено у багаточисельних роботах, наприклад, [5, 23, 30, 31, 41, 42, 61, 62, 63, 69, 70, 71, 82, 83 та ін.].

В Інституті проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України розроблений і введений в дослідну експлуатацію інформаційно-вимірювальний комплекс «Віброскоп». Комплекс створений на базі персонального комп'ютера, двох плат L- 1250 АЦП з процесором обробки сигналів. Комплекс забезпечує підключення штатних п'єзоперетворювачів віброприскорення опор підшипників і засобів вимірювання відносних переміщень шийок роторів валопроводу турбоагрегату з безконтактними перетворювачами переміщень параметричного типу. Програмні та технічні засоби комплексу «Віброскоп» знаходяться в дослідній експлуатації в складі АСУ ТП блоку Київської ТЕЦ-5 і Харківської ТЕЦ-5 [79].

Результати теоретичних та прикладних досліджень, виконаних у Фізико – механічному інституті ім. Г.В.Карпенко НАН України знайшли свою реалізацію при розробці вібродіагностичної системи «ПУЛЬС». Побудована система базується на застосуванні швидкодіючого модулю аналого-цифрового перетворення Е20-10 фірми L-са з USB 2 портом та неперервного 16 бітового блоку збору даних по USB2 інтерфейсу. Частота перетворення аналого-цифрового перетворювача встановлюється програмно від 1 мГц до 10 мГц. В основу блоку прийняття рішення цієї системи покладено результати взаємнокореляційної та взаємносектальної обробки вібраційних сигналів обертових механізмів (турбогенератори, бурові установки, електродвигуни, газоперекачувальні агрегати і т.п.).

У таблиці 1.1 наведені основні ІВДС, що використовуються для вібродіагностування електроенергетичного обладнання. Серед основних характеристик цих систем окремо виділений частотний діапазон вимірюваних сигналів, як однієї з найбільш важливих характеристик при визначенні технічного стану електроенергетичного обладнання.

Таблиця 1.1

Системи вібродіагностування електротехнічного обладнання

№ № пп	Тип приладу або системи, виробник, країна	Вид вимірюваного сигналу	Діапазон вимірюваних частот, кГц	Об'єкти, що діагностуються
1.	ІВДС Advantech - National Instruments, США	Вібрації	10 Гц - 40 кГц	Генератори, електродвигуни, трансформатори.
2.	ІВДС "COMPASS" Brüel & Kjær - Schenck, Данія	Вібрації	0 – 10 кГц (мод.: 3013, 3024). 0 – 100 кГц (мод: 3010, 3012, 3021, 3031).	Електродвигуни, компресори, насоси (ГЦН-195М).
3.	VibroView (ViDiamon), ABB, Німеччина	Вібрації	0,1 Гц – 50 кГц	Генератори, електродвигуни, насоси, трансформатори.
4.	ІВДС Westinghouse, США	Вібрації, температу-ра, електр. параметри	0 – 40 кГц (по вібраціях)	Турбогенератори, електродвигуни, трансформатори.
5.	ІВДС ВК-431, ЗАТ «Вібро – Щит», Україна	Вібрації	10 Гц – 10 кГц	Турбогенератори, роторні машини (підшипники кочення та ковзання)
6.	ІВК "Віброскоп", Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України	Вібрації	1 Гц – 30 кГц	Турбогенератори, (підшипники ковзання, шийки роторів валопроводу)
7.	ІВДС «ПУЛЬС» Фізико–механічний ін-тут ім. Г.В.Карпенко НАН України	Вібрації	1 Гц – 30 кГц	Турбогенератори, Роторні машини
8.	Багаторівнева ІВДС з урахуванням режимів ЕО Інститут електродинаміки НАН України	Вібрації	20 Гц – 30 кГц (з акселерометром АВС 017)	Генератори, електродвигуни власних потреб, трансформатори.

Із наведених нижче матеріалів можна констатувати, що для розробки систем вібродіагностування електроенергетичних об'єктів залучаються, як правило, декілька фірм розробників як програмного забезпечення, так і апаратної їх частини. На даний час більшість таких систем мають інтерфейси стандарту GPIB або IEEE 488 з максимальною швидкістю передачі даних 1

Мбайт/сек. Новий стандарт інтерфейсів GPIB, названий HS 488, збільшує швидкість передачі даних до 8 Мбайт/сек. Найбільш перспективним стандартом є стандарт передачі даних PXI, який має швидкість передачі до 132 Мбайт/сек. Серії апаратних засобів PXI і VXI під такий стандарт передачі даних випускаються фірмою National Instruments. Слід зазначити, що такі апаратні засоби можуть з успіхом застосовуватися для побудови систем вібромоніторингу, віброконтроля і вібродіагностики вузлів ЕО. Що стосується спеціалізованого програмного забезпечення у наведених вище системах, яке використовується для побудови розв'язуючих правил, що базуються на виборі і порівнянні отриманих у процесі вимірювання експериментальних даних зі сформованими навчаючими сукупностями, то описання подібних алгоритмів та відповідного програмного забезпечення у відомих літературних джерелах та електронних ресурсах знайти не вдалось. Також не вдалося знайти у відповідних джерелах інформацію, - яким чином у відомих діагностичних системах і пристроях враховується режим роботи (швидкісний, температурний, електричного навантаження та ін.) досліджуваного ЕО.

Важливим моментом побудови ІВДС є вибір математичної моделі інформаційних сигналів такої системи. У наступному розділі розглянемо ці питання.

Висновки за розділом 1

1. У даному розділі проведено аналітичний огляд існуючих методів та технічних засобів, що забезпечують діагностування основних видів електротехнічного обладнання.

2. На основі розгляду стандартизованих режимів роботи електротехнічного обладнання, вперше обґрунтовано необхідність врахування режимів роботи електротехнічного обладнання при формуванні навчаючих сукупностей для діагностичних систем.

3. Проаналізовано фізичні процеси, що утворюються при роботі різних видів електротехнічного обладнання та розглянуто інформативність при їх використанні як діагностичних сигналів. Доведена доцільність використання методів вібродіагностики для визначення технічного стану вузлів ЕО при одночасному врахуванні режимів роботи ЕО.

4. Обґрунтовано вибір основних видів ЕО та узгоджено стандартизовані режими їх роботи (S1 – S3), при яких забезпечується найбільш достовірне вимірювання (з точки зору діагностики) інформаційних сигналів.

5. Проведено огляд технічних засобів та програмного забезпечення, що можуть бути використані як складові частини систем моніторингу, контролю і діагностики електротехнічного обладнання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДІАГНОСТИЧНИХ СИГНАЛІВ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ РОБОТУ ВУЗЛІВ ЕО В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЙОГО РОБОТИ

В даному розділі розглянуто питання побудови математичних моделей діагностичних сигналів, які виникають у працюючому електротехнічному обладнанні. Запропоновано математичні моделі описання діагностичних сигналів, що водночас враховують як можливі види дефектів, так і режими роботи електротехнічного обладнання. За результатами аналізу математичних моделей діагностичних сигналів обґрунтовано діагностичні ознаки, які надають можливість визначати технічний стан вузлів ЕО, що може працювати у різних режимах. Розроблено моделі формування навчальних сукупностей для ІВДС, які враховують одночасно як припустимі види дефектів у певних вузлах ЕО, так і можливі режими їх роботи.

2.1. Аналіз детермінованих та стохастичних моделей, що характеризують діагностичні сигнали, які виникають у працюючому ЕО при різних режимах його роботи.

У відповідності з [5, 13, 34, 43, 55, 60, 61, 62], для побудови математичних моделей діагностичних сигналів, в основному, використовуються два підходи, які базуються на використанні як детермінованих, так і статистичних методів.

Детерміновані методи передбачають використання в якості математичної моделі діагностичних сигналів детермінованої функції часу. У цьому випадку повне описання діагностичного сигналу надають його амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристики, визначення котрих у детермінованій постановці задачі і у передбаченні лінійного перетворення вимірюваного сигналу, не складає труднощів.

Детерміновані сигнали зручно розглядати як окремий (вироджений) випадок стохастичних процесів за умови, що дисперсія таких процесів прямує до нуля. Такий спосіб суджень іноді зустрічається як в теоретичних, так і в прикладних наукових роботах [5, 34, 87].

Разом з тим, як справедливо стверджується у [5, 61], застосування детермінованих методів при описанні діагностичних сигналів, що супроводжують роботу ЕО, не можна вважати задовільним і аргументованим, тому що переважна більшість вимірюваних процесів, що виникають в досліджуваних вузлах ЕО, носять випадковий характер за своєю природою. Виходячи з цього, застосування ІВДС, що базуються на статистичних методах надає можливість за серією результатів певного вимірювального експерименту рекомендувати алгоритм, за яким обчислюється найкраще в імовірнісному сенсі наближення вимірюваного параметра. Крім того, при використанні таких ІВДС, враховується міра неправильних рішень про технічний стан досліджуваних вузлів, а також з'являється можливість оцінити середню кількість можливих невірних рішень, їх розкид і ін. Доцільність і аргументованість саме статистичного підходу при побудові математичних моделей діагностичних сигналів, а також програмного забезпечення для обробки експериментальних даних у складі ІВДС, підтверджується багаточисельними роботами зарубіжних та вітчизняних авторів [5, 7, 36, 60, 61, 100, 102, 103, 104, 111 та ін.].

Невід'ємною частиною ІВДС технічної діагностики є безпосередньо сам об'єкт діагностики. Для впевненого проведення діагностики того або іншого вузла досліднику, з одного боку, необхідно мати математичну модель, яка на підставі фізики явищ досить достовірно описувала б вимірювані процеси, що виникають в досліджуваних вузлах, а з іншого боку, потрібно мати у своєму розпорядженні ІВДС, побудованої з урахуванням апіорних даних про інформаційні сигнали, які можуть бути отримані за результатами аналізу математичної моделі досліджуваних процесів. При цьому в хронологічному плані модель є первинною, а методи (детерміновані або статистичні), покладені в основу використовуваної ІВС, - вторинними, оскільки вони розробляються відповідно до обраної моделі.

На підставі проведеного аналізу цілого ряду наукових робіт [5, 31, 35, 36, 61, 71, 74, 80, 100, 108, 111, 112 та ін.], можна стверджувати, що при створенні ІВДС діагностики промислового обладнання необхідно використовувати статистичні методи обробки інформаційних сигналів, тобто в основу такої ІВДС повинна бути покладена імовірнісна математична модель.

Слід також зазначити, що побудова вказаної ІВДС є комплексною задачею, яка включає в себе:

- розроблення математичних імовірнісних моделей інформаційних сигналів;
- теоретичне обґрунтування можливих діагностичних ознак на основі результатів дослідження розроблених математичних моделей;
- розробку програмно-технічного забезпечення ІВС діагностики; вибір діагностичних просторів і формування в цих просторах навчаючих сукупностей;
- побудову розв'язуючих правил з діагностики та класифікації конкретних видів дефектів вузлів досліджуваного обладнання.

У відповідності зі створеними моделями діагностичних сигналів, розроблювана ІВДС, повинна в себе включати: основні програмно-технічні засоби; допоміжні засоби забезпечення і управління роботою основних засобів.

Основні програмно-технічні засоби, що входять до складу ІВДС статистичної діагностики, призначені для вимірювання, обробки, аналізу і відображення інформації про стан об'єкта діагностування. Вони досить докладно розглянуті в численних літературних джерелах, наприклад [3, 5, 41, 42, 61, 73 та ін.].

Вибір засобів забезпечення і управління ІВС, що включають в себе інформаційно-довідкове, алгоритмічне (типові і спеціальні програми для ЕОМ) і метрологічне забезпечення, здійснюється з урахуванням об'єктів діагностики, апріорні відомості про яких дає їх математична модель.

Алгоритмічне забезпечення визначає порядок функціонування основних програмно-технічних засобів. Саме таке забезпечення має здійснювати спочатку формування, а потім вибір і порівняння відповідних навчаючих сукупностей, що враховують як можливі типи дефектів, так і режими роботи ЕО.

Метрологічне забезпечення включає в себе методику періодичної перевірки основних метрологічних характеристик ІВДС. Визначальним моментом для розробки зазначеної методики є вибір класу тестових сигналів, який обумовлений математичною моделлю досліджуваних процесів.

Розробка інформаційно-довідкового забезпечення умовно може бути зведена [5, 61] до трьох основних етапів:

- визначенню кількісних оцінок границь діагностичних ознак, що відповідають різним технічним станам вузлів досліджуваного обладнання з урахуванням режимів його роботи;
- вибору діагностичних просторів і формуванням в них навчаючих сукупностей, які відповідають конкретним видам дефектів і певним режимам роботи ЕО;
- побудови розв'язуючих правил з діагностики та класифікації конкретних видів дефектів у вузлах досліджуваного обладнання, що працює у певних режимах.

Рішення усього переліченого комплексу задач, пов'язаних з побудовою ІВДС ЕО, нерозривно пов'язано з обраною математичною моделлю діагностичних сигналів, реалізації яких вимірюються і досліджуються в процесі проведення діагностики. Тому розробка і дослідження математичних моделей цих процесів є первинним при створенні будь-якої ІВДС діагностики.

Як у разі застосування детермінованих, так і статистичних моделей, математична модель об'єкта, що діагностується може бути представлена наступним чином [5]:

$$\Xi = \psi[\mathbf{H}, \Phi, t], \quad (2.1)$$

де Ξ — j -вимірний вектор, компонентами якого є j вихідних функцій $\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_j(t)$; $\mathbf{H}$ — n -вимірний вектор, компонентами якого є n вхідних функцій $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_n(t)$; $\Phi(\theta)$ — m -вимірний вектор, компонентами якого є m внутрішніх функцій об'єкта діагностики $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t)$; t — час, а $\psi[\bullet]$ — деякий в загальному випадку нелінійний функціонал від вказаних вище векторів, що залежить від часу.

При детермінованому підході всі компоненти векторів Ξ , $\mathbf{H}$ і Φ є детермінованими функціями. Перелік можливих діагностичних параметрів і їх допустимі межі визначаються теоретично. Діагностування зводиться до порівняння отриманих у результаті вимірювання значень діагностичних параметрів з фіксованими граничними значеннями. Якщо спостерігається вихід за допустимі межі, то робиться висновок про наявність дефекту.

При стохастичному підході $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_n(t)$ можуть бути задані у вигляді різних класів випадкових процесів. При цьому враховується фізичний характер реальних процесів, які відбуваються в об'єкті діагностики. Стохастичні моделі, як правило, описують ці процеси більш адекватно порівняно з детермінованими моделями.

Об'єкт діагностики характеризується m - вимірним вектором Φ , компоненти якого $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t)$ найчастіше є числовими не випадковими функціями. Внутрішній стан об'єкта діагностики характеризується набором числових параметрів, від яких залежать функції $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t)$. Виміряти ці параметри безпосередньо часто неможливо, тому їх визначають опосередковано через вимірювання і аналіз функцій $\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_j(t)$, які при статистичному підході до діагностики вважаються випадковими. В найпростішому одновимірному випадку задача може бути зведена до аналізу відгуку лінійної системи з імпульсною реакцією $\varphi(\tau)$ при впливі на її вхід процесу $\eta(t)$.

При зміні режиму роботи об'єкту діагностування певним чином будуть мінятися його параметри і характеристики. Врахувати ці зміни можна шляхом введення додаткових змінних у імпульсну перехідну функцію Φ , що входить до складу співвідношення (2.1). У цьому випадку імпульсна перехідна функція має бути представлена у вигляді $\varphi_1(t, \theta), \varphi_2(t, \theta), \dots, \varphi_n(t, \theta)$, де параметр θ характеризує режим роботи досліджуваного об'єкту.

Як було відзначено вище, цей параметр θ може характеризувати швидкісний, температурний, електричного навантаження та ін. режими роботи ЕО. Наприклад, швидкісний режим в обертовій електричній машині постійного струму типу П-51 [5, 21], яка використовується в якості приводу стенду для вібровипробувань підшипників кочення, може приймати значення із множини $v = v_j; j = \overline{1, 1500} \text{ об/хв}$.

Суттєвий вплив на результати діагностування електротехнічного обладнання чинить температура [5, 61]. Як і у попередньому випадку, саме підвищення температури може призводити до виникнення і прогресування так званого теплового (термічного) небалансу у роторних електричних машин. Крім того, температура може сприяти утворенню пробивного каналу в ізоляційному матеріалі обмоток електродвигунів, а також зміні властивостей

мастила в їхніх підшипникових вузлах. Перелічені фактори призводять до зміни віброакустичних характеристик ЕМ і, як наслідок, до зміни оцінок діагностичних ознак. Математична модель імпульсної перехідної функції об'єкту діагностування з урахуванням температурного режиму може бути представлена наступним чином $\varphi_1(t, \chi), \varphi_2(t, \chi), \dots, \varphi_n(t, \chi)$.

Зміна параметрів електричного навантаження також впливає на результати діагностування ЕО, тобто, імпульсна перехідна функція досліджуваного об'єкту може бути представлена так $\varphi_1(t, U), \varphi_2(t, U), \dots, \varphi_n(t, U)$.

У загальному випадку спрощена математична модель, що характеризує процеси, які утворюються при функціонуванні об'єкту діагностування з урахуванням впливу режимів їх роботи має вигляд

$$\Xi = \psi[\mathbf{H}, \mathbf{\Phi}(t, \theta), t], \quad (2.2)$$

де вектори Ξ , $\mathbf{H}$, $\psi[\bullet]$ та t були описані вище, а вектор $\mathbf{\Phi}(t, \theta)$ - m -вимірний вектор, компонентами якого є m внутрішніх функцій об'єкта діагностики $\varphi_1(t, \theta), \varphi_2(t, \theta), \dots, \varphi_n(t, \theta)$.

Аналогічним чином може бути представлена математична модель об'єкту діагностування з урахуванням будь-яких режимів роботи при його функціонуванні.

В роботах [5, 27, 31, 55, 61 та ін.] показано, що модель широкого класу діагностичних процесів може бути представлена у вигляді лінійних випадкових процесів (ЛВП). Важливою властивістю моделей ЛВП, яка і зумовила їх використання для розв'язування широкого класу прикладних задач, в тому числі й статистичної діагностики, є те, що для них відомий загальний вигляд характеристичної функції. Це дає можливість знаходити як моменти процесу будь-якого порядку (при умові, що вони існують), так і скінченновимірні розподіли процесу [5, 13, 58, 61, 68, 69 та ін.]. У наступному підрозділі зупинимось на питаннях представлення діагностичних сигналів, що виникають у різних вузлах працюючого електротехнічного обладнання з використанням лінійних та лінійних періодичних випадкових процесів.

2.2. Представлення діагностичних сигналів, що виникають у різних вузлах і режимах роботи ЕО з використанням лінійних та лінійних періодичних випадкових процесів

Як показали результати теоретичних і експериментальних досліджень [5, 7, 20, 26, 34], вібрації широкого класу технічних об'єктів, а зокрема і багатьох вузлів ЕО, мають чітко виражену багаторезонансну структуру. Тому представляє інтерес задача побудови математичної моделі, яка б описувала такі багаторезонансні процеси вібрацій і, одночасно, забезпечувала у подальшому врахування режимів, у яких відбувається експлуатація ЕО.

Математична модель вібрацій у вузлах ЕО може бути побудована на основі теорії ЛВП [5, 58, 60, 61]. Обґрунтуємо це положення. Припустимо, що досліджуваний вузол, як механічна система, має лінійні властивості, тобто його реакція завжди пропорційна силі збудження. Це припущення дає такі наслідки:

- частотні характеристики досліджуваної механічної системи не залежать від рівня збудження (властивість однорідності).
- частотні характеристики досліджуваної механічної системи не залежать від типу і форми хвилі збудження (властивість накладання).

В більшості випадків досліджувані вузли мають лінійні властивості з незначними відхиленнями, якими можна знехтувати. Але припущення про лінійність не буде справедливим, коли деформації, викликані ударним впливом, занадто великі, наприклад, при серйозних механічних пошкодженнях досліджуваних вузлів, або при надто сильному ударі, який призводить до незворотних пластичних деформацій матеріалу вузла.

Крім того, припустимо наступне:

- існує певна причинна обумовленість, тобто, механічні коливання вузлів не виникають самі по собі, а тільки внаслідок деякого впливу;
- коливання стійкі, тобто вони згасають через деякий час після припинення збудження;
- характеристики досліджуваної механічної системи не змінюються на протязі експерименту (інваріантність за часом).

Зроблені припущення дають можливість математично описати досліджуваний вузол у вигляді деякої лінійної часоінваріантної системи.

Згідно з рядом публікацій, наприклад, [5, 7, 61], вібрації електричних машин мають випадковий характер, тому для їх математичного опису доцільно використовувати той чи інший клас випадкових процесів. Для того, щоб мати можливість здійснювати ймовірнісний аналіз випадкового процесу

$\xi(t)$, необхідно його однозначно задати тим чи іншим способом. В теорії випадкових процесів для цього використовують послідовність скінченновимірних функцій розподілу

$$F(x; t), F(x_1, x_2; t_1, t_2), \dots, F(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n), \dots, \quad (2.3)$$

$$t_1, t_2, \dots, t_n \in \mathbf{T},$$

де $F(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = P\{\xi(t_1) < x_1, \dots, \xi(t_n) < x_n\}$, а символом $P\{A\}$ позначена ймовірність події A .

Очевидно, що такий спосіб задання дуже громіздкий. В роботах [5, 31, 58, 61, 64] було запропоновано метод стохастичних інтегральних представлень, що дає конструктивний спосіб задання досить широкого класу випадкових процесів. Згідно з [58, 64], процес, який є відгуком лінійної системи на вплив у вигляді білого шуму, котрий представляється як узагальнена похідна деякого безмежно подільного випадкового процесу, можна описати математичною моделлю лінійного випадкового процесу (ЛВП).

Для гільбертових лінійних процесів (тобто процесів, зі скінченною дисперсією, характеристична функція яких може бути представлена в канонічній формі Колмогорова) в роботах [5, 13, 53, 58, 59, 61, 64 та ін.] проведені дослідження їх властивостей, а також можливості їх використання для класифікації інформаційних сигналів у різних застосуваннях. В результаті цих досліджень було розроблено методи повного ймовірнісного аналізу ЛВП, зокрема, отримані співвідношення для визначення характеристичних функцій (ХФ) та моментів процесу будь-якого порядку через параметри вхідного (породжуючого) процесу та характеристики лінійної системи (її ядро). Таким чином, теорія ЛВП стала зручним математичним апаратом для аналізу відгуків лінійних систем, що описуються моделлю ЛВП.

Виходячи зі сказаного, використаємо модель ЛВП для опису відгуку досліджуваного вузла ЕО на деякий імпульсний вплив. Наведемо основні означення, що стосуються теорії ЛВП.

Лінійним (у вузькому розумінні) випадковим процесом називають стохастичний інтеграл виду [58, 61, 64]

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in \mathbf{T}, \quad \mathbf{T} \subset \mathbf{R}, \quad (2.4)$$

де $\varphi(\tau, t)$, $\tau \in (-\infty, \infty)$, $t \in \mathbf{T}$ — дійсна не випадкова числова функція (ядро (2.4)), така, що $\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(\tau, t)|^p d\tau < \infty$ рівномірно за t при $p = 1, 2$;

$\{\eta(\tau), \mathbf{P}\{\eta(0)=0\}=1, \tau \in (-\infty, \infty)\}$ — стохастично неперервний випадковий процес з незалежними приростами.

Детерміновану функцію $\varphi(\tau, t)$ називають ядром інтегрального зображення (2.4). Узагальнена похідна процесу $\eta(\tau)$, тобто $\zeta(\tau) = d\eta(\tau)/d\tau$ (породжуючий процес), являє собою випадковий процес типу білого шуму внаслідок незалежності приростів процесу $\eta(\tau)$ [5, 58, 61]. Таким чином, ЛВП можна розглядати як відгук лінійної системи з імпульсною реакцією $\varphi(\tau, t)$ на вплив білого шуму $\eta'(\tau)$.

Якщо процес $\eta(\tau)$ є процесом з некорельованими приростами, то (2.4) називають лінійним у широкому розумінні випадковим процесом.

Зважаючи на те, що діагностичні сигнали формуються реальною фізичною системою, процес $\xi(t)$ повинен мати скінченні значення енергетичних характеристик. Тому будемо вважати, що процес $\xi(t)$ гільбертів, тобто, виконується умова $M[\xi(t)]^2 < \infty$. Для того, щоб процес (2.4) був гільбертовим, необхідно, щоб дисперсія приростів процесу $\eta(\tau)$ була скінченною [58, 64]. У випадку інтегрованості за τ функції $\varphi^k(\tau, t)$, $k = 1, 2, \dots$ при всіх t та існування всіх кумулянтів процесу $\eta(\tau)$ у точці $\tau = 1$ до k -го порядку включно будуть існувати також змішані кумулянти для значень процесу $\xi(t)$ k -го порядку в моменти часу $t_1, \dots, t_k$. Згідно з [58, 61, 64] вони визначаються співвідношеннями:

$$\kappa_k[\xi(t_1), \dots, \xi(t_k)] = \kappa_k \int \prod_{j=1}^k \varphi(\tau, t_j) d\tau, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2.5)$$

де κ_k — k -ий кумулянт випадкової величини $\eta(1)$.

Зокрема, вирази для математичного сподівання $M[\xi(t)]$ та кореляційної функції $R_\xi(t_1, t_2)$ ЛВП (2.4) мають вигляд [5, 58, 61, 64]:

$$M[\xi(t)] = \kappa_1 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\tau,$$

$$R_{\xi}(t_1, t_2) = \kappa_2 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t_1) \varphi(\tau, t_2) d\tau. \quad (2.6)$$

Останні вирази будуть використані нижче при теоретичному обґрунтуванні діагностичних ознак для визначення технічного стану вузлів ЕО за їхніми вібраційними відгуками на імпульсний вплив.

Основною перевагою моделі ЛВП є те, що основні ймовірнісні характеристики процесу (2.4), такі як моменти розподілу, кореляційна функція, характеристична функція, можуть бути у явному вигляді записані через параметри породжуючого процесу $\eta(\tau)$ і ядро процесу $\varphi(\tau)$. Крім того, лінійні операції (інтегрування, диференціювання) над процесами виду (2.4) дають в результаті знову процеси виду (2.4).

Для лінійного у вузькому розумінні випадкового процесу $\xi(t)$ (2.4), за припущення, що

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau, t) d\tau < \infty,$$

логарифм одновимірної характеристичної функції визначається виразом [5, 58, 61, 64]

$$\ln f_{\xi}(u) = ium \sum_{j=1}^n a_{jn} + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\exp \left(iux \sum_{j=1}^n a_{jn} \varphi_j(\tau) \right) - 1 - iux \sum_{j=1}^n a_{jn} \varphi_j(\tau) \right] \frac{dK(x)}{x^2} d\tau, \quad (2.7)$$

де $\varphi_j(t)$, $j = \overline{1, n}$, визначаються за співвідношенням (2.4); m та $K(x)$ – параметри характеристичної функції породжуючого процесу $\eta(\tau)$ у формі Колмогорова; a_j – деякі вагові коефіцієнти.

З урахуванням моделей (2.1) та (2.2) і основних положень теорії ЛВП математична модель вібраційного процесу досліджуваного об'єкту може бути представлена у вигляді векторного ЛВП наступним чином

$$\Xi_n(t) = (\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)), t \in T \quad (2.8)$$

де послідовність компонент $\{\xi_j(t), j = \overline{1, n}\}$ моделі (2.8) описує послідовність діагностичних вібраційних сигналів ЕО у n -режимах його функціонування.

Модель (2.8) є векторним ЛВП, яка дає можливість врахувати специфіку і характерні можливості різних режимів роботи досліджуваного ЕО. Наведена модель є подальшим розвитком відомих математичних моделей діагностичних

сигналів [5, 61, 63, 71 та ін.], що були отримані при дослідженні фізичних процесів, супроводжуючих роботу ЕО. З метою практичного використання в роботі досліджується модель стаціонарного ЛВП, яка знайшла широке застосування у вібродіагностиці технічних об'єктів і систем.

Таким чином, компонента $\xi_j(t)$ моделі (2.8) має інтегральне представлення у виді:

$$\xi_j(t) = \int_0^\infty \phi_j(t - \tau) d\eta(\tau) = \int_0^\infty \phi_j(t - \tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad j = \overline{1, n}, t \in T \quad (2.9)$$

де детерміновані функція $\phi_j(t)$ характеризує імпульсну перехідну функцію об'єкта дослідження, як лінійної системи, у j -му режимі функціонування, а породжуючий процес $\eta(t)$ - випадковий процес з незалежними приростами і безмежно-подільними законами розподілу, який враховує дію значної кількості стохастичних факторів, виникаючих при формуванні діагностичного сигналу. Похідна процесу $\eta'(\tau)$ є процесом білого шуму, що дає можливість використати поєднання теоретичних і експериментальних результатів досліджень у галузі вібродіагностики.

Враховуючи зроблені вище припущення і вказані властивості векторного лінійного процесу виду (2.8), математичну модель відгуку на імпульсний або ударний вплив доцільно побудувати в класі ЛВП. Таким чином, будемо вважати, що $\xi(t)$ являє собою відгук досліджуваного вузла на ударний вплив. Імпульсна перехідна функція цього вузла як лінійної системи представляється функцією $\phi(\tau)$, а збудження системи – $\eta(t)$, які задані вище.

Для відшукування форми ядра системи $\phi(\tau)$ розглянемо типові графіки (рис.2.1) кореляційної функції та спектру потужності вібраційних сигналів, виміряних в ході експериментальних досліджень вібраційних відгуків в балці кріплення бака повітряного вимикача типу ВВ-220, які збуджуються ударним впливом, проведених на реальному обладнанні [5].

З аналізу графіків кореляційних функцій (а також з графіків самих коливань, які ми тут не наводимо) видно, що коливання згасають з часом, причому можна припустити, що зменшення амплітуди відбувається по експоненціальному закону.

Як видно на типових графіках спектральної потужності, коливання мають чітко виражений резонансний характер, причому, кількість резонансів

може бути різна для різних вузлів. Наприклад, на рис.2.1 – два чітких піки. Зазначимо, що серед вивчених реалізацій зустрічалися випадки, коли їх спектри мали до десяти чітких резонансних піків.

Таким чином, досліджуваний вузол можна вважати багаторезонансною коливальною системою. Внаслідок припущення про лінійність досліджуваного вузла, цю систему можна представити як лінійну комбінацію коливальних систем другого порядку [5, 60, 61, 64]. Отже, ударну вібраційну хвилю у точці вимірювання будемо розглядати як зважену суму випадкових процесів, кожен з яких є реакцією на прикладений ударний вплив відповідної коливальної системи другого порядку, тобто

$$\xi_j(t) = \sum_{i=1}^m a_{ji} \xi_{ji}(t), j = \overline{1, n}, t \in T \quad (2.10)$$

В моделі (2.10) для компоненти $\xi_j(t)$ використані наступні позначення:

- $m \in \mathbb{N}$ – ціле число, яке характеризує кількість резонансних частот;
- a_{ji} – вагові коефіцієнти, що відображають співвідношення енергій між відповідними резонансними частотами;
- складова $\xi_{ji}(t)$ враховує характеристики сигналу на частотах, близьких до i -го резонансу і описується формулою:

$$\xi_{ji}(t) = \int_0^\infty \phi_{ji}(t - \tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad (2.11)$$

де $\phi_{ij}(t)$ – імпульсна перехідна функція формуючого резонансного i -го фільтру.

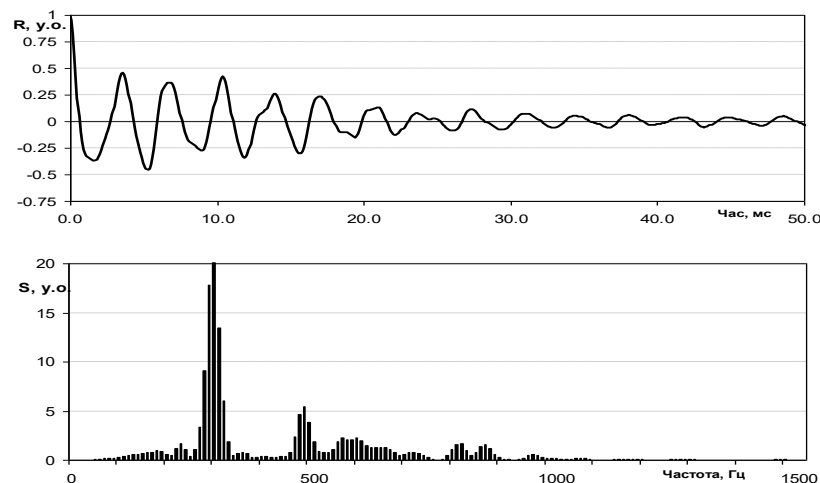


Рис. 2.1. Нормована кореляційна функція (вгорі) і спектр потужності (внизу) вібрацій в балці кріплення бака повітряного вимикача типу ВВ-220

Враховуючи, що досліджувана система є часоінваріантною, а також той факт, що реальна механічна система має незначне затухання (тобто, $\omega > \beta$), імпульсна перехідна функція формуючого резонансного i -го фільтру набуває вигляду:

$$\phi_{ji}(t) = \frac{1}{(2\pi f_{ji})^2} e^{-\beta_{ji} t} \sin(\psi_{ji} t) U(t), \quad (2.12)$$

де f_{ji} – резонансна частота; β_{ji} – коефіцієнт, що характеризує ступінь згасання коливань i -ї складової; $\psi_{ji} = \sqrt{(2\pi f_{ji})^2 - \beta_{ji}^2}$ – коефіцієнт, який характеризує ступінь взаємозв'язку між f_{ji} та β_{ji} ; $U(t)$ – нормалізована функція Хевісайда (одиничний стрибок).

При цьому передбачається, що компоненти вектору $\{\eta_j(\tau), j = \overline{1, n}\}$ стохастично зв'язані і цей зв'язок настільки сильний, що їх можна розглядати як стохастично еквівалентні, а отже, вважати, що всі вони співпадають з одним процесом $\eta(\tau)$.

Зміна режиму роботи ЕО призводить до зміни власних характеристик об'єкту діагностування, який у представленнях (2.8) та (2.10) задається функцією $\phi_{ij}(t)$. У свою чергу це призводить до залежності числових параметрів і функціональних характеристик вимірюваних діагностичних сигналів $\xi_j(t)$ що описується згідно з (2.10) та (2.11).

У припущенні, що у процесі вимірювання і обробки діагностичного сигналу режим роботи досліджуваного вузлу ЕО не міняється, маємо стаціонарний випадок функціонування цього вузлу.

Виходячи із цього припущення можна стверджувати, що вид основних функціональних характеристик, а саме, кореляційної функції $R(s)$, спектральної щільності потужності $S(f)$ та характеристичної функції $f(u, t)$ досліджуваних вібрацій залишиться незмінними для будь-яких режимів роботи ЕО. Це надає можливість використати основні співвідношення для вказаних функціональних характеристик, які були отримані в роботах [5, 61, 63] для фіксованого режиму роботи ЕО.

Розглянемо тепер властивості збудження системи – $\zeta(\tau) = d\eta(\tau)/d\tau$. При ударі відбувається короткочасний процес передачі енергії від ударного молотка (або іншого засобу прикладення впливу) до тіла досліджуваного

вузла. Тривалість удару, а отже і форма спектру при ударному збудженні, визначається масою і жорсткістю як ударного молотка, так і матеріалу конструкції.

В початковому наближенні тривалість удару можна вважати нескінченно малою, а прикладену силу моделювати дельта-імпульсом, який має рівномірний спектр. Але для більш адекватної моделі необхідно враховувати, що в реальних умовах спектр ударного впливу обмежений.

Спектр ударної сили є неперервним, з максимальною амплітудою при 0 Гц і з подальшим її зменшенням із зростанням частоти. Тривалість удару звичайно набагато менша тривалості реєстрованих в часовій області реалізацій.

В радіотехніці використовується кілька «стандартних» форм імпульсів: прямокутний, трикутний, трапецієвидний, експоненціальний, дзвоноподібний [5]. За формою і спектральними характеристиками найбільш придатним для моделювання ударного впливу можна вважати дзвоноподібний імпульс, який наближено описується наступним виразом:

$$a(t) = Ae^{-2.77t^2/t_i^2},$$

де t_i – так звана активна тривалість імпульсу; A – амплітуда імпульсу.

Основна частина енергії дзвоноподібного імпульсу зосереджена в області частот від 0 до $1/t_i$ Гц.

На практиці «ідеальна» форма імпульсу спотворюється внаслідок різноманітних шумів. Наприклад, це можуть бути паразитні механічні коливання самого ударного молотка, різноманітні вібраційні та сейсмічні хвилі, викликані роботою іншого обладнання, що знаходиться неподалік від вузла, який діагностується, тощо. Такі шуми можна врахувати в моделі шляхом адитивного накладання процесу типу білого шуму. В результаті, запишемо:

$$\zeta(t) = a(t) + \varepsilon(t),$$

де $a(t)$ – детермінована компонента, що описує «ідеальну» форму ударного імпульсу, а $\varepsilon(t)$ – адитивний білий шум.

