

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Теплоенергетичний факультет
Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____/ **Володимир ВОЛОЩУК**/
“ ” _____ 2022 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою
**“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
кібер-енергетичних систем”**
зі спеціальності
**151“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані
технології”**

на тему: Моделювання системи предиктивного обслуговування турбіни

Виконав: студент ІІ курсу, групи ТА-01мн
Темчур Владислав Сергійович
(прізвище ім’я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник ст. викладач Поліщук Ігор
Анатолійович
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Керівник відділу механізації та автоматизації
технологічних процесів, ТОВ «ENERTECH»,
Богдан Д.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”

Факультет Теплоенергетичний
Кафедра Автоматизації теплоенергетичних процесів
Рівень вищої освіти – другий(магістерський)

Спеціальність 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

Освітньо-професійна програма (“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем”)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

(підпис) /ВОЛОДИМИР ВОЛОЩУК/
(імя, ПРИЗВИЩЕ)
“ “ _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Темчуру Владиславу Сергійовичу

(прізвище, імя, по-батькові)

1. Тема дисертації Моделювання системи предиктивного обслуговування турбіни

науковий керівник дисертації ст. викладач, Поліщук Ігор Анатолійович

(прізвище, імя, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» березня 2022 р. № 788-с

2. Термін подання студентом дисертації «10» червня 2022 р.

3. Об’єкт дослідження Вібродіагностика та предиктивний аналіз несправностей турбоагрегату

4. Предмет дослідження

Система вібродіагностики та предиктивного обслуговування парової турбіни

T-100/120-130

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

Огляд літературних джерел

Огляд існуючих АСК турбіни T-100

Розробка системи вібродіагностики турбіни

Розробка системи предиктивного обслуговування з використанням машинного навчання

6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтований перелік публікацій

1. Темчур В.С., Поліщук І.А. «Предиктивне обслуговування обладнання на основі аналізу вібрації» // Матеріали ХХ Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 26–29 квіт. 2022 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во «Політехніка», 2022. – Т. 2.

2. Темчур В.С., Поліщук І.А. «Застосування методів машинного навчання для предиктивного обслуговування турбоагрегату» // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72), №4, 2022.

8. Дата видачі завдання " 28 " вересня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	<i>Видача завдання</i>	28.09.2020	
2	<i>Огляд проблематики обслуговування турбоагрегатів</i>	01.01.2021	
3	<i>Огляд основних методів прогнозування</i>	01.03.2021	
4	<i>Огляд та вивчення основ вібродіагностики</i>	01.06.2021	
5	<i>Огляд методів машинного навчання для прогнозування несправностей обладнання</i>	01.07.2021	
6	<i>Огляд існуючих АСК турбіни Т-100</i>	01.09.2021	
7	<i>Розробка системи вібродіагностики</i>	01.01.2022	
8	<i>Розробка системи прогнозування з використанням машинного навчання</i>	01.04.2022	
9	<i>Обробка отриманих результатів</i>	20.04.2022	
10	<i>Стартап-проект</i>	20.05.2022	
11	<i>Підпис керівника магістерської дисертації</i>	10.06.2022	
12	<i>Попередній захист магістерської дисертації</i>	14.06.2022	
13	<i>Захист</i>	17.06.2022	

Студент

(підпис)

(імя, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(імя, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел (29 найменувань). Робота містить 32 таблиці, 77 рисунків та формули. Повний обсяг магістерської дисертації складає 109 сторінок.

Об'єкт дослідження – вібродіагностика та предиктивний аналіз несправностей турбоагрегату.

Предмет дослідження – система вібродіагностики та предиктивного обслуговування парової турбіни Т-100/120-130.

Мета дослідження – розробка системи предиктивного обслуговування турбоагрегату.

Основні задачі:

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробка системи контролю та моніторингу вібрації;
- розробка моделі вібродіагностики;
- розробка моделі прогнозування стану обладнання з використанням методів машинного навчання.

Актуальність

На сьогоднішній день, затрати на обслуговування обладнання, а також затрати підприємства в зв'язку з простоем обладнання обчислюються неймовірними сумами. Впровадження систем предиктивного обслуговування дозволяє мінімізувати час простою обладнання шляхом прогнозування виникнення дефектів. За рахунок цього можна заздалегідь планувати ремонтні та профілактичні роботи, значно скоротити час їх проведення, а також оптимізувати процес закупівлі, транспортування та зберігання запасних комплектуючих.

Методи дослідження: методи математичного і комп'ютерного моделювання динамічних процесів, методи вібродіагностики, методи предиктивного обслуговування, методи машинного навчання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у виборі ефективних засобів обрахунку вібропараметрів та використання методів машинного навчання для прогнозування стану обладнання.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено та реалізовано програмний продукт системи вібродіагностики.
2. Розроблено та реалізовано програмний продукт системи предиктивного обслуговування турбоагрегату.

Апробації результатів дослідження

Результат дослідження впроваджується на контролерах Siemens Simatic S7-400 при автоматизації системи вібродіагностики та предиктивного обслуговування парової турбіни Т-100/120-130, підприємством ТОВ «ENERTECH». Додається відповідний акт про впровадження.

Публікації

1. Темчур В.С., Поліщук І.А. «Вимоги до обладнання автоматизації, яке працює у вибухонебезпечних умовах»// Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів 2020 року. У 2 т. – К. : 7 КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – Т. 2. – С. 59.
2. Темчур В.С., Поліщук І.А. «Оптимізація економічності згоряння палива парового котла за допомогою машинного навчання»// Матеріали XIX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 20–23 квіт. 2021 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – Т. 2. – С. 40-41.
3. Темчур В.С., Поліщук І.А. «Предиктивне обслуговування обладнання на основі аналізу вібрації» // Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 26–29 квіт. 2022 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – Т. 2.
4. Темчур В.С., Поліщук І.А. «Застосування методів машинного навчання для предиктивного обслуговування турбоагрегату» // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72), №4, 2022.

ABSTRACT

The master's dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of sources used (29 titles). The work contains 32 tables, 77 figures and formulas. The full volume of the master's dissertation is 109 pages.

The object of research is vibration diagnostics and predictive analysis of turbine unit malfunctions.

The subject of research is the system of vibration diagnostics and predictive maintenance of the steam turbine T-100 / 120-130.

The purpose of research is to develop a system of predictive maintenance of the turbine unit.

Main tasks:

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

- development of vibration control and monitoring system;
- development of vibration diagnostics model;
- development of a model for forecasting the state of equipment using machine learning methods.

Actuality

To date, the cost of maintaining the equipment, as well as the cost of the enterprise due to equipment downtime is calculated in incredible amounts. The introduction of predictive service systems can minimize equipment downtime by predicting the occurrence of defects. Due to this, it is possible to plan repair and maintenance work in advance, significantly reduce the time of their implementation, as well as optimize the process of purchasing, transporting and storing spare parts.

Research methods: methods of mathematical and computer modeling of dynamic processes, methods of vibrodiagnostics, methods of predictive maintenance, methods of machine learning.

The scientific novelty of the obtained results is the choice of effective means of calculating vibration parameters and the use of machine learning methods to predict the state of equipment.

The practical significance of the results obtained

1. Developed and implemented a software product for vibration diagnostics.
2. Developed and implemented a software product for predictive maintenance of the turbine unit.

Approbation of research results

The result of the study is implemented on the Siemens Simatic S7-400 controllers in the automation of the vibration diagnostics system and predictive maintenance of the steam turbine T-100 / 120-130, at the enterprise "ENERTEX". The corresponding act of implementation is attached.

Publications

1. Temchur, Polishchuk "Requirements for automation equipment operating in explosive atmospheres" // Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 2020. In 2 volumes - K.: 7 KPI. Igor Sikorsky, 2020. - Vol. 2. - P. 59.

2. Temchur VS, Polishchuk IA "Optimization of fuel economy of steam boiler with the help of machine learning" // Materials of the XIX International. scientific-practical conf. young. Scientists and Students, Kyiv, April 20-23. 2021 - Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, Polytechnic Publishing House, 2021. - Vol. 2. - P. 40-41.

3. Temchur VS, Polishchuk IA "Predictive maintenance of equipment based on vibration analysis" // Materials of the XX International. scientific-practical conf. young. Scientists and Students, Kyiv, April 26-29. 2022 - Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, Polytechnic Publishing House, 2022. - Vol. 2.

4. Temchur VS, Polishchuk IA "Application of machine learning methods for predictive maintenance of the turbine unit" // Scientific notes of Tavriya National University. VI Vernadsky. Series: Technical Sciences. Volume 33 (72), №4, 2022.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ОПИС ОБ’ЄКТА УПРАВЛІННЯ	11
1.1. Проблематика обслуговування парових турбін.....	11
1.1.1. Методи прогнозування	13
1.1.2. Статистичне прогнозування несправностей	13
1.1.3. Інструментальне прогнозування несправностей	15
1.1.4. Прогнозування на основі минулого досвіду	18
1.1.5. Прогнозування відмов обладнання в умовах малої кількості поломок ..	21
1.1.6. Вібродіагностика.....	22
1.1.7. Види вібрацій.....	28
1.1.7.1.Періодична вібрація	28
1.1.7.2.Гармонічна вібрація	28
1.1.7.3.Полігармонічна вібрація.....	30
1.2. Турбіна Т-100/120-130.....	31
1.3. Методи машинного навчання для прогнозування несправностей.....	34
1.3.1. Метод опорних векторів(Support Vector Machine – SVM).....	34
1.3.2. Штучна нейронна мережа (ШНМ)	35
1.3.3. Нечітка нейронна мережа.....	36
1.3.4. Деревя рішень	37
1.3.5. Байєсівська мережа довіри.....	39
РОЗДІЛ 2. ОПИС АСК ТУРБИНИ Т-100.....	42
2.1. Опис функцій системи автоматизації	42
2.1.1. Функції нижнього рівня АСУ	43
2.1.2. Функції, верхнього рівня АСУ	45
2.2. Огляд і аналіз контурів регулювання.....	45
2.3. Функціональна структура системи управління об’єктом	48
2.3.1. Послідовність проведення вимірів.....	49

2.4. Технічне забезпечення системи управління.....	50
РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД І АНАЛІЗ СИСТЕМ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	53
3.1 Розробка системи предиктивного обслуговування об'єкта управління .	53
3.1.1 Особливості конструкції та статичне моделювання	53
3.1.2 Моделювання системи моніторингу та аналізу вібрації.....	65
3.1.2.1 Аналіз вібрації в часовій області.....	67
3.1.2.2 Аналіз вібрації в частотній області	68
3.1.3 Частотно-часовий аналіз вібрації в умовах промислового шуму	69
3.1.4 Розробка системи предиктивного обслуговування турбін	81
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ.....	85
4.1. Імітаційне моделювання системи предиктивного обслуговування.....	85
РОЗДІЛ 5. СТАРТАП-ПРОЄКТ	93
5.1. Опис ідеї проєкту	93
5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту.....	94
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	95
5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту	100
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	102
ВИСНОВКИ.....	104
Список використаних джерел	107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЗ – програмне забезпечення;

ЦВТ – циліндр високого тиску;

ЦСТ – циліндр середнього тиску;

ЦНТ – циліндр низького тиску;

ПМГ – підігрівач мережної води горизонтальний;

ПВТ – підігрівач високого тиску;

ПНТ – підігрівач низького тиску;

СКЗ – середньоквадратичне значення;

ТОУ – технологічний об'єкт управління;

ВСТУП

Помилкові рішення про припинення експлуатації промислового обладнання або, навпаки, про необґрунтоване продовження його ресурсу тягнуть за собою величезні фінансові втрати. Також, непередбачені поломки обладнання можуть потягнути за собою «застій» обладнання, що в свою чергу призведе до зменшення виробництва критично важливого кінцевого продукту. Наявність таких проблем робить завдання оцінки стану обладнання та прогнозування його відмов надзвичайно актуальним для забезпечення планування його завантаження та ремонтів, безпечної експлуатації. Таким чином якісне обслуговування промислового обладнання зможе забезпечити високу надійність, безпеку та економічну ефективність експлуатації.

Основний спосіб підвищення експлуатаційної надійності, полягає у тому, щоб саме прогнозувати несправності пристроїв, передбачити можливість виходу обладнання з ладу, що дозволить виявити несправності для їх подальшого усунення. Як результат, мінімізується можливість прояву несправностей та відмов обладнання.

Дана робота присвячена дослідженню методів предиктивного обслуговування турбоагрегату. Вихід з ладу турбіни призводить до зупинки всієї системи, що в свою чергу, завдає величезних збитків. Для підтримання працездатності турбіни необхідно регулярно проводити планові ремонтні роботи. Кожен плановий ремонт займає доволі багато часу, оскільки проводиться огляд та аналіз всього агрегату, всіх його компонентів. Цей час можна значно зменшити якщо виконувати цілеспрямований огляд окремих компонентів, для яких була спрогнозована несправність.

На сьогоднішній день один з найефективніших методів діагностики несправностей - метод вібродіагностики. Використання цього методу дозволяє досить точно спрогнозувати несправності компонентів обладнання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ОПИС ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

1.1. Проблематика обслуговування парових турбін

Елементи турбін функціонують в умовах колосальних навантажень, агресивного середовища та високої температури, що призводить до їх ушкоджень. Парова турбіна та її допоміжне обладнання містять велику кількість вузлів та деталей, які вимагають точного дотримання технології виготовлення, високої точності зборки та монтажу, а також ремонту. Незважаючи на всі заходи контролю, що здійснюються на етапах, що передують введенню в експлуатацію турбоагрегату, можливість виникнення неполадок на початковому етапі експлуатації, на жаль, не виключається. Чітке розуміння процесів, що відбуваються в турбіні, допомагає швидко виявити та усунути ці неполадки, а головне їх причини. Навпаки, відсутність необхідних знань призводить до тимчасового усунення самих неполадок, а не їх причин, у гіршому — до серйозних аварій і руйнування турбіни, і навіть суміжних із нею агрегатів і апаратів. Значна кількість випадків вимушених простоїв обладнання відбувається через неграмотне обслуговування обладнання. У той же час на багатьох електростанціях, де обслуговуючий персонал має достатні знання та можливості, кількість вимушених зупинок з вини обслуговування помітно зменшується.

Основним завданням персоналу, що обслуговує турбоустановку, при нормальній роботі є забезпечення заданої електричної та теплової потужності за повної гарантії надійної роботи та максимально можливої економічності. Нормальна експлуатація турбіни неможлива без ретельного догляду та регулярних перевірок систем захисту та регулювання. Уважний огляд доступних вузлів систем регулювання та захисту, порівняння поточних показань приладів з попередніми, особливе ставлення до всіх «незвичних» відхилень на працюючій турбіні, виконання всіх операцій і перевірок, передбачених інструкціями з експлуатації, дозволяють надійно експлуатувати систему регулювання і, отже,

турбіну. Але до складу турбіни входить величезна кількість елементів, до яких обслуговуючий персонал не має доступу в режимі роботи турбіни. Експлуатація будь-якої деталі машини передбачає вплив на неї великої кількості різних факторів, що викликають зміни в технічному стані, що з часом призводить до відмови. Істотною особливістю цих факторів є їх довільний (стохастичний) характер. До факторів, що мають найбільш істотний вплив на швидкість зміни технічного стану деталі, відносяться: технологічні навантаження, характеристики міцності матеріалу деталі, геометричні розміри та інші. Загалом, існує величезна кількість факторів, які негативно впливають на стан турбоагрегату, проблема полягає в тому, що зробити висновки про наближення поломки або виявити вже існуючий дефект (який на даному етапі не впливає на працездатність) – неможливо без проведення детального аналізу з використання спеціалізованого ПЗ.

Крім того, необхідно мати на увазі ще одну дуже важливу роль обслуговування. Хоча сучасна наука про турбіни досягла досить високого рівня розвитку, вона все ж таки не може відповісти сьогодні повною мірою на всі питання, що висувуються практикою. До таких питань відносяться, наприклад, надійність роботи лопаткового апарату при деяких режимах, поведінка довгих багатопрольотних валопроводів при обертанні на масляній плівці підшипників, міцність деталей турбін та інших елементів в умовах нестационарних теплових режимів. Адекватна оцінка стану обладнання, наявність достатньої кількості інформації про роботу, наявність надійного обладнання для моніторингу, використання якісної системи керування, у сукупності, дозволяють підвищити якість і самих установок, і їх обслуговування.

Основний спосіб підвищити ефективність обслуговування – перехід до предиктивного обслуговування (predictive maintenance). Цей підхід включає в себе велику кількість сучасних інформаційних технологій. Предиктивне обслуговування дозволяє спрогнозувати поломки та несправності обладнання ще на етапі їх зародження, тим самим уникнути ситуацій, коли обладнання повністю виходить з ладу і втрачає свою працездатність.

Існує величезна кількість методів діагностики та прогнозування стану обладнання, які базуються на дослідженні різноманітних параметрів. Діагностика стану обладнання та оцінка ступеня небезпеки пошкодження на основі даних контролю вібрації – один з найбільш ефективних методів підвищення надійності обладнання. Вібраційна діагностика, як і інші методи діагностики, вирішує завдання пошуку несправностей і оцінки технічного стану досліджуваного об'єкту. В даній роботі основну увагу приділено саме аналізу вібрацій турбоагрегату.

1.1.1. Методи прогнозування

Для вирішення задач прогнозування термінів відмов, різними дослідниками було запропоновано безліч моделей, що відрізняються набором вхідних даних, методами їх аналізу, формою подання результатів і тд.

Деякі з поширених моделей:

- метод прогнозування часу відмови деталей з використанням законів розподілу їх ресурсів, одержаних зі статистики ремонтів;
- метод, проведений Гребником В.М. та Цапко В.К., дозволяє використовувати значення напруги, що виникають у деталі, виміряні за допомогою спеціальних приладів, та характеристики деталі для прогнозування ресурсу;
- метод прогнозування відмов на основі даних діагностики з використанням номограм.

Кожен із методів передбачає використання власної процедури прогнозування, що визначається видом та характером вихідної інформації. Кожен із методів виконується в два етапи. На першому етапі визначаються параметри прогнозування, а на другому – здійснюється обробка отриманих даних і на її основі відбувається прогнозування несправностей. Точність кожного методу залежить від параметрів які використовуються при прогнозуванні.

1.1.2. Статистичне прогнозування несправностей

Сутність статистичного прогнозування несправностей полягає у тому, що на підставі статистичних даних про несправності вузлів і деталей пристроїв

будується графік залежності ймовірності справної роботи пристроїв від напрацювання (рис. 1.1). При цьому, щоб перейти до імовірнісних залежностей, статистичні матеріали, що використовуються, повинні відображати закономірності зміни надійності, тобто бути достовірними та масовими. Статистика показує, що для отримання задовільної точності прогнозування достатньою є статистика, одержувана на підставі врахування досвіду експлуатації всього обладнання на підприємстві або суттєвої його частини.

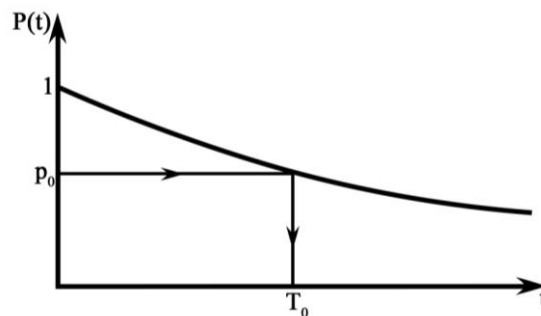


Рисунок 1. 1 Графік ймовірності справної (безвідмовної) роботи

З графіка (рис. 1.1) видно, що кожному значенню напрацювання пристроїв даного типу відповідає певне значення ймовірності справної роботи, тобто надійності. Задаючи прийнятне значення надійності P_0 , ми отримаємо значення напрацювання T_0 , при якому дотримується заданий рівень надійності.

Експлуатація пристроїв у межах встановленого технічного ресурсу забезпечує потрібну експлуатаційну надійність.

Використання статистичних відомостей про несправності для прогнозування технічного ресурсу зовсім не означає, що ми повинні чекати на масові відмови пристроїв. Статистичний характер прогнозування несправностей при визначенні технічного ресурсу не дозволяє врахувати фактичний технічний стан кожного окремого пристрою. Якщо для пристрою А, з умов дотримання необхідної надійності, заданий технічний ресурс $(P_0)A$, будь-який пристрій цього типу після досягнення ним напрацювання T_0 підлягає зняттю з експлуатації незалежно від його реального технічного стану. Імовірностатистичний характер прогнозування забезпечує дотримання заданої надійності лише в середньому, тобто для достатньо великої кількості експлуатованих пристроїв типу А. У той же час деякі пристрої цього типу змогли б справно

працювати значно більше часу, ніж T_0 , а деякі менше. Тому погнозування технічного ресурсу (статичне) має проводитися тільки для тих пристроїв, експлуатаційна надійність яких не може бути забезпечена методами інструментального прогнозування.

1.1.3. Інструментальне прогнозування несправностей

Прямий контроль

Сутність інструментального прогнозування несправностей з використанням прямого контролю, полягає у вимірі параметрів та зняття характеристик, що дозволяють оцінити технічний стан пристрою. Така оцінка, передбачає порівняння з еталонними значеннями, а також обчислення певних показників дозволяє передбачити можливість появи несправностей у період експлуатації до наступної перевірки. При цьому необхідна точність і об'єктивність вихідних даних залежать від правильності вибору контрольної-вимірювальної апаратури та методики виконання контролю.

Термін "прямий контроль" означає, що перевірка проводиться або на непрацюючому пристрої, або на пристрої, що працює в номінальному режимі, а створення штучних режимів, відмінних від робочих, не виконується. При перевірці непрацюючих пристроїв зазвичай контролюють параметри електричних ланцюгів, переміщення рухомих частин, люфти та інші. У робочих режимах зазвичай перевіряють тиски, витрати, моменти, потужності, температури, швидкості та точності відпрацювань.

Висока ефективність інструментального прогнозування залежить від правильності вибору контрольованих параметрів. До таких параметрів пред'являються особливі вимоги: їх зміни повинні вказувати на наближення несправностей ще до того, як буде відзначено порушення працездатності. Нерідко з метою прогнозування виконується контроль проміжних параметрів або навіть контроль непрямих ознак, які не входять у перелік паспортних даних.

Зазвичай, для виявлення параметрів, які дозволяють успішно прогнозувати появу несправностей, проводяться спеціальні дослідження. Наведемо один характерний приклад. Протягом багатьох років обриви термопар не піддавалися

інструментальному прогнозуванню, оскільки не були відомі параметри, що дозволяють передбачити зниження механічної міцності, що є причиною обриву. В результаті проведених досліджень була виявлена залежність, що зв'язує механічну міцність і електричний опір спаю R (рис. 1.2).

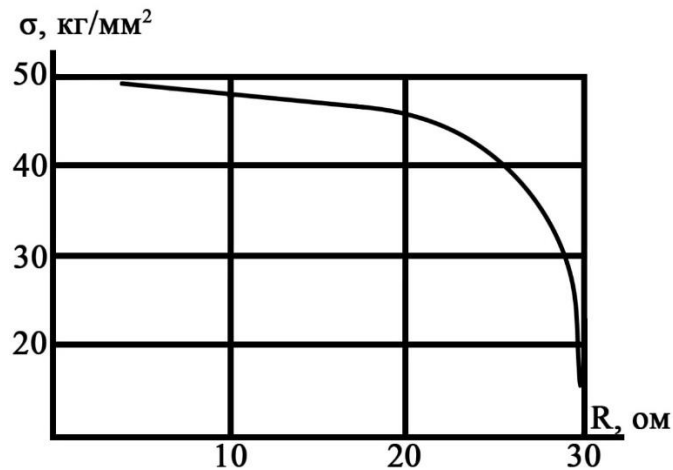


Рисунок 1. 2 Графік залежності механічної міцності термопари (спаю) від електричного опору

Характер виявленої залежності дозволяє передбачити зниження механічної міцності спаю тоді, коли термоелектричні характеристики термопари ще не мають відхилень від норми і працездатність термометра ще не порушена. Отже, можна своєчасно відбракувати термопари, не допускаючи їх відмов у процесі експлуатації.