Більшість процесів, які протікають у ЕО, характеризуються циклічною зміною в часі, що зумовлено специфікою його роботи. У зв'язку з цим коротко

зупинимось на розгляді деяких математичних моделей, які дозволяють описати таку циклічність.

Лінійні періодичні (циклічні) випадкові процеси. Відомо, що основні вузли ЕО працюють в умовах електромагнітних полів. Так, шихтовані магнітопроводи трансформаторів піддаються дії магнітного поля, викликаного періодичними струмами, що протікають в обмотках; вали, опори та підшипники обертових електричних машин знаходяться під впливом періодично змінних сил, викликаних обертанням роторів тощо. При цьому часто значення таких процесів не повторюються точно в кожному періоді, тобто мають стохастичний характер. Тому в якості математичних моделей таких процесів природно використовувати різні класи випадкових процесів, які враховують циклічність [5, 6, 31, 43, 57, 61, 100, 102, 108, 113].

Коротко зупинимось на термінології стосовно визначення циклічності, періодичності та ритмічності, прийнятій у [31, 57].

Циклічний процес — це фізичне поняття, яке визначене стосовно фізичного явища і стосується того випадку, коли з точки зору фізики (а не строго математично) можна виділити повторюваність характеристик або фізичних властивостей сигналів.

Поняття *ритмічності* вживається тоді, коли спостерігається принаймні два фізичних процеси, один з яких має характер циклічності, близький до другого. Тоді ці два процеси називають ритмічними (один розглядається в ритмі з іншим). Наприклад, різні коливання, викликані одне одним або такі, що відбуваються одне в залежності від іншого, пов'язані з ним.

Періодичні процеси або функції — строго чисто математичне абстрактне поняття і вживається при побудові різних математичних моделей реальних циклічних або ритмічних процесів, як одновимірних, так і багатовимірних.

Під *стохастичною періодичністю* розуміють властивість характеристик випадкового процесу повторюватися в часі через відомий період T , причому реалізації процесу можуть і не бути строго періодичними. Це означення не можна розглядати як математично строго, оскільки воно не дає можливості відповісти на запитання, що таке період випадкового процесу, тому далі ми його уточнимо і конкретизуємо.

На даний час відомо ряд моделей випадкових процесів, що враховують циклічність. Очевидно, найпростіші з них — адитивна та мультиплікативна

моделі [5], які широко використовуються для опису сигналів на фоні завад у радіотехніці. Адитивне зображення має вигляд

$$\xi(t) = f_a(t) + \zeta(t), \quad (2.13)$$

а мультиплікативне

$$\xi(t) = f_m(t) \cdot \zeta(t), \quad (2.14)$$

де $\zeta(t)$ — стаціонарний центрований випадковий процес; $f_a(t)$ і $f_m(t)$ — детерміновані періодичні функції із заданим періодом T .

Модель (2.13) враховує періодичність лише математичного сподівання. Центральні моменти такого процесу, в тому числі й кореляційна функція, не залежать від початку відліку. Зображення (2.14) може застосовуватися для врахування стохастичної періодичності коливань пульсуючого характеру. Кореляційна функція процесу (2.14) періодична по сукупності аргументів.

В рамках перших двох моментів вивчаються періодично корельовані випадкові процеси (ПКВП) [68, 100] та періодичні процеси в широкому розумінні [57]. Більш загальна модель стохастично періодичних процесів [57] вимагає періодичності всіх скінченновимірних функцій розподілу процесу і включає дві вищезгадані моделі як частинні випадки.

Згідно з визначенням ПКВП [68, 100], його кореляційна функція $R(t_1, t_2)$ для будь-яких t_1 і t_2 існує, неперервна і задовольняє умові

$$R(t_1, t_2) = R(t_1 + T, t_2 + T), \quad t_1, t_2 \in (-\infty, \infty), \quad (2.15)$$

де $T > 0$ — деяке фіксоване число.

Якщо, як це часто прийнято в енергетичній теорії, цікавитися лише характеристиками процесу в рамках перших двох функцій розподілу, то приходимо до так званих періодичних в широкому розумінні випадкових процесів [57].

У цьому випадку [57], для періодичного в широкому розумінні випадкового процесу $\xi(t)$, $t \in (-\infty, \infty)$, якщо існує таке $T > 0$, що його одновимірні і двовимірні функції розподілу задовольняють умовам

$$F(x; t) \equiv F(x; t + T), F(x_1, x_2; t_1, t_2) = F(x_1, x_2; t_1 + T, t_2 + T), \\ t_1, t_2 \in (-\infty, \infty). \quad (2.16)$$

Найбільш адекватною математичною моделлю циклічних процесів на даний час є лінійні періодичні випадкові процеси, що більш детально розглядаються в [31, 57]. У цих же роботах доведено, що клас ЛПВП є

підкласом ЛВП, заданих на всій числовій осі. Виходячи з цього, логарифм безмежно подільної скінченновимірної характеристичної функції ЛПВП може бути представлений у вигляді (2.7).

Однією із важливих властивостей характеристичної функції ЛПВП є можливість враховувати періодичність у ядрі $\varphi(\tau, t)$ і параметрах породжуючого процесу $\eta(t)$. Так, у роботі [57] доведено, якщо існують дійсні числа $T > 0$ і $\alpha \in (-\infty, \infty)$ такі, що при всіх значеннях τ і t

$$\varphi(\tau, t) = \varphi(\tau + \alpha T, t + T) \quad (2.17)$$

і виконуються співвідношення

$$\begin{aligned} dk_1(\tau) &= dk_1(\tau + \alpha T), \\ dk_2(\tau) &= dk_2(\tau + \alpha T), \\ d_x d_\tau K(x, \tau) &= d_x d_\tau K(x, \tau + \alpha T), \end{aligned} \quad (2.18)$$

де $k_1(\tau)$ і $k_2(\tau)$ — перші кумулянтні функції процесу $\eta(t)$; $K(x, \tau)$ — його пуассонівський спектр стрибків у формі Колмогорова.

У виразах (2.17) та (2.18) параметр α має значення відношення періоду приростів породжуючого процесу до періоду ЛПВП з урахуванням знаку.

У випадку, якщо функція $\varphi(\tau, t)$ задовольняє умові $\varphi(\tau, t) \equiv \varphi(t - \tau)$, тобто лінійний процес формується стаціонарною системою, то лінійний процес (2.4) буде періодичним тоді і тільки тоді, коли процес $\eta(t)$ має періодичні прирости [57].

З іншого боку, якщо процес $\eta(t)$ однорідний, то лінійний процес (2.4) буде T -періодичним тоді і тільки тоді, коли $\varphi(\tau, t) = \varphi(\tau, t + T)$ [57]. В цьому випадку $\alpha = 0$ і отримується лінійний випадковий процес, заданий на колі.

У відповідності із (2.18) Кореляційна функція ЛПВП може бути записана у вигляді

$$R(t_1, t_2) = k_2[\eta(1)] \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t_1) \varphi(\tau, t_2) d\tau, \quad t_1, t_2 \in (-\infty, \infty). \quad (2.19)$$

Математична модель лінійних періодичних випадкових процесів допускає статистичне визначення її ймовірнісних параметрів за отриманою реалізацією процесу, що дає можливість застосовувати такі моделі в діагностиці електротехнічного обладнання.

Якщо розглядати три основні фізичні процеси, які зумовлюють режими роботи ЕМ, тобто кутова швидкість, електричне навантаження та температура,

то серед цих процесів для описання за допомогою моделей ЛПВП найбільш підходить саме кутова швидкість. У цьому випадку величина основного періоду T буде залежить від вказаної швидкості ротора ЕМ, тобто період T_p у моделі ЛПВП з урахуванням швидкісного режиму роботи ЕМ має вигляд $T_p = T \pm \Delta t$, де Δt – режимні коливання кутової швидкості. З урахуванням зроблених позначень зміна швидкісного режиму роботи ЕМ буде призводити до зміни у ядрі $\phi(\tau, t) = \phi(\tau, t + T)$. У свою чергу це призведе до відповідних змін при отриманні параметрів і характеристик за співвідношеннями (2.5), (2.6), (2.7) та (2.19).

Зміну режиму роботи ЕО можна також враховувати шляхом внесення змін T на T_p у складових (2.18), що характеризують породжуючий процес $\eta(t)$

Оскільки у подальшому в даній дисертаційній роботі в якості носія інформації будуть використані вібрації окремих вузлів (підшипники кочення, шихтований магнітопровід), зупинимось на питаннях побудови математичних моделей вібрацій деяких вузлів ЕО.

2.3. Математичні моделі вібрацій, що супроводжують роботу вузлів електричних машин в різних режимах роботи та обґрунтування на їх основі діагностичних ознак

Розглянемо побудову математичної моделі вібраційних сигналів, що супроводжують роботу окремих вузлів електричних машин (ЕМ).

Згідно з [5, 37, 47, 61], вібрації у вузлу ЕМ породжуються в основному деяким імпульсним потоком, який виникає в ньому при роботі ЕМ.

Для інтерпретації вібрації рухомого вузла ЕЕО в математичному вигляді необхідно представити вібрації вузла у вигляді відгука механічної системи вузла на дію породжуючого імпульсного потоку, що утворюється у вузлу ЕМ при його роботі. В якості моделі породжуючого імпульсного потоку використовується білий шум [5, 58, 60], а модель механічної системи вузла ЕМ представляється у вигляді лінійної системи.

За своєю фізичною природою процес, що викликає вібрації вузлів, представляє собою потік випадкових у часі і за інтенсивністю імпульсів [5, 61]. Припустимо, що вони статистично незалежні і задовольняють умові рівномірної нескінченної малості. Таким чином, цей процес можна описати математичною моделлю випадкових процесів з незалежними значеннями,

які підпорядковуються безмежноподільному закону розподілу [5, 58, 61, 64].

Рухому частину енергетичної машини можна розглядати як механічну коливальну систему, на яку діє породжуючий процес, що викликає у свою чергу її резонування на певних частотах [5, 6, 20, 61]. Резонансні частоти обумовлені не тільки конструктивними особливостями вузла, що досліджується, але і особливостями всієї ЕМ в цілому.

Як було показано у попередньому підрозділі 2.2, вібрації багатьох вузлів ЕМ носять багаторезонансний характер. Використання класів лінійних та лінійних періодичних випадкових процесів при побудові імовірнісних моделей цих вузлів дозволяє проводити повний імовірнісний аналіз запропонованих моделей. У свою чергу це дозволяє обґрунтовано вибрати діагностичні ознаки і програмно-технічне забезпечення для ІВДС та підвищує вірогідність проведеної діагностики. З урахуванням матеріалів попереднього підрозділу, в лінійному наближенні механічну коливальну систему можна представити однією або сукупністю лінійних ланок першого і другого порядку, тобто сукупністю коливальних і аперіодичних ланок. Виходячи з цього, для аналізу механічної коливальної системи маємо можливість використовувати добре розроблений апарат теорії лінійних систем [5, 57, 61].

В цьому випадку вібрації, які реєструються в точці розміщення акселерометра на досліджуваному вузлі ЕО, представляють собою її відгук на дію векторного породжуючого процесу.

Оскільки місця виникнення імпульсів в породжуючому процесі постійно переміщуються в просторі, можна умовно локалізувати їх за групами, тобто перейти від механічної моделі з розподіленими вхідними діями до багатовходової моделі (рис.2.2) [5, 61]. На цьому рисунку $\eta_j'(\tau)$, $j = \overline{1, n}$, введені вище різні компоненти вектору породжуючого процесу; ($\varphi_j(\tau, t)$, $j = \overline{1, n}$) – вектор імпульсних перехідних функцій системи, що розглядається; n – число входів системи; $\xi(t)$ – вібраційний процес, який спостерігається в точці розміщення вібродатчика.

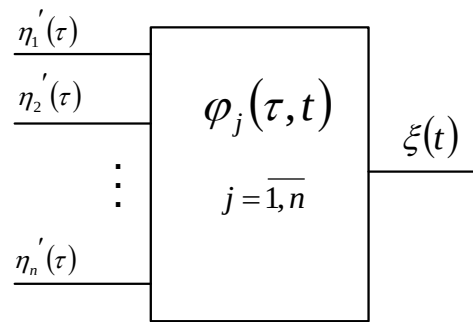


Рис.2.2. Схема багатовходової лінійної системи

Для побудови математичної моделі вібрацій вузлів, використаємо припущення, що вібраційний процес в точці розміщення датчика є відгуком $\xi(t)$ лінійної системи на дію породжуючого процесу, який представляє собою послідовність окремих імпульсів. Кожен з імпульсів породжуючого процесу визначається імовірнісним законом появи його у часі та має певну інтенсивність, значення яких носять випадковий характер.

Породжуючий процес $\eta'(\tau)$ є випадковим процесом з незалежними значеннями, причому розподіл цих значень безмежноподільний. Враховуючи результати побудови математичної моделі породжуючого процесу $\eta'(\tau)$, викладені в [5, 61], вібраційний сигнал в точці розміщення акселерометра для фіксованого моменту t можна представити у вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{\tau_k} \varphi(\tau_k, t) . \quad (2.20)$$

Використовуючи узагальнений пуассонівський процес $\pi_1(\tau)$, записуємо (2.4) у вигляді

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^t \varphi(\tau, t) d\pi_1(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\pi_1(\tau), \quad (2.21)$$

оскільки $\varphi(\tau, t) \equiv 0$ при $t < \tau$.

Працюючу рухому частину ЕМ можна представити у вигляді механічної або відповідної до неї (згідно методу електромеханічних аналогій [5, 61]), електричної багаторезонансної багатовходової системи, що характеризується вектором імпульсних перехідних функцій $\{\varphi_j(\tau, t), j = \overline{1, n}\}$, як це схематично показано на рис.2.2.

В цьому випадку відгук досліджуваної системи можна розглядати як суму випадкових процесів, що надходять від різних взаємодіючих елементів і який може бути представлений у вигляді (2.10), тобто

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

де n – деяке додатнє число, яке визначається конструктивними, технологічними та експлуатаційними характеристиками вузла; a_j – вагові коефіцієнти, які враховують затухання у відповідному каналі розповсюдження вібраційної хвилі, $a_j > 0$; а компоненти $\xi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(\tau, t) d\eta(\tau)$, $j = \overline{1, n}$.

Породжуючий процес $\eta'(\tau)$, характер якого в значній мірі обумовлений технічним станом досліджується вузла, може бути заданий за допомогою характеристичних функцій (2.7). По складовим, що входять в характеристичні функції, ми маємо можливість досліджувати породжуючий процес $\eta'(\tau)$. Подібне використання канонічного представлення характеристичної функції (2.7) для $\eta'(\tau)$ дає можливість при розгляді моделі вібрацій вузла одночасно враховувати його нормальну та імпульсну складові. Причому, імпульсна складова може бути обумовлена деякими дефектами вузла. Так, в залежності від вибору виду функцій $K(x)$, що входить до складу (2.7), імпульсний процес $\eta'(\tau)$ може бути пуассонівським, гамма-процесом або деяким іншим процесом з незалежними приростами [5, 13, 61].

Отже, на основі запропонованих моделей процес вібрацій $\xi(t)$ в точці розміщення вібросенсору може розглядатися як відгук багаторезонансної лінійної системи, що описується вектором імпульсних перехідних функцій $\varphi_j(\tau, t)$ при дії на її входи породжуючого процесу $\eta'(\tau)$. Як було показано у попередньому підрозділі, для математичного описання процесу $\xi(t)$ можна застосовувати клас лінійних випадкових процесів.

У відповідності з роботами [5, 61], можна пояснити багаторезонансність структури цих вібрацій на прикладі роботи підшипника кочення та шихтованого магнітопроводу, що є одними з основних вузлів ЕМ.

Математична модель вібрацій підшипника кочення. Для пояснення структури утворення цих вібрацій скористаємося плоскою спрощеною моделлю однорядного підшипника, що має $n_{ш}$ тіл кочення і працює на горизонтально розміщеному роторі електричної машини. Спрощена механічна схема підшипника з нерухомо закріпленим зовнішнім кільцем приведена на рис.2.3.

Величини C'_k і C''_k , $k = \overline{1, n_{ш}}$, описують еквівалентні пружності кільця і переходу, який заповнений змазкою між кільцями, тілами кочення і сепаратором (розглядається тільки пружність, яка виникає в радіальному напрямку площини підшипника). Величини r_k , $k = \overline{1, n_{ш}}$ – тертя, яке вноситься в систему за рахунок руху тіл кочення в сепараторі і обумовлене в'язкістю змазки, розглядається також тільки в радіальному напрямку.

Величина M – приєднана маса ротора електричної машини. Кожне тіло кочення підшипника має масу m_k , $k = \overline{1, n_{ш}}$. Наближено вважаємо, що у нового підшипника маси тіл кочення рівні між собою $m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_n$. Однак за мірою зносу між масами тіл кочення може з'явитися відчутний розкид мас, який викликає асиметрію елементів підшипника і додаткові компоненти.

У відповідності з методом електромеханічних аналогій механічна система підшипника (рис.2.3, а), яка містить маси $M, m_1, m_2, \dots, m_{n_{ш}}$, пружні зв'язки C'_k і C''_k і тертя r_k , $k = \overline{1, n_{ш}}$, трансформується в еквівалентну електричну схему з індуктивностями $L, L_1, L_2, \dots, L_n$, ємностями C_k і опорами R_k , $k = \overline{1, n_{ш}}$ (рис. 2.3, б). При цьому m_k, C_k і r_k не переходять безпосередньо в L_k, C_k і R_k електричної схеми, а пов'язані з ними складними залежностями. Елементи L_k, C_k і R_k визначеним чином з'єднуються в еквівалентній схемі підшипника кочення і утворюють своєрідні RLC -контури, що здатні резонувати на визначених частотах. Отже, виходячи із розгляду спрощеної механічної схеми підшипника кочення можна зробити висновок, що він є багаторезонансною системою. Це підтверджується експериментально в роботах [5, 61].

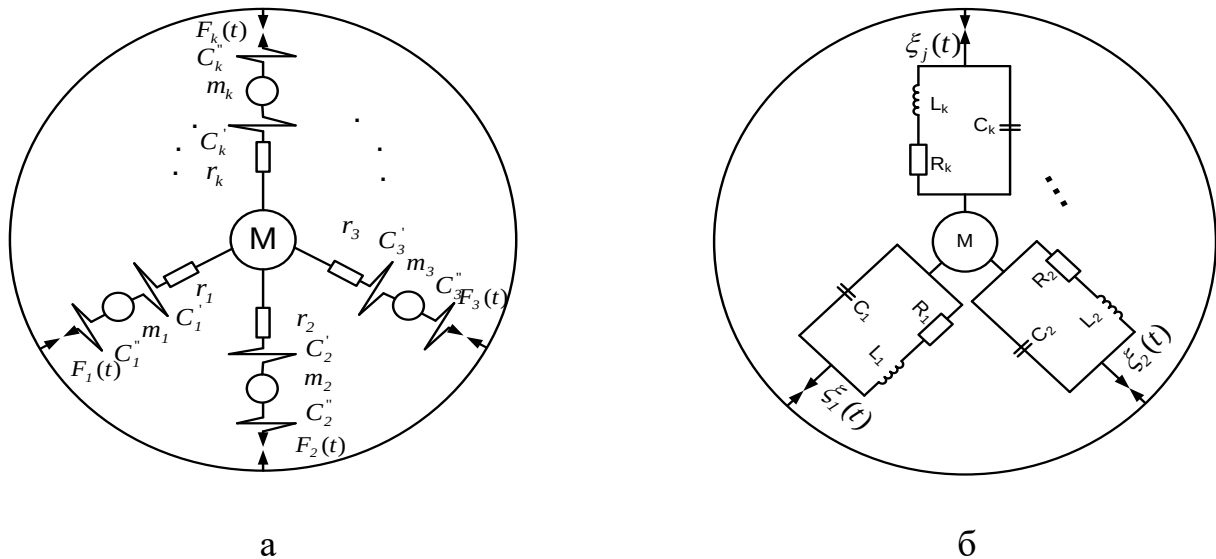


Рис.2.3. Плоска схема підшипника кочення

а.- механічна схема; б. – еквівалентна електрична схема.

У відповідності з поясненнями, наведеними у цих роботах, кожену еквівалентну силу $\{F_k, k = \overline{1, n_{iii}}\}$, яка діє в радіальному напрямку на тіла підшипника кочення, встановленого на горизонтально розташованому роторі, можна записати у вигляді

$$F_k(t) = \frac{1}{2} \bar{a} [\cos(\omega t + \varphi_k) + |\cos(\omega t + \varphi_k)|] + \eta'(t) + f_k(t), \quad (2.22)$$

де $\bar{a}$ – амплітуда, яка дорівнює середньому значенню сили, що діє на тіло кочення, яке знаходиться в нижньому положенні ротору; φ_k – початкова фаза відповідного тіла кочення, якщо для першого прийняти $\varphi_1 = 0$, то $\varphi_k = 2 \frac{\pi}{n_\omega} (k-1)$; $\eta'(\tau)$ – породжуючий процес; $f_k(t)$ – складова, до якої відносяться електромагнітні сили, сили що зумовлені незбалансованістю ротора, а також вібрації за рахунок щітково-колекторного вузла і аеродинамічні сили.

Електричним аналогом сили $F_k(t)$ в еквівалентній електричній схемі підшипника кочення згідно з методами електромеханічних аналогій можуть служити еквівалентні токи $I_k(t)$ або напруги $U_k(t)$. Представлення підшипника у вигляді електричної схеми дозволяє використовувати при його аналізі добре розроблені методи теоретичних основ електротехніки,

статистичної радіотехніки і теорії ймовірностей. Крім того, воно дає можливість моделювати роботу підшипника на ПЕОМ.

Поява дефекту викликає зміну в багаторезонансній системі підшипника і супроводжується зміною значень параметрів R_j , L_j і C_j в запропонованій схемі рис.2.3, б. У підсумку це робить іншим характер породжуючого процесу $\eta'(t)$ і призводить до зміни вібраційного процесу $\xi(t)$, який реєструється акселерометром.

За результатами, наведеними у [5, 61], математична модель коливального процесу вібрацій, які викликані роботою підшипникового вузла і спостерігаються в точці встановлення акселерометра, може розглядатися як багатовхідна коливальна система другого порядку, що характеризується вектором імпульсних перехідних функцій з компонентами (2.12), тобто, має вигляд

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

$$\text{де} \quad \psi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2} ; \quad \beta_j = \frac{R_j}{2L_j} > 0 ; \quad \omega_j = \frac{1}{\sqrt{L_j C_j}} ; \quad \omega_j > \beta_j .$$

Вибір імпульсної перехідної функції виду (2.12) обумовлений тим, що найпростіший RLC -контур в коливальному режимі має саме таку характеристику, а також задовільним співпадінням теоретичних висновків з результатами експериментальних досліджень.

Імовірнісний аналіз запропонованої математичної моделі приведений в припущенні, що кожний із входів багатовхідної системи (рис. 2.2), яка представляється вектором імпульсних перехідних функцій (2.10), впливає процес, який можна розглядати як адитивне накладення великого числа незалежних імпульсів, що виникають у випадкові моменти часу. Такий породжуючий фізичний процес в рамках сформульованих припущень з достатньою підставою можна описати моделями типу білий шум [5, 60, 61].

Вібрації підшипників кочення в точці спостереження на підшипниковому щиті електричної машини в установленому режимі можна

представити у вигляді суми (2.10) випадкових процесів – відгуків системи, що наведена на рис. 2.2 за кожним із каналів розповсюдження, яка описується вектором з компонентами (2.10) при дії на вхід кожного з каналів випадкового процесу типу білий шум. В цьому випадку кожна компонента – відгук, що пов’язана з визначеним каналом розповсюдження і входить як доданок в (2.10), представляється в усталеному режимі у вигляді компонент лінійного процесу

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

де кожна $\varphi_j(\tau)$, $\tau \in (-\infty, \infty)$, визначається за (2.12) з урахуванням (2.11) для окремих компонент, а $\{\eta_j(\tau), j = \overline{1, n}\}$ – вектор породжуючих процесів з незалежними приростами, похідні компонент якого діють на входи системи (рис.2.2).

З урахуванням аналітичних викладок, наведених у [5, 61] були отримані співвідношення для кореляційної функції $R(s)$ спектральної щільності потужності $S(\omega)$ та характеристичної функції $f(u)$ досліджуваного процесу вібрацій $\xi(t)$ в точці розміщення акселерометру.

Кореляційна функція процесу (2.10) в усталеному режимі з врахуванням (2.12) записується у вигляді

$$R(s) = \sum_{j=1}^n e^{-\beta_j |s|} [A_{jn} \cos \psi_j s + B_{jn} \sin \psi_j |s|] \quad , \quad \text{при всіх } s \in (-\infty, \infty) \quad , \quad (2.23)$$

де

$$A_{jn} = \frac{a_j \omega_j^2}{2\psi_j} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 a_{kj}}{\psi_k} k_{2kj} \geq 0 \quad ; \quad B_{jn} = \frac{a_j \omega_j^2}{2\psi_j} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 b_{kj}}{\psi_k} k_{2kj} \quad ,$$

$$a_{kj} = \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \tilde{\psi}_{kj}^2} - \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \psi_{kj}^2} \geq 0 \quad ; \quad b_{kj} = \frac{\tilde{\psi}_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \tilde{\psi}_{kj}^2} + \frac{\psi_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \psi_{kj}^2} \quad ;$$

$$\beta_{kj} = \beta_k + \beta_j \quad ; \quad \psi_{kj} = \psi_k + \psi_j \quad ; \quad \tilde{\psi}_{kj} = \psi_k - \psi_j \quad ,$$

а k_{2kj} – змішаний другий семіінваріант випадкових величин $\eta_k(1)$ і $\eta_j(1)$, $k_{2kj} = k_2[\eta_k(1)\eta_j(1)]$, який при $k = j$ переходить в звичайну дисперсію відповідної випадкової величини.

В (2.23) компоненти вектору ψ_j , $j = \overline{1, n}$, будемо називати резонансними частотами, оскільки вони визначають положення максимумів спектра, а компоненти вектору β_j , $j = \overline{1, n}$, – коефіцієнтами затухання. Хоча останній вираз отриманий для випадку $\psi_j > 0$, $j = \overline{1, n}$, однак він залишається справедливим при скільки завгодно близьких до нуля резонансних частотах і за безперервності може бути розповсюджений і на випадок, коли при деякому j частота $\psi_j \rightarrow 0$. Цим оправдовується назва процесу (2.9) як багаторезонансної моделі.

Передбачається, що процес (2.10) є стаціонарним і $R(0) < \infty$, тому для нього існує спектральна щільність, яка визначається як косинус-перетворення Фур'є з урахуванням (2.23) у вигляді

$$S(\omega) = 2 \sum_{j=1}^n \frac{A_{jn} \beta_j (\omega_j^2 + \omega^2) + B_{jn} \psi_j (\omega_j^2 - \omega^2)}{(\omega_j^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_j^2}. \quad (2.24)$$

Повні ймовірнісні характеристики вібраційного процесу (2.10) можна отримати за допомогою його характеристичної функції (2.7), загальний вид якої з урахуванням режимів роботи ЕО був наведений у попередньому підрозділі.

Отримане співвідношення (2.7) дозволяє за відомими характеристиками породжуючого процесу з використанням перетворення Фур'є–Стилтьєса обчислювати значення розподілу ймовірностей процесу (2.10).

Коротко зупинимось на розгляді утворення вібраційного процесу у шихтованому магнітопроводі ЕМ.

Математична модель вібрацій шихтованого магнітопроводу. З шихтованого магнітопроводу формується осереддя ротора або статора ЕМ. Конструктивно це осереддя складається з набору пластин магнітострикційної сталі, яке комплектується різними видами електричної обмотки. Саме електричне навантаження цієї обмотки у багатьох випадках визначає режим роботи ЕМ. Оскільки шихтований магнітопровід в комплексі з обмоткою складають електромеханічний вузол, при його роботі у складі ЕМ можуть виникати дефекти як в електричній, так і механічній його частинах. У цьому

випадку дуже важливо дослідити питання впливу електричного режиму обмотки на стан шихтованого магнітопроводу (температурний, ступінь пресування пластин та ін.). Крім того, постає питання – який фізичний процес обрати в якості діагностичного сигналу і які його параметри і характеристики застосувати як діагностичні ознаки?

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведені у [5, 24, 63] довели досить високу інформативність вібрацій, що виникають і розповсюджуються у пакеті шихтованого магнітопроводу під час експлуатації ЕМ. Крім того, використання методів ударної тестової діагностики дозволило за допомогою вимірювання і наступної статистичної обробки сигналу віброприскорення діагностувати ступінь пресування пластин заліза, що утворюють пакет магнітопроводу.

Надалі розглянемо питання застосування наведеної вище багаторезонансної моделі (2.10) до описання процесу утворення вібрацій у шихтованому магнітопроводі.

У вищезгаданих роботах [5, 24, 63] розглянуто питання виникнення вібрацій у шихтованому магнітопроводі, який використано в якості осереддя статора турбогенератора. Як приклад досліджено процес утворення коливань у крайніх пакетах осереддя цього статора, що призводить до найбільш типового дефекту магнітопроводу, так званої «розпушовки». Виникнення цього дефекту відбувається під впливом електромагнітного поля, що викликає поступове послаблення пресування активної сталі. В результаті відбувається відшарування пластин зубців від шихтованого масиву осереддя ротору. Вказане розшарування відбувається під впливом сили

$$F(t) = f(t) + \eta'(t), \quad (2.25)$$

де $f(t)$ - сила, що впливає на крайню пластину внаслідок гармонійної зміни індукції; $\eta'(t)$ - випадкова складова сили.

Як показано у вказаних вище роботах [5, 24, 63], сила $\eta'(t)$ являє собою потік випадкових за часом і за амплітудою імпульсів, що утворює породжуючий процес. У цих же роботах зроблено обґрунтування, що при певних припущеннях шихтований магнітопровід статора, або ротора ЕМ можна розглядати як механічну коливальну систему, котра здатна резонувати

на певних частотах під впливом породжуючого процесу. Це зумовлено тим, що вказане осереддя ЕМ складається з різних елементів (пластини шихтованого магнітопроводу, бандажні кільця, стяжні призми та ін.), для кожного з яких характерна своя власна частота вібрацій.

Саме виходячи з цього, досліджуваний магнітопровід може розглядатись як багаторезонансна багатовходова лінійна система другого порядку. Тобто, як і для підшипника кочення вібраційний процес $\xi(t)$ в точці розміщення акселерометру може бути представлений співвідношенням (2.10), для опису ймовірнісних характеристик якого придатні отримані вище співвідношення, а саме, кореляційна функція (2.23), спектральна щільність (2.24) та характеристична функція (2.7).

Таким чином, зазначені співвідношення (2.7), (2.23) та (2.24) надають можливість обґрунтувати діагностичні ознаки для визначення технічного стану підшипників кочення та шихтованого магнітопроводу за результатами вимірювання і статистичної обробки на ІВДС діагностичного вібраційного сигналу $\xi(t)$.

Поява різноманітних дефектів в підшипнику кочення супроводжується зміною значень параметрів R_j , L_j і C_j , що входять до складу еквівалентної електричної схеми підшипника (рис.2.3, б). У свою чергу в запропонованій математичній моделі (2.10), це призводить до зміни початкових і центральних моментів, а також характеру кривої функції розподілу ймовірностей діагностичного вібраційного сигналу, які отримуються на основі (2.7).

Як видно із співвідношення (2.23) автокореляційна функція процесу (2.10) повністю визначається параметрами a_j , ψ_j і β_j , $j = \overline{1, n}$, які можна використовувати як діагностичні ознаки при аналізі вібрацій підшипників кочення і шихтованого магнітопроводу ЕМ.

Для діагностики підшипників кочення ЕМ можна використовувати в якості діагностичних ознак наступні параметри:

При спектрально-кореляційному аналізі вібрацій:

- коефіцієнти затухання β_j , $j = \overline{1, n}$;
- частотні параметри ψ_j , $j = \overline{1, n}$;

При аналізі кривих розподілу ймовірностей вібрацій:

- характер кривої функції розподілу ймовірностей;
- початкові та центральні моменти, серед яких найбільш інформативними є коефіцієнти асиметрії k та ексцесу γ .

Якщо замість параметрів k та γ скористатись зв'язаними з ними параметрами $\beta_1 = k^2$ и $\beta_2 = \gamma + 3$, то в якості діагностичного простору для формування навчаючих сукупностей, що характеризують технічний стан досліджуваних вузлів, можна вибрати площину (β_1, β_2) , у який будуватиметься відома в статистиці діаграма Пірсона [5, 59, 61, 110]. Саме такий підхід буде використаний у розділі 4 даної дисертаційної роботи для формування навчаючих сукупностей, які враховують як види можливих дефектів досліджуваного вузлу ЕО, так і режим його роботи.

Надалі перейдемо до розгляду моделей формування навчаючих сукупностей, що забезпечують можливість одночасного врахування як видів дефектів вузлів ЕО, так і режими його роботи.

2.4. Моделі формування навчаючих сукупностей, що характеризують станів вузлів ЕО з урахуванням режимів їх роботи

Сучасний етап розвитку технологій, які застосовуються в енергетичному виробництві, характеризується суттєвим збільшення інформаційного обміну між елементами енергосистеми на всіх її ієрархічних рівнях. Електроенергетичні системи (ЕЕС) розвинутих країн світу переходять до використання інтелектуальних мереж, побудованих на основі концепції Smart Grid, що висуває нові вимоги і перед засобами забезпечення надійності як енергосистеми в цілому, так і її компонентів. З'являється необхідність у формуванні цілісної багаторівневої системи управління, яка забезпечує високий рівень автоматизації та надійності всієї ЕЕС, охоплює виробників електроенергії, передавальні та розподільчі мережі, споживачів. Важливе місце посідає отримання актуальної інформації про фактичний стан кожного елемента електричної мережі та обмін цією інформацією між багатьма учасниками, що в сукупності забезпечує підвищення надійності ЕЕС в цілому.

Одним з ключових завдань в електроенергетиці є розроблення методів та технічних засобів моніторингу і діагностики стану окремих пристроїв ЕЕС

в реальному часі, забезпечення узагальнення такої діагностичної інформації, виділення з великого масиву даних тієї інформації, що є критично важливою для системи в цілому, та передачу її на вищий рівень ієрархії [23, 70, 82].

Реалізувати поставлену мету можна шляхом створення інтелектуальної розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану та діагностування ЕЕО.

В ході практичного використання таких систем, які ґрунтуються на попередньому навчанні і орієнтовані на використання Smart Grid технологій, виникають питання, пов'язані з принципами побудови навчаючих сукупностей (НС) та подальшою організацією їх використання для визначення технічного стану певного енергетичного об'єкту, або його вузлу. Слід зазначити, що системи моніторингу і діагностування, побудовані за Smart Grid технологією мають працювати у режимі реального часу, тобто така система повинна оперативно знаходити у банку навчаючих сукупностей відповідну сукупність, яка містить інформацію як про вид дефекту цього об'єкту, так і про режим його роботи.

Розглянемо питання розроблення моделей формування просторів діагностичних ознак (мір), що відповідають різним технічним станам вузлів ЕО, яке працює у різних режимах (швидкість обертання ротора ЕМ, температура вузлів, що діагностуються, різні ступені електродинамічного навантаження та ін.).

При проведенні функціональної еталонної діагностики під час формування НС (еталонів) виникає задача вибору діагностичних просторів. Згідно [65], у сучасній математиці «... *простір* – це логічно мислена форма (або структура), яка слугує середовищем, де здійснюються інші форми та ті чи інші конструкції ...». У нашому випадку під «*простором* будемо розуміти *множину будь-яких об'єктів*, які називають його точками; ними можуть бути геометричні фігури, функції, стан фізичної системи та ін. ...».

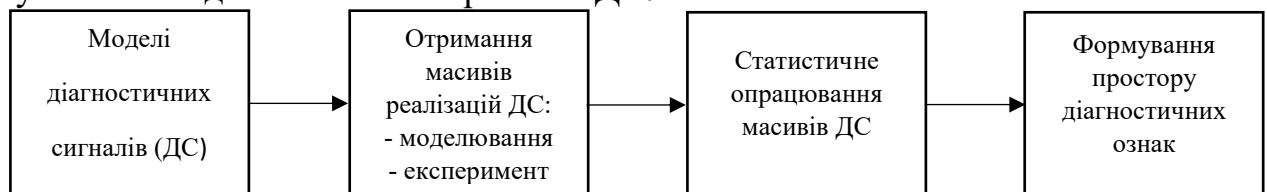
Згідно з [5, 21, 61, 69], в якості координат діагностичних просторів зазвичай обирають параметри або функціональні характеристики діагностичних сигналів, які виявилися найбільш чутливими до зміни технічного стану досліджуваних об'єктів. Мірність діагностичного простору безпосередньо пов'язана з кількістю координат, по яких сенсорами здійснюється вимірювання діагностичних сигналів.