Іноді для прогнозування необхідно не тільки вимірювання певних параметрів, а й проведення розрахунків з використанням результатів вимірювань. Важливим засобом прискорення робіт з прогнозування є автоматизація контрольних, обчислювальних та інших робіт прогнозування.

Методи інструментального прогнозування із застосуванням прямого контролю можна поділити на дві групи:

- методи дискретного контролю, при яких контролюючі пристрої вводяться в дію в період між застосуваннями обладнання або спеціально перериваючи їх роботу;

- методи безперервного контролю, за яких спеціальна апаратура безперервно контролює параметри пристрою, надаючи сигнал попередження про наближення несправностей.

Апаратура дискретного контролю, як правило, виконується у вигляді спеціальних пультів, блоків, перевірочних установок тощо. Для застосування в процесі експлуатації така апаратура випускається у мініатюрному конструктивному виконанні з використанням напівпровідників, плівкових конструкцій тощо.

Апаратура безперервного контролю є вбудованою, а її елементи розосереджені по вузлах, блоках та деталях контрольованого пристрою.

Для сучасного рівня розвитку засобів інструментального прогнозування характерне прагнення отримувати вхідну інформацію від різних систем та пристроїв обладнання в уніфікованому вигляді для того, щоб переробляти цю інформацію з метою прогнозування в єдиному обчислювальному пристрої (наприклад ПЛК).

Граничний контроль

Граничний контроль являє собою метод інструментального прогнозування несправностей, який передбачає використання спеціальних перевірочних режимів, відмінних від робочих режимів пристроїв, що розглядаються. Мета створення таких режимів полягає в імітації несправності.

Останнім часом ведуться розробки методів граничного контролю не тільки для прогнозування несправностей під час експлуатації, але й для вибору оптимальних режимів, характеристик, робочих точок на характеристиках під час проектування пристроїв та систем.

Очевидно, що ефективне інструментальне прогнозування несправностей (будь-якими методами) дозволяє експлуатувати обладнання відповідно до його реального технічного стану і відмовитися від статистичного прогнозування, недоліки якого були викладені раніше. Тому розробка нових методів інструментального прогнозування та пошук нових параметрів, що дозволяють прогнозувати несправності, є найважливішими завданнями забезпечення високої експлуатаційної надійності промислового обладнання.

1.1.4. Прогнозування на основі минулого досвіду

Комплекс промислових машин, будучи технічною системою, що відновлюється, постійно змінює свій фактичний стан. Переважання процесів зносу над процесами відновлення навіть однієї деталі чи вузла призводить до зупинки всього комплексу. Тому питання оперативного вирішення завдань прогнозування в умовах обмеженого обсягу інформації, неявно, але постійно вирішуються ремонтною службою. І тому використовуються методи інженерного прогнозування.

Для практичних цілей інженерного прогнозування найчастіше застосовується аналітичне прогнозування. При цьому використовуються елементарні функції: лінійні, лінійні з періодичним уточненням кута нахилу прямої; статичні функції, що описують характер чи фізичну картину (швидкість) розвитку несправності. Результат може бути отриманий у вигляді точкового, інтервального значення або у вигляді розподілу ймовірностей (рис. 1.3).

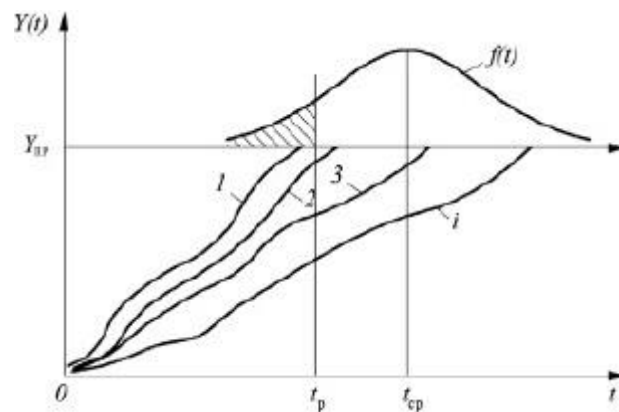


Рисунок 1. 3 Графічна інтерпретація реалізації прогнозованого ресурсу:

$Y_{пр}$ – граничний стан; $f(t)$ - функція розподілу напрацювань; $t_{ср}$ - математичне очікування напрацювання до граничного стану; 1, 2, 3, 4, i - конкретні реалізації $Y(t)$; t_p – час ремонту

Основним принципом прогнозування є використання минулого досвіду. Інформація щодо поведінки машини в минулому є базою для прогнозування зміни стану машини в майбутньому. Передісторія, покладена в основу, має бути за тривалістю не менше часу прогнозу. Прогнозуванню передуює згладжування експериментальних даних.

Для короткострокового прогнозу часто використовують лінійну апроксимацію:

$$y = a_0 + a_1 t \text{ або } y = at.$$

Значення коефіцієнта a визначається за формулою:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i y_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i^2}, \quad (1.1)$$

де y_i – поточне значення параметра, $i = 1, 2, \dots, n$ – число вимірів; τ_i – період виміру.

Якщо відома швидкість розвитку конкретної несправності об'єкта, що характеризується швидкістю зміни значення діагностичного параметра, прогноз здійснюється за формулою:

$$h_{\text{прог}} = S_h t, \quad (1.2)$$

де $h_{\text{прог}}$ – прогнозоване значення; S_h – швидкість зміни діагностичного параметра; t – час прогнозу.

Періодично уточнюється нахил прямої шляхом визначення коефіцієнта a для 3-5 останніх вимірів.

Найчастіше передбачається, що зі збільшення напрацювання t діагностичний параметр k збільшується.

На рис. 1.4 зміну параметра показано кривою 1 в діапазоні напрацювання від 0 до 250 годин. Необхідно здійснити прогноз на майбутні 125 годин роботи (до 375 годин). Граничне значення $k_{\text{пред}} = 80$.

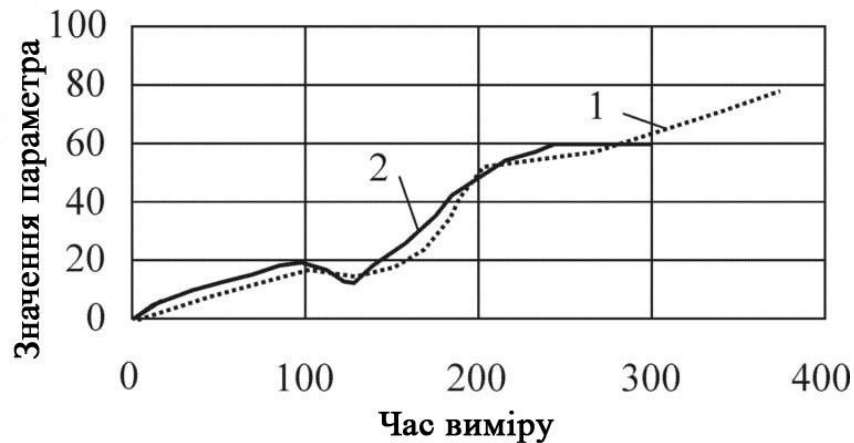


Рисунок 1. 4 Приклад прогнозування діагностичного параметра К:
1-лінія прогнозування, 2-згладжена крива

Для виключення випадкових тенденцій виконується експоненційне згладжування вимірених параметрів за формулою:

$$k_{i\text{сгл}} = ak_i + (1 - a)k_{(i-1)\text{сгл}}, \quad (1.3)$$

де $k_{i\text{сгл}}$ та k_i – відповідно згладжений і не згладжений параметр i -го виміру; a - стала згладжування, прийнята для цілей діагностування 0,4 (з діапазону 0 ... 0,5); $k_{(i-1)\text{сгл}}$ – згладжений параметр попереднього виміру. Короткострокове прогнозування здійснюється за допомогою лінійної апроксимації за передісторією зміни параметра k за останні 100 годин: $y = at$. Значення коефіцієнта визначаються за формулою (1.2).

Процеси зношування працюючого устаткування залежать від якості технічного обслуговування і технологічних навантажень. Ці залежності носять детермінований та стохастичний характер. У процесі експлуатації ці залежності не можуть бути точно визначені. Невизначеним залишається граничне значення діагностичних параметрів для різних видів ушкоджень.

Щодо конкретного механізму потрібне прийняття індивідуальних, а не середньостатистичних рішень. У цьому випадку неприйнятним є метод екстраполяції (визначення майбутніх значень величин, на основі наявних даних про тенденції їх змін у минулі періоди) та метод аналогій (встановлення та використання для прогнозування аналогії з іншими об'єктами за деякими загальними рисами).

1.1.5. Прогнозування відмов обладнання в умовах малої кількості поломок

Сучасне обладнання забезпечене необхідною кількістю датчиків та приладів контролю, що дозволяють відслідковувати велику кількість параметрів його роботи. При прогнозуванні відмов необхідно вибрати найбільш інформативні з них. Для розв'язання цього завдання можна використовувати методи машинного навчання (МН). Прогнозування відмов обладнання на основі методів МН останнім часом стає все більш актуальним завданням, яке вирішується в таких областях, як: машинобудівне виробництво, транспортні системи, промисловість, оскільки застосовувані методи ефективніші порівняно з методами заснованими на нечіткій логіці, статистичних методи тощо. Проте запропоновані підходи до побудови прогнозних моделей орієнтовані на навчання на прецедентах, що у ряді випадків не може бути застосовано на практиці. Наприклад, у ситуаціях, коли поломки відбуваються досить рідко чи немає досить великої статистики. Тому застосування методів МН для підвищення якості прогнозів відмов обладнання з метою зниження аварійності є актуальним.

Процедура МН потребує достатньої кількості даних, що відповідають описуваному режиму роботи, так як збирання даних, відповідних тим або іншим відмовам вимагає спостереження протягом тривалого часу експлуатації, і цих даних може бути критично мало, наприклад, для нового обладнання. Тому навчання здійснюється на даних, які відповідають нормальному режиму функціонування об'єкта дослідження (тобто той час, коли не було поломок та інших аномалій). Тим самим модель вчиться прогнозувати, яким має бути сигнал за нормального режиму роботи. У тому випадку, якщо у певний момент часу фактичне значення сигналу відрізняється від прогнозованого «нормального» значення сигналу, фіксується аномальна поведінка і сигналізується про можливу поломку.

Розглянемо ключові етапи побудови моделі прогнозування при цьому підході. Пропонується наступна модель, що складається з етапів збору

параметрів, навчання моделі та прогнозування. На першому етапі визначається перелік усіх параметрів, які збираються з вузлів агрегату. До таких параметрів (для більшості агрегатів, що використовують електродвигуни, підшипники ковзання, систему мастила і т.п.) можна віднести: температуру підшипників, температуру олії, температуру води, температуру обмоток статора, тиск олії, вібрацію підшипника, віброшвидкість, струм двигуна та інші. Позитивний ефект від надмірності параметрів, що збираються, полягає в тому, що модель прогнозування зможе враховувати такі фактори, які можуть здатися незначними з точки зору впливу на відмову. При цьому важливим є те, що навчальна вибірка складається тільки з даних, у яких немає відмов та аномалій.

Даний підхід дозволяє максимально використовувати інформацію про роботу агрегату, що збирається з його вузлів в нормальному режимі роботи. Для навчання використовуються лише дані при нормальному режимі роботи агрегату, на відміну від аналогічних підходів, при яких для навчання необхідні дані до та під час несправності обладнання. Завдання алгоритму МН – спрогнозувати нормальний сигнал для кожного датчика, використовуючи значення сигналів за попередній проміжок часу. Для виявлення відмов і для діагностики вузлів агрегату модель аналізує різницю в показаннях фактичного та прогнозованого нормального сигналів в наступний проміжок часу. При навчанні на прецедентах модель виявляє патерни в показаннях датчиків, які були зафіксовані в моменти часу, що передують відмови обладнання. Якщо ці патерни збігаються з фактичним сигналом, то фіксується потенційна відмова. При підході прогнозування відмов обладнання в умовах малої кількості поломок, дані про відмови використовуються тільки при налаштуванні моделі для мінімізації хибних повідомлень про відмову обладнання та мінімізації пропусків реальних поломок.

1.1.6. Вібродіагностика

Вібраційна діагностика - це метод діагностування технічних систем та обладнання, заснований на аналізі параметрів вібрації створюваної працюючим обладнанням.

Вібродіагностика відіграє значну роль у виявленні складних дефектів, так як вібрації, що виникають при роботі машини, достатньо повно відображають відносний стан деталі або вузла, дозволяють судити про виникаючі динамічні навантаження, а також виявляти причини дефектів [27].

Методи вібродіагностики спрямовані на виявлення та ідентифікацію несправностей агрегатів машин та обладнання. Носієм інформації про технічний стан елементів працюючого обладнання у вібродіагностиці є віброакустичний сигнал. Вібросигнал практично миттєво реагує на зміну стану обладнання, що визначає швидкість постановки діагнозу та прийняття рішення.

Вібросигнал - це складний коливальний рух, який може бути представлений у вигляді сукупності простих гармонік, які описуються трьома параметрами: частотою f , амплітудою S та початковою фазою φ . Нижче представлено графік коливальних рухів (рис. 1.5).

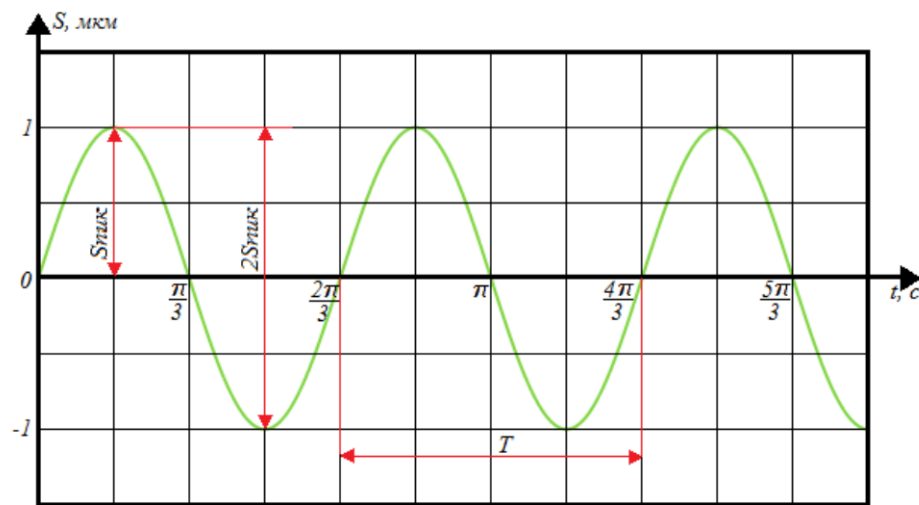


Рисунок 1. 5 Параметри коливань

Ці параметри мають певні математичні співвідношення при розгляді гармонійних коливань. Якщо вібрація точки (або тіла) має чисто поздовжню форму коливань вздовж однієї осі (x), то миттєве зміщення (віброзміщення) від вихідного положення може бути описано математичним рівнянням:

$$s = S_{\text{пик}} * \sin\left(2\pi * \frac{t}{T}\right) = S_{\text{пик}} * \sin(2\pi * f) = S_{\text{пик}} * \sin(\omega * t), \quad (1.4)$$

де $\omega = 2\pi \cdot f$ -кутова частота; $S_{\text{пик}}$ - максимальне зміщення точки (або тіла) від вихідного положення; t - час. Вібропереміщення вимірюється в мікрометрах

(1 мкм = 10^{-6} м = 10^{-3} мм) або в мм. Частота вібрації вимірюється у герцах (1 Гц = 1 с^{-1}) або числах оборотів за хвилину (об/хв, рад/с).

Зміна зміщення в часі є швидкістю (віброшвидкістю) руху точки (або тіла), тому коливання можна описати через швидкість:

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega * S_{\text{пик}} * \cos(\omega * t) = V_{\text{пик}} * \cos(\omega * t) = V_{\text{пик}} * \sin\left(\omega * t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.5)$$

Таким чином, віброзміщення за допомогою диференціювання може бути перетворено на швидкість. Одиницями виміру віброшвидкості є мм/с чи м/с.

При диференціюванні амплітуда множиться на частоту, тому амплітуда віброшвидкості на певній частоті пропорційна добутку зміщення (s) та частоти (f). Зі збільшенням частоти при фіксованому значенні зсуву швидкість зростає вдвічі, а збільшення частоти в 10 разів призводить до збільшення швидкості 10 разів.

Зміна швидкості руху точки (або тіла) у часі є прискоренням (віброприскорення) руху:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 * S_{\text{пик}} * \sin(\omega * t) = -a_{\text{пик}} * \sin(\omega * t) = a_{\text{пик}} * \sin(\omega * t + \pi). \quad (1.6)$$

Таким чином, для отримання прискорення зі швидкості необхідно ще одне диференціювання, отже ще одне множення на частоту. Тому прискорення при фіксованому зміщенні буде пропорційне квадрату частоти. Одиницями виміру віброприскорення - м/с².

На підставі другого закону Ньютона (сила дорівнює добутку маси на прискорення) при заданому зміщенні сила буде пропорційна квадрату частоти. Саме тому на практиці не стикаються з коливаннями, де великі прискорення супроводжуються великими зсувами, просто не існує таких дуже великих сил, які були б достатньо руйнівними.

Як видно з вищенаведених рівнянь, форма та період коливань залишаються незмінними незалежно від того, чи розглядається зсув, швидкість чи прискорення.

Слід зазначити, що миттєві значення s , v , a відрізняються за фазою. Так, швидкість випереджає зміщення на фазовий кут 90° (у рівнянні) та прискорення випереджає швидкість на фазовий кут 90° (у рівнянні). В якості характеризуючої величини було застосовано пікове значення амплітуди коливань, тобто застосування пікового значення амплітуди коливань ефективно при розгляді гармонійних (найпростіших) коливань.

Середнє арифметичне абсолютне значення амплітуди коливання характеризує загальну інтенсивність вібрації та визначається як:

$$X_{|сep|} = \frac{1}{T} * \int_0^T |x| dt. \quad (1.7)$$

Середнє значення амплітуди коливань використовується під час аналізу коливань за дуже великий проміжок часу (добу, кілька діб), здебільшого у стаціонарних системах моніторингу обладнання (Рис. 1.6). Тому ця величина особливого практичного інтересу не представляє.

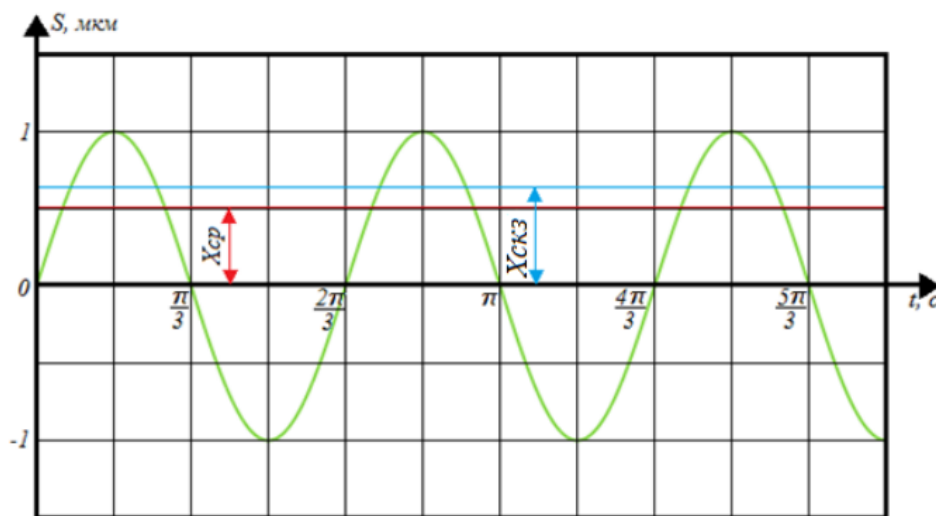


Рисунок 1. 6 Визначення середньої і ефективної амплітуди коливань

Іншою величиною амплітуди коливань є середньоквадратичне значення (СКЗ). СКЗ – важлива характеристика амплітуди вібрації для розрахунку якої потрібні миттєві значення амплітуди коливань піднести до квадрату, а величини, що вийшли, усереднити за часом. Для отримання правильних значень інтервал усереднення приймають не менше одного періоду коливання. Після цього для отримання СКЗ береться квадратний корінь:

$$X_{\text{скз}} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T s^2(t) dt}. \quad (1.8)$$

Для чисто гармонійних коливань (вібрація містить лише одну частоту коливань) співвідношення між піковим, середнім та середньоквадратичним значеннями амплітуди визначиться за формулою:

$$X_{\text{скз}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} * X_{|\text{сер}|} = \frac{1}{\sqrt{2}} * X_{\text{пик}}. \quad (1.9)$$

В загальному вигляді ці співвідношення можна описати так:

$$X_{\text{скз}} = F_f * X_{|\text{сер}|} = \frac{1}{F_c} * X_{\text{пик}}, \quad (1.10)$$

де F_f і F_c - відповідно коефіцієнт форми та амплітуди:

$$F_f = \frac{X_{\text{скз}}}{X_{|\text{сер}|}}; F_c = \frac{X_{\text{пик}}}{X_{\text{скз}}}. \quad (1.11)$$

Коефіцієнти дають уявлення про форму хвилі вібрації. Для чисто гармонійних коливань ці коефіцієнти дорівнюють:

$$F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 (\cong 1\text{Дб}); F_c = \sqrt{2} = 1,414 (\cong 3\text{Дб}). \quad (1.12)$$

Коливання, що зустрічаються на практиці, не є чисто гармонійними коливаннями, хоча більшість з них можуть бути періодичними.

На рисунку 1.7 наведено приклад типового динамічного процесу.

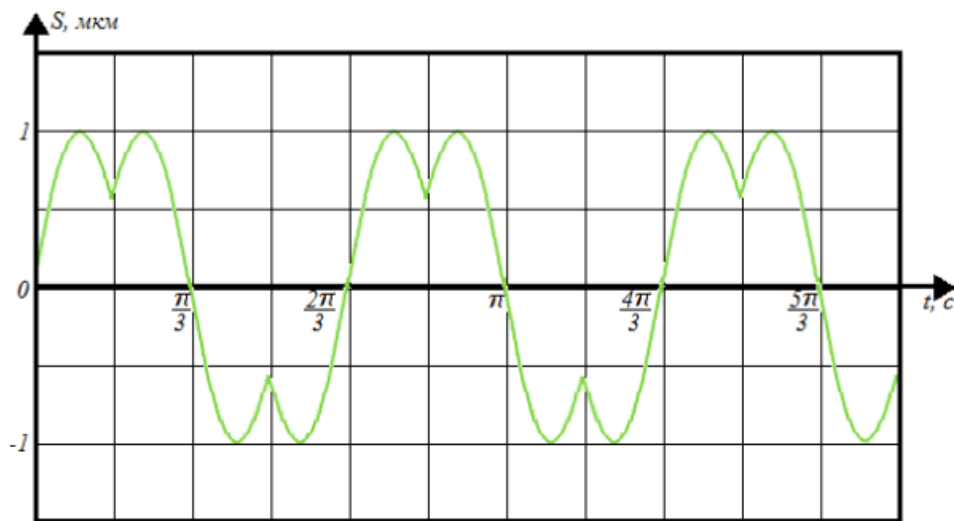


Рисунок 1. 7 Типовий динамічний коливальний процес

Визначивши пікове, середнє та середньоквадратичне значення цієї вібрації, а також її коефіцієнти форми та амплітуди, можна отримати інформацію, що дозволяє зробити висновок про негармонійний характер.

При використанні в якості діагностичної ознаки кожен з розглянутих параметрів має особливість. Що ж до величини коливання, то при її описі використовують такі основні параметри:

- віброзміщення (s);
- віброшвидкість (v);
- віброприскорення (a).

Контролювати вібрацію за параметром віброзміщення найбільш ефективно у низькочастотному діапазоні від 0 до 300...500 Гц. Частотна характеристика віброшвидкості має ділянку від 10 до 1000 ... 2000 Гц. Тому у частотному діапазоні від 10 до 1000 Гц рекомендується контролювати вібрацію за параметром віброшвидкості.