Позначимо простір діагностичних ознак через Ω . В разі вибору статистичних діагностичних моделей в якості сукупності діагностичних ознак до складу цього діагностичного простору Ω зазвичай входять певні статистичні параметри і характеристики, які є найбільш інформативними до виявлення наявності та класифікації різних видів дефектів у вузлах ЕО.

Виходячи з цього, параметри та характеристики діагностичних сигналів можна отримувати, розглядаючи їх як реалізації випадкових процесів або полів.

$$\begin{aligned} \xi(\omega) &\rightarrow \xi(\omega, t), \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T \\ \xi(\omega) &\rightarrow \xi(\omega, r, t), \quad \omega \in \Omega, \quad r(x, y, z), \quad t \in T. \end{aligned} \quad (2.26)$$

З урахуванням обґрунтованих діагностичних ознак та режимів роботи ЕО нижче наведено схематичну ілюстрацію формування НС для діагностики вузлів ЕО за допомогою створеної ІВДС.



В якості діагностичного простору Ω для формування НС обрано відомий у статистиці еліпс розсіювання. Виходячи з цього, параметри та характеристики діагностичних сигналів можна отримувати, розглядаючи їх як реалізації випадкових процесів або полів.

Враховуючи таке уявлення про вимірювання діагностичних сигналів, можна схематично показати формування діагностичного простору (рис. 2.4). У верхній частині рис.2.4 наведено Ω - простір сукупності діагностичних ознак, які визначаються відповідними статистичними параметрами та характеристиками. Як показали [5, 61, 69] багаточисельні теоретичні і експериментальні дослідження, серед таких параметрів найбільш інформативними є початкові та центральні моменти (кумулянти) до j -порядку включно, а серед характеристик – кореляційна функція $R(\tau)$, спектральна щільність потужності $S(f)$, щільність розподілу ймовірностей $p(x)$ та характеристична функція $f(t, u)$.

Слід також зазначити, що формування НС здійснюється для попередньо обраного об'єкту діагностування та вузлів, що його утворюють. Причому, перелік можливих дефектів при формуванні цих НС, підбирається для кожного вузлу з урахуванням його виду, конструктивних особливостей і призначення. Слід також зазначити, що саме від вибору об'єкту (або певних вузлів, що входять до його складу) залежить інформативність тих чи інших діагностичних ознак [5, 61].

У нижній частині рис. 2.4 схематично наведено принцип побудови підпросторів сукупностей діагностичних ознак $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, що відповідають справному стану об'єкту або наявності певних видів дефектів (дефект 1, дефект 2, ... , дефект n) та входять до складу простору Ω , тобто

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \in \Omega. \quad (2.27)$$

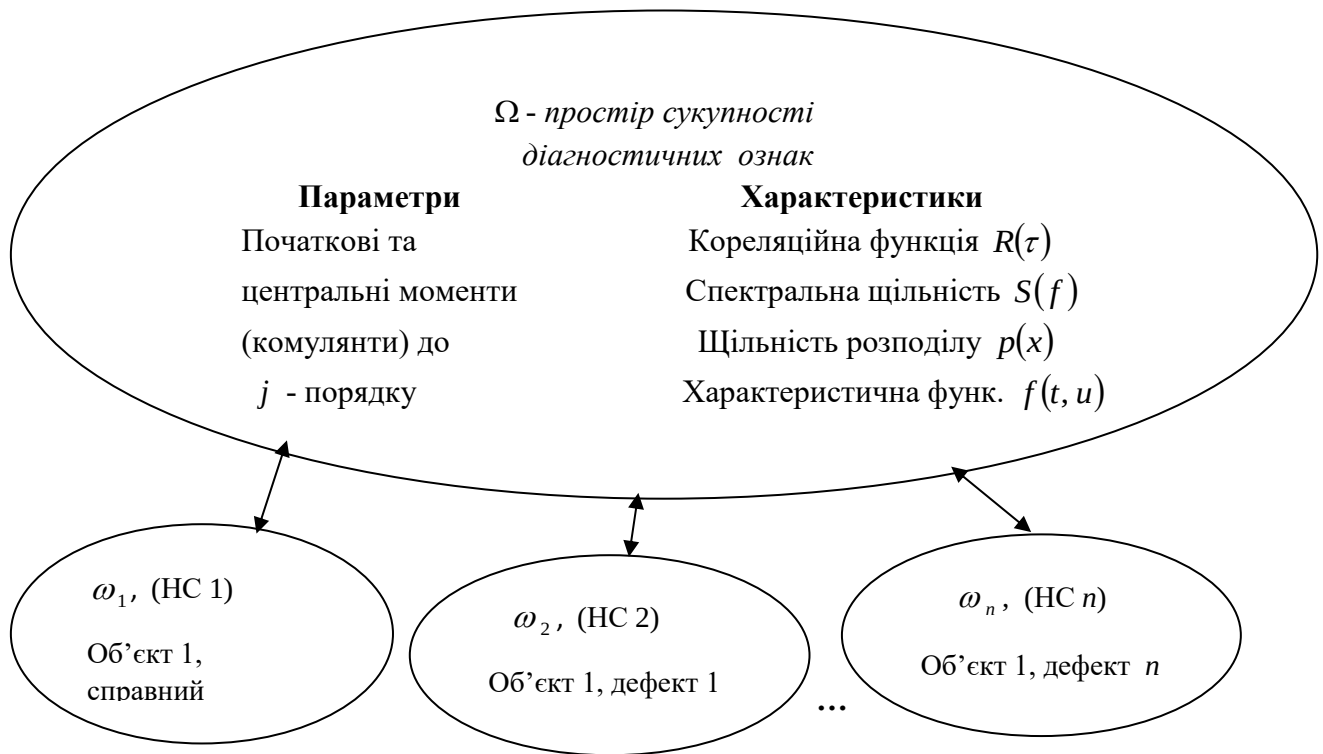


Рис. 2.4 Принцип побудови сукупностей діагностичних ознак

Наведена сукупність підпросторів будується окремо для кожного з об'єктів діагностування. Умовно на рис.2.4 ці підпростори побудовані для об'єкту 1, в якості якого може бути обраний будь-який об'єкт ЕО, для якого реалізуються операції діагностування (наприклад, потужні роторні ЕМ, трансформатори, електродвигуни власних потреб тощо).

Згідно [5, 25, 61, 62], завершальним етапом діагностування ЕО є встановлення наявності і класифікація певних видів дефектів, які можуть виникати у досліджуваних вузлах ЕО. У вказаних роботах підкреслено, що виконання цих операцій передбачає наявність НС, які відповідають певним видам дефектів у вузлах ЕО, що діагностуються. Крім того, для отримання достовірних результатів діагностування необхідно враховувати режим роботи ЕО. Тобто, сформовані НС мають водночас враховувати як можливі види дефектів, так і режими роботи ЕО.

В якості наступного прикладу на рис.2.5 наведено схему утворення діагностичних просторів з НС, що відповідають вказаним вище вимогам, а саме, містять інформацію і про можливі дефекти вузлів ЕО і про режими їх роботи.

У наведений на рис.2.5 схемі показано НС сформовані для справних підшипників кочення, які входять до складу двигунів власних потреб, і працюють, наприклад, у 4-х різних швидкісних режимах.

Цим режимам відповідають діагностичні підпростори: ω_{11} , ω_{12} , ω_{13} , ω_{14} . Аналогічним чином здійснюється формування діагностичних просторів з НС і для інших видів ЕО.

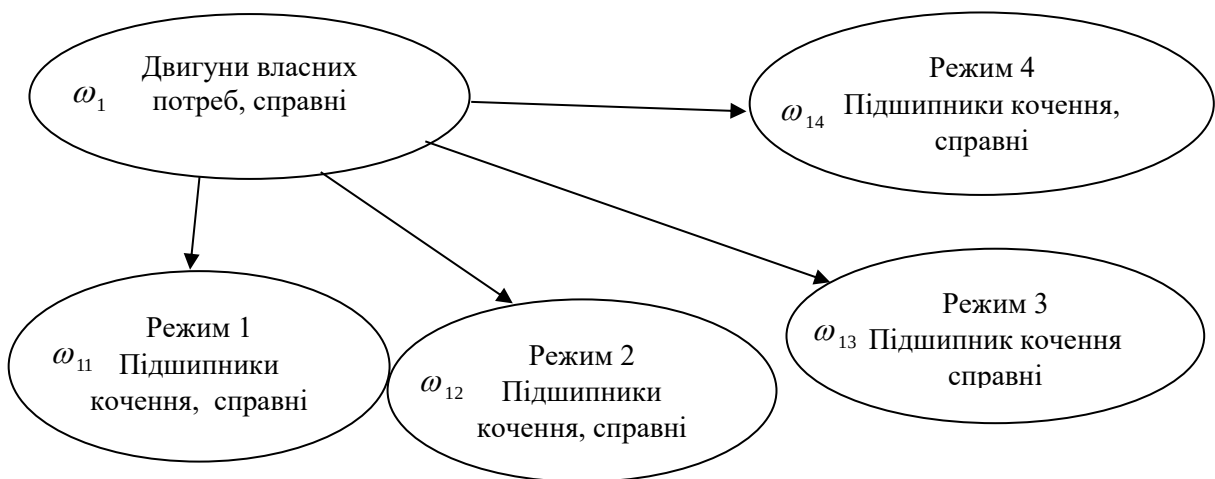


Рис.2.5 Схема формування НС для 4-х режимів роботи підшипників кочення

Сформовану множину діагностичних просторів Ω можна представити у наступній матричній формі

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{k1} & \omega_{k2} & \dots & \omega_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

У наведеній формі (2.28) підпростори, що розташовані по рядках, відповідають однаковим технічним станам цього вузлу, але працюючим у різних режимах, при яких експлуатується досліджуване ЕО, а кожний стовпчик відповідає певному (незмінному) режиму роботи вузлу, але маючим різні технічні стани. Тобто, у сукупності підмножин ω_{nk} , індексом $j = \overline{1, k}$ позначається певний вид дефекту, а індексом $p = \overline{1, n}$ - режим роботи ЕО.

На основі побудованих моделей проведено чисельні експерименти на реальному електротехнічному обладнанні. Докладне описання цих експериментів та їх результати наведено у розділі 4 даної дисертації.

Застосування концепції Smart Grid передбачає значне розширення можливостей систем діагностування за рахунок реалізації додаткових функцій, а саме, забезпечення двостороннього обміну інформацією між усіма ієрархічними рівнями системи, віддалений моніторинг стану досліджуваних об'єктів електростанції, оцінку залишкового ресурсу та ін. Практична реалізація таких ІВДС вимагає створення відповідних методів, алгоритмів і програмного забезпечення, які б у реальному часі оброблювали вимірювані сигнали і видавали результат діагнозу щодо технічного стану досліджуваного ЕО.

Враховуючи те, що організація роботи сучасних електроенергетичних об'єктів є ієрархічною, [70, 82] системи моніторингу, контролю та технічного діагностування ЕЕО також повинні будуватися за ієрархічним принципом.

Наступним кроком у створенні НС для ІВДС є умовне розбиття всього обладнання електростанції на певні ієрархічні рівні.

У відповідності з роботами [7, 22], таких рівнів може бути вибрано 4:

Перший – на цьому рівні розташовані елементи конструкції основних вузлів обладнання електростанції. Саме цей рівень і визначає, які дефекти можливі в об'єкті, що розглядається;

Другий – це власне вузли обладнання, які являють собою конструктивно єдине ціле. Сюди можна віднести обмотки ротора та статора обертових машин, магнітопроводи, підшипникові вузли, корпус, станину, фундамент, систему охолодження;

Третій – представляє агрегати електротехнічного обладнання електростанції: генератори, двигуни власних потреб, трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі, ізолятори, насоси тощо;

Четвертий рівень ієрархії – це рівень електростанції в цілому.

У відповідності із наведеними рівнями пропонується один з методів формування і зберігання НС для банку даних ІВДС, описання якої наведено у наступному 3-му розділі.

На рис.2.6 та рис.2.7 наведені схеми розміщення НС у плоскій та об'ємній матричних формах. Умовно це можна назвати представлення НС у 2D – форматі (рис.2.6) і 3D – форматі (рис.2.7).

Таке представлення НС дозволяє (з узгодженням запропонованих вище ієрархічних рівнів) зручно їх систематизувати по окремим вузлам і агрегатам усього ЕО, що представлено на електростанції і може бути охоплено системою діагностування. Так, у форматі 2D (рис.2.6) представляються НС, що охоплюють дані по одному з вузлів (це відповідає 2-му рівню у запропонованій ієрархії). По стовпчиках запропонованої матриці розташовані елементи, що відповідають певним видам дефектів, які можуть виникати при експлуатації досліджуваного вузла при конкретному фіксованому режимі його роботи (наприклад, $\omega_{11}, \omega_{21}, \omega_{31}, \dots, \omega_{k4}$). За рядками цієї матриці розташовуються елементи, які відповідають однаковим технічним станам (справним, або маючим конкретні види дефектів), але працюючим у різних режимах.

На рис.2.7 наведена об'ємна 3D матриця, яка поєднує декілька вузлів, що складають певний агрегат (наприклад, електродвигун власних потреб), який входить до складу ЕО електростанції. Кожний перетин цієї 3D матриці являє собою плоску 2D матрицю, що відповідає певному вузлу (наприклад, підшипник кочення), що входить до складу досліджуваного агрегату. Система позначень елементів у наведеній матриці залишається такою ж, як і у попередньому випадку для 2D матриці. Так, індексом $j = \overline{1, k}$ позначається певний вид дефекту, а індексом $p = \overline{1, n}$ - певний режим роботи ЕО, а індексом $m = 1, j$ – вузол, що входить до складу певного агрегату. З урахуванням запропонованої 4-х рівневої ієрархічної системи досліджуваний агрегат відноситься до 3-го ієрархічного рівня.

ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}	$\dots$	ω_{1n}
ω_{21}	ω_{22}	ω_{23}	$\dots$	ω_{2n}
ω_{31}	ω_{32}	ω_{33}	$\dots$	ω_{3n}
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
ω_{k1}	ω_{k2}	ω_{k3}	$\dots$	ω_{kn}

Рис.2.6 Навчальна сукупність у плоскій формі для одного вузлу

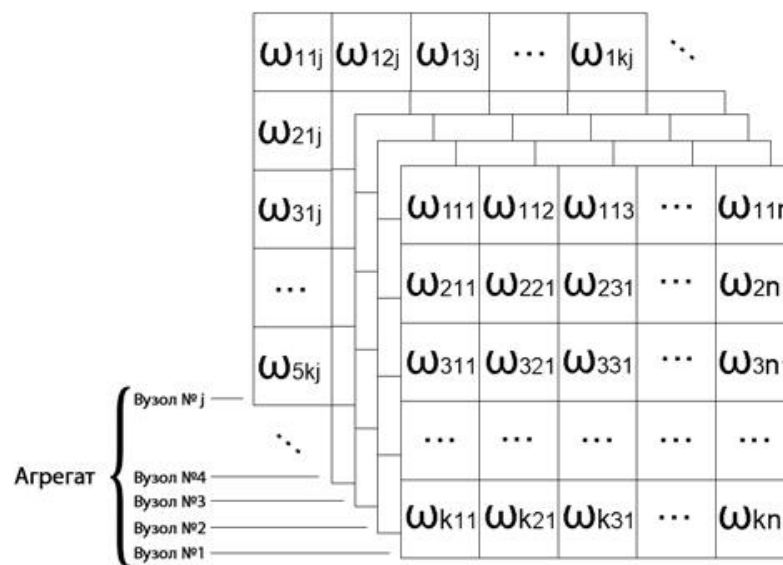


Рис.2.7 Навчальна сукупність в об'ємній формі для декількох вузлів

На основі побудованих моделей проведено чисельні експерименти на реальному електротехнічному обладнанні. Докладне описання цих експериментів та їх результати наведено у розділі 4 даної дисертаційної роботи.

Висновки за розділом 2

1. Вперше розроблено моделі формування навчаючих сукупностей для ІВДС, які враховують одночасно як можливі види дефектів у певних вузлах ЕО, так і припустимі режими їх роботи.
2. Вперше запропоновано форми представлення НС у ієрархічній структурі багаторівневої ІВДС для можливої оцінки у реальному часі технічного стану вузлів ЕО.

3. Удосконалено математичну модель діагностичних сигналів, яка враховує як власні властивості об'єкту діагностування, так і режими (швидкісний, температурний електричний та ін.), у яких працює цей об'єкт.
4. Обґрунтовано можливість використання математичних моделей лінійних і лінійних періодичних випадкових процесів для описання діагностичних сигналів, що супроводжують роботу окремих вузлів ЕО, яке працює у різних режимах.
5. За результатами аналізу математичних моделей діагностичних сигналів обґрунтовано діагностичні ознаки, які надають можливість визначати технічний стан вузлів ЕО, що працює у різних режимах.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ (ІВДС) ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕО, ЩО ПРАЦЮЄ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ

У даному розділі наведено описання структури експериментального зразку багаторівневої ІВДС діагностики, яку у подальшому було використано для обробки експериментальних даних і практичної перевірки розроблених математичних моделей та методів визначення технічного стану вузлів ЕО, що працює у різних режимах.

Розглянуто основні види програмного забезпечення, що розроблено для управління роботою створеної ІВДС, обробки експериментальних даних та побудови розв'язуючих правил з діагностування і класифікації можливих дефектів у вузлах ЕО

Основні результати, що наведено в даному розділі дисертації, опубліковані в роботах автора [22, 23, 29], а також у звіті про наукову роботу [82].

3.1. Експериментальний зразок ІВДС вібродіагностики вузлів ЕО, що працює у різних режимах

Інформаційно-вимірювальна діагностична система (ІВДС) орієнтована на вимір і обробку вібраційних сигналів, що виникають у вузлах електротехнічного обладнання при його роботі.

Необхідність дослідження сигналу вібрацій вузлів ЕО, який фактично є випадковим процесом, для вирішення задач діагностики різних вузлів ЕО зумовлює вимогу визначення стохастичних параметрів і характеристик, що використовуються в якості діагностичних ознак. Крім того, дослідний зразок ІВДС повинен забезпечувати формування навчальних сукупностей і прийняття рішень для виявлення і класифікації дефектів у вузлах ЕО, яке може працювати у різних режимах роботи. І цей момент є принциповим, оскільки для діагностування не треба примусово переводити той чи інший вузол ЕО у той режим роботи (швидкісний, температурний та ін.), при якому

здійснювалось формування навчаючих сукупностей. Саме це надає можливість в реальному часі отримувати інформацію про технічний стан обладнання, що діагностується.

Крім того, вищезгадана ІВДС в порівнянні з відомими системами має більш широкі можливості. Це обумовлено тим, що у створеній системі реалізована модель, заснована на використанні в якості діагностичних ознак статистичних параметрів розподілу вібраційного процесу.

В даному підрозділі зупинимося на розгляді структури, особливості побудови і застосування ІВДС ЕО, що може працювати у різних режимах .

Узагальнена структурна схема багатоканальної ІВДС функціональної діагностики приведена на рис. 3.1. Вона складається з:

- перетворювачів, для вимірювання сигналів різних фізичних процесів, які супроводжують роботу досліджуваного об'єкта;
- аналогової частини, призначеної для попередньої обробки вимірної інформації (узгодження входів і виходів окремих вузлів, посилення сигналу, попередньої фільтрації і т.п.);
- інтерфейсу між аналоговою і цифровою частинами, основним завданням якого є перетворення вимірних сигналів в цифровий код і подальша його передача в цифрову частину ІВДС;
- цифрової частини, до якої входять різні пристрої перетворення аналогових сигналів в цифровий код і які у комплексі з персональним комп'ютером (обчислювальним ядром) працюють за алгоритмом спеціально розробленого програмного забезпечення;
- інтерфейсу користувача, за допомогою якого оператор управляє роботою системи і отримує інформацію про стан об'єкта, що діагностується.

В ІВДС при вирішенні задачі моніторингу стану об'єкта, який розташований на великій відстані, або доступ до якого обмежений, передбачено використання спеціальних каналів (радіоканалу, оптоволоконної лінії) для передачі сигналів на значні відстані.

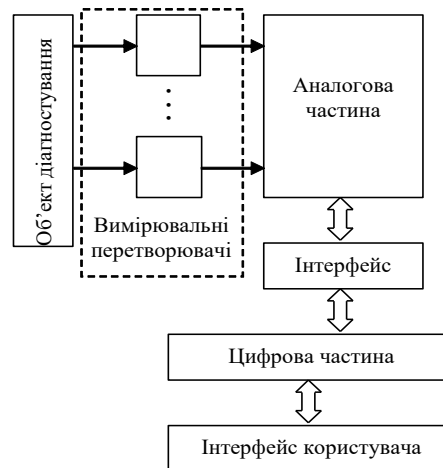


Рис. 3.1. Структурна схема багатоканальної ІВДС

Розробка ІВДС для конкретного типу електротехнічного обладнання пов'язана з вирішенням наступних завдань [5]:

- визначення класу можливих дефектів (катастрофічні, ті, що зустрічаються найчастіше, або обрані за іншими критеріями);
- визначення можливих режимів роботи ЕО (швидкісних, температурних, навантаження та ін.);
- розробки алгоритмів визначення та розпізнавання із заданою ймовірністю конкретних видів дефектів вузлів ЕО.

Крім цих завдань при створенні ІВДС необхідно вирішити комплекс задач, пов'язаних з формуванням навчальних сукупностей і побудовою розв'язуючих правил з діагностики та класифікації конкретних видів дефектів в ЕО, яке може працювати у різних режимах.

На базі узагальненої структури ІВДС (рис.3.1), в залежності від виду розв'язуваних діагностичних завдань, будується конкретна структура ІВДС ЕО. Так, завдяки застосуванню сучасних інформаційних технологій, було реалізовано декілька структур ІВДС, які використовували як дротовий, так і дистанційний канали (стандарти Wi-Fi, Bluetooth) передавання (обміну) даних. Один із варіантів реалізації структури такої ІВДС, створеної в ІЕД НАН України, наведено на рис.3.2.

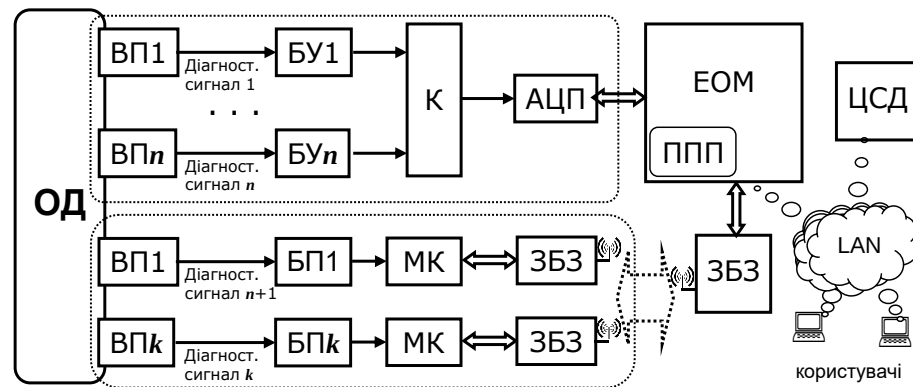


Рис. 3.2. Структура системи діагностування вузлів ЕО з реалізацією дротових і бездротових (дистанційних) каналів вимірювання і передачі інформації. У структурній схемі, що зображено на рис.3.2 прийняті наступні позначення: ОД – об’єкт діагностування; ВП – вимірювальний перетворювач (сенсор); БУ – блок узгодження; К – комутатор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; БП – блок перетворення; МК – мікроконтролер; ЗБЗ – засоби бездротового цифрового зв’язку; ЕОМ – електронна обчислювальна машина; ППП – пакет прикладних програм; LAN – локальна мережа (Intranet) для зв’язку з ЦСД, відображення інформації локальним користувачам; ЦСД – центральна система діагностування.

Розроблений дослідний зразок ІВДС дозволяє виконувати наступні основні функції:

- вимірювання вібраційних сигналів;
- накопичення, зберігання виміряних даних;
- статистичний аналіз даних вимірювань з метою отримання кількісних оцінок діагностичних ознак;
- формування навчальних сукупностей і побудову розв’язуючих правил з діагностики та класифікації дефектів вузлів ЕО, які можуть працювати у різних режимах.

Розробка окремих модулів ІВДС здійснювалася з використанням різноманітних аналогових і цифрових пристроїв та портативних комп’ютерів, що дозволило застосовувати відомі і спеціалізовані програмно-математичні методи обробки сигналів сенсорів, встановлених на досліджуваному об’єкті. Структурна схема лабораторного зразка ІВДС, який використовувався при проведенні експериментальних досліджень діагностичних сигналів, що супроводжують роботу вузлів ЕО, представлена на рис. 3.3. Структурно зразок складається з:

діагностується. При проведенні експериментів в якості об'єкта дослідження були обрані електричні двигуни малої і середньої потужності, що працюють у складі лабораторних стендів Інституту електродинаміки НАН України, а також двигуни власних потреб ТЕС. У цих об'єктах за допомогою розробленої ІВДС вимірювались вібраційні діагностичні сигнали (сенсори Д1, Д2, Д3). Передбачено також, що за допомогою сенсора Д4 може вимірюватись температура певних вузлів досліджуваних об'єктів. Саме сумісний розгляд процесів вібрації і температури надає можливість детально дослідити процеси теплового небалансу, які можуть спостерігатись в обертових електричних машинах при зміні швидкості обертання їх валу, або при виникненні певних видів дефектів (коротке замкнення витків у обмотці, погана збалансованість обертових частин та ін.). Крім того, такий підхід надає можливість використовувати для вимірювання вібрацій трикомпонентний акселерометр Brüel & Kjær 4326A, що, у свою чергу, дозволяє дослідити вібраційне поле у точці розташування цього акселерометру.

Основним елементом в будь-якої ІВДС діагностики є програмне забезпечення, завдяки якому відбувається її функціонування. Розроблена ІВДС включає в себе три основних види програмного забезпечення, а саме:

- керуючі програми, що забезпечують функціонування власне створеного зразка ІВДС;
- пакет програм, призначених для статистичної обробки вимірних діагностичних сигналів;
- програми, що реалізують розв'язуючі правила, щодо прийняття рішень про технічний стан досліджуваних об'єктів.

Опис усіх трьох видів програмного забезпечення для розробленого зразка ІВДС діагностики наведено в підрозділі 3.2.

Завершальний етап діагностування вузлів ЕО з використанням створеного зразка ІВДС реалізується за допомогою блоку прийняття рішення, видає результат діагнозу (рис. 3.3). Даний блок реалізується програмно, за допомогою зазначених вище програмних продуктів.

Виходячи зі схеми, представленої на цьому рисунку, розроблений зразок ІВДС може працювати вище програмних продуктів двох режимах: НАВЧАННЯ і ДІАГНОСТИКА. Робота ІВДС в тому чи іншому із зазначених режимів реалізується за допомогою керуючого програмного забезпечення.

У режимі НАВЧАННЯ, за кількісними оцінками діагностичних ознак ОДО, одержуваних за результатами статистичної обробки вібраційних сигналів, в заздалегідь вибраних діагностичних просторах здійснюється формування навчальних сукупностей НС, що відповідають різним технічним станам досліджуваного вузла і режимам, у яких може працювати ЕО. У режимі ДІАГНОСТИКА, за отриманими ОДО і заздалегідь сформованим НС, з використанням програми побудови розв'язуючих правил проводиться визначення технічного стану вузла, що діагностується (результат діагнозу).

Більш детально питання, пов'язані з роботою блоку прийняття рішення, що входить до складу створеної ІВДС, розглянуті в 4-му розділі цієї дисертаційної роботи.

Однією з важливих особливостей створеної ІВДС, що передбачає можливість її практичного використання у відповідності з концепцією Smart Grid, є врахування багаторівневої структури обладнання електростанції. Для цього передбачається умовне розбиття основного і допоміжного ЕО електростанцій за ієрархічним принципом.

На рис. 3.4 показано ієрархію електротехнічного обладнання традиційної електростанції (ТЕС, АЕС, ГЕС), найбільш важливого з точки зору надійності всього об'єкта. Докладно цю ієрархію описано у роботі [70], а також у звіті про наукову роботу [82].

Описання зображених на рис. 3.4 ієрархічних рівнів обладнання електростанцій було наведено у попередньому розділі 2 даної дисертаційної роботи. Відносно наведених рівнів слід підкреслити, що найбільш інформативним у наведеній структурі є перший та другий рівні, оскільки саме визначення елементів, розташованих на цих рівнях ієрархії дає всю необхідну інформацію про види, причини виникнення та прояву дефектів. За результатами аналізу цієї інформації розробляють діагностичні моделі, вибирають діагностичні сигнали та обґрунтовують діагностичні ознаки, щодо визначення технічного стану ЕО.



Рис. 3.4 Розділення на умовні рівні ЕО електростанції

Очевидно, що будь-яка система діагностування повинна обов'язково виявляти катастрофічні дефекти, оскільки вони повністю порушують працездатність об'єкта діагностування. Разом з тим, деякі некатастрофічні чи часткові дефекти можна залишити поза увагою системи.

Такий підхід до розробки системи дає можливість спростити її структуру, зменшити обсяги інформації, що обробляються в системі та передаються між її ієрархічними рівнями. За рахунок цього система може бути здешевлена, а наявні обчислювальні ресурси можна перерозподілити на виконання більш критичних функцій.

При створенні систем діагностування, як при звичайному підході, так і за Smart Grid обов'язково розв'язуються такі завдання [5, 61, 70, 82]:

- вивчення об'єкту діагностування;
- визначення переліку всіх можливих дефектів або тих з них, що є найбільш ймовірними чи найбільш критичними;
- вибір або побудова математичної моделі об'єкта і відповідні моделі можливих дефектів;
- вибір діагностичних сигналів та діагностичних ознак по кожному виду обладнання, що підлягає діагностуванню;
- вибір методів і розробка алгоритмів діагностування; оцінка їх якості (повнота виявлення дефектів, глибину пошуку);
- розробка технічних засобів діагностування – спланувати структуру системи, вибрати її компоненти; оцінити їхні характеристики (безвідмовність, достовірність роботи тощо).

Слід зазначити, що розв'язок перших п'яти завдань із наведеного переліку не зазнає суттєвих змін при застосуванні технологій Smart Grid. У той же час вирішення останнього завдання потребує проведення додаткових наукових досліджень.

На основі запропонованої вище ієрархії ЕО електростанції, розглянемо особливості побудови багаторівневих систем діагностування об'єктів електроенергетики [5, 70, 82].

На верхньому рівні ієрархії розташовується центральна система діагностування (ЦСД) – головний блок станційної системи діагностування, структурна схема якого зображена на рис. 3.5.

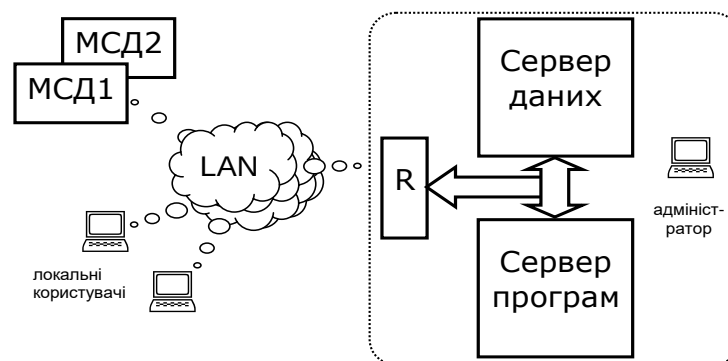


Рис. 3.5. Структура центральної системи діагностування:

МСД n – місцеві системи діагностування; LAN – локальна мережа; R – Router

Як вказано в [70, 82], основні функції ЦСД полягають у наступному: представлення даних різним користувачам (у тому числі територіально віддаленим, наприклад через Web технології) з обмеженням прав доступу в

залежності від службових обов'язків, а також накопичення різного роду статистичної інформації про стан об'єкта в цілому. Крім того, ЦСД може використовуватися для планування роботи об'єкта в цілому, оформлення різного роду звітів тощо. Передбачається, що умови роботи апаратури ЦСД – офісне приміщення, тобто відсутні значні рівні шкідливих зовнішніх впливів, діапазон робочих температур відповідає звичайним умовам роботи, електричне живлення можливе від мережі загального користування.

У свою чергу, типова структура кожної з місцевих систем діагностики (МСД), у відповідності до [70, 82], зображена на рис. 3.2.

Апаратура, що входить до складу МСД, повинна працювати в умовах виробничого процесу електроенергетичного об'єкта. Така апаратура повинна бути захищена від впливу значних рівнів електромагнітних завад, допускати роботу в широкому діапазоні температур, а також, можливо, у агресивних середовищах.

Апаратуру, що входить до складу МСД, можна логічно розділити на 3 ієрархічні рівні. Функції, що виконуються апаратурою цих ієрархічних рівнів, наступні [70, 82]:

Рівень 1 – первинний відбір діагностичної інформації (вимірювання діагностичних сигналів, підсилення, аналогова фільтрація, перетворення в цифрову форму);

Рівень 2 – попередня математична обробка і прийняття проміжних діагностичних рішень (прості алгоритми, реалізація яких не вимагає значних обчислювальних ресурсів, розділення інформації по ступеню критичності дефектів); сигналізація на вищий рівень при наявності дефектів; накопичення незначних обсягів вимірювальної інформації та передача її на вищий рівень (при відповідному запиті);

Рівень 3 – накопичення, повноцінна обробка і глибокий аналіз даних, швидке реагування на аварійні сигнали з нижчого рівня, прийняття діагностичних рішень по об'єкту діагностики в цілому, архівація статистичних даних, прогнозування надійності та оцінка залишкового ресурсу обладнання, планування ремонтних робіт тощо.

На рис. 3.6 наведено узагальнену структуру розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану та діагностики ЕО, яка складається з ряду модулів, кожен з яких призначений для відбору та попередньої обробки вимірювальної

інформації про технічний стан певного вузла (генератор, циркуляційний насос, трансформатор тощо), та одного центрального модуля, який збирає і узагальнює інформацію від всіх місцевих модулів, а також може за необхідності узагальнювати дані і передавати їх на більш високий рівень ієрархії.



Рис. 3.6 Структура розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану та діагностики ЕО

Як зазначено в [70, 82], сучасні розподілені багаторівневі системи моніторингу стану та діагностики електроенергетичного обладнання будуються на основі цифрових засобів обчислень. Разом з тим, окремі енергетичні об'єкти обладнані штатними вимірювальними перетворювачами (зокрема, турбогенератори можуть бути оснащені датчиками температури статора і ротора), які можна використати як частину системи моніторингу.

Для інтеграції цих вимірювальних перетворювачів у систему, що розробляється, до її структури було введено ряд аналогових вимірювальних каналів з комутацією на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), як показано у верхній частині схеми на рис. 3.2. У відповідності із запропонованою структурою цієї схеми далі зупинимось на розгляді провідних та бездротових каналах вимірювання і передачі діагностичних сигналів.

3.1.1. Дротові канали вимірювання і передачі даних, що використано у створеному зразку ІВДС

Структурна схема аналогового (дротового) вимірювального модуля складається з кількох ідентичних за структурою каналів (рис. 3.2), кожен з яких містить вимірювальний перетворювач (ВП) деякої фізичної величини і блок узгодження (БУ), характеристики якого підбираються у відповідності до виду ВП. Наприклад, при вимірюванні вібрацій у якості ВП можна використати п'єзокерамічний акселерометр, тоді БУ – це підсилювач заряду з високим входним опором. Крім того, до БУ можуть входити аналогові схеми фільтрації, необхідні для видалення з вимірювального сигналу високих частот згідно з теоремою Котельникова.

Кожен канал приєднується до одного з входів аналогового комутатора К, який по чергову під'єднує їх до входу схеми АЦП для перетворення в цифровий код. Така схема не дозволяє отримувати значення різних процесів у один і той же момент часу, але є набагато дешевшою, ніж використання власного АЦП для кожного каналу.

Первинні сенсори для побудови вібраційного вимірювального каналу.

Для дослідження діагностичних було обрано первинний сенсор - трикомпонентний акселерометр Brüel & Kjær 4326A [44].

Пристрій призначений для одночасних вимірювань у трьох взаємно-перпендикулярних напрямках. Він складається з трьох чутливих елементів, запакованих в один корпус. Кожен індивідуальний чутливий елемент має власний роз'єм і калібрується окремо.

Зовнішній вигляд акселерометра Brüel & Kjær 4326A показаний на рис. 3.7, а його основні технічні характеристики наведені в табл. 2.1.



Рис. 3.7 Акселерометр Brüel & Kjær 4326A

Технічні характеристики акселерометра Brüel & Kjær 4326A

Табл. 2.1

Чутливість по заряду (на 160 Гц), пКл/г	$3 \pm 15\%$
Частотний діапазон (10%), Гц	x: 1 ... 9000 y: 1 ... 8000 z: 1 ... 16000
Мін. вихідний опір, ГОм	≥ 20
Ємність, пФ	1000
Ізоляція	> 10 МОм
Температурний діапазон, °C	$-55 \dots +175$
Вологостійкість	Герметичний
Максимальне навантаження, g пік	3000

Попередні підсилювачі для вібраційного вимірювального каналу. Для підсилення сигналу було використано підсилювач заряду Brüel & Kjær типу 2634 [44] призначений для узгодження вихідного заряду п'єзоелектричних акселерометрів з входами вимірювальної апаратури. Даний підсилювач є компактним, має міцний корпус (рис. 3.8), що дає можливість розміщувати його безпосередньо біля вимірювального перетворювача з метою уникнення роботи з проведення проводів.