Зі зростанням частоти збуджуються високі рівні віброприскорення. Тому контролювати вібрацію за параметром віброприскорення найбільш ефективно у високочастотному діапазоні частот – понад 1000...2000 Гц. Використання віброприскорення на частотах 100 Гц та нижче може бути менш ефективним.

На підставі вищесказаного впливає, що для оцінки технічного стану машин та механізмів обов'язково потрібно використовувати віброшвидкість у частотному діапазоні від 10 до 2000 Гц. Якщо частота джерела вібрації (наприклад, масляна вібрація підшипника ковзання) знаходиться в низькочастотному діапазоні від 0,5 до 500 Гц, додатково до параметра віброшвидкості необхідно контролювати вібрацію по віброзміщенню. Якщо частота джерела вібрації (наприклад, підшипник кочення) знаходиться в високочастотному діапазоні понад 1000 Гц, додатково до параметра віброшвидкості необхідно контролювати вібрацію за віброприскорення.

1.1.7. Види вібрацій

1.1.7.1. Періодична вібрація

Коливальний процес, у якому значення коливальної величини повторюється через однакові проміжки часу T у тій самій послідовності – називають періодичною вібрацією. Для такої вібрації можна записати наступне:

$$x(t) = x(t + iT), \quad (1.13)$$

де $i = \dots -2, -1, 0, +1, +2 \dots$;

T – період коливань.

Неперервна послідовність, що виражає сукупність всіх частот на проміжку від нижньої граничної частоти f_H до верхньої граничної частоти f_B називається частотним діапазоном.

Ширина смуги частот, для якої $f_B = 2f_H$, називається октавою. Діапазон має ширину k октав, якщо $f_B = 2^k f_H$. У акустиці таке дроблення здійснюється через $k = 1/12; 2/12; \dots; 11/12$. Інтервал, для якого $k = 6/12 = 1/2$, вважається напівоктавою, а для якого $k = 4/12 = 1/3$, третьоктавою.

1.1.7.2. Гармонійна вібрація

Періодична вібрація з однією частотою називається гармонійною. Миттєве значення гармонійної вібрації може бути отримано як проекція на одну з осей прямокутної системи координат довжини вектора S_0 , що обертається проти годинникової стрілки в площині координат з кутовою швидкістю ω , що дорівнює кутовій частоті коливального руху.

Фазовим кутом $\omega t + \varphi$ є кут, утворений напрямом вектора в даний момент із віссю абсцис. Це справедливо і для початкової фази коливання φ . Графічне зображення цього «процесу» називається векторною діаграмою (рис. 1.8).

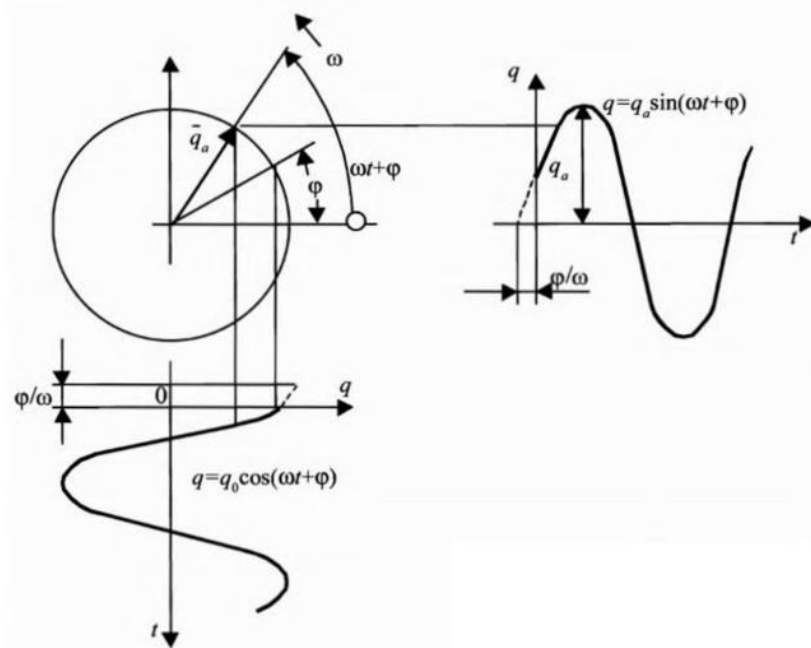


Рисунок 1. 8 Гармонічні коливання у вигляді проєкцій вектора що обертається

Раніше було сказано, вібрація, зокрема і гармонійна, описується одночасно трьома коливальними величинами: віброзміщенням S , віброшвидкістю v та віброприскоренням a . Ці величини для гармонічних коливань зв'язані між собою, ці зв'язки описуються наступними формулами:

$$S = S_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.14)$$

або

$$S = S_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.15)$$

де $\omega t + \varphi$ – фаза гармонічних коливань;

φ – початкова фаза коливань;

S_0 , ω , φ – параметри гармонічної вібрації, що описують її значення в будь-якій часовій точці.

$$v = \omega S_0 \cos(\omega t + \varphi) = v_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.16)$$

$$v = -\omega S_0 \sin(\omega t + \varphi) = -v_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.17)$$

$$a = -\omega^2 S_0 \cos(\omega t + \varphi) = -a_0 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 S, \quad (1.18)$$

$$a = -\omega^2 S_0 \sin(\omega t + \varphi) = -a_0 \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 S, \quad (1.19)$$

Прийнято вважати, вектор що зображує швидкість гармонічного коливання – випереджує вектор зміщення на $\pi/2$ і відстає від вектора

прискорення на $\pi/2$. Віброприскорення та віброзміщення знаходяться у протифазі.

Амплітуди віброзміщення S_0 , віброшвидкості v_0 та віброприскорення a_0 гармонійної вібрації пов'язані між собою співвідношеннями:

$$v_0 = \omega S_0 = 2\pi f S_0, \quad (1.20)$$

$$a_0 = \omega^2 S_0 = (2\pi f)^2 S_0, \quad (1.21)$$

Гармонійні коливання однакової частоти називаються синхронними. Для таких коливань різниця початкових фазових кутів називається зсувом фаз. Якщо цей зсув фаз дорівнює нулю, то гармонійні коливання називаються синфазними, якщо дорівнює π , то протифазними. Порівнювати фази гармонічних коливань має сенс лише для синхронних — які мають однакову частоту гармонічних коливань.

1.1.7.3. Полігармонійна вібрація

Вібрація з багатьма частотами називається полігармонійною. Вона має місце при впливі на систему різних незалежних гармонійних коливань у загальному випадку з різними амплітудами та початковими фазовими кутами.

Для опису полігармонійного процесу заданим гармонійним складовим необхідно зробити додавання коливань. Складання гармонійних складових вібрації, що відбуваються в одному напрямку, називають скалярними.

На форму полігармонійної вібрації великий вплив має зсув початкових фаз між гармоніками, внаслідок чого процес, що містить гармоніки $a_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$, $a_2 \sin(2\omega t + \varphi_2)$, $a_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) \dots$, при незмінних значеннях амплітуд та частот гармонік при зміні початкових фазових кутів, істотно змінює свою форму.

Гармонійний аналіз періодичної (полігармонійної) вібрації — це її представлення як суми гармонійних коливань, у якому періодичні коливання представлені у вигляді ряду Фур'є, а неперіодичні — інтеграла Фур'є. Сукупність амплітуд гармонійних складових періодичних коливань називається амплітудним спектром коливань, сукупність початкових фазових кутів гармонійних складових — фазовим спектром коливання. На рис. 1.9 зображено приклад спектральної діаграми.

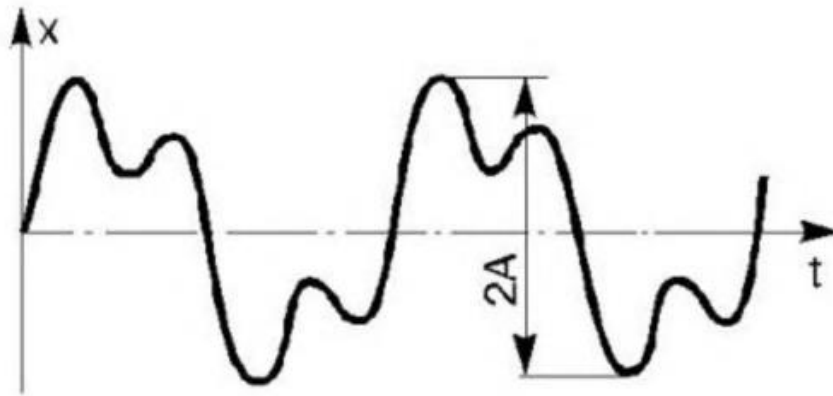


Рисунок 1. 9 Спектральна діаграма

1.2. Турбіна Т-100/120-130

Одновальна парова турбіна Т 100/120-130 номінальною потужністю 100МВт при 3000 обр/хв. з конденсацією та двома опалювальними відборами пара призначена для безпосереднього приводу генератора змінного струму типу ТВФ-100-2 потужністю 100МВт з водневим охолодженням. Відбори пари мають наступні межі регулювання:

- Верхня опалювальна – (0,6 – 2,5) ата.
- Нижня опалювальна – (0,5-2) ата.

Пара до стопорного клапана підводиться по двох паропроводах і потім по чотирьох перепускних трубах прямує до чотирьох регулюючих клапанів. Відкриваючись послідовно, регулюючі клапани подають пару в чотири вварені в корпус соплові коробки, звідки пара надходить на ступінь Кертиса, пройшовши її та вісім нерегульованих ступенів, пара через два патрубки залишає ЦВТ і за чотирма паровпускам підводиться до кільцевої коробки ЦСТ, відливої разом з корпусом. ЦСТ містить 14 ступенів. Після 12 ступеня проводиться верхній, а після останнього ступеня нижній теплофікаційний відбір.

З ЦСТ по двох ресиверних трубах, встановлених над турбіною, пара прямує в ЦНТ двопоточної конструкції. На вході кожного потоку встановлена поворотна регулююча діафрагма з одним ярусом вікон, що реалізує дросельний паророзподіл ЦНТ. У кожному потоці ЦНТ є два ступені.

Валопровід турбоагрегату складається з ротора ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ та генератора. Ротори ЦВТ та ЦСТ з'єднані жорсткою муфтою, причому

напівмуфта ЦСТ відкована разом з валом. Між роторами ЦСТ та ЦНТ, ЦНТ та генератора встановлені напівжорсткі муфти. Кожен з роторів укладений у двох опорних підшипниках. Комбінований підшипник розташований у корпусі середнього підшипника між ЦВТ та ЦСТ.

Ротор ЦСТ – комбінований: диски перших восьми ступенів відковані заодно з валом, інші насаджені на вал з натягом.

Корпус ЦСТ має вертикальний технологічний роз'єм, що сполучає литу передню частину та задню зварну.

Ротор ЦНТ – збірний: чотири робочі диски посаджені на вал з натягом.

Корпус ЦНТ складається з трьох частин: середньої зварно-ливої та двох вихідних зварених.

Корпуси ЦВТ та ЦСТ спираються на корпуси підшипників за допомогою лап. Вихідна частина ЦСТ спирається лапами на передню частину ЦНТ.

ЦНТ має вбудовані підшипники та спирається на фундаментальні рами своїм опорним поясом. Фікспункт знаходиться на перетині поздовжньої осі турбіни та осей двох поперечних шпонок, встановлених на поздовжніх рамах в області лівого (переднього) вихідного патрубка. Взаємне центрування корпусів циліндрів та підшипників здійснюється системою вертикальних та поперечних шпонок, встановлених між лапами циліндрів та їх опорними поверхнями. Розширення турбіни відбувається в основному від фікспункту у бік переднього підшипника та частково – у бік генератора.

Турбіна ПТ-100/120-130 є турбіною нового покоління, має сучасні показники надійності: коефіцієнт готовності – не менше 0,995; середнє напрацювання на відмову одиничного виробу - не менше 6000 годин; ресурс деталей та збірних одиниць із жароміцних матеріалів – не менше 170000 годин; термін служби між ремонтами із розкриттям циліндрів – не менше 6 років; повний термін служби турбіни – не менше 30 років.

В таблиці 1.1 представлені основні технічні характеристики турбіни.

Таблиця 1. 1 - Основні технічні характеристики

Характеристика	Значення
1 Електрична потужність, МВт	110
2 Тиск свіжої пари, кгс/см ²	130
3 Температура свіжої пари, °С	555
4 Частота обертання ротора, об/хв	3000
5 Витрата свіжої пари при ном. потужності, т/год	398
6 Номінальне опалювальне навантаження, Гкал/год	175
7 Максимальне опалювальне навантаження з урахуванням використання теплоти пари, що надходить в конденсатор, для підігріву мережевої води, Гкал/год	184

Для забезпечення надійної та ефективної роботи турбіни в АСУ ТП здійснюється вимірювання наступних аналогових технологічних параметрів, включаючи:

- температура (Т), витрати (Д) і тиску (Р) по пароводяному, живильному та конденсатному трактах турбіни;
- температури металу (Тм) паропроводів, циліндрів турбіни;
- рівнів конденсату в регенеративних та мережевих підігрівачах, конденсаторах;
- температур олії та вкладишів підшипників турбіни;
- температур міді та сталі генератора та збудника.

Введення значень аналогових параметрів здійснюється за періодом 0.5 с.

Аналогові параметри проходять наступну первинну обробку:

а) перевірку достовірності вимірів, по умові виходу за нижню або верхню межу діапазону вимірів АЦП.

б) оцифрування значень параметрів за формулою:

$$Y = A * X + B, \quad (1.22)$$

де X – результат вимірів;

Y-значення параметра в одиницях фізичної розмірності;

А і В – коефіцієнти масштабування, які задаються в базі даних індивідуально для кожного параметра.

г) перевірку достовірності результату вимірювання за індивідуальними уставками, що враховують технологічні особливості параметра.

Вся інформація в зрозумілому і доступному для оператора вигляді відображається у вигляді мнемосхеми (рис.1.10).

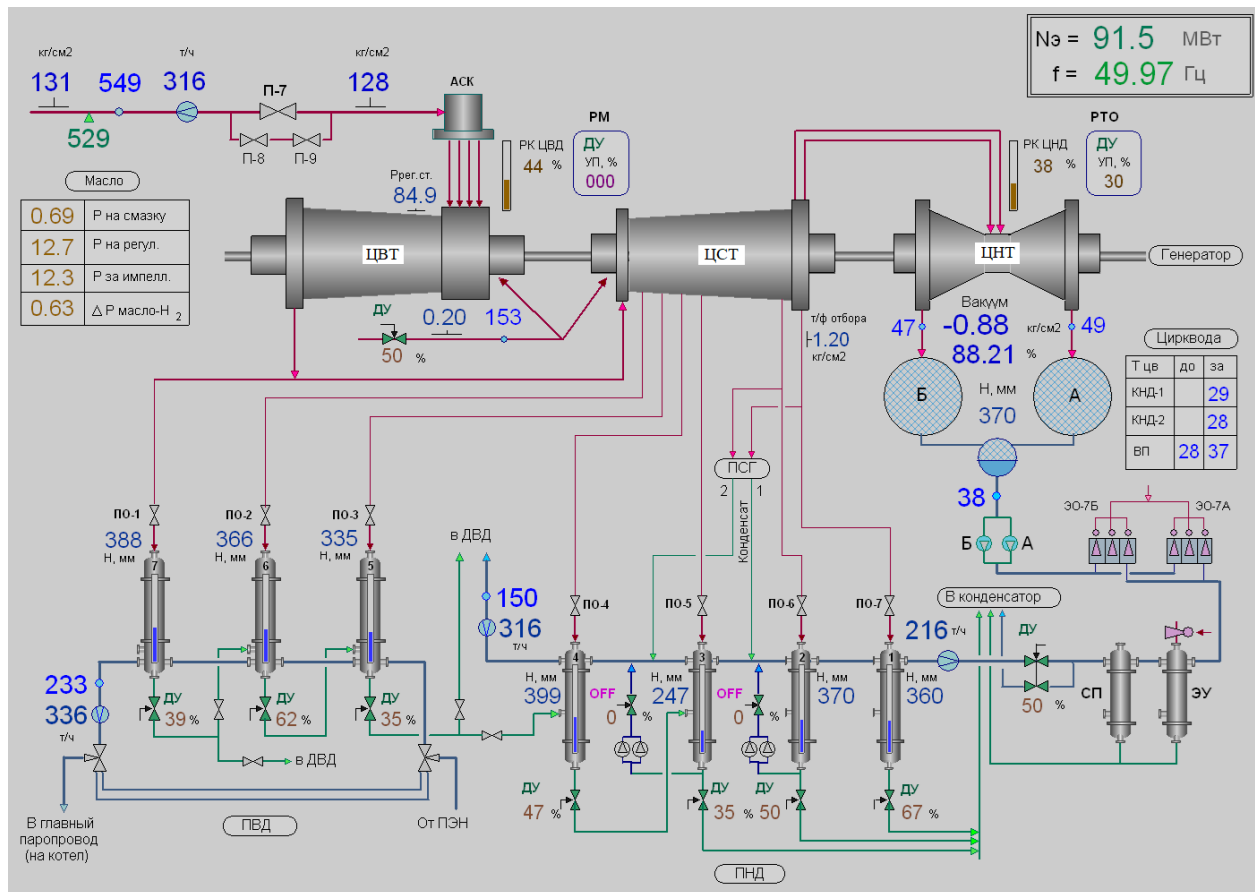


Рисунок 1. 10 Мнемосхема АСК турбіни

1.3. Методи машинного навчання для прогнозування несправностей

1.3.1. Метод опорних векторів (Support Vector Machine – SVM)

Метод опорних векторів показує хороші результати щодо інших алгоритмів з невеликим обсягом навчальних даних, також застосовується при відмові аналогового ланцюга діагностики з використанням вейвлет-перетворення як препроцесор з високою точністю класифікації. Це один із найбільш популярних методів навчання, який застосовується для вирішення задач класифікації та регресії [18].

Основна ідея методу полягає у побудові гіперплощини, що розділяє об'єкти вибірки оптимальним способом. Алгоритм працює з тим припущенням, що чим більша відстань (зазор) між роздільною гіперплощиною і об'єктами класів, що розділяються, тим менше буде середня помилка класифікатора. Кількість опорних векторів зростає з ускладненням задачі. Однак у SVM є недоліки:

- нестійкість до шуму: викиди у вихідні дані стають опорними об'єктами-порушниками і безпосередньо впливають на побудову роздільної гіперплощини;
- не описані загальні методи побудови ядер та спрямовуючих просторів, що найбільш підходять для конкретного завдання;
- немає відбору ознак;
- при спробі використання у мультикласовому завданні якість та швидкість роботи падають.

Останнім часом набирає популярності навчання з частковим залученням вчителя для HVAC (опалення, вентиляції та кондиціонування повітря). Використовуючи лише кілька несправних навчальних вибірок, SVM вирішує завдання виявлення та діагностування компонентів нагріву.

Також можна відзначити метод релевантних векторів (Relevance Vector Machine, RVM). На відміну від SVM, цей метод дає ймовірності, з якими об'єкт належить даному класу. Тобто, якщо SVM каже "x належить класу А", то RVM скаже "x належить класу А з ймовірністю p та класу В з ймовірністю $1-p$ ".

1.3.2. Штучна нейронна мережа (ШНМ)

ШНМ - це потужний інструмент, здатний виконувати завдання класифікації та регресії. ШНМ можна розглядати як зважені орієнтовані графи, в яких нейрони є вузлами, і зв'язки між вузлами є зваженими зв'язками [20]. Це навчання регулює вагу, а також функції активації для прийняття бажаної поведінки. Використовуються два типи навчання: контрольоване навчання з учителем та без учителя.

Навчання з учителем: ціль полягає в тому, щоб визначити синаптичні ваги з помічених прикладів. Мережа параметрів змінюється, щоб мінімізувати

помилки між цільовим висновком (наданим експертом) та фактичним виведенням у мережу. Метод зворотного поширення помилки (англ. backpropagation) - це приклад контрольованого алгоритму навчання.

Без учителя: вхідні дані не містять інформації про бажаний результат, здійснюється за правилами, які змінюють параметри мережі відповідно до вхідних даних. Алгоритм навчання асоціативної пам'яті для мереж Хопфілда є прикладом. Квантові мережі Хопфілда використовуються для діагностики великої кількості несправностей аналогових схем з використанням механізму ймовірності. Зразки несправностей квантуються і стандартно ортогоналізуються для подачі в квантову нейронну мережу Хопфілда. Системний підхід, що використовує механізм квантової асоціативної пам'яті та принцип квантової суперпозиції, дає хороше пояснення ймовірності багатьох несправностей.

Крім того, ШНМ можна використовувати для створення нейронної моделі з метою імітації нормальної поведінки системи та додаткових моделей для імітації різних умов несправності. Потім нейронні моделі розміщуються паралельно з системою, що відстежується, і виявлення несправностей досягається шляхом порівняння вихідних даних нейронних моделей з вихідними даними реальної системи. Класифікація несправностей полягає в простому пороговому тесті залишків, сформованих шляхом віднімання вихідних даних кожної нейронної моделі з відповідних вихідних даних реальної системи. Для оцінки залишків використовується байєсовська мережа. Сила ШНМ — у їх здатності апроксимувати і розпізнавати закономірності. У діагностичних додатках вони показали великі перспективи в областях, де є шуми і помилки. Однак ШНМ вимагає великих обчислювальних ресурсів, що робить збіжність зазвичай повільною під час навчання і схильна до перенавчання, а також вимагає великого набору даних для навчання.

1.3.3. Нечітка нейронна мережа

Додатки для діагностики в основному включають гібридні нечіткі нейронні моделі, в яких нейронні мережі та нечіткі системи об'єднані в одну систему [19]. Найбільш поширені нечіткі нейронні мережі засновані на двох

типах моделей: моделях Тагакі Сугено Канга (ТСК) та Мамдані, у поєднанні з алгоритмами нейронного навчання. Існує два основних застосування нечітких нейронних мереж у моніторингу. Ці застосування найчастіше засновані на вивченні залишків, які генеруються різницею оціненого сигналу, отриманого нейронечітким спостерігачем, з фактичними значеннями сигналу. Потім ці залишки класифікуються та оцінюються за допомогою нечіткої нейронної мережі.

Нейро-нечітке навчання та адаптація нечітких моделей ТСК використовуються для залишкової генерації, у той час як для залишкової оцінки використовується нейронечіткий класифікатор для моделей Мамдані. Така мережа може бути використана для виявлення та ізолювання несправності промислової газової турбіни, приділяючи особливу увагу несправностям, що виникли у виконавчій частині газової турбіни. Більше того, нечітка нейронна мережа використовується для навчання відображення причин несправності. Результати показують, що цей метод може точно діагностувати численні несправності. Послідовна нечітка кластеризація нечітких нейронних мереж на динамічній основі розроблена та успішно застосовується для моніторингу високошвидкісного процесу фрезерування. Він може послідовно вивчати модель, адаптуватися до варіацій та надавати оцінку чи прогноз стану процесу. Це полегшує ненав'язливу діагностику несправностей. Нечітка нейронна мережа має переваги над ШНМ, тому що нечітка нейронна мережа має здатність представляти невизначеності, властиві людському знанню, за допомогою лінгвістичних змінних, і це надійно щодо можливих порушень у системі. Тим не менш, для навчання нечіткої нейронної мережі необхідно включати знання експерта в цій галузі, щоб встановити правила, а навчання потребує великих обчислювальних ресурсів.

1.3.4. Дерева рішень

Дерева рішень є одним з найефективніших інструментів інтелектуального аналізу даних та передбачуваної аналітики, які дозволяють вирішувати завдання класифікації та регресії [21].

Вони представляють собою ієрархічні деревоподібні структури, що складються з вирішальних правил виду «Якщо ..., то ...». Правила автоматично генеруються в процесі навчання на навчальній множині i , оскільки вони формулюються практично природною мовою (наприклад, «Якщо обсяг продажів більше 1000 шт., то товар перспективний»), дерева рішень як аналітичні моделі більш вербалізовані та інтерпретовані, ніж, скажімо, нейронні мережі.

Оскільки правила у деревах рішень створюються шляхом узагальнення безлічі окремих спостережень (навчальних прикладів), що описують предметну область, то за аналогією з відповідним методом логічного виведення їх називають індуктивними правилами, а сам процес навчання – індукцією дерев рішень.