Рис. 3.8. Підсилювач заряду Brüel & Kjær типу 2634

Коефіцієнт підсилення може регулюватися в межах від 0 до 20 дБ (від 1 до 10 мВ/пКл) за допомогою вмонтованого 10-обертового потенціометра.

Пристрій містить вбудований фільтр високих частот, призначений для відсікання низькочастотних шумів, що лежать в частотному діапазоні нижче 1 Гц. Верхня межа смуги пропускання залежить від ємності навантаження, що увімкнене на вихід підсилювача, і досягає 100 кГц (50 кГц при ємності навантаження 20 нФ).

Пристрої перетворення і вводу даних до ПЕОМ. Отримання інформації від аналогу відбувається за допомогою багатоканального пристрою NI USB-6218 (National Instruments multifunction data acquisition device Type USB-6218) поєднує в собі комутатор на 32 аналогових канали і схему АЦП.

Він отримує електричне живлення по шині USB, відрізняється високою точністю вимірювань і досить великою частотою вибірки. Має 32 аналогових входи з частотою дискретизації до 250 кГц (при одно-канальному вводі даних). Крім того, NI USB-6218 має 2 аналогових виходи, 8 цифрових вихідних ліній, 4 програмованих діапазони вимірювань (від $\pm 0,2$ В до ± 10 В) на канал.

Пристрій розроблений спеціально для мобільних застосувань.

Зовнішній вигляд пристрою вводу даних NI USB-6218 показаний на рис. 3.9, а його основні технічні характеристики наведені в табл. 2.2.



Рис. 3.9. – Пристрій вводу аналогових даних NI USB-6218

Технічні характеристики пристрою вводу даних NI USB-6218

Табл. 2.2

Підключення до ПК	По шині USB
Кількість каналів	32 однополярних / 16 диференційних
Частота дискретизації	250 кГц
Роздільна здатність	16 біт
Одночасна дискретизація по кількох каналах	відсутня
Вхідний діапазон	$-10 \dots +10$ В; $-200 \dots +200$ мВ
Буферна внутрішня пам'ять	4096 відліків
Аналогові виходи	2 / 250 кГц / 16 біт / $-10 \dots +10$ В
Кількість цифрових ліній	8 вхідних + 8 вихідних

блок демодуляції і резистивний фільтр, вимірний сигнал надходить до блоку перетворення аналогового сигналу в DCM-сигнал (duty cycle modulated – модуляція з коефіцієнтом заповнення) [22, 30]. Часова діаграма такого сигналу показана на рис. 3.11.

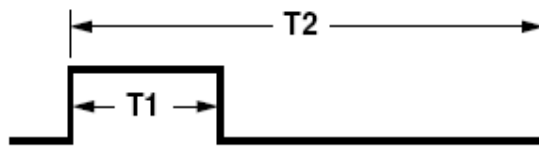


Рис. 3.11. DCM сигнал

Амплітуда виміряного вібраційного сигналу прямо пропорційна відношенню довжин імпульсів $T1/T2$. При цьому нульове значення прискорення відповідає 50% заповненню, тобто випадку, коли $T1 = 0,5 \cdot T2$. При $T1 < 0,5 \cdot T2$ вимірюється «від’ємне» прискорення відносно вибраної осі та у напрямку додатного прискорення. При $T1 > 0,5 \cdot T2$ маємо показник додатного прискорення відносно вибраної осі.

Коефіцієнт масштабування дорівнює 12,5 % на 1 g (дані виробника) [21]. Отже, амплітуда виміряного сигналу

$$A(g) = (T1/T2 - 0,5) \cdot 12,5\%.$$

Довжина імпульсу $T2$ визначається величиною резистора R_{SET} (рис. 3.10). Ширина частотної смуги (в межах до 6 кГц) встановлюється за допомогою конденсаторів C_X та C_Y , під’єднаних до виходів X_{FILT} та Y_{FILT} .

Експериментальний модуль бездротового вимірювання вібрацій складається з наступних основних елементів:

- двох акселерометрів ADXL202;
- мікроконтролера PIC16LF873-041 виробництва Microchip Technology;
- модуля Bluetooth EYMF2CMM-XX виробництва TAIYO YUDEN;
- супутніх елементів, що забезпечують функціонування блоку.

Зручність використання сенсорів, з виходів яких знімаються DCM-сигнали, пов’язана з тим, що такі сенсори можуть бути напряму підключені до входу лічильника мікропроцесора без використання аналого-цифрового перетворення або зв’язуючих логічних мікросхем, що спрощує процес обробки виміряного сигналу та збільшує час автономної роботи пристроїв.

Зовнішній вигляд розробленого експериментального модуля показаний на рис. 3.12.

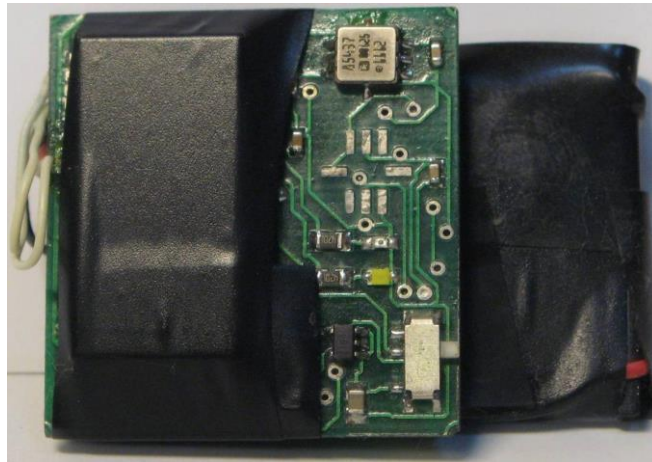


Рис. 3.12. Експериментальний бездротовий модуль вимірювання вібрацій

Додаткові електронні компоненти 2-го рівня ієрархії. Як було вказано у [82], прийнято рішення модулі другого рівня ієрархії системи виготовляти на основі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi model B+. Цей комп'ютер повністю готовий до роботи як обчислювальний модуль, але для виготовлення на його основі модуля системи діагностики необхідно ввести до його складу наступні компоненти:

- карту пам'яті стандарту micro SD зі встановленим системним та прикладним програмним забезпеченням (ПЗ);
- блок бездротового зв'язку в стандарті Bluetooth, що повинен забезпечити зв'язок модуля з бездротовим модулем вимірювання вібрацій;
- блок бездротової мережі на основі стандарту 802.11 (Wi-Fi), який буде забезпечувати зв'язок модуля 2-го рівня з модулем МСД;
- блок живлення (автономний чи звичайний).

Карта пам'яті, блоки Bluetooth та Wi-Fi – серійного виробництва. Блок автономного живлення модулів 2-го рівня ієрархії було виготовлено самостійно на основі акумуляторної батареї напругою 6 В і ємністю 14 А·г, призначеної для встановлення в пристрої безперебійного живлення. Загальний вид створеного модуля показано на рис. 3.13.

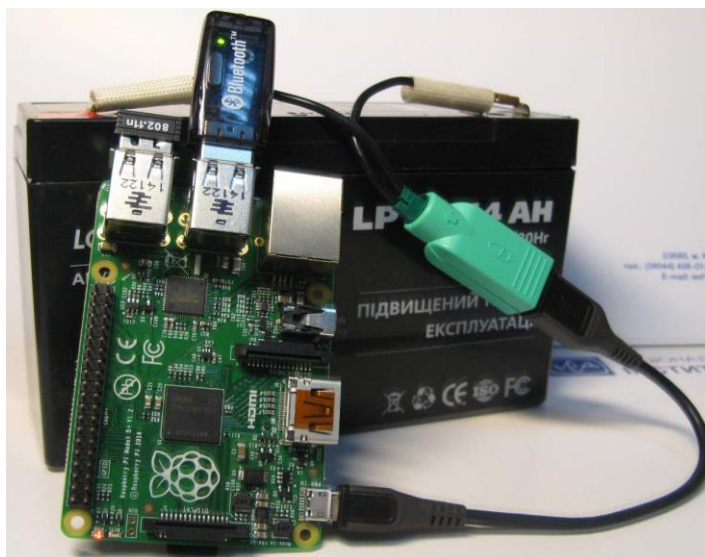


Рис. 3.13. Експериментальний модуль 2-го рівня ієрархії
з блоком автономного живлення

Розглянувши основні питання, пов'язані з апаратною частиною створеної ІВДС, перейдемо до розгляду програмного забезпечення, яке покладено в основу розробленої системи.

3.2. Програмне забезпечення для створеного зразку ІВДС

Протягом кількох останніх років на об'єктах електроенергетики розвинених країн значно зросла кількість вимірювальних засобів, у тому числі побудованих на основі бездротових технологій зв'язку [24, 30, 31]. При поєднанні у єдину інформаційно-вимірювальну систему вони дають можливість здійснювати дистанційний моніторинг, контроль і діагностування різноманітного устаткування, яке експлуатується на цих об'єктах – енергоблоках електростанцій, електричних підстанціях тощо. Збільшення кількості вимірювальних засобів підвищує достовірність інформації, що отримується про об'єкти моніторингу і діагностування, але разом з тим суттєво збільшує обсяги даних, які необхідно передавати, накопичувати і аналізувати [70].

3.2.1. Програмне забезпечення для управління роботою експериментального зразку ІВДС вузлів ЕО

Програмне забезпечення – сукупність програм системи обробки інформації, для багаторівневої системи моніторингу стану та технічної діагностики електроенергетичних об'єктів [23, 82] можна умовно розділити на 3 класи:

- системне ПЗ;
- прикладне ПЗ;
- вбудоване ПЗ.

Системне ПЗ – це операційна система, а також набір системних допоміжних програм (utilities), які в сукупності створюють робоче середовище та надають основні сервіси для прикладного ПЗ. В рамках даної дисертаційної роботи не ставилася мета створювати системне ПЗ. Натомість, будуть використані готові операційні системи: Microsoft Windows та Linux. Такі операційні системи вибрані з наступних міркувань: Microsoft Windows – поширена операційна система, для якої існує велика кількість доступних програмних продуктів. Оператори діагностичної системи, які працюють у середовищі Microsoft Windows, матимуть можливість користуватися звичним віконним інтерфейсом, а також використовувати звичні пакети програм для додаткової обробки даних (за потреби), оформлення звітів про стан обладнання, виконання інших завдань, пов'язаних з їх професійними обов'язками. Операційні системи сімейства Linux відрізняються тим, що не потребують значних обчислювальних потужностей, гнучко адаптуються до виконання запланованих функцій, придатні для написання програм, які працюють в режимі квазі – реального часу, а також достатньо захищені від несанкціонованого втручання ззовні, що в подальшому полегшить розробку заходів по забезпеченню кібернетичної безпечності діагностичної системи.

Вбудоване ПЗ працює в мікроконтролерах, на яких зібрані модулі 1-го рівня ієрархії діагностичної системи. Функції такого ПЗ сильно обмежені низькою обчислювальною потужністю апаратного забезпечення і зводяться, в основному, до керування процесом аналого-цифрового перетворення вимірюваних діагностичних процесів та передачі даних у модулі 2-го рівня, до яких вони приєднані. Особливістю такого ПЗ є те, що воно працює без операційної системи, а тому самостійно повинно реалізовувати протоколи вводу-виводу, необхідні для комунікації з іншими модулями. Для більшості сучасних мікроконтролерів існують компілятори з мови C, які реалізовані на персональних комп'ютерах, що суттєво спрощує розробку вбудованого ПЗ, а також дає можливість в окремих випадках використовувати існуючий програмний код одночасно як на мікроконтролері, так і на інших системах.

Прикладне ПЗ виконує функції, специфічні для системи, що розробляється. Ключовими завданнями прикладної частини ПЗ є збір, обробка за заданими алгоритмами і накопичення вимірювальної інформації.

Особливістю системи, яка розробляється, є те, що ПЗ повинно працювати на різних типах комп'ютерів, а саме:

- настільних комп'ютерних системах (модулі 4-го рівня);
- ноутбуках (модулі 3-го рівня);
- малопотужних одноплатних комп'ютерах (модулі 2-го рівня).

Операційні системи, під управлінням яких працюватимуть ці модулі, також різні: для модулів 3-го та 4-го рівня це – сімейство Microsoft Windows, а для модулів 2-го рівня – сімейство Linux.

Виходячи з того, що ПЗ повинно працювати на різномірній програмно-апаратній платформі, при його розробці необхідно враховувати такі особливості:

- інтерфейси для обміну даними мають бути уніфіковані і повинні піддаватися простій реалізації на будь-якій з платформ, які входять в систему;
- стандарти зберігання даних повинні бути спільні для різних систем;
- програми, які можуть виконуватися на будь-якій з платформ, що входять в систему, повинні розроблятися з урахуванням вимог сумісності (portability) на мовах програмування, компілятори для яких доступні одночасно на всіх цільових платформах; такі програми можуть залежати лише від таких бібліотек, які доступні на всіх цільових платформах;
- програми, які недоцільно переносити на іншу платформу і які не реалізують інтерфейсів з іншими апаратно-програмними модулями, можуть розроблятися на будь-якій мові програмування, доступній у відповідному робочому середовищі.

В свою чергу, прикладне ПЗ можна розділити на дві категорії:

- Керуюче ПЗ – для реалізації алгоритмів діагностування, включаючи взаємодію окремих модулів між собою;
- Діагностичне ПЗ – для статистичної обробки вимірюваних даних, прийняття діагностичних рішень, оцінювання залишкового ресурсу, планування відмов тощо.

Як керуюче, так і діагностичне ПЗ працює на модулях від 2-го до 4-го рівнів ієрархії інтелектуальної розподіленої діагностичної системи.

В даному підрозділі зупинимося на програмах, що входять до першої категорії. Алгоритми та програми, що входять до діагностичного ПЗ, наведено нижче, у підрозділі 3.2.2 даної дисертаційної роботи.

Алгоритмічно-програмне забезпечення модулів 2-го рівня ієрархії системи. Основними функціями модулів 2-го рівня ієрархії є:

- попередня математична обробка і прийняття проміжних діагностичних рішень про фактичний технічний стан окремого електротехнічного пристрою або його вузла;
- сигналізація на вищий рівень при наявності дефектів;
- накопичення незначних обсягів вимірювальної інформації та передача її на вищий рівень при надходженні відповідного запиту від модуля вищого рівня.

Для виконання таких функцій модулі 2-го рівня повинні реалізовувати прості алгоритми обробки даних (діагностичне ПЗ), а також алгоритми діагностування та обміну інформацією між модулями (рис. 3.14).

Алгоритм діагностування у випадку модуля 2-го рівня полягає в періодичному опитуванні приєднаних до нього модулів 1-го рівня, отриманні заданого обсягу вимірювальної інформації, аналізу цієї інформації та відповідної реакції в залежності від результатів аналізу. Він реалізується програмою DiagMon (діагностичний монітор). Розглянемо її роботу в нормальному циклічному режимі (запуск та зупинку розглянемо пізніше).

Взаємодія між модулями 1-го та 2-го рівня реалізована по класичній архітектурі «клієнт-сервер», причому модулі 1-го рівня виступають в якості серверів. Вони більшість часу перебувають у режимі очікування зі зниженим енергоспоживанням, що дає можливість значно подовжити час їх роботи до заміни чи перезарядження батареї. Для опитування приєднаних модулів програма DiagMon, що працює на модулі 2-го рівня, ініціює початок зв'язку з вибраним модулем 1-го рівня, після чого відповідний модуль повинен перейти в режим вимірювання і почати передачу даних із заданою частотою. Після того, як модуль 2-го рівня отримає необхідну кількість значень вимірюваного процесу, він розриває зв'язок з відповідним модулем 1-го рівня, який одразу ж знову переходить в режим очікування. Модуль 2-го рівня запускає наявне діагностичне ПЗ для оцінювання фактичного стану контрольованого вузла і записує результати у файл заданого формату.

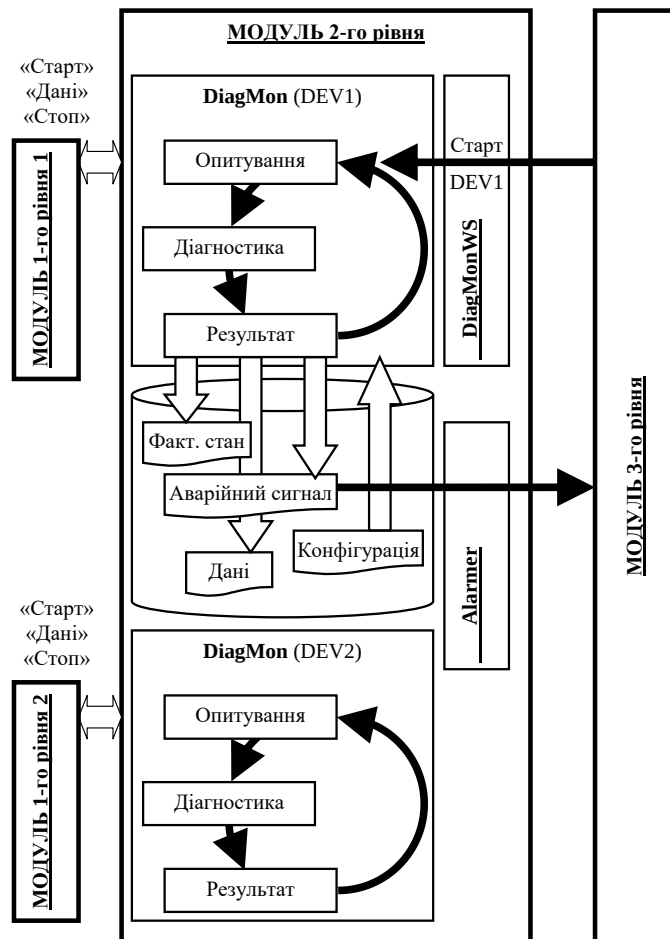


Рис. 3.14. Спрощена функціональна схема керуючого ПЗ 2-го рівня

Штатною ситуацією вважається така, коли весь цикл програми DiagMon пройшов без будь-яких збоїв, а також аналіз отриманих даних не виявив відхилень фактичного стану контролюваного вузла від норми.

В такому випадку програма просто переходить в режим очікування на заданий інтервал часу.

Нештатні ситуації, які обробляються програмою DiagMon, наступні:

1) Модуль 1-го рівня не відповідає на запит про встановлення зв'язку.

Ця ситуація можлива, наприклад, коли батарея живлення модуля 1-го рівня вичерпана і він більше не може отримувати від неї електроенергію.

Програма DiagMon в такому випадку записує у файл результату повідомлення встановленого формату про збій вимірювального модуля і завершає роботу.

2) Після встановлення сеансу зв'язку з модулем 1-го рівня і передачі частини даних модуль 1-го рівня перестає надсилати дані.

Причини і реакція такі ж як і в попередньому випадку.

3) Результати роботи діагностичного ПЗ свідчать, що стан контрольованого вузла не можна вважати задовільним, але він ще не є аварійним.

Причиною може бути як похибка вимірювання діагностичного процесу чи помилка при оцінюванні, так і реальне погіршення технічного стану об'єкта.

Програма DiagMon записує у файл результату повідомлення встановленого формату про критичний стан об'єкта і продовжує роботу.

4) Результати роботи діагностичного ПЗ свідчать, що стан контрольованого вузла можна вважати аварійним.

Найбільш ймовірною причиною є аварійний технічний стан об'єкта.

Програма DiagMon записує у файл результату повідомлення встановленого формату про аварійний стан об'єкта. Крім того, програма створює спеціальний файл-сигнал, після чого продовжує роботу.

Для реалізації обміну даними між модулями 2-го та 3-го рівня розроблений спеціальний процес-сигналізатор Alarmer, який періодично сканує задану директорію на предмет наявності файла-сигналізатора. Періодичність такого сканування набагато вища, ніж періодичність виконання звичайного діагностичного циклу програмою DiagMon. Якщо Alarmer знайде файл-сигнал, він створює спеціальний запит на Web-сервіс, запущений на відповідному модулі 3-го рівня, сигналізуючи таким чином про наявність аварійного стану контрольованого вузла.

Для того, щоб модуль 3-го рівня мав можливість звертатися за інформацією до модулів 2-го рівня, коли йому це необхідно, розроблений спеціальний Web-сервіс DiagMonWS. У відповідь на спеціальний запит з боку модуля 3-го рівня він формує і надсилає повідомлення про фактичний стан контрольованого об'єкта і час останнього опитування. У відповідь на інший запит DiagMonWS формує і надсилає пакет даних, який був записаний в результаті останнього вимірювання. Таким чином в разі необхідності модуль 3-го рівня може провести більш глибокий аналіз даних за допомогою застосування складних алгоритмів, виконання яких на модулях 2-го рівня зайняло б занадто багато часу.

Іншим типом запиту, який може надсилати модуль 3-го рівня на Web-сервіс DiagMonWS, є запуск процесу моніторингу.

Модулі 2-го рівня можуть здійснювати моніторинг одночасно кількох об'єктів. Для цього необхідно, щоб до модуля 2-го рівня було підключено відповідну кількість вимірювальних модулів 1-го рівня, а також здійснено відповідне налаштування у конфігураційному файлі. Кожному вимірювальному модулю умовно присвоюється деякий ідентифікатор – ім'я пристрою.

Для початку моніторингу певного об'єкта модуль 3-го рівня повинен надіслати на Web-сервіс DiagMonWS запит запуску моніторингу з параметром, що ідентифікує заданий пристрій. DiagMonWS у відповідь запускає процес DiagMon з відповідним параметром. DiagMon при старті перевіряє, чи для заданого ідентифікатора існує запис встановленого формату в конфігураційному файлі. Якщо такий запис знайдено, то DiagMon перевіряє, чи моніторинг для заданого пристрою на даний час ще не було запущено. Індикація пристроїв, моніторинг яких запущено, здійснюється за допомогою спеціального файлу-маркера. Якщо цей файл знайдено для відповідного ідентифікатора, то DiagMon зупиняє роботу. Якщо ж файл не знайдено, то DiagMon зчитує з конфігураційного файлу параметри моніторингу (такі, як параметри доступу до вимірювального модуля, що відповідає даному ідентифікатору, частота опитування, діагностичний алгоритм обробки, критерії визначення критичного та аварійного станів), після чого запускає нормальний циклічний режим, який було описано вище.

Останнім видом запиту, який може надсилати модуль 3-го рівня, є запит на зупинку моніторингу вибраного об'єкта.

Програма DiagMon написана мовою C, оскільки на цій мові зручно реалізувати обробку масивів даних. Програми Alarmer та DiagMonWS написані на мові Java, яка добре підходить для реалізації Web-сервісів. Виконання Web-сервісів забезпечується за допомогою пакету з відкритими програмними кодами Apache Tomcat версії 7.

Врахування ступеня критичності стану об'єкта (нормальний, критичний, аварійний) в модулі 2-го рівня дає можливість зменшити обсяги інформації, що передаються між ієрархічними рівнями системи. Завдяки цьому можна збільшити кількість діагностичних параметрів, що одночасно вимірюються системою, не вимагаючи суттєвого збільшення обчислювальної потужності її компонентів.

Алгоритмічно-програмне забезпечення модулів 3-го рівня ієрархії системи. За допомогою модулів 3-го рівня ієрархії забезпечується функції діагностування окремого енергетичного пристрою. Основний обсяг ПЗ таких модулів складає діагностичне ПЗ.

Основним програмним компонентом, який виконується в циклічному режимі, є головний діагностичний монітор DiagMaster. Він здійснює періодичне опитування усіх приєднаних пристроїв: модулів 2-го рівня та багатоканального АЦП. У випадку модулів 2-го рівня, DiagMaster перш за все запитує інформацію про час останньої діагностичної операції стосовно конкретного пристрою та отримані результати. Якщо модуль 2-го рівня повертає нормальний стан, то процес DiagMaster переходить до наступного пристрою або модуля. Якщо ж модуль 2-го рівня інформує про критичний стан, то DiagMaster може застосувати глибокий аналіз діагностичної інформації з об'єкта. Для прийняття такого рішення повинен бути розроблений спеціальний алгоритм, що увійде до складу діагностичного програмного забезпечення. У випадку опитування каналів АЦП DiagMaster проводить вимірювання реалізації процесу заданої довжини, а потім застосовую до неї вибраний алгоритм обробки інформації.

Після закінчення кожного циклу виконання програми DiagMaster система отримує оновлений зріз інформації про фактичний технічний стан всіх контрольованих об'єктів. Цей зріз записується для тривалого зберігання і статистичного аналізу в разі необхідності.

Іншим програмним компонентом, який повинен бути запущений постійно, є сторож аварійних сигналів AlarmWS, організований у формі Web-сервісу. Він приймає аварійні сигнали від процесів Alarmer, що виконуються на приєднаних модулях 2-го рівня.

Програма DiagMaster написана мовою C. Програма Web-сервісу AlarmWS написана мовою Java. Виконання Web-сервісу забезпечується за допомогою пакету з відкритими програмними кодами Apache Tomcat версії 7.

Вбудоване програмне забезпечення мікроконтролера модулів 1-го рівня ієрархії системи. Мікроконтролер PIC16LF873-041 модулів 1-го рівня ієрархії з інтегрованим акселерометром працює під управлінням вбудованого ПЗ, основним елементом якого є програма управління мікроконтролером. За

допомогою програмного продукту можливо задавати різні режими роботи блоку сенсорів, наприклад:

- частоту передачі даних;
- потужність радіосигналу;
- об'єм вибірки.

Крім того, вбудоване ПЗ містить базовий елемент, який забезпечує управління основними функціями мікроконтролера. До його складу входить додатковий елемент ПЗ мікроконтролера, який, при необхідності, можливо замінити без демонтажу блоку сенсорів з об'єкту діагностики та без необхідності гальванічного підключення до нього, а лише за допомогою радіоканалу стандарту Bluetooth шляхом використання базового елементу ПЗ мікроконтролера. Така можливість запроектована з урахуванням теоретичної необхідності модифікації функціональності блоку сенсорів у процесі використання системи на об'єкті.

Перейдемо до розгляду діагностичного ПЗ, основне призначення якого обробка експериментальних даних з метою отримання кількісних оцінок діагностичних ознак.

3.2.2. Програмне забезпечення для статистичної обробки діагностичних сигналів

На структурній схемі ІВДС, що наведено на рис.3.3, ці програми позначено через ПГА, ПСКА та ППС відповідно. Тобто, для отримання статистичних оцінок вимірних реалізацій було використано програми дві основні програми: гістограмного аналізу (ПГА або PEARSON) та спектрально-кореляційного аналізу (ПСКА або SPEKTR). Для перевірки вимірних діагностичних сигналів на стаціонарність було використано в якості допоміжної програму ППС.

3.2.2.1. Програмне забезпечення на основі методів спектрально- кореляційного аналізу діагностичних сигналів

Спектрально-кореляційний аналіз є одним з основних інструментів дослідження діагностичних сигналів, особливо таких, як вібрації різноманітних вузлів досліджуваного обладнання. Цей метод статистичної обробки дає можливість аналізувати поведінку окремих частотних складових

енергетичного спектра сигналу, які часто є інформативними діагностичними ознаками.

Розглянемо основні співвідношення, що використовуються при спектрально-кореляційному аналізі випадкових процесів.

Згідно з теоремою Хінчина [3, 32, 33, 48], кореляційна функція $R(\tau)$ дійсного стаціонарного випадкового процесу може бути представлена у вигляді

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega \tau) dF(\omega), \quad \tau \in (-\infty, \infty), \quad (3.1)$$

де $F(\omega)$ – спектральна функція.

Якщо спектральна функція $F(\omega)$ є абсолютно неперервною, то існує її похідна $G(\omega)$, яка називається спектральною щільністю потужності і визначається виразом

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau, \quad \omega \in (-\infty, \infty) \quad (3.2)$$

Зазначимо, що функція $G(\omega)$ парна, отже достатньо її задати для $\omega \in [0, \infty)$. Враховуючи, що $R(\tau)$ також парна, (3.1) і (3.2) можна переписати у вигляді

$$S(\omega) = 4 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau, \quad \omega \in [0, \infty), \quad (3.3)$$

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) \cos(\omega \tau) d\omega, \quad \tau \in (-\infty, \infty), \quad (3.4)$$

де спектральна щільність потужності $S(\omega)$ задана на додатній півосі:

$$S(\omega) = \begin{cases} G(\omega), & \omega = 0, \\ 2G(\omega), & \omega > 0, \\ 0, & \omega < 0. \end{cases}$$

Розглянемо вирази для оцінок кореляційної функції та спектральної щільності потужності за вибіркою стаціонарного випадкового процесу (2.8).

Оцінка кореляційної функції знаходиться таким чином [38, 56, 58]:

$$\tilde{R}_\tau = \tilde{R}(\tau \cdot \Delta t) = \frac{1}{N - \tau - 1} \sum_{k=0}^{N-\tau-1} \overset{\circ}{X}_k \overset{\circ}{X}_{k+\tau}, \quad \tau = \overline{0, s},$$

де $s = M - 1$ – максимальний зсув, M – кількість точок у оцінці кореляційної функції.

Оцінка нормованої кореляційної функції знаходяться таким чином [5, 61]:

$$\overset{\circ}{R}_\tau = \tilde{R}_\tau / \tilde{R}_0, \quad \tau = \overline{0, s}.$$

Величина максимального зсуву s вибирається так, щоб значення кореляційної функції $\overset{\circ}{R}_\tau$ при $\tau > s$ були малими і їх можна було вважати рівними нулю. Для того, щоб поняття «малі значення кореляційної функції» мало точний сенс, використаємо відомий статистичний метод перевірки на нуль-кореляцію [5, 58], суть якого полягає в наступному.

При кожному τ обчислюється значення t -статистики Стюдента

$$t_\tau = \left| \overset{\circ}{R}_\tau \right| \cdot \sqrt{(N - \tau - 2) / \left(1 - \left(\overset{\circ}{R}_\tau \right)^2 \right)}.$$

Далі знаходиться значення ймовірності P_τ помилки, що виникає при відхиленні гіпотези про те, що $\overset{\circ}{R}_\tau = 0$, з виразу

$$P_\tau = 1 - 2 \frac{\Gamma_1}{\sqrt{\pi(N - \tau - 2)}} \int_1^{t_\tau} \left[\left(1 + \frac{x^2}{N - \tau - 2} \right)^{\frac{N - \tau - 1}{2}} \right]^{-1} dx, \quad (3.5)$$

$$\text{де } \Gamma_1 = \frac{\Gamma\left(\frac{N - \tau - 2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N - \tau - 1}{2}\right)} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \prod_{x=1}^{(N - \tau - 1)/2} \left(1 + \frac{1}{N - \tau - 2x} \right), & (N - \tau) - \text{парне,} \\ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \prod_{x=1}^{(N - \tau - 1)/2} \left(1 + \frac{1}{N - \tau - 2x} \right), & (N - \tau) - \text{непарне,} \end{cases}$$

$\Gamma(\cdot)$ – гамма-функція.

Значення інтеграла в (3.5) не виражається в скінченному вигляді через елементарні та відомі спеціальні функції, але воно може бути знайдене чисельним методом по формулі Сімпсона.

Потім імовірність P_τ порівнюється з обраним порогом (рівнем значимості) α , наприклад, $\alpha = 0,95$ [14]. Якщо $P_\tau > \alpha$, то приймається гіпотеза про «нуль-кореляцію», у протилежному випадку ця гіпотеза відхиляється.

Оцінка спектральної щільності $S(\omega)$ може знаходитися різними способами. Виходячи з означення спектральної щільності (3.3), можна побудувати таку оцінку [1, 38, 56, 59]:

$$\tilde{S}(\omega) = 2\Delta t \left(\tilde{R}_0 + 2 \sum_{k=0}^{s-1} \tilde{R}_k \cos(\omega k \Delta t) + \tilde{R}_s \cos(\omega s \Delta t) \right), \quad \omega \in [0, \infty). \quad (3.6)$$

Часто використовують оцінку виду [59]

$$S_N(\omega) = \frac{\Delta t}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} X_k \cos(\omega k \Delta t) \right)^2,$$

яка називається періодограмою. Періодограма еквівалентна [59] оцінці (3.6), якщо замість $\tilde{R}$ взяти зміщену оцінку кореляційної функції

$$R'_\tau = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-\tau-1} X_k X_{k+\tau}, \quad \tau = \overline{0, N-1},$$

Дисперсія періодограми не залежить від N , тому оцінка є неслухною. Для покращення оцінок спектральних щільностей досліджуваного сигналу використовується метод спектрального вікна [5, 59].

Обчислення $\tilde{S}(\omega)$ переважно здійснюють для значень частоти

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{M \cdot \Delta t}, \quad k = 0, 1, \dots, M/2. \quad (3.7)$$

Для знаходження спектральної щільності можна використати дискретне перетворення Фур'є [59]

$$S_k = \sum_{n=0}^{M-1} \tilde{R}_n \exp \left[-2\pi i \frac{kn}{M} \right], \quad k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (3.8)$$

причому нормуючий множник $1/\Delta t$ внесено у значення S_k щоб спростити запис, і крім того S_k – комплексні величини.

Обчислення безпосередньо за виразами (3.6) або (3.8) при великих s потребує значного часу. Для обчислення всіх значень S_k за формулою (3.8)

необхідно виконати приблизно M^2 операцій множення та додавання комплексних чисел. В загальному випадку, одна така операція еквівалентна чотирьом операціям множення і додавання дійсних чисел, але, якщо врахувати, що множник $\tilde{R}_n$ є дійсним, то кількість операцій з дійсними числами можна скоротити вдвічі.

Витрати машинного часу при обчисленнях за виразом (3.8) можна суттєво знизити, якщо врахувати властивості функції

$$W_M(u) = \exp\left[-2\pi i \frac{u}{M}\right].$$

Зокрема, вона періодична, $W_M(M)=1$ і при всіх u та v вірна рівність $W_M(u+v) = W_M(u)W_M(v)$.

На основі цього були створені та впроваджені у практику алгоритми обчислення, які отримали назву “швидке перетворення Фур’є” (ШПФ). Найпоширенішим алгоритмом ШПФ є алгоритм Кулі–Тьюкі [1, 8, 38, 56]. При умові, що $M = 2^p$, для обчислення M -точкового ШПФ потрібно приблизно $M \cdot p$ операцій множення та додавання комплексних чисел. Це, очевидно, суттєво менше, ніж обчислення прямим методом за виразом (3.8) при великих M . Крім того, існують алгоритми ШПФ, орієнтовані на дійсні вхідні послідовності, що дозволяє скоротити кількість операцій ще вдвічі.

Для спектрально-кореляційного аналізу вимірних реалізацій вібраційних процесів в ППП для ІВДС була включена програма SPECTR. Вона вирішує задачу обчислення авто-кореляційної функції і спектра потужності досліджуваного сигналу.

Програма працює у відповідності з наступним узагальненим алгоритмом:

- знаходиться оцінка математичного сподівання часового ряду;
- здійснюється центрування ряду;
- знаходяться оцінки авто-кореляційної функції;
- знаходяться оцінки нормованої авто-кореляційної функції (нормування за дисперсією);
- для оцінок нормованих кореляційних функцій гаусових часових рядів здійснюється перевірка гіпотези про «нуль-кореляцію»;

– за допомогою перетворення Фур'є знаходиться оцінка спектральної щільності досліджуваного процесу.

Часовий ряд, що аналізується, програма зчитує з файлу вхідних даних. Числові результати виконання програми записуються у файл, графіки спектрів виводяться на екран монітора.

Основне вікно програми SPECTR одразу після запуску програми порожнє. Воно містить лише головне меню програми, що складається з пунктів «Файл» та «Параметри».

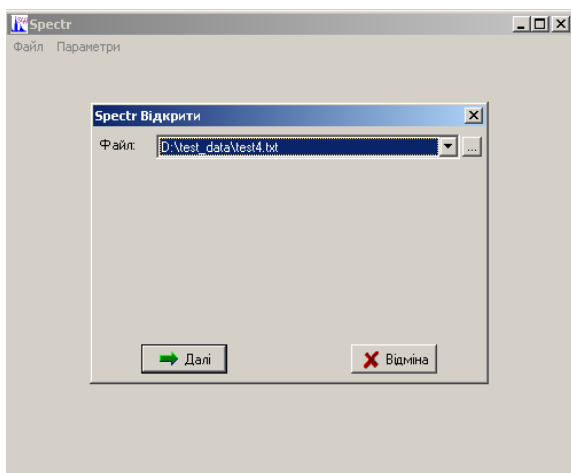


Рис. 3.15. Вікно вибору файлу даних

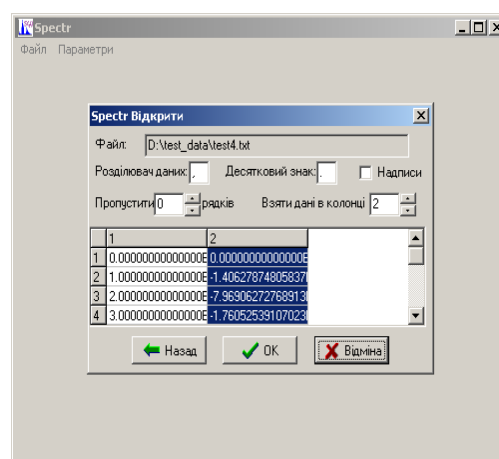


Рис.3.16. Вікно вибору форматування файлу даних

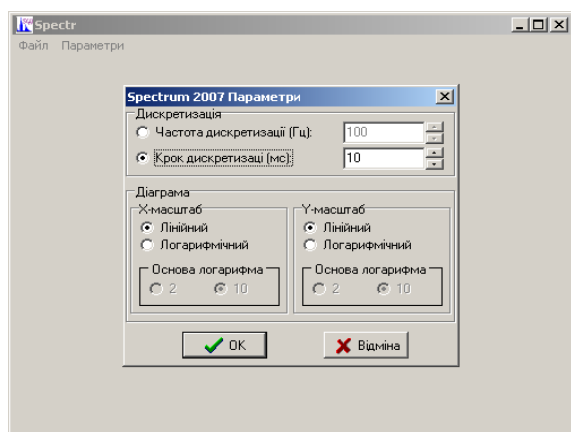


Рис. 3.17. Вікно вибору параметрів відображення спектру

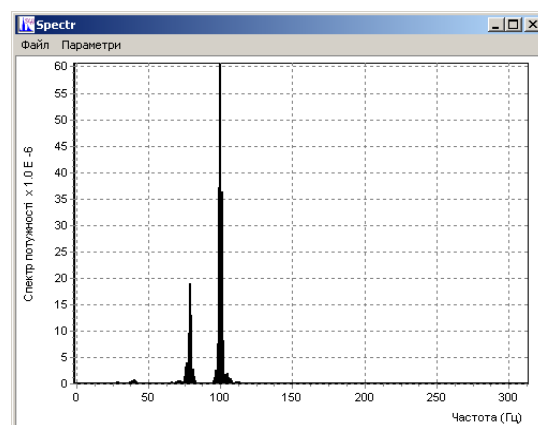


Рис. 3.18. Графік спектру потужності

Після вибору елемента меню «Файл -> Відкрити», відкривається вікно вибору файлу даних для аналізу (рис.3.15).

Коли файл вибрано, на наступному кроці користувач задає параметри формату файлу: розділювач даних, десятковий знак, чи є в файлі заголовки колонок (рис.3.16).

Коли всі параметри задані вірно, слід натиснути кнопку «ОК», після цього з'явиться нове вікно, в якому можна задати крок або частоту дискретизації та параметри відображення спектру (рис.3.17).

Після натискання на кнопку «ОК» буде відображено графік спектра потужності досліджуваного сигналу (рис.3.18), а також автоматично буде створено текстові файли з таблицями даних по кореляційній функції та спектру потужності.

Детальна блок-схема алгоритму роботи програми не наводиться, оскільки програма побудована за принципом обробки подій, внаслідок чого не має наперед заданої чіткої послідовності операторів.

3.2.2.2. Програмне забезпечення на основі методів гістограмного аналізу діагностичних сигналів з використанням згладжуючих кривих за системою Пірсона

Як вже згадувалося у розділі 2, повну інформацію про випадковий процес містить послідовність скінченновимірних функцій розподілу. Гістограмний аналіз діагностичних сигналів має на меті дослідження характеру їх одновимірної щільності розподілу за результатами вимірювання їх реалізацій. Досить перспективним методом для розв'язання поставленої задачі можна вважати використання системи кривих, введеної К.Пірсоном. При цьому одночасно здійснюється як підбір аналітичного виразу для розподілу, так і класифікація, оскільки кожному типу розподілу поставлений у відповідність певний номер. Цей номер у деяких випадках може виступати в якості діагностичного параметра [5, 45, 59, 61, 110].

Розглянемо основні співвідношення та алгоритми, що покладено в основу програмного забезпечення для гістограмного аналізу з використанням системи кривих Пірсона.

Пірсон досліджував розподіли, що мають значну асиметрію та ексцес (пов'язані з третім та четвертим моментами), тобто сильно відрізняються від нормального розподілу. Для того, щоб теоретична крива з достатньою

точністю описувала експериментальний розподіл, вона повинна мати такі ж чисельні значення перших чотирьох моментів, як і експериментальна крива.

Беручи за основу різницеве рівняння, якому задовольняє гіпергеометричний розподіл, і вводячи деякі додаткові припущення, Пірсон отримав диференціальне рівняння вигляду

$$\frac{dp(x)}{dx} = \frac{x-a}{b_0 + b_1x + b_2x^2} p(x), \quad (3.9)$$

де $p(x)$ – щільність розподілу.

Розв'язки цього рівняння називаються кривими Пірсона. Параметри a , b_0 , b_1 та b_2 , що входять в рівняння (3.9), можуть бути виражені через перші чотири моменти розподілу, для якого підбирається аналітичний вираз. А саме, при умові центрування розподілу

$$a = b_1, \quad b_0 = \frac{c_0}{d}, \quad b_1 = \frac{c_1}{d}, \quad b_2 = \frac{c_2}{d}, \quad (3.10)$$

де

$$\left. \begin{aligned} c_0 &= -\mu_2(4\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2), \\ c_1 &= -\mu_3(\mu_4 + 3\mu_2^2), \\ c_2 &= -2\mu_2\mu_4 + 6\mu_2^3 + 3\mu_3^2, \\ d &= 10\mu_2\mu_4 - 18\mu_2^3 - 12\mu_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

У виразах (3.11) μ_n , $n = 2, 3, 4$ – центральні моменти розподілу.

Як відомо, загальний розв'язок рівняння (3.9) має вигляд

$$p(x) = Ce^{\varphi(x)}, \quad \varphi(x) = \int \frac{x-a}{b_0 + b_1x + b_2x^2} dx. \quad (3.12)$$

Константа C , що входить у вираз (3.12), вибирається з умови, якій повинна задовольняти щільність будь-якого розподілу, а саме:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1. \quad (3.13)$$

Характер кривої $\varphi(x)$ пов'язаний з розв'язками рівняння

$$b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0. \quad (3.14)$$

Пірсон ввів величину

$$\kappa = b_1^2 / 4b_0b_2, \quad (3.15)$$

від значення якої залежать корені характеристичного рівняння (3.14), а значить і форма кривої розподілу. Величина (3.15) отримала назву “критерій Пірсона” або “каппа Пірсона”.

Каппа Пірсона є основним критерієм при виборі типу апроксимуючої кривої. Всього існує 12 типів кривих, серед яких 3 основних, а інші є їхніми граничними або частинними випадками. Деякі автори виділяють додатково ще нормальний розподіл.

Основні типи мають місце при наступних значеннях каппи Пірсона: Тип I при $\kappa < 0$, Тип IV при $0 < \kappa < 1$, Тип VI при $\kappa > 1$. Для визначення перехідних типів необхідно застосування додаткових критеріїв:

$$l_1 = 5\beta_2 - 6\beta_1 - 9, \quad l_2 = 3\beta_1 - 2\beta_2 + 6, \quad S = 2(l_1/l_2 + 1).$$

Каппа Пірсона через величини β_1 і β_2 виражається таким чином:

$$\kappa = \frac{-\beta_1(S+2)^2}{16(S+1)}.$$

Схема алгоритму підбору кривої Пірсона наведена на рис.3.19.

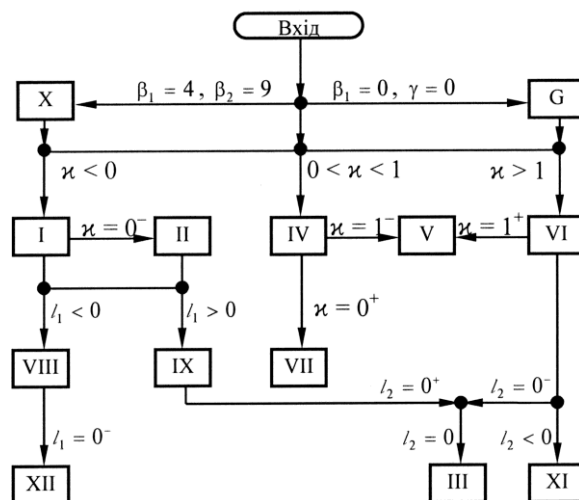


Рис. 3.19. Схема алгоритму підбору кривих Пірсона

Повну інформацію про вирази всіх типів розподілів Пірсона можна знайти в книгах [59, 110].

Основне вікно програми PIRSON наведене на рис.3.20. Воно розділене на кілька смислових частин.

Зверху розташована область головного меню програми (рис.3.21), за допомогою якого виконуються такі функції:

- вибір файлу даних для аналізу;
- друк графіка;
- експорт графіка і таблиць в програму Microsoft Word;
- вихід з програми.

При виборі пункту меню «Открыть» з'являється стандартне для системи Microsoft Windows діалогове вікно відкриття документа. Вибрати файл з даними для аналізу можливо також за допомогою кнопки, що розташована зліва безпосередньо під областю головного меню програми. Назва вибраного файлу буде відображена в полі справа від цієї кнопки.

Вхідні дані для програми PIRSON оформляються у виді текстового файлу (у кодах ASCII).

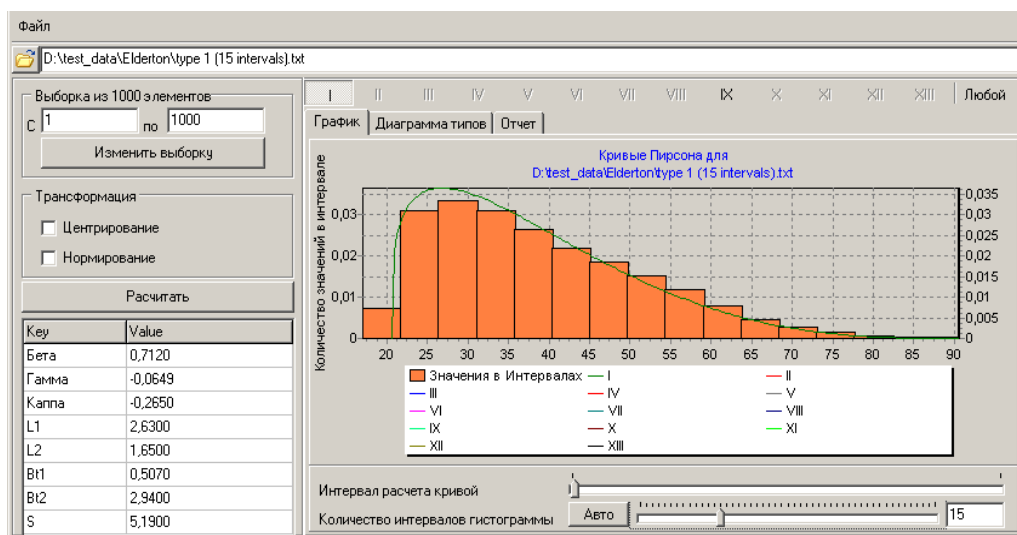


Рис. 3.20. Основне вікно програми PIRSON

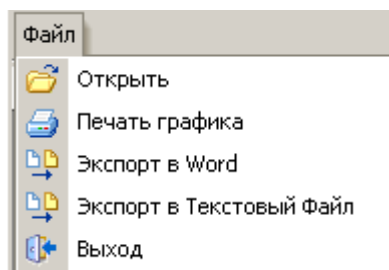


Рис.3.21 Головне меню програми PIRSON

В лівій частині вікна містяться елементи управління для вибору частини вибірки: «С (.....) по (.....)», центрування та нормування часового ряду, а також кнопка для запуску розрахунків «Расчитать». Після натискання на неї

в нижньому лівому куті вікна програми виводяться числові значення розрахованих параметрів, а в правій частині вікна – графічні або табличні результати, вибір між якими здійснюється з допомогою закладок.

Можливе відображення таких результатів:

- гістограма з накладеним на неї графіком вибраної кривої (рис.3.20);
- діаграма типів (рис.3.22);
- звіт про результати розрахунків у текстовій формі, що містить значення всіх розрахованих параметрів, а також таблиці, за якими можна побудувати графіки в сторонній програмі (рис.3.23.).

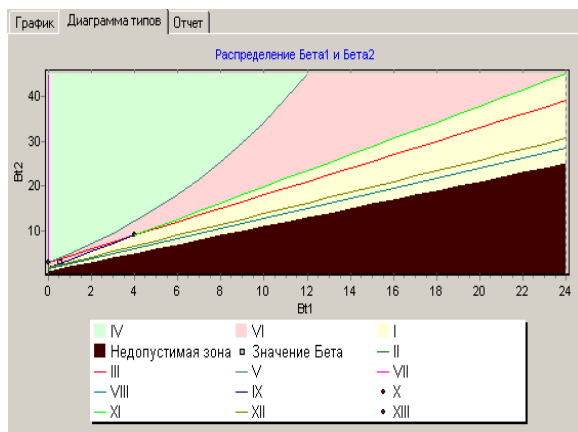


Рис.3.22. Діаграма типів кривих

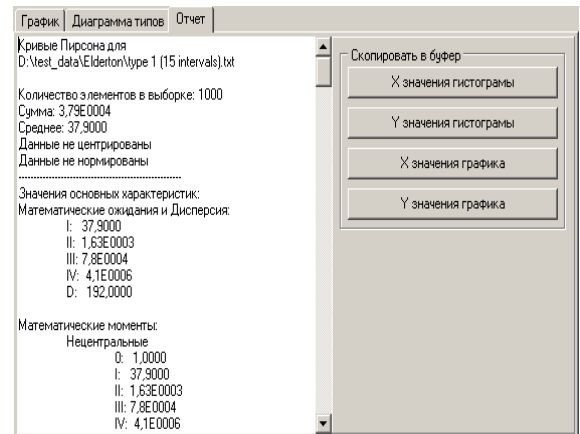


Рис. 3.23. Звіт про результати розрахунків з кнопками додаткових операцій

Звіт містить наступне:

- вид гістограми: центрована, нормована чи ні;
- обсяг вибірки, кількість інтервалів у гістограмі;
- оцінки початкових моментів;
- оцінку дисперсії, середньоквадратичного відхилення, інтервал гістограми, найменше і найбільше спостереження;
- оцінки центральних моментів, коефіцієнти асиметрії й ексцесу, каппи Пірсона;
- тип згладжуючої кривої та її параметри (по можливості – більше однієї кривої);
- таблиці значень згладжуючої кривої і гістограми, відповідні графіки.

На закладці, котра відображає звіт про результати розрахунків у текстовій формі, є додаткові кнопки, що дозволяють записати в текстовий файл вибірково деякі табличні результати.

При можливості підбору кількох типів кривих Пірсона одночасно, з'являється можливість вибрати тільки ті з них, які цікавлять дослідника, приховавши при цьому графіки тих, що його не цікавлять. Для цього введені кнопки від «I» до «XIII», а також «Любой» зверху правої частини основного вікна програми. Кнопка «Любой» призначена для досвідчених користувачів, які глибоко розуміють принципи роботи програми і теоретичні основи підбору кривих розподілу за методом Пірсона.

Вихідні дані програми записуються у файл і видаються на екран монітора у вигляді графіків. В них міститься наступне:

- вид гістограми: центрована, нормована чи ні;
- обсяг вибірки, кількість інтервалів у гістограмі;
- оцінки початкових моментів;
- оцінка дисперсії, середньоквадратичного відхилення, інтервал гістограми, найменше і найбільше спостереження;
- оцінки центральних моментів, коефіцієнти асиметрії й ексцесу, каппа Пірсона;
- тип згладжуючої кривої та її параметри;
- таблиці значень згладжуючої кривої та гістограми, відповідні графіки.

Перейдемо до розгляду алгоритмів та програмного забезпечення для діагностики і класифікації технічного стану ЕО.

3.2.2.3. Алгоритми та програмне забезпечення на основі методів перевірки статистичних гіпотез для діагностики і класифікації технічного стану ЕО

Використання статистичної моделі до рішення задачі діагностики різних вузлів ЕО на підставі інформації, що міститься у вібраційних процесах, які виникають при проведенні функціональної діагностики цих вузлів, в основі отримання діагностичних рішень лежить теорія перевірки статистичних гіпотез, яка тісно пов'язана з сучасною теорією розпізнавання образів [1, 8, 14, 62, 92, 93].

В найпростішому випадку задачу діагностики можна звести до перевірки простих гіпотез про один параметр або про сукупність параметрів одновимірної або багатовимірної функції розподілу спостережуваної

випадкової величини, в якості якої можуть виступати параметри досліджуваного випадкового процесу.

Розглянемо випадок перевірки гіпотез про параметри, наприклад, частоти багаторезонансної моделі, багатовимірної гауссівської випадкової величини

$$\Xi_m = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m) \quad (3.16)$$

по вибірці об'єму n , такий, що складається із векторів

$$\Xi_{m1}, \Xi_{m2}, \dots, \Xi_{mn}. \quad (3.17)$$

Спостережувана реалізація (повторна вибірка) цієї випадкової величини – прямокутна матриця

$$\mathbf{X} = \|x_{jk}\|, \quad j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (3.18)$$

Це означає, що мали місце події $\xi_{jk} = x_{jk}$, при всіх $j = \overline{1, m}$ і $k = \overline{1, n}$.

Припустимо, що елементи послідовності векторів (3.17) статистично незалежні. Відзначимо, що на відміну від (3.17) елементи матриці (3.18) не випадкові, оскільки є вже спостереженими значеннями елементів (3.17). Як відомо, щільність ймовірності гаусового m -вимірного вектору (3.16)

$$p(\mathbf{Y}) = \frac{|\mathbf{M}|^{-1/2}}{(2\pi)^{m/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{Y} - \mathbf{\Theta})^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{\Theta}) \right], \quad (3.19)$$

де $\mathbf{M}$ – кореляційна матриця компонент вектору (3.16); $\mathbf{\Theta}$ – матриця-стовпець, $\mathbf{\Theta} = \{\mathbf{M}\xi_j\}$, $j = \overline{1, m}$; символ $(\mathbf{Y} - \mathbf{\Theta})^T$ позначає транспоновану матрицю – матрицю-рядок.

В найпростішому випадку багатовимірна задача перевірки гіпотез формулюється таким чином.

Спостерігається реалізація вибірки (3.17) у вигляді матриці не випадкових чисел (3.18) і відносно щільності ймовірності вектору (3.16), що породив цю реалізацію, формулюються дві гіпотези:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{параметри в (3.19): } \mathbf{\Theta} = \mathbf{\Theta}_0; \\ H_1: & \text{параметри в (3.19): } \mathbf{\Theta} = \mathbf{\Theta}_1 \end{aligned} \quad (3.20)$$

при одній і тій же відомій матриці $\mathbf{M}$. При цьому H_0 іменується основною гіпотезою, а H_1 – конкуруючою. Передбачається, що $\mathbf{\Theta}_0 \neq \mathbf{\Theta}_1$. Необхідно на основі спостережуваної реалізації (3.18) побудувати правило, за яким

приймається рішення про правильність однієї з гіпотез. Згідно з [5, 61], це можна зробити таким чином.

Функція $p(\mathcal{E}_m)$, отримана з (3.19) заміною не випадкового аргументу $\mathbf{Y}$ на випадковий вектор $\mathcal{E}_m$, називається функцією правдоподібності [5, 14, 61]. Вона приймає випадкові значення як функція випадкового вектору (3.16) і залежить від не випадкового векторного параметра Θ , тому більш детально записуватимемо її у вигляді $p(\mathcal{E}_m, \Theta) = p(\mathcal{E}_m)$. Відношення цих функцій при різних значеннях Θ , визначених у формулюванні гіпотез (3.20), яке називається відношенням правдоподібності, позначимо $l(\mathcal{E}_m)$. Його логарифм визначається у вигляді

$$\varsigma = \ln l(\mathcal{E}_m) = \frac{p(\mathcal{E}_m, \Theta_1)}{p(\mathcal{E}_m, \Theta_0)}, \quad (3.21)$$

де щільність розподілу, по якій побудована функція правдоподібності, визначається у відповідності з (3.19).

Якщо спостерігається впорядкована послідовність векторів, тобто вибірка об'єму n описується по (3.17), то для кожного елемента такої послідовності векторних спостережень одержуємо логарифм елементарного відношення правдоподібності з врахуванням (3.19) у вигляді

$$\varsigma_k = \ln l(\mathcal{E}_{mk}) = \mathcal{E}_{mk}^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) - \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0), \quad k = \overline{1, n}. \quad (3.22)$$

Кожне $\varsigma_k, k = \overline{1, n}$ цієї послідовності є скалярною гауссівською випадковою величиною, що лінійно залежить від компонент вектору (3.17), значить ς_k можна розглядати як дискретний білий шум [5, 59] або як скалярний гаусів випадковий процес з дискретним аргументом і незалежними значеннями через незалежність елементів послідовності (3.17).

Математичне сподівання ς_k не залежить від k і за умови, що вірна гіпотеза H_0 , визначається з врахуванням (3.19) так:

$$\begin{aligned} M\{\varsigma_k |_{H_0}\} &= \Theta_0^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) - \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) = \\ &= -\frac{1}{2}(\Theta_1 - \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) = -\kappa_2/2, \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\text{де} \quad \kappa_2 = (\Theta_1 - \Theta_0)^T M^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0). \quad (3.24)$$

Аналогічно при справедливості гіпотези H_1

$$M\{\zeta_k |_{H_1}\} = \Theta_1^T \mathbf{M}^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0) - \frac{1}{2} (\Theta_1 + \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0) = \kappa_2 / 2 \quad (3.25)$$

Згідно [5, 61] дисперсія ζ_k може розглядатись як дисперсія компонент вектору Ξ_m , яка записується в матричному вигляді $\Xi_m^T \mathbf{A}$, де $\mathbf{A}$ – довільна матриця-стовпець не випадкових дійсних коефіцієнтів $\mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0)$. Дисперсія цієї форми $D(\Xi_m^T \mathbf{A}) = \mathbf{A}^T \mathbf{M} \mathbf{A}$. З урахуванням цього, незалежно від того, яка гіпотеза має місце, одержуємо

$$\begin{aligned} D(\zeta_k |_{H_0}) &= D(\zeta_k |_{H_1}) = D[\Xi_m^T M^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0)] = [M^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0)]^T M M^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0) = \\ &= (\Theta_1 - \Theta_0)^T M^{-1} (\Theta_1 - \Theta_0), \text{ оскільки } (\mathbf{M}^{-1})^T = (\mathbf{M}^T)^{-1}. \end{aligned}$$

Отже

$$D(\zeta_k |_{H_0}) = D(\zeta_k |_{H_1}) = \kappa_2, \quad (3.26)$$

де κ_2 визначається згідно (3.24). Таким чином $\{\zeta_k, k = \overline{1, n}\}$ є стаціонарний гаусів білий шум [1, 3] з математичним сподіванням (3.23) або (3.25) і дисперсією κ_2 , що не залежать від k . В [5, 61] закон (3.27), що має описану властивість, відноситься до закону з монотонним відношенням правдоподібності.

Наведені співвідношення покладено в основу запропонованого Нейманом-Пірсоном методу перевірки статистичних гіпотез [5, 8, 61], суть якого полягає у наступному.

Виходячи з визначення відношення правдоподібності, наведених у вказаних роботах

$$l(\Xi_{m1}, \Xi_{m2}, \dots, \Xi_{mn}) = \prod_{k=1}^n \frac{p(\Xi_{mk}, \Theta_1)}{p(\Xi_{mk}, \Theta_0)}, \quad (3.27)$$

логарифм якої – сума логарифмів елементарних відношень правдоподібності (3.22)

$$\eta_n = \ln l(\varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m2}, \dots, \varepsilon_{mn}) = \sum_{k=1}^n \zeta_k \text{ або}$$

$$\eta_n = \left(\sum_{k=1}^n \varepsilon_{mk} \right)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) - \frac{n}{2} (\Theta_1 + \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0), \quad n=1, 2, \dots \quad (3.28)$$

і як функція n є випадковим процесом з дискретним аргументом і незалежними приростами [5, 59, 61].

Очевидно, що величини η_n також розподілені по нормальному закону з дисперсією $n\kappa_2$ і математичним сподіванням $n\kappa_2/2$, якщо вірна гіпотеза H_1 , і $-n\kappa_2/2$, якщо вірна гіпотеза H_0 .

Через випадковий характер досліджуваних процесів будь-яке рішення, пов'язане з вибором однієї з гіпотез, супроводжується помилками двох видів [8, 11, 14, 61]. Помилка першого роду, ймовірність якої прийнято позначати α , виникає в тому випадку, якщо відхиляється основна гіпотеза H_0 , коли вона насправді має місце. Помилка другого роду, ймовірність якої позначається β , полягає в ухваленні гіпотези H_0 , коли насправді вірна конкуруюча гіпотеза H_1 .

У загальному випадку, коли для прийняття рішення про технічний стан обладнання використовується набір діагностичних ознак, може бути застосоване найпростіше розв'язуюче правило вибору гіпотез в двоальтернативній ситуації [5, 61], запропоноване Нейманом і Пірсоном. Воно ґрунтується на однопороговому аналізі логарифма відношення правдоподібності (3.28) і фактично зводиться до оптимального вибору деякого порогу C , що розділяє безліч допустимих значень відношень правдоподібності e^{η_n} на дві підмножини, що не перетинаються. Іншими словами, основним моментом в цій задачі є вибір на безлічі допустимих значень процесу e^{η_n} деякого порогу C , для якого при заданому значенні α , фіксованому об'ємі вибірки n і якнайменшому β можна було б зробити висновок про те, що має місце гіпотеза H_0 при $\eta_n \leq \ln C$ і H_1 при $\eta_n > \ln C$. Або з врахуванням (3.28) гіпотеза H_0 приймається, якщо

$$\tilde{\varepsilon}_m \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) \leq K, \quad (3.29)$$

а гіпотеза H_1 , якщо

$$\tilde{\Xi}_m \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) > K, \quad (3.30)$$

$$\text{де } \tilde{\Xi}_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Xi_{mk}^T = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{1k}, \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{2k}, \dots, \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{mk} \right), \quad (3.31)$$

$\xi_{jk} - j$ -й елемент k -го вектору з (3.17);

$$K = \frac{\ln C}{n} + \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0). \quad (3.32)$$

За визначенням

$$\alpha = 1 - P_{\Theta_0}\{H_0\}; \quad \beta = P_{\Theta_1}\{H_0\}, \quad (3.33)$$

де $P_{\Theta}\{H_0\}$ – ймовірність ухвалення гіпотези H_0 , коли істинне значення параметра розподілу рівне Θ .

Через прийняте розв’язуюче правило і з врахуванням (3.33) маємо

$$\begin{aligned} P_{\Theta_0}\{H_0\} &= P_{\Theta_0}\{\eta_n \leq \ln C\} = 1 - \alpha; \\ P_{\Theta_1}\{H_0\} &= P_{\Theta_1}\{\eta_n \leq \ln C\} = \beta. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Переходячи від η_n до нормованих відхилень

$$\bar{\eta}_n = (\eta_n - M\eta_n) / \sqrt{D\eta_n},$$

при різних значеннях параметра Θ з (3.34) одержуємо систему двох рівнянь щодо невідомих n і C

$$\begin{cases} P_{\Theta_0}\left\{\bar{\eta}_n \leq \frac{\ln C}{\sqrt{n\kappa_2}} + \frac{\sqrt{n\kappa_2}}{2}\right\} = 1 - \alpha; \\ P_{\Theta_1}\left\{\bar{\eta}_n \leq \frac{\ln C}{\sqrt{n\kappa_2}} - \frac{\sqrt{n\kappa_2}}{2}\right\} = \beta. \end{cases} \quad (3.35)$$

В (3.35) $\bar{\eta}_n$ – гауссівська випадкова величина з нульовим математичним сподіванням і дисперсією, рівній одиниці. Тому ймовірності, що входять в ліву частину, можна записати через інтеграл ймовірності

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz$$

у вигляді

$$\begin{cases} \alpha = 1 - \Phi \left\{ \frac{\ln C}{\sqrt{n\kappa_2}} + \frac{\sqrt{n\kappa_2}}{2} \right\}; \\ \beta = \Phi \left\{ \frac{\ln C}{\sqrt{n\kappa_2}} - \frac{\sqrt{n\kappa_2}}{2} \right\}. \end{cases}$$

Через квантілі [11] нормального розподілу u_p , що визначаються як корені рівняння $\Phi(u_p) = p$, останні вирази можна записати як

$$u_{1-\alpha} = \frac{\ln C}{\sqrt{n\kappa_2}} + \frac{\sqrt{n\kappa_2}}{2}; \quad u_\beta = \frac{\ln C}{\sqrt{n\kappa_2}} - \frac{\sqrt{n\kappa_2}}{2},$$

звідки з врахуванням $u_{1-\alpha} = -u_\alpha$ знаходимо

$$n = \frac{(u_\alpha + u_\beta)^2}{\kappa_2}; \quad \ln C = \frac{u_\alpha^2 - u_\beta^2}{2}. \quad (3.36)$$

З урахуванням цих виразів порогове значення (3.32) записується у виді

$$K = \frac{\kappa_2(u_\alpha - u_\beta)}{2(u_\alpha + u_\beta)} + \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_0)^T \mathbf{M}^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0). \quad (3.37)$$

Діагностичні випробування плануються таким чином. Задаємо значення вірогідності α і β , які звичайно вибираються з ряду чисел 0,1; 0,05; 0,02; 0,01. В результаті навчання оцінюються Θ_1 , Θ_0 і $\mathbf{M}$, причому один з параметрів звичайно відповідає умовно справному вузлу, що діагностується. Потім по (3.24), (3.36) і (3.37) визначаємо порогове значення K і кількість спостережень, необхідну для ухвалення рішення, причому заокруглення при використанні (3.36) проводиться з перевищенням розрахункових дробових значень. На цьому планування завершується. Ставиться експеримент по діагностиці, в результаті якого з'являється числова матриця (3.18) з числом рядків, рівним розрахунковому значенню n . Узявши середнє арифметичне по її стовпцях, отримаємо матрицю-рядок

$$\tilde{X}_m = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{1k}, \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{2k}, \dots, \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{mk} \right). \quad (3.38)$$

Потім перевіряємо нерівності (3.29) і (3.30), але вже для спостережень реалізації (3.38). Якщо виконується нерівність $\tilde{X}_m M^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) \leq K$, то приймається гіпотеза H_0 , в протилежному випадку – H_1 .

Величини Θ_0 , Θ_1 і $\mathbf{M}$ отримуються в результаті навчання ІВДС.

На базі наведених вище співвідношень було побудовано програму для операційної системи Microsoft Windows®. Практичне застосування цієї програми зводиться до прийняття діагностичного рішення відносно технічного стану досліджуваного об'єкту. Це рішення зводиться до перевірки сформульованих гіпотез (3.20), тобто, до порівняння даних попереднього навчання з кількісними оцінками Θ_0 , Θ_1 і $\mathbf{M}$, що містяться у блоку попереднього навчання ІВДС, з кількісними оцінками вибраних діагностичних ознак, що отримані в результаті вимірювань на досліджуваному об'єкті.

У додатку 2 наведено блок-схему програму прийняття діагностичного рішення, щодо технічного стану вузлу ЕО. Як видно з наведеної блок-схеми, для запуску програми, через діалогове вікно вводяться та розраховуються наступні дані:

Задаються значення вірогідності помилок першого α та другого β роду;

Вибираються у блоку навчання ІВДС навчаючи сукупності, що відповідають сформульованим гіпотезам H_0 та H_1 ;

Визначаються порогове значення K та кількість спостережень n .

Отримання цих даних завершує етап планування експерименту. Надалі здійснюється вимірювання діагностичних сигналів, в результаті чого отримується числова матриця з числом рядків, рівним розрахунковому значенню n . Узявши середнє арифметичне по її стовпцях, отримаємо матрицю-рядок $\tilde{X}_m$, за якою здійснюється перевірка гіпотез H_0 та H_1 , а саме, якщо виконується нерівність $\tilde{X}_m M^{-1}(\Theta_1 - \Theta_0) \leq K$, то приймається гіпотеза H_0 , в протилежному випадку – H_1 . На підставі цього виноситься рішення про технічний стан досліджуваного ЕО.

У наступному підрозділі оцінимо метрологічні характеристики окремих модулів розробленої ІВДС.

3.3. Перевірка метрологічних характеристик дослідного зразку ІВДС

Вимірювання і подальша обробка сигналів фізичних процесів з використанням ІВДС, а, отже, і результати діагностики конкретних вузлів електротехнічного обладнання супроводжуються похибками, які породжуються цілою низкою причин. Ці причини, в основному, обумовлені: випадковим характером досліджуваних процесів; впливом побічних процесів, породжуваних в працюючих електричних машинах різними факторами; наявністю ЕОМ; використанням аналогових приладів і пристроїв в тракті вимірювання, перетворення і реєстрації досліджуваних сигналів; перетворенням аналогових сигналів в цифрові коди для подальшої їх обробки на ЕОМ. Відповідно до відомої класифікацією [5, 78], перші три види похибок можуть бути віднесені до методичним похибок, а два інші - до інструментальним.

Крім вказаних методичних похибок, дослідження вимірюваних сигналів супроводжується інструментальними похибками, зумовленими аналоговими і цифровими пристроями, входять в використовувану ІВДС. Зупинимося на деяких питаннях, пов'язаних з визначенням цих похибок.

3.3.1. Визначення метрологічних характеристик аналогової частини дослідного зразку ІВДС

Питання перевірки метрологічних характеристик подібних ІВДС розглядалися багатьма авторами, наприклад [3, 5, 31, 61, 80, 83, 99,]. Крім того, методи визначення їх метрологічних характеристик нормованих методиками і стандартами [2, 16, 17, 18, 66, 77]. Разом з тим, використання сучасних засобів вимірювання, перетворення і обробки випадкових сигналів потребує створення нових методів оцінки метрологічних характеристик ІВС.

ІВДС включає у себе первинні перетворювачі, блоки посилення і узгодження, АЦП, електронні пристрої обробки цифрових сигналів. Сучасні сенсори і схеми посилення і узгодження, ланки обробки сигналів, що входять до складу ПЕОМ, мають досить високі метрологічні параметри. Основні ж похибки в ІВДС виникають за рахунок перетворення аналогових випадкових

сигналів в цифровий код. Тому детально зупинимося на розгляді саме цих похибок.

Як було зазначено вище, система ІВДС складається з двох частин: аналогової і цифрової. На рис. 3.24 представлена структурна схема аналогової частини ІВДС. Як видно з цієї схеми, до складу аналогової частини розробленої 4-канальної ІВДС в один з каналів (з давачем Д1) входять, наприклад, вимірювач температури. Решта три канали, призначені для вимірювання віброприскорень, виконані за однаковою послідовної схемою: підсилювач напруги (ПН), режекторний фільтр (РФ), фільтр нижніх частот (ФНЧ), фільтр верхніх частот (ФВЧ), атенюатор (АТ). На питаннях визначення похибок для цих каналів зупинятися не будемо, оскільки вони досить докладно розглянуті в [3, 5, 78]. Нижче розглянемо тільки питання, що стосуються визначення інструментальних похибок, що виникають в каналах, призначених для вимірювання вібраційних сигналів.

Похибка, що вноситься аналоговою частиною цього каналу, визначається, в основному, інструментальною похибкою п'єзоелектричного перетворювача, підсилювача напруги, блоком фільтрації (РФ, ФНЧ, ФВЧ) та атенюатору. Ця похибка обумовлена наступними факторами: нерівномірністю частотної характеристики, похибкою коефіцієнта передачі та ін. Деякі питання виникнення похибок, що вносяться аналоговою частиною ІВДС, розглянуті в роботі [5, 61].

Відповідно до [5, 61], для п'єзоелектричних перетворювачів АВС – 017 нерівномірність частотної характеристики в смузі частот 20 Гц - 30 кГц не перевищує 3%. З цього випливає, що вимір амплітуд синусоїдальних сигналів на будь-якій частоті із зазначеного діапазону з використанням перетворювача АВС – 017 проводиться з відносними похибками $\delta_{пер} \leq 3\%$.