У навчальній множині для прикладів має бути задано цільове значення, оскільки дерева рішень є моделями, що будуються на основі навчання з учителем. При цьому якщо цільова змінна дискретна (мітка класу), то модель називають деревом класифікації, а якщо безперервна, то деревом регресії.

В прогнозуванні дерева рішень можна використовувати для аналізу розповсюдження телеметрії у вітряних турбінах за допомогою алгоритму навчання дерева рішень та виявлення відмов, пошкоджень та аномальних операцій. Вони навчають набір класифікаторів дерева рішень Bagged на наборі даних з морської вітряної електростанції, що складається з 48 вітряних турбін, і використовують його для автоматичного виділення шляхів, що пов'язують збої через надмірну вібрацію з їх можливими причинами.

Алгоритм CART використовується для введення дерева рішень у діагностичну стратегію вентиляційних установок. Детектор стану і регресійна модель включені в стратегію для підвищення інтерпретованості розробленої діагностичної стратегії. Показано, що за допомогою цієї стратегії можна досягти високих діагностичних показників.

Дерева рішень візуально більш інтуїтивно зрозумілі, простіше та легше засвоюються та інтерпретуються інженерами. На відміну від інших методів класифікації, з класифікаторами дерева рішень можна виконувати аналіз причин

несправностей на основі даних; можна простежити шлях від кінцевого стану до ініціювання, шлях, який слідує послідовності та хронології взаємозв'язку подій. Древа рішень дуже стійкі до зашумлених та неповних даних. Однак для них необхідно використовувати параметр обрізки, щоб зменшити необхідність перенавчання.

1.3.5. Байєсівська мережа довіри

Байєсівська мережа довіри (Bayesian Belief Network, BBN) — важлива імовірнісна графічна модель, яка може ефективно вирішувати різні проблеми невизначеності на основі ймовірнісного представлення інформації та логічних висновків. Байєсівська мережа довіри - імовірнісна графічна модель, що представляє набір випадкових величин та їх умовних залежностей через орієнтований ациклічний граф. Така мережа складається з якісної та кількісної частин.

Якісна частина – це спрямований ациклічний граф, у якому вузли являють собою системні змінні, а дуги символізують залежності або причинно-наслідкові зв'язки між змінними.

Кількісна частина складається з умовної імовірнісної таблиці, яка представляє відносини між кожним вузлом та його батьками.

Процедури діагностики несправностей з мережею байєсівської довіри складаються з моделювання структури BBN, моделювання параметрів BBN, виведення BBN, ідентифікації несправностей, а також перевірки та верифікації. Використовується кілька основних методів побудови структурних моделей BBN для діагностики несправностей. Три основних методи включають причинно-наслідкові зв'язки, алгоритми зіставлення чи структурування навчання. Крім того, параметрами є апіорна ймовірність кореневих вузлів та умовна ймовірність листових вузлів. Ці ймовірності можуть бути отримані з експертних знань та досвіду, а також статистичних результатів історичних, змодельованих та експериментальних даних.

Алгоритми можуть бути засновані на аналізі поведінки системи, що спостерігається, і порівнянні його з набором поведінкових патернів, створених

на основі різних несправних станів. Порівнюючи зі зразком, можна сформулювати оцінку апостеріорного розподілу байєсівської імовірнісної моделі. Коли діагностика несправностей пов'язана з тимчасовими, системними чи складними системами, неминучі проблеми зі статичними BBN. Тому для вирішення цих проблем використовуються деякі інші типи BBN, такі як динамічна байєсівська мережа та об'єктно-орієнтована байєсівська мережа.

Динамічна байєсівська мережа — це екстенціональні BBN із змінними, що залежать від часу, і їх можна використовувати для моделювання тимчасової еволюції динамічних систем. Таким чином, використовується мережа байєсів, яка моделює систему електропостачання для інтегральних схем. При цьому обробляється динаміка збою, що змінюється, розвиток збою і потужність збою. Динамічна байєсівська мережа використовується для моделювання процесу динамічної деградації електронних продуктів, а ланцюги Маркова використовуються для моделювання перехідних відносин чотирьох станів, тобто відсутності несправності, перехідної несправності, переривчастої несправності та постійної несправності. Крім того, методологія діагностики несправностей може ідентифікувати несправні компоненти та розрізняти типи несправностей у різний час.

Об'єктно-орієнтована байєсовская мережа забезпечує підхід досягнення ієрархічного представлення моделі, і кожен рівень відповідає рівню абстракції, показуючи інкапсульовані вузли для поточного рівня об'єкта. Такий підхід знижує складність побудови BBN та підвищує ймовірність повторного використання моделей. Методологія діагностики несправностей у реальному часі складних систем із структурами, що повторюються, запропонована з використанням об'єктно-орієнтованої байєсівської мережі. У разі виникнення несправностей запропонована система діагностики несправностей на основі об'єктно-орієнтованої байєсівської мережі може повідомляти про несправності та попередження. Для зазначеної системи з певною ситуацією оператор може запровадити деяку відому інформацію про досвід у додаткові інформаційні рівні підмереж додаткової інформації та відмов через загальну причину.

BBN інтуїтивно зрозумілий користувачеві в плані взаємодії між змінними моделями. Це корисно для моделювання невизначеності і може бути легко використано для моделювання ієрархічних рівнів множинних причин та наслідків з даними з багатьох джерел, які зазвичай зустрічаються у виробничих системах. Основна проблема навчання BBN полягає у побудові деревоподібної структури, і для вирішення цієї проблеми було запропоновано кілька методів, включаючи експертну думку.

РОЗДІЛ 2. ОПИС АСК ТУРБІНИ Т-100

2.1. Опис функцій системи автоматизації

Система що розглядається є дворівневою. Нижній рівень відповідає за збір інформації та виконання функції локального контролю, а верхній – функції супервізорного управління. Локальна система управління реалізується на базі ПЛК. Керуючі дії здійснюються за допомогою виконавчих механізмів, якими управляє контролер сигналом 0-10 В через приводи, блоки ручного управління та контактори. Об'єктом автоматизації є турбіна Т-100/120-130. Для того, щоб задовільнити основні вимоги, а саме безпечність та надійність роботи – система повинна забезпечувати такі функції (таблиця 2.1).

Таблиця 2. 1 - Функції контролю та регулювання

Ф-ї контролю	Ф-ї регулювання
Витрата пари перед ЦВТ	Потужність турбіни
Температура пари перед ЦВТ	Рівень конденсату в підігрівачах
Тертя в підшипниках ЦВТ	Рівень конденсату в конденсаторі
Тертя в підшипниках ЦНТ	Рівень в ПМГ
Осьовий зсув ЦВТ	Тиск води на ущільнення
Осьовий зсув ЦНТ	Тиск води на маслоохолоджувач
Температура пари на відборах ЦВТ	Тиск пари на нагрів шпильок
Температура пари на відборах ЦНТ	Тиск пари на нагрів фланців
Тиск пари після ЦВТ	
Тиск пари перед підігрівачами	
Потужність турбіни	
Рівень конденсату в підігрівачах	
Витрата води перед деаератором	
Температура води перед деаератором	
Рівень конденсату в конденсаторі	

Таблиця 2. 2 - Функції сигналізації та блокування

Ф-ї сигналізації	Ф-ї блокування
Рівень в конденсаторі	Потужність турбіни
Рівень в ПВТ	Рівень конденсату в підігрівачах
Рівень в ПНТ	Рівень конденсату в конденсаторі
Рівень в ПМГ	Рівень в ПМГ
Тиск пари на ущільнення	
Вакуум в конденсаторі	
Тиск пари перед турбіною	
Температура гострої пари перед турбіною	
Тиск водню	
Температура опорного підшипника	
Температура упорного підшипника	
Перепад температури ЦВТ	
Перепад температури між фланцями	

Функції блокування призначені для запобігання масштабної аварії при виході параметрів за допустимі межі. Якщо ж така ситуація виникає, то активується звукова та візуальна сигналізація і зупиняється робота контуру в якому було виявлено відхилення.

2.1.1. Функції нижнього рівня АСУ

На нижньому рівні знаходиться польове обладнання: датчики, виконавчі механізми та їх вторинні прилади. Завдання обладнання цього рівня - вимірювання фізичних параметрів та їх перетворення на стандартні типи електричних сигналів, отримання керуючих сигналів від обладнання середнього рівня (контролери) та безпосереднє управління технологічним обладнанням відповідно до цих сигналів. Функції АСУ ТП слід відрізняти від функцій, виконуваних всім комплексом технічних засобів системи або його окремими пристроями. Функції поділяються на керуючі, інформаційні та допоміжні.

Інформаційна функція АСУ ТП — це функція системи по збору, обробці і передачі інформації про стан ТОУ оператору, або на наступну обробку до пристрою, який формує керуючі впливи. В процесі обробки інформації виконуються операції сумування, згладжування, обчислення непрямих показників, які не можуть бути визначені безпосередньо при контролі, зіставлення поточних значень параметрів технологічного процесу із заданими. Отже, відбувається передача сигналів датчиків, виведення сигналів управління на виконавчі механізми, візуалізація процесів та мнемосхеми, ведення алармів, ведення архівів, ведення системи звітності, обмін даними між верхнім і нижнім рівнем АСУ, вимірювання параметрів.

Керуюча функція АСУ ТП це функція управління технологічним процесом, що включає отримання інформації про стан технологічного об'єкта управління, оцінку інформації, вибір впливів, що управляють, і їх реалізацію.

До керуючих функцій АСУ ТП відносяться:

- дистанційне управління;
- автоматичне регулювання;
- функціонально-групове управління;
- автоматичне блокування;
- автоматичний захист.

Допоміжна функція АСУТП це функція, що включає збирання та обробку даних про стан АСУТП або подання цієї інформації персоналу системи або здійснення керуючих впливів на відповідні технічні та/або програмні засоби АСУТП.

До них відноситься перевірка справності пристроїв АСУТП та правильності вихідної інформації, автоматичне введення резервних пристроїв АСУТП при відмови працюючих, повідомлення персоналу про відмови в АСУТП.

Через складність сучасних АСУТП значення допоміжних функцій дуже велике, так як без них неможливе нормальне функціонування систем.

2.1.2. Функції, верхнього рівня АСУ

На цьому рівні розв'язуються задачі:

- архівування подій;
- зведення матеріалів і енергетичних балансів;
- вироблення управлінь для запобігання розвитку аварійних подій;
- синхронізації та координації взаємодії технологічних операцій та обладнання.

Завдяки координації забезпечується ефективне функціонування декількох паралельних ТП, що в свою чергу робить виробничий процес максимально продуктивним. Функція координації параметрів відповідає за підбір оптимальних параметрів протікання процесу на верхньому рівні АСУ (адаптація) і дозволяє коректно підібрати режим роботи в залежності від цих параметрів. Після визначення оптимальних параметрів і підбору належного режиму подаються відповідні сигнали керування на регулятори і інші прилади (нижнього рівня).

Однією з найважливіших є функція обміну інформацією, яка забезпечує обмін даними між різноманітними АСУ, це дозволяє інтегрувати АСУ ТП в АСУ підприємства.

2.2. Огляд і аналіз контурів регулювання

Регулятори призначені для підтримки в заданих межах значень основних технологічних параметрів. Перелік регуляторів АСУ ТП наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2. 3 - Перелік регуляторів АСУ

№	Назва регулятора
Регулятори рівня	
1	Регулятор рівня ПНТ-1
2	Регулятор рівня ПНТ-2 нормальний
3	Регулятор рівня ПНТ-2 граничний
4	Регулятор рівня ПНТ-3 нормальний
5	Регулятор рівня ПНТ-3 граничний
6	Регулятор рівня ПНТ-4

Продовження таблиці 2.3

№	Назва регулятора
7	Регулятор рівня ПВТ-5
8	Регулятор рівня ПВТ-6
9	Регулятор рівня ПВТ-7
10	Регулятор рівня ПМГ-1
11	Регулятор рівня ПМГ-2
12	Регулятор рівня в конденсаторі
Регулятори тиску	
13	Регулятор тиску пари на ущільнення
14	Регулятор тиску води на маслоохолоджувач
15	Регулятор тиску пари на обігрів шпильок
16	Регулятор тиску пари на обігрів фланців
Основні регулятори турбіни	
17	Регулятор потужності
18	Регулятор теплофікаційного відбору

Регулятори рівня здійснюють підтримання регульованого параметра на необхідному значенні за рахунок впливу на клапан, що регулює, на злив конденсату з підігрівача або конденсатора. При перевищенні рівнем завдання формується вплив на відкриття клапана, що призводить до збільшення зливу конденсату і, відповідно, до зниження рівня. Якщо рівень нижче заданого, то спостерігається зворотна картина: виробляється керуючий вплив на закриття клапана, що призводить до зменшення зливу конденсату і, відповідно, до підвищення рівня.