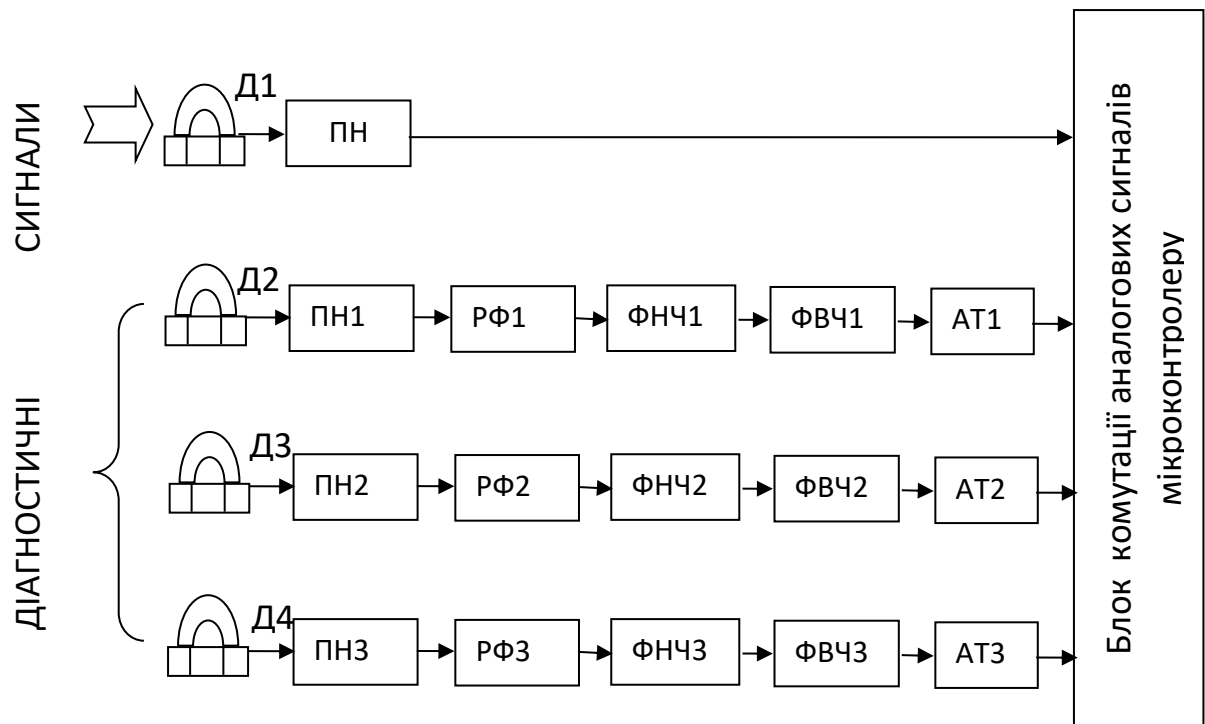


Рис 3.24. Схема аналогової частини ІВДС

Похибки розробленого попереднього підсилювача, який було використано у комплекті разом з віброперетворювачем АВС – 017, в основному обумовлена нелінійністю його частотної характеристики. При правильному узгодженні з сигналом, який надходить з виходу віброперетворювача, відносна похибка розробленого попереднього підсилювача становить $\delta_{n\partial c} \leq 1,5\%$.

Суттєвий внесок у сумарну похибку аналогової частини дослідного зразку ІВДС додає блок фільтрації, який складається з трьох типів фільтрів - РФ, ФНЧ, ФВЧ. За рахунок нелінійності характеристик у смузі прозорості фільтрація діагностичних сигналів здійснюється з відносними похибками, які не перевищують 3% за амплітудним значенням сигналів по кожному з типів фільтрів, тобто $\delta_{ф\grave{и}лт} \leq 3\%$.

За рахунок включення у вимірювальні канали ІВДС атенюатора (АТ), основне призначення якого підсилення діагностичного сигналу за дискретними значеннями 0, 10, 20, 30 та 40 дБ, відносна похибка спотворена нелінійністю його частотної характеристики не перевищує $\delta_{am} \leq 2\%$.

У припущенні, що перетворювачі, підсилювачі і фільтри, які використовуються по кожному з вимірювальних каналів можна вважати лінійними ланками і припускаючи, що фазові зрушення в цих ланках мізерно малі, а також з урахуванням [5, 61], сумарна відносна похибка аналогової частини дослідного зразка ІВДС укладена між найбільшою і найменшою з відносних похибок пристроїв, що входять до складу розробленої системи. Звідси випливає, що сумарна відносна похибка аналогової частини ІВС знаходиться в інтервалі

$$\delta_{\text{відс}} \leq \delta_{\text{ан}} \leq \delta_{\text{пер}}, \quad 1,5\% \leq \delta_{\text{ан}} \leq 3\%.$$

3.3.2. Визначення метрологічних характеристик цифрової частини лабораторного зразку ІВДС

Перетворення відліків аналогових сигналів в цифровий код – необхідна умова для подальшої їх обробки на ЕОМ. Отримання інформації від аналогового сигналу відбувається за допомогою багатоканального пристрою NI USB-6218 (National Instruments multifunction data acquisition device Type USB-6218) поєднує в собі комутатор на 32 аналогових каналів і схему АЦП. Основні технічні характеристики цього перетворювача представлено у підрозділі 3.2 даної дисертаційної роботи.

Використаний пристрій має 4 діапазони вимірювання напруги: $\pm 0,2 \text{ В}$; $\pm 1,0 \text{ В}$; $\pm 5,0 \text{ В}$; $\pm 10,0 \text{ В}$. Фірма – виробник (National Instruments) у технічній документації на цей пристрій наводить такі дані відносних похибок перетворення по цим діапазнам: 1,74%; 1,37%; 1,23 %; 1,15 %. Виробник гарантує перетворення вимірюваних діагностичних сигналів з наведеними значеннями похибок по кожному із вимірюваних каналів.

Враховуючи, що при роботі пристрою NI USB-6218 у складі ІВДС використовувався діапазон з напругою $\pm 1,0 \text{ В}$, будемо вважати що перетворення сигналів із аналогової форми в цифрову здійснювалось з відносною похибкою, яка не перевищує 1,37%. Тобто, відносна похибка перетворення сигналів цифрової частини ІВДС по кожному із каналів значення відносної похибки складає $\delta_{\text{о.ацп}} = 1,37\%$.

Виходячи з отриманих результатів, сумарна відносна інструментальна похибка аналогової і цифрової частин створеного дослідного зразка ІВДС

діагностики по каналу, призначеному для обробки вібраційних сигналів, складе $2\% \leq \delta_{\text{сум}} \leq 3\%$.

Експериментальна перевірка вимірювального каналу дослідного зразка ІВС вібродіагностики з використанням випробувального вібростенду

Вібродіагностична апаратура, яка розробляється або модернізується, повинна відповідати діючому в Україні ГОСТ 25275-82 «Система стандартів по вибрации. Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. Общие технические требования», який поширюється на прилади для вимірювання корпусів і опор підшипників обертових машин з частотою обертання 10-200 об/хв, а також на елементи вібровимірювальних приладів. Вказується, що такий прилад для контролю електричної частини повинен мати пристрій електричного калібрування, який здатен видавати гармонійний сигнал частотою 79,6 Гц. Похибка калібрування вібровимірювальних приладів не повинна перевищувати 5%. Основна похибка вимірювання гармонійної вібрації в межах робочої частини шкали не повинна перевищувати 10%.

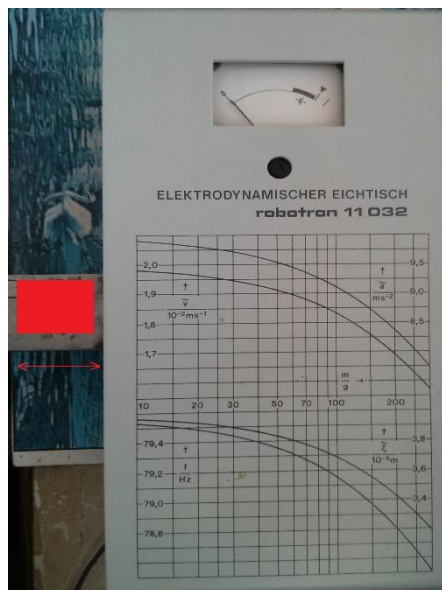


Рис.3.25. Електродинамічний вібростіл Robotron 11 032

Для перевірки відповідності розробленого лабораторного зразку ІВС діючому стандарту України, проведемо серію експериментів по вимірюванню сигналу віброприскорення на електродинамічному вібростолі Robotron 11 032, який генерує гармонійний вібраційний сигнал з частотою 79,6 Гц.

Розташуємо блок сенсорів на кронштейн вібростола, позначений червоним кольором зліва. Напрямок вібрації вказаний червоними стрілками.

Проведемо серію з 50 експериментів для визначення частоти основної гармоніки вібраційного сигналу.

Графік залежності амплітуди віброприскорення від часу одного з типових експериментів наведено нижче, на рис.3.26.

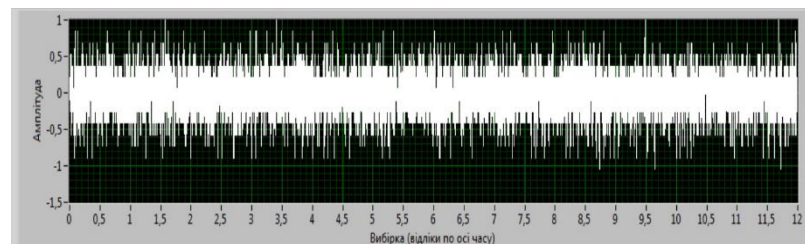


Рис.3.26. Графік залежності амплітуди віброприскорення від часу

З використанням програми спектрального аналізу було отримано спектральну щільність потужності наведеного вище реалізації сигналу. Графік спектру потужності для даного сигналу наведено на рис.3.27.

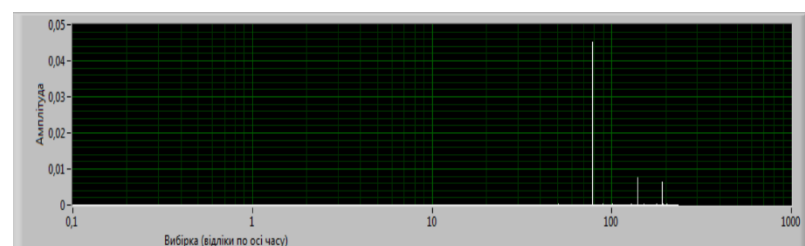


Рис.3.27. Графік спектру потужності вібраційного сигналу

Виконавши вимірювання частоти основної гармоніки для кожного експерименту, визначимо її середнє значення: $f_{test} = 78,57$.

Розрахуємо відносну похибку вимірювання еталонної частоти, згенерованої вібростолом:

$$\delta = \frac{|79,6 - 78,57|}{78,57} \cdot 100\% = 1,32\%$$

Дане значення знаходиться у припустимих ГОСТ 25275-82 межах.

Такі вимірювання та обробка вібраційного сигналу проводяться автоматично за допомогою одного з модулів блоку приймання та обробки інформації ІВС.

Виконані дослідження довели можливість використання розробленого зразку ІВДС з точки зору її відповідності діючим стандартам України, а розроблене програмне забезпечення і апаратні засоби надають можливість проводити систематичне калібрування сенсорів вібрації при проведенні експериментальних досліджень.

У наступному, четвертому розділі, наведено результати експериментальних досліджень, отримані за допомогою розробленого зразку ІВДС.

Висновки за розділом 3

1. Розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок інформаційно-вимірювальної діагностичної системи, у якій, на відміну від відомих систем, передбачений блок, що забезпечує вибір відповідної навчаючої сукупності для проведення діагностування вузлів електротехнічного обладнання, яке може працювати у різних режимах (швидкісний, температурний, електричного навантаження та ін.).
2. Проведений порівняльний аналіз методів діагностування з використанням нейронних мереж та методів, що застосовують навчаючі сукупності, які відповідають певним дефектам та режимам роботи ЕО довів перевагу останніх у сенсі кращих показників точності та вірогідності результатів діагностування вузлів ЕО.
3. Запропоновані методи оцінки метрологічних параметрів ІВДС. На відміну від існуючих, створені методи дозволяють оцінювати загальну похибку вимірювального каналу створеного зразка ІВДС, що зумовлена наявністю в ній аналогової і цифрової частин. Для оцінки останньої складової, що зумовлена наявністю в ІВДС аналого-цифрового перетворювача, запропоновано використовувати двопараметричну формулу, яка дозволяє з більш високою достовірністю оцінити точність перетворення аналогового сигналу у цифровий код. Для створеного зразка ІВДС сумарна відносна інструментальна похибка аналогової і цифрової частин вимірювального каналу, призначеному для обробки вібраційних сигналів складає $2\% \leq \delta_{\text{сум}} \leq 3\%$.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕО ЗА ДОПОМОГОЮ СТВОРЕНОГО ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКУ ІВДС

За результатами імовірнісного аналізу математичних моделей діагностичних сигналів у другому розділі були теоретично обґрунтовані можливі діагностичні ознаки певних вузлів ЕО. Ця задача фактично була вирішена на якісному рівні. Головна мета експериментальних досліджень - встановити кількісні оцінки запропонованих діагностичних ознак, що відповідають різним технічним станам досліджуваних вузлів ЕО і яке може працювати у різних режимах (швидкісних, температурних, виду навантаження та ін.). Саме наявність в інформаційних базах даних ІВДС навчаючих сукупностей, що сформовані по оцінкам діагностичних ознак з урахуванням як видів дефектів вузлів ЕО, так і режимів їх роботи дозволяють проводити моніторинг і діагностування стану ЕО в реальному часі, не чекаючи переналаштування режиму роботи вузлів ЕО у той режим, при якому були попередньо сформовані навчаючі сукупності, що відповідають певним дефектам досліджуваних вузлів ЕО. Запропонований у даній дисертаційній роботі підхід побудови навчаючих сукупностей з урахуванням як видів можливих дефектів так і режимів роботи ЕО, забезпечує практичне застосування ІВДС, що реалізують Smart Grid технології.

Розгляд результатів експериментальних досліджень почнемо з короткого опису об'єктів, на яких проводились експерименти.

4.1. Опис експериментальних об'єктів

Для ілюстрації залежності кількісних оцінок діагностичних ознак від режимів роботи певних вузлів ЕО наведемо декілька прикладів. Для вирішення цієї задачі обмежимося експериментальними випробуваннями такого важливого вузлу електричних машин (ЕМ), як підшипник кочення та стан пресування шихтованого магнітопроводу статора або ротору досліджуваних ЕМ. Перш за все, обмежимося кількома можливими режимами (величина кутової швидкості обертання валу ЕМ, режим струмового навантаження обмотки шихтованого магнітопроводу, величина зусилля пресування пакету пластин заліза магнітопроводу) для найбільш поширених

видів ЕО. Під час проведення експериментів здійснювалось вимірювання віброприскорення досліджуваних об'єктів.

4.1.1. Стенд вібродіагностики підшипників кочення

Для подальших досліджень вібрацій підшипника кочення, які можуть працювати у різних швидкісних режимах та мати різні види дефектів був використаний експериментальний стенд, виготовлений в ІЕД НАН України [5, 21, 61]. На рис.4.1 наведено загальний вид цього стенду. Його основне призначення полягало у експериментальній перевірці діагностичних ознак за наявності типових дефектів типу перекіс, відсутність мастила; дослідження пошкоджень зовнішнього або внутрішнього кільця підшипника внаслідок викришування металу (так званого пітингу) в умовах зміни швидкісного режиму роботи досліджуваного підшипника.

Стенд за конструкцією складається з трьох основних вузлів: електричного приводу, масивного валу, вузла кріплення і вимірювання вібрацій випробовуваного підшипника. Обертання випробовуваного підшипника, встановленого в вузлу кріплення і вимірювання вібрацій (зображений у лівій частині рис. 4.1), забезпечується електричним двигуном постійного струму типу П-51 через масивний вал. Цей двигун потужністю 11 кВт забезпечує обертання випробовуваного підшипника з будь-якою швидкістю в діапазоні від 10 до 1500 об/хв. Застосування спеціальної муфти з гумовими пальцями дозволяє максимально знизити вібрації, зумовлені роботою електричного приводу. Крім того, зниження вібрацій валу експериментальної установки сприяє закріплення його в опорах з підшипниками ковзання, виконаними з фторопласту, а також розміщення валу і вузла кріплення та вимірювання вібрацій випробовуваного підшипника на масивній плиті.

Основне призначення вузла кріплення і вимірювання вібрацій підшипника (рис. 4.2) – це можливість штучно відтворювати основні дефекти підшипника та розміщення первинної віброперетворювальної апаратури (акселерометрів). Для вимірювання віброприскорень досліджуваного підшипника використовувався акселерометр типу АВС-017, що дозволило вимірювати вібрації підшипника в смузі частот 20 Гц ... 30 кГц. Він встановлюється в радіальному напрямку по відношенню до підшипника.

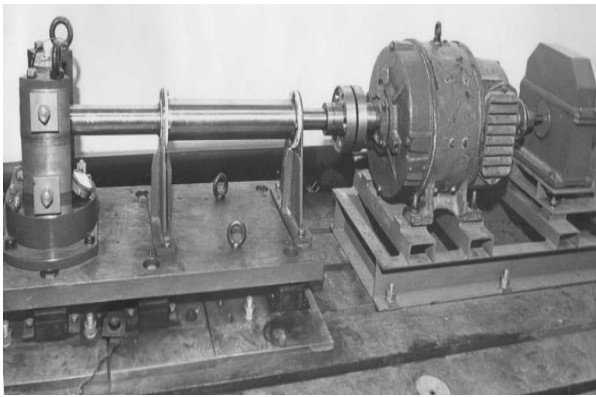


Рис. 4.1. Установка для вібраційних випробувань підшипників кочення

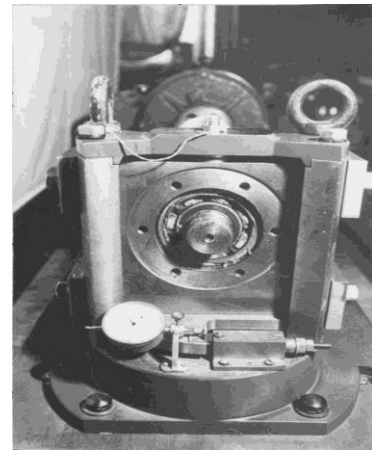


Рис.4.2. Вузол кріплення і вимірювання вібрацій підшипника

Поворотна плита призначена для створення перекосу в підшипнику до величини $0,5^\circ$, який забезпечується за допомогою двох витискних гвинтів, встановлених по обидва боки поворотної плити. Величина перекосу в підшипнику, випробуваному в даній установці, знаходиться як тангенс кута, утвореного при перекосі площиною перетину, що умовно проходить в радіальному напрямку через середину внутрішнього кільця підшипника, з площиною аналогічного перетину зовнішнього кільця.

Як було зазначено вище, крім дефектів типу «перекіс» на установці, що розглядається були проведені дослідження вібрацій підшипників, у яких штучно було видалено мастило. Також випробувались підшипники, які мали дефекти типу «пітінг» на внутрішньому, зовнішньому кільцях і тілах кочення. Ці дефекти зумовлені втомою металу і виникають в результаті довготривалої експлуатації підшипників кочення у складі електричних машин під певним навантаженням. Саме такі дефектні підшипники кочення використовувались для проведення експериментів з дослідження їх вібрацій за допомогою вказаного станду.

Використання у складі означеного станду в якості приводу електричного двигуна постійного струму надає можливість докладно дослідити залежність параметрів вібрацій підшипників кочення не тільки від виду можливих їх дефектів, але й від швидкісного режиму обертання валу установки. Ця особливість забезпечує одночасне врахування при формуванні навчаючих

сукупностей для інформаційного блоку ІВДС як режиму роботи досліджуваного ЕО, так і видів можливих дефектів у підшипниках.

Працездатність розробленого зразка ІВДС перевірялась також за допомогою стенду вібровипробувань шихтованого магнітопроводу. Цей стенд надає можливість при проведенні експериментів фізично відтворювати різні ступені пресування пакету заліза у магнітопроводі разом з одночасною зміною електричного режиму навантаження обмотки магнітопроводу.

4.1.2. Стенд вібровипробувань шихтованого магнітопроводу при різних режимах його роботи

Для експериментальних досліджень щодо виявлення стану пресування пластин заліза у шихтованому магнітопроводі було використано стенд, який складався з фрагментів пластин трансформаторного заліза, затягнутих у пакет за допомогою металевих шпильок. На цьому пакеті було навито обмотку, до клем якої підключалася електрична напруга різної величини. Загальний вид цього стенду наведено на рис. 4.3.

Вимірювання вібраційного сигналу проводилися при двох крайніх станах пресування магнітопроводу: «розпушеному» і спресованому за допомогою динамометричного ключа з зусиллям 30 Н·м. Зміна режиму роботи здійснювалась шляхом регулювання напруги на обмотці магнітопроводу. При цьому вимірювалися значення напруги U та струму I через обмотку. Сигнали віброприскорення шихтованого пакету магнітопроводу вимірювались за допомогою акселерометра АВС-017 у смузі частот 20 Гц ... 30 кГц. Після цього із застосуванням програми спектрального аналізу і за допомогою створеної ІВДС визначались кількісні оцінки діагностичних ознак.

Виходячи з розгляду спектрограм ударних вібраційних хвиль, що поширюються по тілу шихтованого магнітопроводу (типові з них представлені у роботах [5, 21, 63]), а також на результатах розділу 2 даної дисертаційної роботи досліджувались наступні діагностичні ознаки: амплітуди A_f основних максимумів спектрограми $S(f)$; частоти f_n основних максимумів спектрограми $S(f)$; кількість n_f максимумів спектрограми $S(f)$ у фіксованій смузі частот.

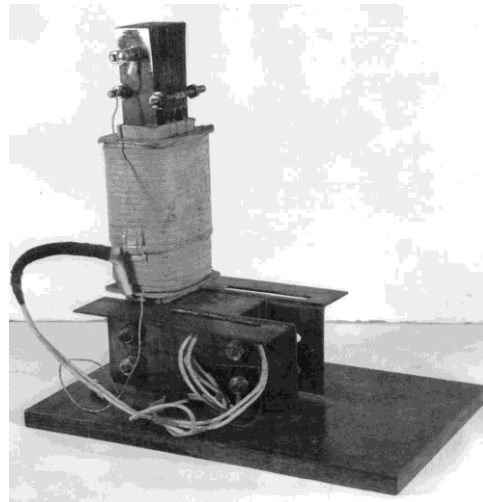


Рис. 4.3. Стенд вібровипробувань шихтованого магнітопроводу

Для перевірки працездатності лабораторного зразка ІВДС на реальних електротехнічних об'єктах було здійснено його експериментальні випробування на ЕО теплової електростанції. Коротко зупинимось на розгляді цих питань.

4.1.3.Двигуни власних потреб теплової електростанції

Перевірка розробленого зразку ІВДС здійснювалась шляхом використання вібраційного модуля системи для вимірювання вібрацій електроприводу питомих насосів на тепловій електростанції ТОВ «ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» (Дарницька ТЕЦ -4).

Базуючись на результатах теоретичних та експериментальних досліджень, проведення вимірювання та аналізу вібраційних сигналів, отриманих з рухомих вузлів електричної машини, коротко опишемо експерименти з вимірювання сигналів віброприскорення за допомогою розробленої ІВДС. Перевірка цього зразку ІВДС здійснювалась із використання вібраційного модуля системи для вимірювання вібрацій електроприводу DKRAJ 4519-4 (рис.4.4) питомих насосів KRHA-300/660/40A-019 (рис.4.5) на тепловій електростанції ТОВ «ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» (Дарницька ТЕЦ -4). При проведенні експериментів дистанційні сенсори вібрацій встановлювались на підшипникових щитах цих електродвигунів.



Рис.4.4. Електродвигун
DKRAJ 4519-4M



Рис. 4.5. Водяний насос
KRHA-300/660/40A-019

При побудові приладів і систем діагностування, вибору їх структури та алгоритмів діагностування необхідно брати до уваги технічні характеристики досліджуваного двигуна, які наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики досліджуваного двигуна

Тип	DKRAJ 4519-4M
1	2
Потужність, кВт	710
Робоча напруга, В	3000
Частота струму живлення, Гц	50
Струм, А	156
Частота, об/хв	1491
Cos φ	0,91
Ступінь захисту, IP	44
Вага, кг	3500
Робоча температура, °C	-20/+40

Перейдемо до опису експериментів, що проводились на цих об'єктах.

4.2. Експериментальна перевірка діагностичних ознак технічного стану вузлів ЕО, що працює у різних режимах

Як відомо [5, 2, 61, 89], достовірність результатів діагностування суттєво залежить від режимів роботи досліджуваного ЕО. Отже, здійснюючи моніторинг та діагностування вузлів ЕО з використанням сучасних систем, необхідно враховувати режим роботи (температура, швидкість обертання валу, ступінь електродинамічного та механічного навантаження тощо) досліджуваного ЕО. Ця задача може бути успішно вирішена, якщо використати у такій системі відповідні алгоритми і, так звані, еталони або навчаючі сукупності [5, 28, 61, 71, 92, 93], які відповідають, з одного боку, певним дефектам досліджуваного ЕО, з другого – режимам, у яких працює це ЕО.

Для ілюстрації залежності кількісних оцінок діагностичних ознак від режимів роботи певних вузлів ЕО розглянуто результати експериментів, проведених на лабораторних стендах ІЕД НАНУ і двигунах власних потреб теплової електростанції.

Експериментальне дослідження запропонованих діагностичних ознак проводились на прикладі вібродіагностики підшипникових вузлів ЕМ, а також стану пресування пакету заліза шихтованого магнітопроводу, що працювали у різних режимах.

4.2.1. Експериментальна перевірка діагностичних ознак з використанням даних, отриманих на стенді вібродіагностики підшипників кочення

Для ілюстрації залежності кількісних оцінок діагностичних ознак від режимів роботи певних вузлів ЕО наведемо декілька прикладів. Для вирішення цього завдання обмежимося експериментальними випробуваннями такого важливого вузлу електричних машин (ЕМ), як підшипник кочення. Перш за все, обмежимося кількома можливими режимами, а саме – величиною кутової швидкості обертання валу ЕМ для найбільш поширених типів підшипників ЕО. Під час проведення експериментів за допомогою розробленої ІВДС здійснювалось вимірювання віброприскорення досліджуваних підшипників.

Як було зазначено вище, випробуванням на стенді (рис.4.1) піддавались підшипники кочення типу 309 ЕШ₂ з різними типами дефектів (перекіс, відсутність мастила, дефекти внутрішнього та зовнішнього кілець, тіл кочення, що зумовлені викришуванням металу через його втому). Згідно з роботами [5, 21, 37, 61], найбільш інформативними діагностичними ознаками, що дозволяють виявляти та класифікувати всі перелічені дефекти підшипників кочення, є коефіцієнти асиметрії k та ексцесу γ вібрацій досліджуваних підшипників кочення. У таблиці 4.2 наведено

результати дослідження віброприскорень як умовно справних підшипників кочення, так і маючих вказані вище дефекти і встановлених на стенді (рис. 4.1)

Таблиця 4.2

Експериментальні дослідження підшипників кочення

№ пп	Умови випробування підшипника	Швидкість оберт. валу $V_{xв}$, об/хв		250	500	750	1000
		Познач. та результати випробувань					
1.	Справний	Познач. навчальної сукупності		ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}	ω_{14}
		Оцінки середн. знач. коефіцієн.	k	0,039 ± 0,01	0,035±0,01	0,042±0,01	0,039±0,02
			γ	0,184± 0,04	0,193±0,01	1,051±0,14	1,531±0,37
2.	Відсутнє мастило	Познач. навчальної сукупності		ω_{21}	ω_{22}	ω_{23}	ω_{24}
		Оцінки середн. знач. коефіцієн.	k	0,041±0,03	0,038±0,01	0,044±0,01	0,035±0,0
			γ	0,583±0,048	0,611±0,131	1,813±0,241	2,342±0,543
3.	Перекіс	Познач. навчальної сукупності		ω_{31}	ω_{32}	ω_{33}	ω_{34}
		Оцінки середн. знач. коефіцієн.	k	0,037±0,03	0,035±0,01	0,036±0,02	0,032±0,01
			γ	1,007±0,11	1,171±0,17	2,331±0,26	3,007±0,74
4.	Дефект внутр. кільця	Познач. навчальної сукупності		ω_{41}	ω_{42}	ω_{43}	ω_{44}
		Оцінки середн. знач. коефіцієн.	k	0,037±0,02	0,032±0,02	0,028±0,01	0,023±0,01
			γ	1,394±0,24	1,517±0,21	3,273±0,41	3,673±0,83

*) Отримані значення оцінок коефіцієнтів асиметрії k слід множити на множник 10^{-2} .

При проведенні експериментів з дослідження впливу величини кутової швидкості обертання валу ЕМ на кількісні оцінки основних діагностичних ознак (таблиця 4.2) швидкісний режим обертання валу змінювався дискретно зі значеннями $v_{об} \in (250, 500, 750, 1000)$ об/хв. У відповідності зі створеною моделлю [21, 27, 28], формування діагностичних просторів, що відповідають як певному технічному стану підшипника кочення (справний, відсутність мастила, перекіс, дефект внутрішнього кільця), так і певному вищевказаному швидкісному режиму, можна позначити як сукупність множини Ω , елементами якої є підмножини ω_{jn} , $j, n \in \overline{1, 4}$. В такому позначенні індекс j відповідає певному технічному стану підшипника при його випробуванні на установці, а n - кутовій швидкості валу установки. У даному випадку $n_1 = 250$ об/хв, $n_2 = 500$ об/хв, $n_3 = 750$ об/хв, $n_4 = 1000$ об/хв.

Ці позначення ω_{jn} , $j, n \in \overline{1,4}$ наведено у таблиці 4.2. Тобто, під кожною ω_{jn} , $j, n \in \overline{1,4}$ будемо уявляти певну навчальну сукупність (НС), що відповідає водночас як певному технічному досліджуваного підшипника кочення, так і певному режиму його роботи.

За результатами вимірювання реалізацій вібрацій досліджуваних підшипників можна відмітити, що кількісні оцінки середніх значень коефіцієнтів асиметрії k майже не залежать від зміни ані швидкісного режиму, ані перелічених у таблиці 4.2 можливих дефектів. Тобто, у даному випадку коефіцієнт асиметрії k не виявився інформативною діагностичною ознакою. Отримані значення оцінок коефіцієнтів асиметрії k свідчать про симетричний характер кривої розподілу експериментально отриманих на стенді (рис.4.1) значень віброприскорень підшипників кочення.

На відміну від оцінок коефіцієнтів асиметрії k , значення кількісних оцінок середніх значень коефіцієнтів ексцесу γ віброприскорень підшипників підтвердили їх інформативність при діагностуванні вказаних типів дефектів підшипників кочення, що працюють у певних швидкісних режимах. За даними таблиці 4.2 можна відмітити підвищення середніх значень коефіцієнту ексцесу γ при наявності певних дефектів у досліджуваних підшипниках. Так, при фіксованій швидкості обертання валу $v_{об} = 250 об/хв$, спостерігається поступове підвищення середніх значень коефіцієнту ексцесу γ досліджуваних віброприскорень при наявності різних дефектів підшипників (відсутність мастила, перекид, дефект внутрішнього кільця) у порівнянні зі справним підшипником. Максимальних значень цей параметр набуває у випадку дефекту внутрішнього кільця підшипника. Підвищення значень оцінок коефіцієнту ексцесу γ віброприскорень підшипників при наявності дефектів свідчать про наявність у вібраціях останніх імпульсів зі значною амплітудою. Отримані дані підтверджують результати, наведені у роботах [5, 61, 69].

Зміна швидкісних режимів установки призводить до суттєвої зміни кількісних оцінок коефіцієнту ексцесу γ віброприскорень підшипників. Як видно з таблиці 4.2, при збільшенні швидкості обертання валу спостерігається збільшення середніх значень оцінок коефіцієнту ексцесу γ . Максимальні значення цього параметру спостерігаються при випробуваннях підшипників з дефектами внутрішнього кільця та при швидкості обертання валу $v_{об} = 1000 об/хв$.

Наведені у таблиці 4.2 дані підтверджують необхідність врахування швидкісних режимів роботи підшипників кочення при проведенні діагностування їх технічного стану. Згідно з [5, 21, 27, 28], цю задачу можна розв'язати шляхом побудови навчальних сукупностей, що базуються на використанні значень досліджуваного параметру γ і які враховують водночас як типи можливих дефектів, так і швидкісний режим роботи підшипника кочення. Найкращим способом це можна зробити, якщо використати для формування навчаючих сукупностей діагностичний простір, у якому координатами є найбільш інформативні діагностичні ознаки. Враховуючи експериментально отримані дані, наведені у таблиці 4.2, в якості такого діагностичного простора може бути вибрана відома у статистиці діаграма Пірсона [5, 50, 110].

4.2.2. Експериментальна перевірка діагностичних ознак, здійснена за допомогою стенду вібровипробувань шихтованого магнітопроводу

Згідно з [5, 21, 24, 61], основними діагностичними ознаками, які дозволяють виявляти та класифікувати низку дефектів певних вузлів ЕО, є центральні моменти третього та четвертого порядку, а саме, коефіцієнти асиметрії k та ексцесу γ , а також спектральна щільність потужності досліджуваних вібрацій.

Вимірювання проводилися як на магнітопроводі, спресованому за допомогою динамометричного ключа з зусиллям 30 Н·м, так і з «розпушеним».

Результати досліджень віброприскорення шихтованого магнітопроводу довели необхідність врахування режимів його роботи для певних умов експлуатації. Коротко зупинимось на описі експериментів з використанням цього модельного зразка.

Таблиця 4.3

Експериментальні дослідження магнітопроводу

Ступінь навантаження			Стан пресування магнітопроводу					
№ пп	Напруга U, В	Струм I, А	Розпушений			Затягнутий		
			σ	k	γ	σ	k	γ
1	50	3,5	$0,322 \cdot 10^{-3}$	0,023	-1,000	$2,312 \cdot 10^{-3}$	0,257	-1,430
2	100	6,0	$1,045 \cdot 10^{-3}$	-0,340	-1,100	$5,428 \cdot 10^{-3}$	0,108	-1,480
3	150	9,1	$4,322 \cdot 10^{-3}$	-0,028	-0,773	$9,883 \cdot 10^{-3}$	0,131	-1,420
4	200	12,5	$17,157 \cdot 10^{-3}$	0,250	-0,597	$11,654 \cdot 10^{-3}$	0,047	-1,320
5	250	14,1	$22,380 \cdot 10^{-3}$	-0,092	-0,999	$17,870 \cdot 10^{-3}$	0,198	-1,220

Таблиця 4.3 містить дані з дослідження коефіцієнтів асиметрії k та ексцесу γ сигналу віброприскорення сегменту шихтованого магнітопроводу (рис.4.3) при різних струмах та напругах, що подаються у обмотку цього сегменту. Слід зазначити, що одним із найбільш типових дефектів для шихтованого магнітопроводу є, так зване, «розпушення», тобто розшарування окремих пластин, внаслідок послаблення зусилля, що через стяжні призми (шпильки) стискає серцевину магнітопроводу.

Зміна режиму роботи здійснювалась шляхом подавання у обмотку магнітопроводу через ЛАТР дискретних значень струму із наступного ряду $I_{\text{нав}} \in (3,5; 6,0; 9,1; 12,5; 14,1)$ А. Для кожного з наведених значень струму вимірювались за допомогою акселерометра АВС-017 відповідні сигнали віброприскорень шихтованого пакету магнітопроводу та із застосуванням відповідного програмного забезпечення в ІВДС визначались кількісні оцінки коефіцієнтів асиметрії k та ексцесу γ , а також будувалась спектрограми $S(f)$.

Як видно із наведених у таблиці 4.3 експериментальних значень, зростання величини струму у обмотці шихтованого магнітопроводу не призводить до закономірних змін кількісних оцінок коефіцієнтів асиметрії k та ексцесу γ . Отже, ці параметри не можна використовувати як діагностичні ознаки. Разом з тим, спостерігається чітка закономірність зростання середньоквадратичного відхилення σ віброприскорень шихтованого пакету магнітопроводу при збільшенні струму через обмотку. Таким чином, цей діагностичний параметр можна використати для визначення ступеня навантаження в пакеті магнітопроводу.

Результати проведених експериментальних досліджень щодо ступеня пресування магнітопроводу та струмового режиму обмотки магнітопроводу довели інформативність спектрального аналізу досліджуваних вібрацій. Аналіз отриманих спектрограм (рис. 4.6) показав, що при розпушуванні магнітопроводу з'являються додаткові складові з високою амплітудою. В якості діагностичної ознаки можливо використовувати кількість максимумів спектрограм вище заданого рівня. Із наведених у таблиці 4.3 даних експериментів при побудові спектрограм, представлених на рис.4.6 було використано перші три, тобто, коли $I_{\text{нав}} \in (3,5; 6,0; 9,1)$ А

Для прийняття вірного рішення про стан пресування шихтованого магнітопроводу при проведенні його діагностики необхідно мати навчаючі сукупності, які б відповідали найбільшій кількості значень ступеню стягнення заліза

у шихтованому пакеті. І що особливо важливо, при цьому необхідно враховувати і режим струмового навантаження обмотки досліджуваного магнітопроводу.

Сформовані у вибраних діагностичних просторах навчаючі сукупності фактично є банком навчаючих сукупностей для здійснення за допомогою ІВДС моніторингу і діагностики станів вузлів ЕО, що працює у різних режимах. Подальше використання отриманих еталонів реалізується шляхом побудови розв'язуючих правил з встановлення технічного стану вузлів ЕО, для чого використовується відома в статистиці процедура перевірки статистичних гіпотез. Типові приклади з реалізації процедури побудови таких розв'язуючих правил наведені в [5, 61, 62, 63].

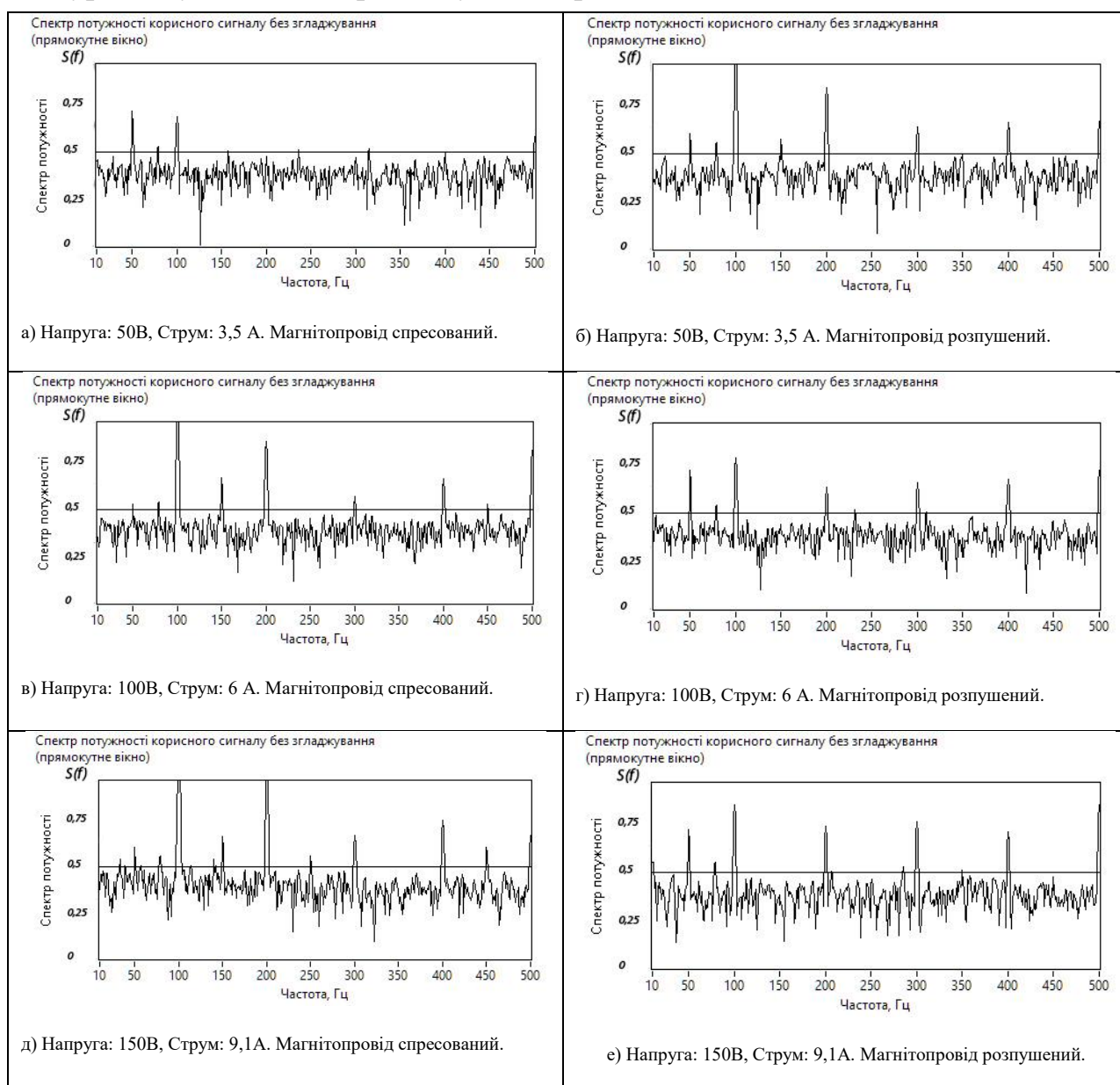


Рис. 4.6 Спектрограми досліджуваних вібрацій

Наведені результати експериментів підтвердили інформативність як діагностичних ознак параметрів, що отримуються за спектральною щільністю

потужності $S(f)$ віброприскорень шихтованого магнітопроводу. За результатами проведених досліджень можна безпосередньо перейти до формування навчаючих сукупностей, що враховують водночас як ступінь пресування залізних пластин у магнітопроводу, так і величину електричного навантаження обмотки.

4.2.3. Перевірка функціонування ІВДС на електродвигунах власних потреб теплових електростанцій

Для перевірки функціонування створеної ІВДС в умовах працюючої теплової електростанції були виконані експериментальні дослідження (вимірювання вібрацій) на підшипникових вузлах електродвигунів власних потреб ТОВ «ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» (Дарницька ТЕЦ) [82].

Двигун працює в нормальному режимі. На рис. 4.7. наведено графік залежності амплітуди віброприскорення від часу:

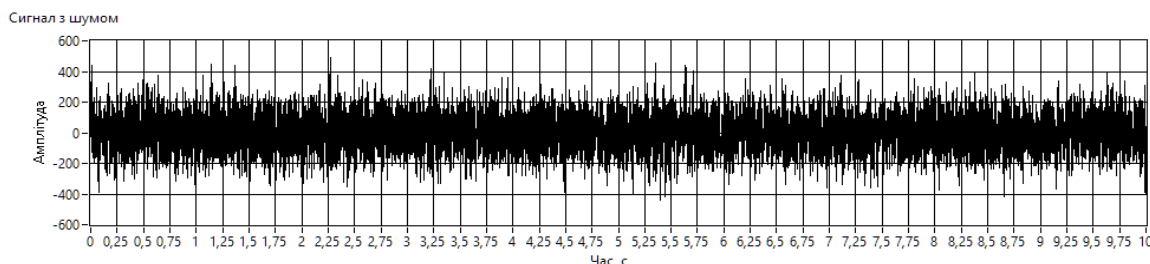


Рис. 4.7. Залежність амплітуди віброприскорення від часу для підшипників кочення електродвигуна DKRAJ 4519-4М.

Використаємо для обробки виміряного вібраційного сигналу програму статистичного спектрального аналізу, що базується на алгоритмах швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). При вказаній обробці було застосовано вікно Бартлетта. На рис.4.8 наведено графік спектру потужності виміряного вібраційного сигналу.

Як видно із представлених залежностей, основна частота спектру відповідає робочій швидкості двигуна складає і 24,9 Гц.

Виконані вимірювання та аналіз підтверджують можливість використання розробленого зразка ІВДС для проведення діагностування рухомих так і нерухомих вузлів ЕО з віддаленим розташуванням блока сенсорів.

Застосування пікомереж та використання взаємоінтегрованої структури блоків сенсорів дозволить створити ефективну систему діагностування значної кількості однотипних електричних машин.

Отриманий спектр потужності може бути вибраний в якості навчальної сукупності віброприскорень умовно справних підшипників електродвигуна DKRAJ 4519-4M.

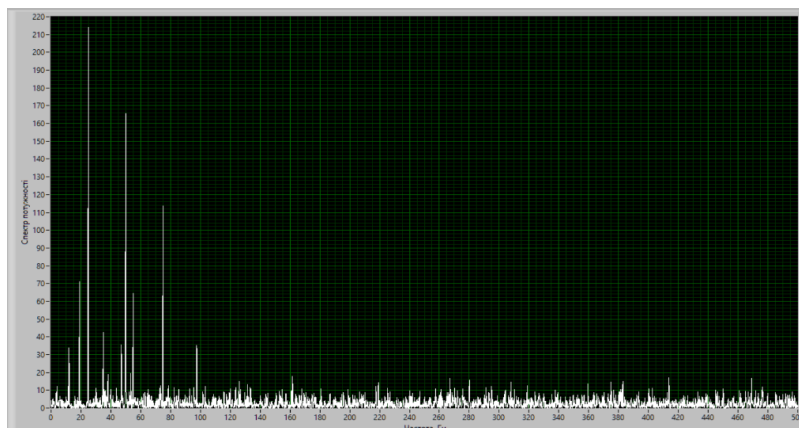


Рис. 4.8. Спектр потужності вібраційного сигналу, виміряний на підшипникових вузлах електродвигуна DKRAJ 4519-4M.

Крім наведеного експерименту, за допомогою створеного зразку ІВДС були досліджені вібрації підшипників кочення електродвигуна DKRAJ 4519-4M, який щойно пройшов поточне технічне обслуговування. Результати цих експериментів дозволили оцінити: - як температурний стан підшипникових

вузлів впливає на характеристики їх вібрацій. Основний сенс цих експериментів полягає у тому, що у не робочому стані основні вузли досліджуваного електродвигуна мають температуру оточуючого середовища, тобто, температуру приміщення, де він розташований. Однак, при введенні цього двигуна в експлуатацію температура його вузлів підвищується до робочих значень, що передбачені його технічними характеристиками. Проведення цих експериментів дасть можливість перевірити, як змінюються в залежності від температури оцінки основних діагностичних ознак стану підшипників кочення, а саме, коефіцієнтів асиметрії k та ексцесу γ їх вібрацій, які були запропоновані у 2-му розділі дисертації.

4.3. Формування навчальних сукупностей, що відповідають певним технічним станам та певним режимам роботи досліджуваних вузлів ЕО

Розв'язок будь-якої задачі статистичної діагностики [3, 5, 26, 27, 55, 61, 100] передбачає: побудову математичної моделі діагностичного сигналу; теоретичне обґрунтування діагностичних ознак; формування навчаючих сукупностей; побудову розв'язуючих правил з визначення технічного стану і класифікації можливих

дефектів у досліджуваному об'єкті. Як відомо [5, 45 50, 61], найбільш зручною формою представлення навчаючої сукупності є відомий у статистиці еліпс розсіяння.

Наступний крок у проведенні діагностики передбачає на основі сформованих навчаючих сукупностей побудову розв'язуючих правил з виявлення можливих дефектів, які зводяться до перевірки статистичних гіпотез: основної H_0 і конкуруючої H_1 .

Оскільки питання, пов'язані з описом джерела діагностичної інформації (підшипники кочення ЕМ, шихтований магнітопровід, двигуни власних потреб теплових електростанцій), а також з попередньою статистичною обробкою вимірної діагностичної інформації, були розглянуті вище, зупинимось докладніше на питаннях проведення навчання ІВДС і формуванні образів (навчальних сукупностей). Вони мають містити водночас інформацію як про можливі види дефектів, так і про режими функціонування досліджуваних вузлів ЕО. У свою чергу, кожна з них представляють собою деякі множини, сформовані зі значень параметрів, що відповідають режиму і стану ЕО. Докладніше зупинимось на питаннях формування навчальних сукупностей, отриманих з використанням описаних вище об'єктів за результатами експериментальних досліджень вібраційних діагностичних сигналів.

4.3.1. Побудова навчальних сукупностей за результатами випробувань підшипників кочення на стенді

Основні етапи завдання діагностування ЕО з використанням статистичних методів розглянуті в роботах [5, 61]. Нижче коротко зупинимось на питаннях, побудови і формування навчаючих сукупностей (НС), які відповідають певним технічним станам досліджуваних підшипників кочення та режимам їх роботи. Для цього використаємо результати дослідження вібрацій підшипників, які наведено у таблиці 4.2.

Як було показано в [5, 21, 31, 61, 69], коефіцієнти асиметрії k та ексцесу γ , що характеризують розподіл процесів вібрації різних вузлів ЕО, можуть бути використані в якості діагностичних ознак для визначення технічного стану або ступеня навантаження вузлів ЕО.

Якщо замість коефіцієнтів k та γ скористатися пов'язаними з ними параметрами

$$\beta_1 = k^2, \quad \beta_2 = \gamma + 3, \quad (4.1)$$

то в якості діагностичного простору можна вибрати площину (β_1, β_2) , в якій будується діаграма Пірсона [5, 45, 61, 110]. Коротко розглянемо питання формування в діагностичному просторі (β_1, β_2) НС, що відповідають різним технічним станам та різним швидкісним режимам досліджуваного підшипника. Для цього встановимо межі зміни кількісних оцінок $\bar{\beta}_1$ і $\bar{\beta}_2$ в залежності від виду дефекту та режиму випробуваного підшипника. Риса над символом $\bar{\beta}_1$ означає оцінку параметра β_1 .

На рис. 4.9 представлені НС в діагностичному просторі (β_1, β_2) , сформовані за результатами дослідження реалізацій процесу вібрацій підшипника кочення, що має різні технічні стани і працює у різних швидкісних режимах. Кожна навчальна сукупність являє собою еліпс розсіювання [5, 21, 61], побудований по точках, координатами яких є усереднені оцінки $\bar{\beta}_1$ і $\bar{\beta}_2$.

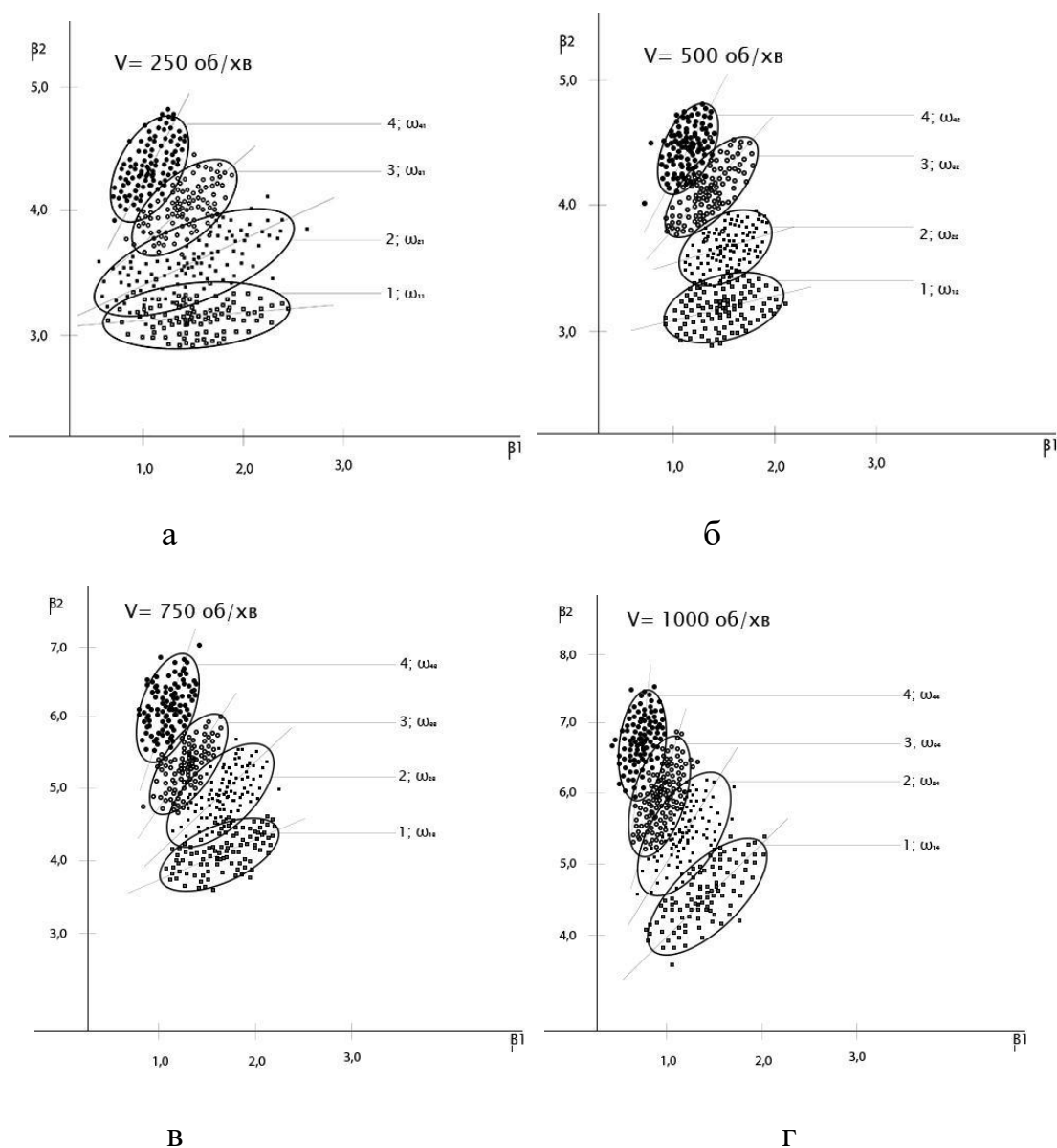


Рис. 4.9 Навчальні сукупності просторі (β_1, β_2)

Цифрою 1 позначена навчальна сукупність, що відповідає випробуванням умовно справного підшипника кочення; 2 – відсутнє мастило; 3 – перекіс; 4 – дефект внутрішнього кільця. Всі ці позначення збережено для НС, що сформовано для випробувань підшипника, працюючого у різних швидкісних режимах (рис. 4.9 , а, б, в, г). Представлені на цих рисунках еліпси розсіювання були побудовані за результатами обробки від 85 до 100 вибірок експериментально виміряних реалізацій віброприскорень досліджуваних підшипників кочення, що випробувались на установці (рис.4.1) і мали як різні технічні стани, так і випробувались у різних швидкісних режимах. Кожна із наведених на рис.4.9 точок відповідає одній реалізації віброприскорень підшипника кочення, що мав одне із перелічених технічних станів і випробувався у чотирьох швидкісних режимах $v_{об} \in (250; 500; 750; 1000)$ об/хв. У свою чергу кожен із еліпсів розсіювання «покривав» своїми границями до 95% експериментально отриманих точок, що відповідали певним умовам випробувань досліджуваних підшипників.

Просте порівняння розміщення НС на площині (β_1, β_2) показує їх суттєву залежність як від типу дефекту, так і від швидкісного режиму роботи установки (рис.4.1), Тобто, кожній НС слід поставити у відповідність певне позначення підмножини ω_{jn} , яка б поєднувала у собі інформацію як про технічний стан підшипника, так і про швидкісний режим його роботи.

Використання для формування НС діагностичного простору діаграми (β_1, β_2) Пірсона з координатами (β_1, β_2) надає можливість по отриманим координатам β_1 та β_2 визначити основні параметри і тип кривої розподілу, що відповідає отриманим експериментальним даним. Цей факт дозволяє більш точно проводити діагностування технічного стану досліджуваних об'єктів, оскільки, крім параметрів β_1 та β_2 можна використовувати і інші параметри (наприклад, κ - каппа Пірсона, S та ін. [5, 59, 61, 110]), що характеризують розподіл у системі кривих Пірсона.

На підставі проведених досліджень можна констатувати, що переважна більшість гістограм, побудованих за результатами обробки зареєстрованих реалізацій процесу вібрацій підшипників, апроксимувались, в основному, 4 - м та 7 - м типами кривих з системи Пірсона [5, 59, 61, 110], тобто, криві розподілу мали симетричний вигляд, по відношенню до середнього значення із загостреною вершиною. Крім того, для переважної більшості експериментів відзначалося деяке збільшення (в середньому) оцінки коефіцієнта β_2 . Це пояснюється тим, що при появі дефектів

(відсутність мастила, перекіс, дефекти внутрішнього кільця) в зареєстрованих реалізаціях процесу вібрацій, відзначається поява імпульсів зі значною амплітудою.

4.3.2. Побудова навчальних сукупностей за результатами випробувань шихтованого магнітопроводу на стенді

Зупинимось на побудові навчальних сукупностей, відповідають різному ступеню пресування досліджуваного шихтованого магнітопроводу. У попередніх розділах були теоретично обґрунтовані до експериментально перевірені діагностичні ознаки, кількісні оцінки яких можуть бути отримані за допомогою статистичного спектрального та гістограмного аналізів вібраційного діагностичного сигналу.

Виходячи з розгляду спектрограм вібраційних хвиль, що поширюються по тілу шихтованого магнітопроводу (типові з них представлені на рис. 4.6 а, б, ... , е) та при зміні режиму струмового навантаження обмотки, можна відзначити, що найбільш інформативними діагностичними ознаками, що дозволяє діагностувати ступінь пресування шихтованого магнітопроводу, є: амплітуди основних максимумів спектрограми; частоти основних максимумів спектрограми; число основних максимумів спектрограми у фіксованій смузі частот.

Пояснимо на прикладі розгляду спектрограм, представлених на рис. 4.6 а, б, ... , е, яким чином відбувається формування навчальних сукупностей за результатами спектрального аналізу. Зупинимось на розгляді побудови навчаючих сукупностей при різних режимах електричного навантаження обмотки шихтованого магнітопроводу. Для пояснення питання побудови навчаючих сукупностей за результатами спектральної обробки реалізацій віброприскорень шихтованого магнітопроводу, скористуємося правилами, які були запропоновані в [5, 38, 63] при проведенні ударної діагностики стану пресування шихтованого магнітопроводу за допомогою спеціального ударного молотку. При проведенні цих експериментів обмотка шихтованого магнітопроводу була знеструмлена, тобто ударні випробування проводилась у двох станах шихтованого магнітопроводу: спресованого із зусиллям 30 Н·м і коли пресувальне зусилля було повністю відсутнє.

Основна діагностична ознака для цього випадку випробувань шихтованого магнітопроводу – це кількість частотних максимумів, яка відповідає двом вищезначеним станам пресування магнітопроводу.

Основна мета експериментів, які розглянуті у даному підрозділі - це сформулювати навчаючі сукупності при подаванні електричного живлення на клема обмотки шихтованого магнітопроводу.

Для встановлення залежності вібраційних характеристик магнітопроводу з різними ступенями пресування пакету залізу, на клема обмотки магнітопроводу подавались різні величини напруги. Тобто, на відміну від експерименту з використанням ударного молотка, для діагностування ступеня пресування шихтованого магнітопроводу [5, 24, 63] в статичному (знеструмленому) стані обмотки, підключення обмотки під електричний струм з певними параметрами навантаження призводить до виникнення вібраційних хвиль, характеристики і параметри яких змінюються в залежності від електричного режиму роботи обмотки.

Для побудови навчаючих сукупностей, які відповідають як стану пресування так і електричному навантаженню обмотки магнітопроводу, скористаємося спектрограмами, що наведено на рис. 4.6. Базуючись на результатах спектрального аналізу цих спектрограм, в якості діагностичної ознаки для побудови навчаючих сукупностей було обрано число основних максимумів спектрограм у фіксованій смузі (до 500 Гц) частот. Кількість максимумів спектрограми, які враховувались при формуванні навчаючих сукупностей на рівні $S_{ампл} = 0,5$ за амплітудою. На цьому рівні на графіках спектрограм рис.4.6 проведено паралельно осі частот f лінії порогового значення за амплітудою спектрограми. Це значення по осі $S(f)$ вибрано умовно, для зручності підрахування кількості максимумів у спектрограмах, що є визначальним для формування навчаючих сукупностей і наступної побудови розв'язуючих правил з визначення технічного стану вузла ЕО з урахуванням режимів його роботи. Формування навчаючих сукупностей здійснювалось у одновимірному діагностичному просторі ν .

Аналіз кожної із спектрограм рис.4.6 дає у вибраному діагностичному просторі ν по одній точці, яка відповідає різному ступеню (спресований із зусиллям 30 Н·м, або розпушений) пресування шихтованого магнітопроводу. Ці дослідження було проведено для кожного з 3-х режимів електричного навантаження обмотки (1 – й режим – напруга 50 В, струм 3,5 А; 2 – й режим – напруга 100 В, струм 6 А; 3 – й режим – напруга 150 В; струм 9,1 А).

Для побудови навчаючих сукупностей у діагностичному просторі ν було проведено для кожного із зазначених електричних режимів близько 200 експериментів із дослідження вібрацій шихтованого магнітопроводу. Ці

експерименти проводились спочатку на шихтованому магнітопроводі, стиснутому із зусиллям 30 Н·м, а надалі – на магнітопроводі, у якого було повністю зняте стискаюче зусилля. Перед проведенням спектрального аналізу усі експериментально отримані реалізації перевірялись на стаціонарність з використанням t та F - критеріїв, які докладно описані, наприклад, у роботах [4, 5, 8, 14, 45, 50, 72, 84].

На рис.4.10 наведено навчаючі сукупності побудовані у одновимірному діагностичному просторі ν , що відповідають різним ступеням пресування пакету заліза при різних режимах електричного навантаження обмотки. Навчаючі сукупності являють собою гістограми кількості максимумів ν досліджуваних спектрограм зафіксованих на рівні $S_{ампл} = 10^{-10}$. Ці навчаючі сукупності побудовані для кожного із 3-х вказаних вище електричних режимів роботи обмотки магнітопроводу.

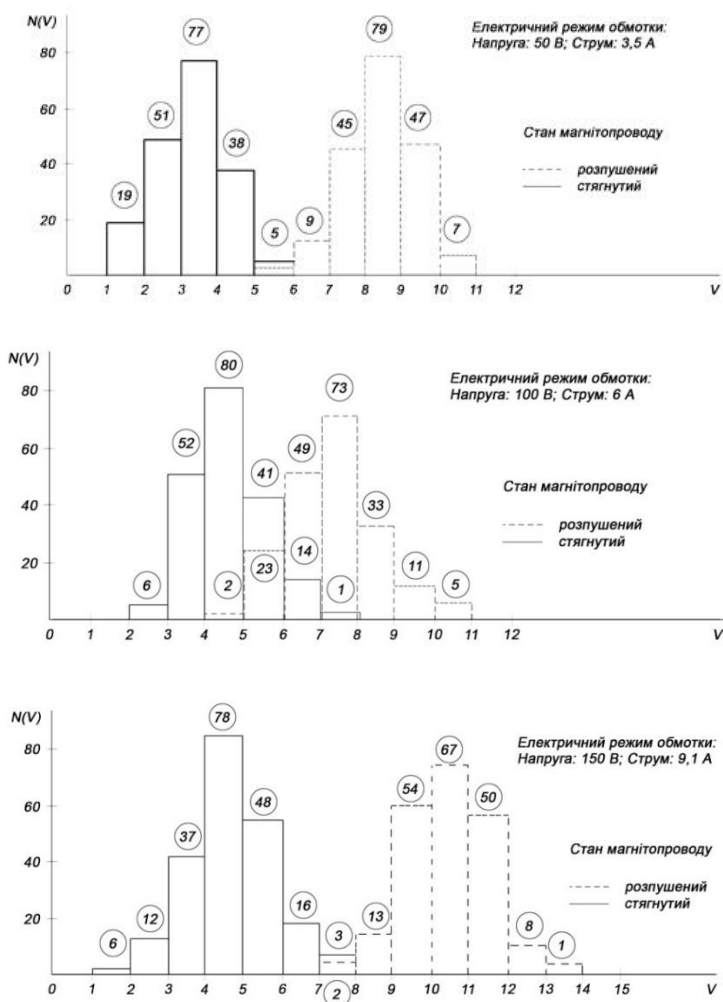


Рис. 4.10 Гістограми кількості максимумів ν

Як видно із представлених гістограм, підвищення величини напруги та струму в обмотці призводить до взаємного зміщення гістограм, що відповідають збільшенню кількості перетинів максимумів спектрограми із умовно вибраним порогом

$S_{ампл} = 0,5$. При чому, спостерігається у середньому збільшення кількості перетинів, як при знятті стискаючого зусилля у магнітопроводі, так і при підвищенні величини напруги і струму в обмотці.

Прикінцевою операцією з діагностики технічного стану вузлів ЕО є побудова розв'язуючих правил, яка реалізується на основі побудованих навчаючих (в нашому випадку гістограм, наведених на рис.4.10). Однак, як показано у роботах [5, 61, 62, 63], розв'язуючі правила краще будувати не за гістограмами, а за згладжуючих їх кривими, які входять до системи кривих Пірсона.

На рис.4.11 наведено криві, що згладжують гістограми осередненого числа ν максимумів спектрограм вібрацій шихтованого магнітопроводу. Ці криві і є навчаючими сукупностями у одновимірному просторі ν . Розподіл числа ν відповідає як різним стискаючим зусиллям пакету заліза у шихтованому магнітопроводі, так і різним режимам електричного навантаження обмотки магнітопроводу.

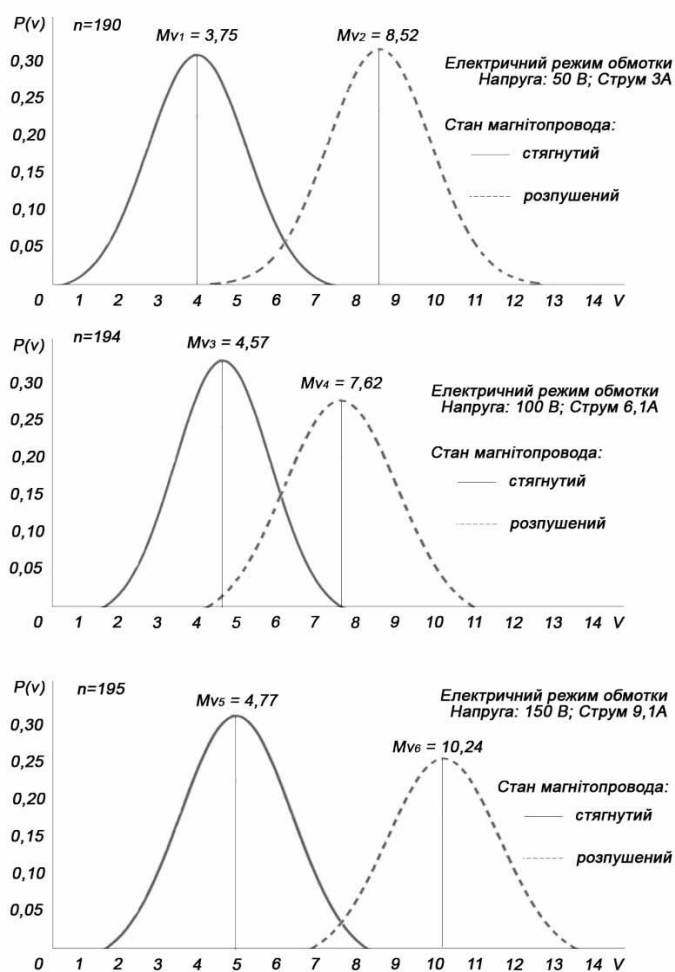


Рис.4.11 Криві, що згладжують гістограми осередненого числа ν максимумів спектрограм вібрацій шихтованого магнітопроводу

Як видно із рис.4.11, побудовані криві мають різні математичні сподівання $M \nu_j$, $j = \overline{1,6}$ і зміщені одна відносно одної. Дані параметрів отриманих кривих та умов проведення експериментів наведено у таблиці 4.4.

Зміна взаємного розташування гістограм в залежності від стану пресування пакету заліза, а також зміна електричного режиму роботи обмотки свідчить про необхідність врахування режимів роботи обмотки магнітопроводу при створенні банку навчаючих сукупностей для ІВДС.

Таблиця 4.4

Умови проведення експерименту та параметри отриманих кривих

Режим електричного навантаження			Стан пресування магнітопроводу	
№ п п	Напруга U, В	Струм I, А	Затягнутий	Розпушений
			$M \nu_j, j = 1; 3; 5$	$M \nu_j, j = 2; 4; 6$
1	50	3,5	3,75	8,52
2	100	6,0	4,57	8,62
3	150	9,1	4,77	10,24

Перш ніж розглянути типовий приклад з визначення та класифікації можливих дефектів у вузлах ЕО, коротко зупинимось на питаннях формування навчаючих сукупностей за даними експериментів, отриманих на електротехнічному обладнанні теплової електростанції.

4.3.3. Приклад побудови навчальних сукупностей за результатами випробувань підшипникових вузлів двигунів власних потреб теплової електростанції

В якості об'єктів дослідження для формування навчаючих сукупностей під час проведення цих експериментів було обрано підшипникові вузли електродвигунів DKRAJ 4519-4М. Ці двигуни використовуються як привод питомих водяних насосів KRHA-300/660-40A-019. Досліджувались віброприскорення поверхні підшипникових вузлів одного із зразків вказаного типу двигунів, що пройшов плановий поточний ремонт.

Основна мета проведення експериментів з вимірювання та дослідження віброприскорення підшипникових вузлів полягала у встановленні залежності параметрів вібрації від робочої температури підшипникових вузлів вказаних електродвигунів. Саме з цієї причини був обраний електродвигун, який вводився до

експлуатації після поточного ремонту, тобто температура поверхні його підшипникового вузлу приблизно дорівнювала внутрішній температурі приміщення, де були встановлені ці двигуни, а саме $t = 21^\circ\text{C}$. Температура вказаної поверхні вимірювалась за допомогою контактного термометра типу CEWAL BRC 66V1 з діапазоном вимірювання $0 - 120^\circ\text{C}$.

Для цього температурного стану за допомогою розробленого зразку ІВДС було проведено вимірювання і наступна статистична обробка по програмі гістограмного аналізу PEARSON діагностичного сигналу віброприскорення підшипникового вузлу. Наступне вимірювання досліджуваного сигналу було здійснено після досягнення вказаним двигуном робочих експлуатаційних параметрів (приблизно через 1 годину після пуску двигуна). Температура підшипникового вузлу на цей момент досягла відмітки $t = 39^\circ\text{C}$.

За даними статистичної обробки вимірювань віброприскорень підшипникового вузлу вказаного двигуна отриманих при різних температурах, за оцінками параметрів β_1 і β_2 у діагностичному просторі (β_1, β_2) були сформовані навчальні сукупності, які наведено на рис.4.12. Як і у попередніх дослідженнях, навчальні сукупності являють собою еліпси розсіювання побудовані на рівні 0,95 за точками, що відповідають різним значенням температури досліджуваного вузла, а саме, 21°C та 39°C . Для формування наведених навчаючих сукупностей було використано вибірки об'ємом близько 120 елементів.

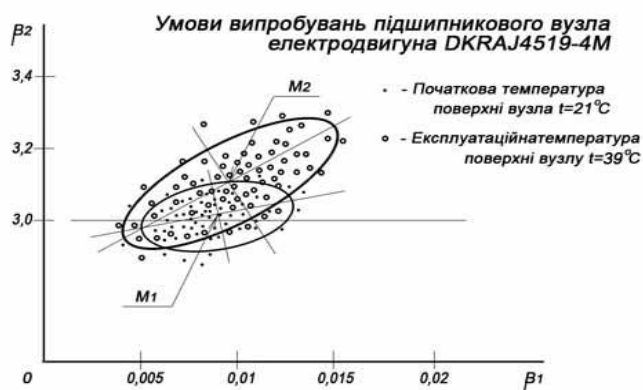


Рис.4.12 Навчальні сукупності для різних температур роботи двигуна діагностичному просторі (β_1, β_2)

Як видно з наведених сукупностей, підвищення температури підшипникового вузлу електродвигуна призводить до незначного зміщення еліпсу розсіювання за величиною параметру β_2 . Різниця у розміщенні центрів еліпсів центрів еліпсів (M_1

та M_2) можна відмітити зовсім незначне зміщення цих центрів за координатою β_1 і майже на 0,1 одиницю за параметром β_2 . Різниця у розміщенні центрів навчальних сукупностей M_1 та M_2 та зміна границь побудованих еліпсів розсіяння, що спостерігаються при підвищенні температури під час експлуатації електродвигуна можна пояснити зміною умов утворення вібрацій у підшипниковому вузлі за рахунок зміни властивостей консистентного мастила, яке використовується у підшипнику.

У підсумку, отримані у даному підрозділі результати свідчать про необхідність врахування температурного режиму при створенні ІВДС і наступній діагностиці ЕО.

Маючи сформовані навчаючі сукупності, що враховують як вид можливого дефекту вузлу ЕО, так і режим його роботи можна безпосередньо перейти до побудови розв'язуючих правил з діагностики певних видів дефектів.

4.4. Приклад побудови розв'язуючих правил з діагностики стану підшипників кочення електричних машин

Для побудови розв'язуючих правил з діагностики і класифікації дефектів у підшипниках кочення електричних машин скористуємось навчаючими сукупностями наведеними у підрозділі 4.3.1, а саме сукупностями, що сформовані із застосуванням стенду вібродіагностики при швидкості обертання валу $\nu = 250 \text{ об/хв}$. Цьому випадку відповідають навчальні сукупності, наведені на рис. 4.9, а.

Як відзначено в [5, 61, 71], при побудові розв'язуючих правил з діагностики конкретних дефектів по вказаним навчаючим сукупностям зручніше перейти від двовимірної прямокутної системи із координатами (β_1, β_2) до полярної системи (ρ, φ) , перехід до якої здійснюється за співвідношеннями

$$\rho = \sqrt{\beta_1^2 + (\beta_2 - 1)^2} \quad (4.2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\beta_2 + 3}{\beta_1 + 4} \quad (4.3)$$

Обґрунтованість такого переходу наведено у [5, 61]. Згідно з рис.4.9, розташування еліпсів розсіяння, що відповідають різним технічним станам опиняється витягнутими уздовж радіусу ρ і стиснутими за кутом φ . Виходячи з цього, перетин щільності розподілу у площині куту φ постає більш інформативним до визначення параметрів розподілу діагностичних ознак у порівнянні із радіусом ρ . Саме це виявляється суттєвим аргументом для обґрунтування переходу від двовимірного діагностичного простору (β_1, β_2) до одновимірного з координатою φ .

З використанням такого переходу наведемо в у якості прикладу розв'язок задачі діагностування наявності мастила у підшипнику кочення 309ЕШ₂, що випробувався на стенді вібродіагностики із обертовою швидкістю $v = 250 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. На рис. 4.13 в одновимірному діагностичному просторі ϕ наведено типові гістограми та згладжуючі їх криві, які отримано з використанням навчаючих сукупностей, що задаються еліпсами розсіювання 1 та 2 рис. 4.9, а. Представлені на рис. 4.13 гістограми та криві розподілу зміщені одна відносно одної і мають різні математичні сподівання: $M\phi_1 = 55,35^\circ$ – справний підшипник, $M\phi_2 = 57,92^\circ$ – відсутнє мастило.

Отримані криві відносяться до XIII, IV або VII типам кривих з системи Пірсона [5, 59, 61], тобто можуть бути апроксимувати нормальним законом розподілу. Отже, для побудови розв'язуючих правил при діагностуванні зазначених дефектів в підшипнику можна використовувати класичну двохальтернативну процедуру перевірки статистичних гіпотез за Нейманом-Пірсоном, яка для нормального розподілу описується відносно простими математичними виразами. Згідно цієї процедури розв'язуюче правило з діагностики відсутності мастила у підшипнику зводиться до перевірки двох гіпотез: $H_0: M\phi_1 = 55,35^\circ$ (справний) $\leftrightarrow H_1: M\phi_2 = 57,92^\circ$ (відсутнє мастило).

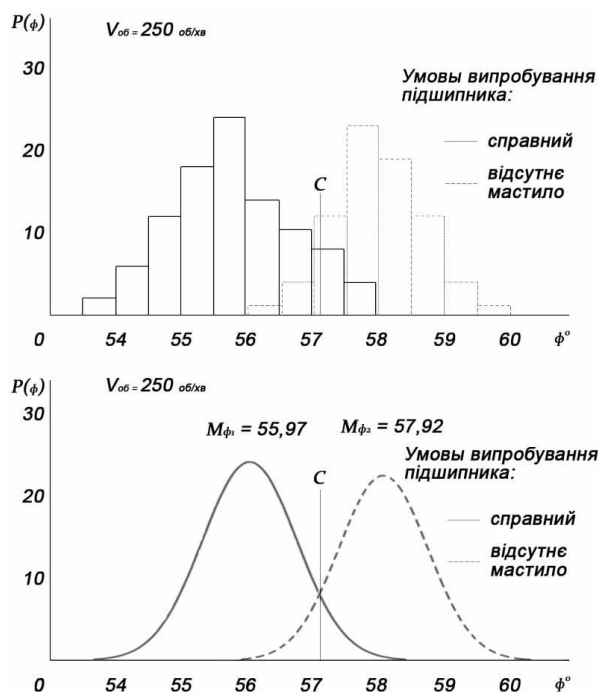


Рис.4.13 Гістограми та згладжуючі криві для справного підшипника кочення та з відсутнім в нього мастилом

Для побудови вказаного розв'язуючого правила здійснимо планування експерименту.

Діагностування відсутності мастила в підшипнику 309 ЕШ₂ зводиться до перевірки основної гіпотези: $H_0: M\varphi_1 = 55,97^\circ$ (підшипник справний) проти простий альтернативи: $H_1: M\varphi_2 = 57,92^\circ$ (відсутнє мастило). Припустивши ймовірності помилок першого і другого роду $\alpha = 0,05$ і $\beta = 0,01$ і знайшовши для них за таблицями [11] стандартного нормального розподілу відповідні квантилі $u_{1-\alpha} = 1,645$ і $u_{1-\beta} = 2,326$, визначимо необхідну кількість спостережень і величину порога з урахуванням того, що дисперсія $\sigma^2 = 0,3851$:

$$n = \frac{(u_\alpha + u_\beta)^2 \sigma^2}{(M\varphi_2 - M\varphi_1)^2} = \frac{6,073}{3,803} = 1,597 \approx 2.$$

Згідно з [5, 61] для цього випадку величина порогу C обчислюється за співвідношенням

$$C = \frac{(M\varphi_2 - M\varphi_1)(u_\alpha - u_\beta)}{2(u_\alpha + u_\beta)} + (M\varphi_1 + M\varphi_2)/2 = 0,167 + 56,945 = 57,112^\circ.$$

Отримавши в результаті проведеного планування експерименту всі необхідні дані для побудови розв'язуючого правила, здійснимо діагностування відсутності мастила в конкретних зразках підшипників типу 309 ЕШ₂, встановлених на стенді вібровипробувань підшипників кочення і у яких було попередньо повністю видалено мастило.

Для перевірки технічного стану підшипників було обрано чотири екземпляри підшипників 309 ЕШ₂, що випробувались на стенді з обертовою швидкістю $v = 250 \text{ об/хв}$. В процесі випробувань виміряні і оброблені за програмою гістограмного аналізу за допомогою розробленої ІВДС по 2 вибірці, що містять вібрації випробовуваних підшипників для кожного екземпляру і які працювали без мастила. Оцінки значень параметра φ вібрацій підшипників, що випробовувались на стенді, наведені в табл.4.5.

Сформульовані гіпотези H_0 та H_1 за правилом Неймана – Пірсона перевіряються за допомогою порогової нерівності [5, 61], яка у спрощеному варіанті має вид

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varphi_k \leq C,$$

де n - кількість спостережень, C – визначений поріг.

Після підстановки даних з таблиці 4.5 у наведену вище порогову нерівність його ліва частина для 1-го ... 4-го екземплярів випробовуваних підшипників приймає значення, рівні 58,49 °; 59,55 °; 60,01 °; 59,69 °, тобто для всіх чотирьох зразків підшипників 309 ЕШ₂ ліва частина порогової нерівності більше правої. Отже, на основі отриманих результатів приймається гіпотеза H_1 - у підшипниках відсутнє мастило. Аналогічно по гіпотезам, сформульованим вище, будуються розв'язуючі правила для діагностування інших видів дефектів при умові врахування відповідних швидкісних режимів роботи установки.

Таблиця 4.5.

Випробування підшипників кочення

Вимірюваний параметр	Номер випробуваного підшипника			
	1	2	3	4
Справний підшипник				
φ_1	55,37 ⁰	55,45 ⁰	55,84 ⁰	55,93 ⁰
φ_2	54,92 ⁰	56,07 ⁰	54,19 ⁰	57,68 ⁰
$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \varphi_j$	55,15 ⁰	55,76 ⁰	55,02 ⁰	56,81 ⁰
Відсутнє мастило				
φ_1	57,71 ⁰	59,83 ⁰	60,18 ⁰	59,11 ⁰
φ_2	59,26 ⁰	58,67 ⁰	59,84 ⁰	60,27 ⁰
$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \varphi_j$	58,49 ⁰	59,55 ⁰	60,01 ⁰	59,69 ⁰

Отже, розглянутий вище приклад довів, що спільне використання третього і четвертого моментів вібрацій підшипників дозволяє вибрати в якості діагностичного простору відому в статистиці діаграму Пірсона. Специфічний перехід від діаграми Пірсона до нової системи координат підвищує достовірність і роздільну здатність діагностики, а також спрощує процедуру побудови розв'язуючих правил приймаючи до уваги гіпотезу про гаусовів закон отриманих експериментальних даних.

Висновки за розділом 4

1. Вперше, за допомогою розробленого експериментального зразку системи вібродіагностики вузлів електротехнічного обладнання за експериментальними даними віброприскорень досліджуваних підшипників кочення сформовано навчальні

сукупності, що відповідають водночас як певним технічним станам підшипників кочення, так і швидкісним режимам їх випробувань.

2. Вперше, у відповідності із розробленою математичною моделлю, запропоновано представлення навчальних сукупностей у вигляді матриці, елементи якої враховують водночас як можливий тип дефекту досліджуваного підшипника кочення, так і швидкісний режим його роботи.

3. Використання в якості діагностичного простору діаграми Пірсона надає можливість за результатами вимірювань вібрацій досліджуваних підшипників кочення отримати основні статистичні параметри, що характеризують розподіл експериментальних даних і тим самим підвищити точність формування навчаючих сукупностей і подальший результат діагнозу технічного стану досліджуваного об'єкту.

4. Вперше, з використанням розробленого дослідного зразку ІВДС проведено експериментальні дослідження на реальному електротехнічному обладнанні теплової електростанції, в ході яких підтверджено інформативність коефіцієнтів асиметрії k та ексцесу γ досліджуваних вібрацій як діагностичних ознак для формування навчаючих сукупностей з визначенні технічного стану підшипників кочення електричних машин. Встановлено та досліджено залежність побудованих навчальних сукупностей від температурного режиму поверхні підшипникових вузлів електродвигунів власних потреб електростанції.

5. Результати проведених експериментальних досліджень щодо ступеня пресування магнітопроводу та струмового режиму обмотки магнітопроводу довели інформативність спектрального аналізу досліджуваних вібрацій. Аналіз отриманих спектрограм (рис.4.6) показав, що при розпушуванні магнітопроводу з'являються додаткові складові з високою амплітудою. В якості діагностичної ознаки можливо використовувати кількість максимумів спектрограм вище умовно заданого рівня.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язана актуальна науково-прикладна задача з розробки моделей, методів та комп'ютеризованої системи, що їх реалізує для діагностування технічного стану вузлів електротехнічного обладнання з урахуванням режимів їх роботи. Розв'язок цієї задачі надає можливість використовувати створені методи та системи діагностування у середовищі Smart Grid технологій. В процесі вирішення цієї задачі були отримані наступні результати:

1. Вперше розроблено моделі формування навчальних сукупностей для ІВДС, які враховують одночасно як можливі види дефектів у певних вузлах ЕО, так і можливі режими їх роботи.
2. Дістали подальшого розвитку математичні моделі діагностичних сигналів, які враховують як властивості об'єкту діагностування, так і режими (швидкісний, температурний електричний та ін.), у яких працює цей об'єкт.
3. На основі розгляду стандартизованих режимів роботи електротехнічного обладнання, вперше обґрунтовано необхідність врахування режимів роботи електротехнічного обладнання при формуванні навчаючих сукупностей для діагностичних систем. Встановлено основні види ЕО та узгоджено стандартизовані режими їх роботи ($S1 - S3$), при яких забезпечується найбільш достовірне вимірювання (з точки зору діагностування) інформаційних сигналів
4. Розроблено структурну схему, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок інформаційно-вимірювальної діагностичної системи, у якій, на відміну від відомих систем, передбачений блок, що забезпечує вибір відповідної навчаючої сукупності для проведення діагностування вузлів електротехнічного обладнання, яке може працювати у різних режимах (швидкісний, температурний, електричного навантаження та ін.).
5. Вперше, за допомогою розробленого експериментального зразку системи вібродіагностики вузлів електротехнічного обладнання за експериментальними даними віброприскорень досліджуваних підшипників кочення сформовано навчальні сукупності, що відповідають водночас як певним технічним станам підшипників кочення, так і швидкісним режимам їх випробувань.
6. Вперше, у відповідності із розробленою математичною моделлю, запропоновано представлення навчальних сукупностей у вигляді матриці, елементи якої

враховують водночас як можливий тип дефекту досліджуваного підшипника кочення, так і швидкісний режим його роботи.

7. Вперше, з використанням розробленого дослідного зразку ІВДС проведено експериментальні дослідження на реальному електротехнічному обладнанні теплової електростанції, в ході яких підтверджено інформативність коефіцієнтів асиметрії k та ексцесу γ досліджуваних вібрацій як діагностичних ознак для формування навчаючих сукупностей з визначенні технічного стану підшипників кочення електричних машин. Встановлено та досліджено залежність побудованих навчальних сукупностей від температурного режиму поверхні підшипникових вузлів електродвигунів власних потреб електростанції.
8. Матеріали дисертаційної роботи знайшли практичне використання при розробленні та експериментальній перевірці в умовах теплової електростанції вібраційного модуля, що інтегрований у багаторівневу систему діагностики електротехнічного обладнання.
9. Перспективи застосування розробленої системи контролю знаходяться в області підвищення експлуатаційної надійності та подовження ресурсу електротехнічного обладнання енергопідприємств. Результати досліджень можуть бути використані при розробленні систем моніторингу і технічної діагностики обладнання промислових підприємств. Серед об'єктів потенційного впровадження – електротехнічне обладнання більш ніж 40 енергоблоків теплових електростанцій України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 755 с.
2. Аппаратура общего назначения для определения основных параметров вибрационных процессов. Общие технические требования: ГОСТ 30296-95. – [Чинний від 1997-01-10]. – М.: Изд.-во стандартов, 1995. – 20 с. –(Міждержавний стандарт).
3. Бабак В.П., Бабак С.В., Еременко В.С. и др.; Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник. К: София – А, 2014. 832 с.
4. Бабак В.П., Марченко Б.Г., Фриз М.Є. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика – Київ: Техніка, 2004. 288 с.
5. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 456 с.
6. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1965. 560 с.
7. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрациям. Учебное пособие. Изд-во «Северо-западного учебного центра». С-Петербург, 2000. 159 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.
9. Бибер Л.А., Любарский Ю.Я., Надточий В.М., Цейтлин А.С. Экспертная система вибрационного контроля гидрогенератора. *Електричество*, 1990. №8. С. 48 – 51.
10. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 211 с.
11. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики М.: Наука, 1983. 416 с.
12. Борисов Н.А. Основные проблемы развития ТЭС в Украине и пути их решения на среднесрочную перспективу. *Енергетика и електрифікація* . 2002. №5. С. 6–13.
13. Боровикова О.Ю., Красильников А.И., Мыслович М.В. Модели пуассоновской спектральной функции Колмогорова в задачах диагностики электротехнического оборудования. *Техническая электродинамика*. 2002. № 4. С. 73 – 78. с.
14. Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматгиз, 1960. 328 с.
15. Вибрация энергетических машин: Справочное пособие. / ред. Н.В. Григорьева. Л.:

Машиностроение, 1974. 464 с.

16. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибраций на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹ (ISO 10816-3:1998 IDT): ГОСТ ИСО 10816-3-2002: [Чинний від 2007-01-10]. М.: Стандартиформ, 2007. – 16 с. (Національний стандарт України).
17. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров (ISO 5348-98 IDT): ДСТУ ИСО 5348-2009: Чинний від 2011-01-01. М.: Стандартиформ, 2008. 12 с. (Національний стандарт України).
18. Вибрация машин с возвратно-поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерения (ISO 2954-75 IDT): ГОСТ ИСО 2954-97. – Чинний від 1998-01-08. М.: Изд.-во стандартов, 1998. 10 с. (Міждержавний стандарт).
19. Волков Л.К., Ковалёв Р.Н., Никифорова Г.И. и др. Вибрация и шум электрических машин малой мощности. Л.: Энергия, 1979. 205с.
20. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Вибродиагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
21. Герцик С.М. Формування навчаючих сукупностей для систем діагностування електроенергетичного обладнання з урахуванням режимів його роботи. – *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 52. С. 54-61.
22. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Р.М. Сисак *Автономні діагностичні комплекси моніторингу стану вітроелектричних агрегатів*. Праці XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювальна енергетика XXI століття». м. Київ, 27 – 29 вересня 2017 р. С. 574-579.
23. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М. Алгоритми функціонування та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування обладнання об'єктів електроенергетики - *Технічна електродинаміка*. 2016. №4. С. 86-88.
24. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М. Особливості використання автономних вимірювальних перетворювачів для

- діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 116-120.
25. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М. *Принципи побудови систем моніторингу вітроелектричних агрегатів з автономними вимірювальними перетворювачами*. Праці XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювальна енергетика XXI століття». м. Київ, 26 – 28 вересня 2018 р. С. 430-433.
 26. Герцик С.М., Городжа А.Д., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М., Трощинський Б.О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їх використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. №2. С. 86-94.
 27. Герцик С.М. *Математичні моделі діагностичних сигналів, що характеризують технічний стан електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи*. Праці XI Міжнародної науково технічної конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки», Київ, 13-14 квітня 2017 року, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського. С. 97-99
 28. Герцик С.М., Мислович М.В. Моделі формування навчаючих сукупностей для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Метрологія та прилади*, №5-1(67), 2017. С. 94-97.
 29. Герцик С.М., Мислович М.В. *Особливості побудови систем технічної діагностики електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи*. Збірка тез XXII Міжнародної конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики». м. Одеса, 10 – 14 вересня 2018. С. 29.
 30. Гижко Ю.І., Мислович М.В. Особливості побудови інформаційно-вимірювальних систем діагностики рухомих частин електротехнічного обладнання. *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України*. № 2 (17). 2007. С. 107–115.
 31. Гижко Ю.І., Мислович М.В. Елементи теорії та питання практичного застосування систем вібродіагностування рухомих вузлів електричних машин. *Технічна електродинаміка*. №2. 2015. С. 45 – 56.
 32. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1965. 400 с.

33. Гнеденко Б.В., Колмогоров А.Н. Предельные теоремы для сумм независимых величин. М.: Гостехиздат, 1949. 175 с.
34. Горбунов А.А., Диментберг М.Ф. Некоторые задачи диагностики для колебательной системы с периодическим параметрическим возбуждением. *Механика твёрдого тела*. 1974. №2. С. 49 – 52.
35. Гриневич Ф.Б., Таранов С.Г., Марченко Б.Г., Мислович М.В. Перспективи розвитку приладобудування, інформаційно-вимірювальних систем та метрологічного забезпечення для електроенергетики України. *Техн. електродинаміка*. 2000. №6. С. 3 – 12.
36. Гуляев В.А. Вычислительная диагностика. Киев: Наук. думка, 1992. 232 с.
37. Дайер В., Стюарт Р. Обнаружение повреждения подшипника качения путём статистического анализа вибраций. *Труды американского общества инженеров – механиков*. Серия «Конструирование и технология машиностроения». 1978, т. 100, №2. С. 23 – 31.
38. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. 316 с.
39. Дуб Д. Вероятностные процессы / пер. с англ. А.М. Яглома. М.: Иностранная литература, 1956. 605 с.
40. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надёжность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.
41. Зварич В.Н. Приборы и системы вибродиагностики электроэнергетического оборудования. *Технічна електродинаміка*. 2001. № 2. С. 67 – 70.
42. Зварич В.Н. Системы вибродиагностики и программное обеспечение диагностирования электроэнергетического оборудования *Технічна електродинаміка*. 2002. № 6. С. 66 – 70.
43. Зварич В.Н., Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Стохастически периодические процессы как модели информационных сигналов. *Известия Вузов “Радиоэлектроника”*. 1995. т. 38. № 1. С. 46 – 51.
44. Каталог приборов для анализа звука, вибраций и обработки данных. Нэрум: Дания, фирма «Брюль и Кьер», 1989 – 1990 гг.
45. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966. 392 с.

46. Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів (ГОСТ 14209 – 97, ІЕС 354 – 91). З поправкою. Чинний від 1999-01-01. 102 с. (Національний стандарт України).
47. Коварский Е.М., Малыгин В.М., Горбунов А.Г. Ударно-импульсный метод диагностики начального разрушения подшипников качения. *Электротехника*. 1981. № 1. С. 57 – 59.
48. Колмогоров А. Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 535 с.
49. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення. ДСТУ 2865-94. Чинний від 1996-01-01. 85 с. (Національний стандарт України).
50. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Высшая школа, 1974. 563 с.
51. Кузьмин В.В., Лившиц А.Л., Шпатенко Т.В., Шпатенко В.С. Электромеханические процессы в шихтованных магнитопроводах крупных электрических машин – новый подход к описанию явлений и разработке мероприятий по предотвращению появления дефектов. *Гідроенергетика України*. 2010. №4. С. 27 – 31.
52. Куйбышев А.Б. Надёжность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения. М: Изд-во стандартов, 1972. 104 с.
53. Лукач Е. Характеристические функции. М.: Наука, 1979. 424 с.
54. Любарский Ю.Я., Надточий В.М., Ординян Н.А., Митрофанов Д.Е. Информационная экспертная система для обслуживающего персонала ГЭС. *Электричество*, 1991. №3. С. 64 – 66.
55. Малярченко А.П. Обоснование линейной модели сигнала для акустико-эмиссионной диагностической системы. *Техн. электродинамика*. 1992. №5. С. 11 – 17.
56. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
57. Марченко Б.Г. Лінійні періодичні процеси. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ, 1999. С. 172-185.
58. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. К: Наук. Думка, 1973. 192 с.
59. Марченко В.Б. Ортогональные функции дискретного аргумента и их приложение

- в геофизике. К.: Наук. думка, 1992. 211 с.
60. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Белые шумы в колебательных системах АН УССР, Ин-т электродинамики №599. К.: 1989. 42 с.
61. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. К.: Наук. думка, 1992. 195 с.
62. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Некоторые особенности построения решающих правил при проведении вибродиагностики подшипников качения электрических машин. *Физико-технические проблемы надёжности электрических машин*. Киев: Наук. думка, 1986. С. 19 – 26.
63. Марченко Б.Г., Мыслович М.В., Целина В.Н. Ударная диагностика шихтованных магнитопроводов. К.: Ин-т электродинамики АН Украины, 1993. 40 с.
64. Марченко Б.Г., Щербак Л.Н. Линейные случайные процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1975. 143 с.
65. Математическая энциклопедия. Гл. ред. И.М. Виноградов. М.: Советская Энциклопедия. Т.4, Ок – Сло. 1984. 1216 с.
66. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. ГОСТ Р52766-2007 (МЭК 60034-1-2004). Дата введения. Чинний від 2008-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. 74 с. (Національний стандарт України).
67. Меженный Ю.Я. Вопросы технической диагностики щётчного аппарата турбогенератора. Киев, 1989. 54 с.
68. Мыслович М.В., Приймак Н.В., Щербак Л.Н. Периодически коррелированные случайные процессы в задачах обработки акустической информации. Киев: Общество “Знание” УССР, 1980. 26 с.
69. Мыслович М.В., Сисак Р.М. Інформаційно-вимірювальні системи статистичної діагностики електроенергетичного обладнання на основі використання системи кривих Пірсона. *Техн. електродинаміка*. 2002. Тем. вип.: Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 1. С. 109–112.
70. Мыслович М.В., Сисак Р.М. Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об’єктів. *Техн. електродинаміка*. 2015. №1. С. 78–85.
71. Мыслович М.В., Сысак Р.М. Методы и системы статистической диагностики. – *Гидроэнергетика Украины*. 2005. №1. С. 12 – 20.

72. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
73. Надточий В.М. Экспертные системы диагностики электрооборудования. *Электричество*, 1991. №8. С. 9 – 16.
74. Надточий В.М. Экспертные системы диагностики становятся реальностью. *Энергохозяйство за рубежом*, 1992. №5.–С. 13 – 20.
75. Надёжность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет: В.С.Авдусевский (пред) и др. М.: Машиностроение, 1987. Т. 9 Техническая диагностика / Под ред. В.В.Клюева, П.П.Пархоменко. 352 с.
76. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. К.: Наукова думка, 2009. 327 с.
77. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений: ГОСТ 8.009-84. – Чинний від 1986-01-01. М.: Изд.-во «Стандартинформ», 2006. 40 с. (Міждержавний стандарт).
78. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев: Вища школа, 1976. 432 с.
79. Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭЦ путем модернизации, реконструкции и усовершенствования режимов их эксплуатации / Мацевитый Ю.М., В.Г. Шульженко, В.Н. Голощапов и др.]; под ред. Ю.М. Мацевитого. Киев.: Наукова думка, 2008. 366 с.
80. Полиметрические системы: теория и практика: Монография / Ю.Д.Жуков, Б.Н.Гордеев, А.В.Зивенко, А.Ю.Грешнов, О.А.Зими́на, В.Н.Чегринец, Е.О.Прищепов. Под ред. Ю.Д.Жукова. – Николаев: Атолл, 2012. 382 с.
81. Рагульскис К.М., Юркаускас А.М. Вибрации подшипников / Под ред. К.М.Рагульскиса. Л.: Машиностроение, 1985. – 119 с.
82. Розроблення дослідного зразка багаторівневої системи технічної діагностики електротехнічного обладнання теплоелектростанцій. Звіт про наукову роботу за договором від 05.02.2018 р. №Об 4.5.1–18/1254-18. Київ: Ін-т електро-динаміки НАН України. Держ. реєстрація №0116U006590. 2018. 61 с.
83. Розроблення методів та засобів вібродіагностики потужних електричних машин ТЕС та ТЕЦ з урахуванням міжнародних стандартів Київ.: Ін-т електродинаміки НАН України. Заключний звіт з наукового проекту Об4.8, програми

- «Об'єднання». Держреєстрація № 0110U003667. 2012. 140 с.
84. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1977. 192 с.
 85. Слуцкий Е.Е. Избранные труды. Теория вероятностей. Мат статистика. М. : Изд-во АН СССР, 1970. 292 с.
 86. Тейлор Я.И. Идентификация дефектов подшипников с помощью спектрального анализа Труды американского общества инженеров-механиков. Серия «Конструирование и технология машиностроения». 1980, т. 102, №2. С. 1 – 8.
 87. Технические средства диагностирования: Справочник / Под общ. ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
 88. Типовая инструкция ремонта и модернизации активной стали с использованием современных методов диагностики и контроля технического состояния статоров турбогенераторов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 18 с.
 89. Титко О.І. Підвищення надійності та ефективності електричних машин у динамічних режимах генеруючих енергоблоків *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. К.: ІЕД НАНУ, 2009. Вип 23. С. 83-90.
 90. Титко О.І., Ахременко В.Л., Гуторова М.С. Підвищення енергоефективності електродвигунів власних потреб електростанцій при роботі в маневрених режимах. *Енергетика і електрифікація*. 2009. С. 1 – 8.
 91. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. Ростов: Изд – во Рост. ун-та 1986. 160 с.
 92. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир. 1978. 411 с.
 93. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
 94. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отделение, 1989. 312 с.
 95. Шеберстов А.И. Состояние тепловых электростанций Украины, перспективы их обновления и модернизации. *Енергетика і електрифікація*, 2004. № 12. С. 1–6.
 96. Шидловский А.К., Мацевитий Ю.М. Проблемы электроэнергетики України *Техн. електродинаміка*. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». 2006. Ч.1. С. 3–7.

97. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
98. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Зайцев Б.Ф. Задачи термо-прочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов, Харьков: ХНАДУ, 2011. 444 с.
99. Явленский К.Н., Явленский Ф.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение, 1983. 239 с.
100. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань.— Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2013. 804 с.
101. Ясинский Ю.А., Ходин Н.Е., Шапкин И.А. Диагностика технического состояния сердечника электродвигателя. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2007. №3-4. С. 64 – 67.
102. Antony J., Guillet F., Badooni M., Bonvardot M. Blind Separation of Convolved Cyclostationary Process. *Signal Processing*. 2005. Vol.85. P. 51 – 66.
103. Antoni J., Randall R.B. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part I – evaluation of adaptive algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. Vol.18. P. 89– 101.
104. Antoni J., Randall R.B. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part II – a novel frequency-domain algorithm evaluation of adaptive algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. Vol.18. P. 103 – 117.
105. Immovilli F., Cocconcelli M. Experimental Investigation of Shaft Radial Load Effect on Bearing Fault Signatures Detection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, No.3. May/June 2017 P. 2721-2729.
106. Krasilnikov A.I., Marchenko B.G., Myslovich M.V. A Mathematical Model of Linear Random Processes in Substantiation of Diagnostic Criteria in Vibratory Diagnostics of Rolling-Contact Bearing. *Vibration Engineering. Hemisphere Publishing Corporation*. 1989. Vol. 3. P. 205 – 211.
107. Lugannani R., Thomas J.B. On a Class of Stochastic Processes which are Closed under Linear Transformations. *Information and Control*. 1967. Vol.10. P. 1 – 21.
108. McCormick A.C., Nandi A.K. Cyclostationarity in Rotation Machine Vibrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1998. Vol.12. № 2. P. 225–242.

109. McInerny S.A., Dai Y. Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection *IEEE Transactions on Education*. 2003. Vol. 46, No.1. P. 149-156.
110. Pearson K. Mathematical Contribution to the Theory of Evolution. XIX. Second Supplement to a Skew Variation. Phil. Trans. of the Royal Soc. of London., Ser A. – 1916. Vol. 216. P. 429 – 457.
111. Tagnait J.K. Stochastic system identification with noisy input using cumulant statistics. *IEEE Trans. Automatic Control*. 1992. Vol.37. P. 476 – 485.
112. Myslovych M., Sysak R. Design peculiarities of multi-level systems for technical diagnostics of electrical machines. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 47 – 50.
113. Zvaritch V., Martchenko B., Mislovitch M. The Models of Random Periodic Information Signals on the White Noise Bases. *Applied Mathematics Letters*. 1995. vol. 8. № 3. P. 87 –89.
114. Zvaritch V., Martchenko B., Mislovitch M. White Noise in Information Signal Models. *Applied Mathematics Letters*. 1994. vol. 7. № 3. P. 93 – 95.
115. Yang H., Ma L., Mathew J. Fault diagnosis of rolling element bearings using basis pursuit. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2005. Vol. 19. P. 341 – 356.

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ*Список публікацій здобувача*

1. С.М. Герцик, Ю.І. Гижко, М.В. Мислович, Л.Б. Остапчук, Р.М. Сисак. Алгоритми функціонування та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування обладнання об'єктів електроенергетики. *Технічна електродинаміка*. 2016. №4. С. 86-88. (Особистий внесок – розроблено, відлагоджено та експериментально перевірено алгоритм і відповідну програму опитування вимірювальних сенсорів, що встановлені на окремих вузлах ЕО електростанцій)
2. Герцик С.М. Моделі формування навчаючих сукупностей для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Метрологія та прилади*. №5-1(67). 2017. С. 94-97. (Особистий внесок – обґрунтовано матричну форму представлення просторів діагностичних ознак, що, водночас, враховує як можливі дефекти, так і режими роботи ЕО)
3. Герцик С.М., Городжа А.Д., Мислович М.В., Подольцев О.Д., Сисак Р.М., Трощинський Б.О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їх використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. №2. С. 86-94. (Особистий внесок – досліджено багаторезонансні моделі вібраційних діагностичних сигналів, що виникають в результаті ударного збудження у шихтованому магнітопроводі та у корпусі високовольтних електровимикачів)
4. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М., Мислович М.В., Остапчук Л.Б., Сисак Р.М.. Особливості використання автономних вимірювальних перетворювачів для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 116-120. (Особистий внесок – проведено експерименти з вимірювання та дослідження вібраційних сигналів на шихтованому магнітопроводі при різних режимах електричного навантаження його обмотки та ступенях механічного пресування пакету пластин заліза)
5. Герцик С.М. Формування навчаючих сукупностей для систем діагностування електроенергетичного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 52. С. 54-61.

Продовж. дод. А

Апробація результатів дисертації

1. Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (Київ, 13-14 квітня 2017 року, форма участі – публікація тез)
2. Міжнародна науково-практична конференція "Відновлювана енергетика XXI століття" (Київ, 27 – 29 вересня 2017 р. та 26 – 28 вересня 2018 р., форма участі – публікація тез)
3. Міжнародна конференція «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» (Одеса, 10–14 вересня 2018 р., форма участі – публікація тез)
4. Міжнародній конференції «Моделювання-2018» («Simulation-2018») (Київ, 12 – 14 вересня 2018 р. , форма участі – публікація тез)

Додаток Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер ТОВ
«СВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ»

 В.С. Ключенко

2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електро-
динаміки НАН України,
академік НАН України

 О.В. Кириленко

2018 р.

АКТ

використання експериментального зразку багаторівневої інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) діагностики електротехнічного обладнання (ЕО) електростанцій для визначення вібраційних характеристик ЕО, що експлуатується на енергопідприємстві ТОВ «СВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ»

Нами, Двойних В.П., начальником електроцеху ТОВ «СВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ», Старіковим С.О., мастером електроцеху ТОВ «СВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ», Мисловичем М.В., зав. відділом №12 ІЕД НАН України, Зваричем В.М., пров. н.с. відділу №12 ІЕД НАНУ, Гижком Ю.І., с.н.с. відділу №12 ІЕД НАНУ, Герциком С.М., аспірантом відділу №12 ІЕД НАНУ, складено даний акт в тому, що на об'єктах енергопідприємства ТОВ «СВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» було випробувано вібродіагностичний модуль багаторівневої ІВС діагностики, створений співробітниками ІЕД НАНУ, і отримано наступні результати:

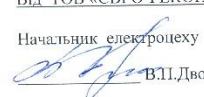
- Розроблений зразок багаторівневої ІВС діагностики ЕО повністю підтвердив свою працездатність та корисність для вирішення задач моніторингу, контролю і діагностики електротехнічного обладнання енергопідприємств.

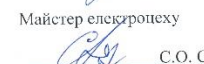
- За допомогою вібраційного модуля багаторівневої ІВС діагностики було здійснено вимірювання та обробку вібраційних інформаційних сигналів, що реєструвались на підшипникових вузлах та обертовому валу електродвигуна типу DKRA1 – 4519–4V (вир. Німеччина), з параметрами $P = 710 \text{ кВт}$; $U = 3000 \text{ В}$; $I = 156 \text{ А}$; $n = 1490 \text{ об/хв}$.

- За результатами статистичної обробки вібраційних інформаційних сигналів були встановлені спектрально-кореляційні характеристики та ймовірнісні закони їх розподілу. Отримані характеристики дозволили встановити основні діагностичні ознаки, що надають можливість визначати технічний стан вузлів ЕО, що діагностуються.

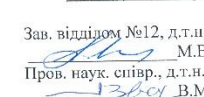
Розроблений вібраційний модуль інтегровано в загальну багаторівневу систему діагностики ЕО. Використання розширеної структури багаторівневої ІВС дозволяє підвищити ступінь експлуатаційної надійності ЕО за рахунок підвищення точності і вірогідності діагностики окремих вузлів ЕО.

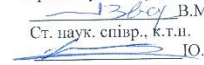
Від ТОВ «СВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ»:

Начальник електроцеху
 В.П. Двойних

Майстер електроцеху
 С.О. Старіков.

Від ІЕД НАН України:

Зав. відділом №12, д.т.н., професор
 М.В. Мислович
Пров. наук, співр., д.т.н.

 В.М. Зварич
Ст. наук, співр., к.т.н.
Ю.І. Гижко
Аспірант
 С.М. Герцик

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електро-
динаміки НАН України,
академік НАН України

 О.В. Кириленко

2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Президент Групи
компаній «Аміко»
д.т.н., професор

 Ю.Д. Жуков

2018 р.

АКТ

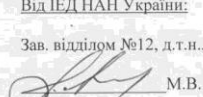
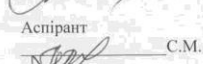
впровадження результатів дисертаційної роботи Герцика Сергія Миколайовича
«Комп'ютеризована система діагностики вузлів електротехнічного обладнання з
урахуванням режимів його роботи»

Нами, Гордєєвим Б.М., головним конструктором Групи компаній «Аміко»,
Мисловичем М.В., зав. відділом №12 ІЕД НАН України, Герциком С.М., аспірантом ІЕД
НАН України, складено даний акт в тому, що в Групі компаній «Аміко» впроваджено
наступні результати дисертаційної роботи Герцика С.М.:

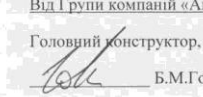
- Математичні моделі діагностичних сигналів, що супроводжують роботу окремих вузлів електротехнічного обладнання при різних режимах його роботи. Побудовані моделі надали можливість обґрунтувати низку діагностичних ознак, які визначають технічний стан досліджуваних вузлів електротехнічного обладнання.
- Алгоритми та програмне забезпечення, що реалізують методи спектрально-кореляційного та гістограмного аналізів для одержання кількісних оцінок діагностичних ознак стану електротехнічного обладнання, яке працює у різних режимах.
- Алгоритми та програмне забезпечення, які здійснюють перевірку статистичних гіпотез відносно діагностики і класифікації дефектів в обладнанні, що діагностувалося і працює у різних режимах експлуатації.
- Базуючись на моделях та алгоритмах, розроблених у вказаній дисертаційній роботі, був створений модуль управління банком даних до складу яких входять навчаючі сукупності, що враховують можливі види дефектів та режими роботи певних вузлів електротехнічного обладнання. Розроблений модуль інтегровано в загальну систему діагностики електротехнічного обладнання.

Використання розроблених алгоритмів, методів та програмного забезпечення дозволило розширити можливості існуючих систем діагностики та контролю електротехнічних об'єктів, підвищити їх ступінь надійності та точність і вірогідність діагностики їх елементів.

Від ІЕД НАН України:

Зав. відділом №12, д.т.н., професор
 М.В. Мислович
Аспірант
 С.М. Герцик

Від Групи компаній «Аміко»:

Головний конструктор, д.т.н.
 Б.М. Гордєєв

Додаток В

БЛОК-СХЕМА ПРОГРАМИ ПОБУДОВИ РОЗВ'ЯЗУЮЧИХ ПРАВИЛ