У регуляторах рівня використовується сигнал жорсткого зворотного зв'язку, в якості якого використовується сигнал положення виконавчого механізму регулюючого клапана.

Жорсткий зворотний зв'язок забезпечує стійкість регулятора та перешкоджає виникненню автоколивальних процесів у контурі регулювання. Разом з тим жорсткий зворотний зв'язок призводить до деяких незручностей, а

саме: регулятор підтримує рівень по відношенню до завдання зі статичною помилкою, величина якої становить приблизно 10-15 мм, на кожні 10% зміни положення виконавчого механізму по відношенню до початкового, при якому регулятор був включений у роботу.

Регулятори тиску призначені для підтримання необхідного тиску води або пари за регулюючим клапаном, а також підтримання тиску пари на обігрів фланців та шпильок.

Регулятор потужності здійснює підтримку регульованого параметра шляхом формування керуючих імпульсів «Більше» та «Менше», що надходять на вхід виконавчого механізму синхронізатора швидкості турбіни, який змінює ступінь відкриття регулюючих клапанів ЦВТ і, відповідно, витрату пари на турбіну.

Регулятор потужності забезпечує виконання наступних функцій:

- автоматична підтримка заданої електричної потужності турбогенератора в діапазоні 40-120 МВт;
- розвантаження турбоагрегату при зниженні тиску гострої пари перед турбіною нижче 125 кгс/см² зі швидкістю 5 МВт/хв. Зниження навантаження триває до відновлення тиску, і якщо цього не відбувається, то до досягнення навантаження холостого ходу (3 МВт);
- розвантаження/навантаження турбіни при відповідно збільшенні частоти мережі до 50.15 Гц або зниженні частоти мережі до 49.85 Гц. Графік зміни навантаження (Рп) для турбіни 100 МВт в залежності від відхилення частоти від номінальної наведено на рисунку 2.1.

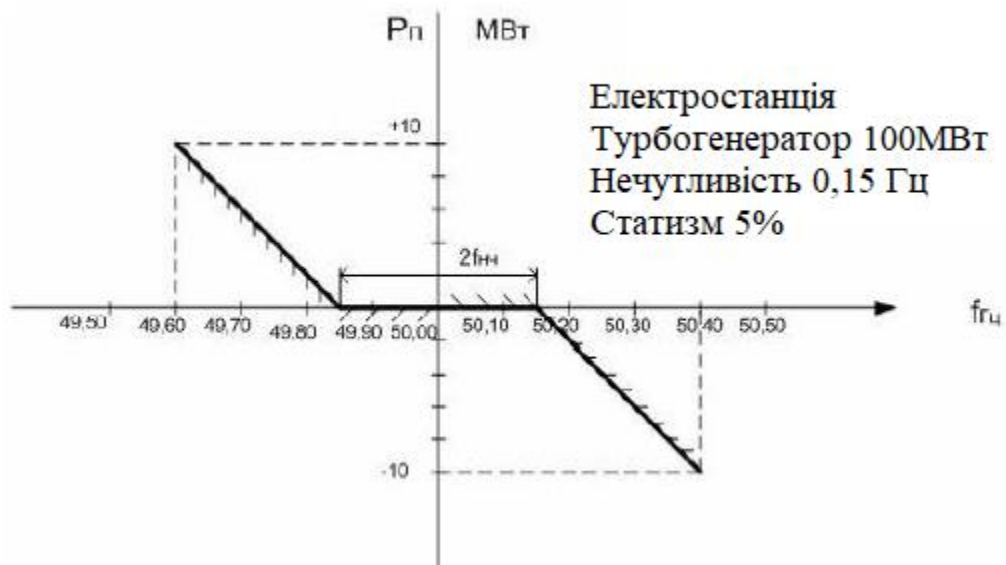


Рисунок 2. 1 Залежність навантаження турбіни від частоти

Регулятор теплофікаційного відбору здійснює підтримку регульованого параметра шляхом формування керуючих імпульсів «Більше» і «Менше», що надходять на вхід виконавчого механізму, який змінює ступінь відкриття поворотно-регулюючої діафрагми ЦНТ і, відповідно, тиск пари теплофікаційного відбору. Регулятор теплофікаційного відбору забезпечує автоматичну підтримку заданої електричної потужності турбогенератора в діапазоні $-0,55 - 1,45 \text{ кгс/см}^2$.

2.3. Функціональна структура системи управління об'єктом

На рисунку 2.2 зображена функціональна структура системи. Система моніторингу вібрації турбоагрегату.

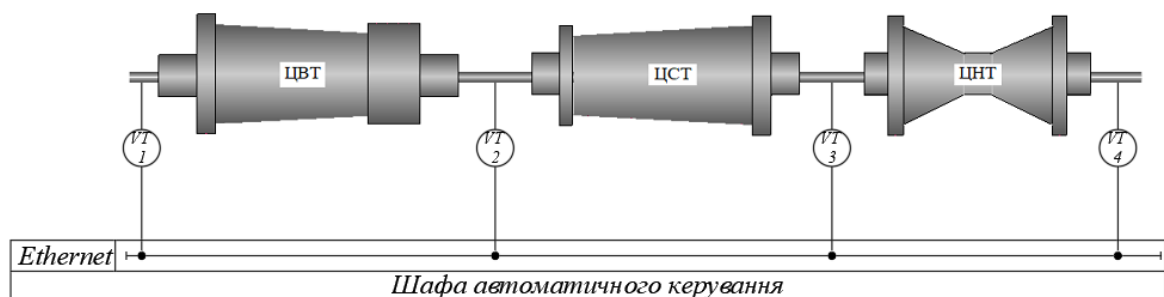


Рисунок 2. 2 Функціональна структура системи

Вібрація вимірюється в чотирьох місцях:

1. Вібрація на опорі валу ЦВТ зліва.

2. Вібрація на опорі між ЦВТ та ЦСТ.
3. Вібрація на опорі між ЦСТ та ЦНТ.
4. Вібрація на опорі ЦНТ справа.

Надійне і якісне кріплення вібрдатчиків на поверхні досліджуваного об'єкта – одна з найважливіших умов для отриманні точних і надійних результатів при вимірі вібрації і контролю стану обладнання. Ненадійне кріплення датчика призводить до зменшення лінійної області амплітудно-частотної характеристики датчик та, відповідно, до значного зменшення діапазону його виміру.

Найкращим способом кріплення датчика вважається кріплення на гладкій плоскій поверхні за допомогою міцної сталеві шпильки. Згідно з рекомендаціями ISO 1101 поверхня для кріплення датчика повинна відповідати рівню шорсткості поверхні – не більше 1,6 мкм.

Датчики встановлюються на основах підшипників. Вібрація турбоагрегату відбувається в трьох напрямках, тому вимір відбувається в трьох напрямках відносно осі валу турбіни: осьовому, поперечному, вертикальному. Використовуються сучасні датчики які виконують вимір вібрації у всіх трьох напрямках. На виході датчика можемо отримуємо цифровий сигнал.

2.3.1. Послідовність проведення вимірів

Вимір та дослідження вібрації можна умовно поділити на три види:

- контрольні виміри для працюючого агрегату;
- спеціальні діагностуючі виміри для працюючого агрегату;
- обстеження непрацюючого агрегату.

Контрольні виміри виконуються для розпізнання та прогнозування стану обладнання враховуючи вплив технологічних режимів обладнання. Контрольні виміри поділяють на поточне контрольне вимірювання і повне контрольне вимірювання вібрації. Поточний контроль виконується для:

- визначення загального поточного рівня вібрації в контрольних точках;
- порівняння отриманих показників вібрації з нормованими.

При виявленні невідповідності з нормами або при появі негативної тенденції – необхідно термінове проведення повного контрольного вимірювання.

Повне контрольне вимірювання – є основним «інструментом» прогнозування. Повне контрольне вимірювання виконує такі завдання:

- визначення поточного рівня вібрації в контрольних точках;
- розпізнання стану обладнання;
- попередня оцінка рівня небезпеки виявлених відхилень та виділення зон з максимальним рівнем відхилень;
- повний аналіз стану обладнання та прийняття рішення щодо подальшої експлуатації турбоагрегата;

Повне контрольне вимірювання виконується без втручання в режим експлуатації турбоагрегату. Повне контрольне вимірювання дає можливість розпізнати стан турбоагрегату, а також дізнатися найбільш ймовірні причини виникнення відхилення вібрації від норми, що в свою чергу, дозволяє координувати ремонтні або профілактичні роботи таким чином, щоб вони були направлені на усунення саме цієї причини (не виконуючи дослідження всього агрегату).

2.4. Технічне забезпечення системи управління

АСУ ТП є розподіленою, ієрархічною, багатофункціональною, програмованою, автоматизованою системою, відкритою для подальшого розвитку як за рахунок включення в локальну мережу АСУТП додаткових інтелектуальних пристроїв, так і за рахунок встановлення додаткових завдань на існуючі пристрої без зміни базового математичного забезпечення.

Технічні засоби АСУ ТП базуються на резервованій системі підвищеної надійності Simatic S7-412H, що складається з двох ідентичних промислових контролерів, які працюють за принципом «ведучий – ведений». Обидва контролери пов'язані між собою оптичними кабелями синхронізації і паралельно виконують ту саму програму. При цьому управління технологічним процесом та обмін даними з верхнім рівнем ПТК виконує лише «ведучий» контролер. При

його відмові функції «ведучого» контролера безударно передаються «веденому» контролеру (час підхоплення не більше 30 мс). Для зв'язку по протоколу Modbus використовується комунікаційний процесор CP 441. В якості джерела живлення центральних процесорів використовуються блоки живлення PS 407 (10 В), для інших приладів та датчиків - PS 405 (24 В).

Вимірювальне обладнання

Для виміру параметрів вібрації використовуються сучасні «трикординатні» датчики з цифровим виходом – DVA484. Ці датчики призначені для виміру віброзміщення, віброприскорення та віброшвидкості по трьом напрямкам, також є можливість здійснювати контроль рівня нахилу відносно осей. Сигнал віброприскорення надходить до блоку математичної обробки, де перетворюється в сигнали віброшвидкості та віброзміщення. Також, є можливість розрахувати амплітуду, миттєве значення та середньоквадратичне значення. Датчик та блок математичної обробки (плата) знаходяться в герметичному корпусі.

Особливості:

- всі розрахунки та обчислення відбуваються в режимі реального часу, інтервал оновлення даних – 10 мс;
- похибка вимірювань вібрації не більше 5% в основному частотному діапазоні;
- додаткова похибка не більше 2,5%;
- можливість контролю кута нахилу осі з точність 1°.

В таблиці 2.4 наведені основні технічні характеристики датчика.

Таблиця 2. 4 - Технічні характеристики датчика DVA484

Параметр	Значення
Метрологічні параметри	
Діапазон показань амплітуди віброшвидкості, мм/с	0-100
Діапазон показань амплітуди віброприскорення, м/с ²	0-100

Продовження таблиці 2.4

Параметр	Значення
Діапазон показань амплітуди віброзміщення, мкм	0-100
Діапазон робочих частот, Гц	2-1000
Вихідний сигнал, живлення	
Тип вихідного сигналу	Цифровий
Інтерфейс	RS-485
Протокол	Modbus RTU
Діапазон напруги живлення, В	10-24
Конструктивні параметри	
Маса, кг	0,13
Тип кріплення	Шпилька М6 (М8/М10/М12)
Ступінь захисту	IP68
Експлуатаційні параметри	
Діапазон робочих температур, °С	-40...+80
Параметри надійності	
Середній час напрацювання на відмову, год	40000
Термін служби, років	10
Встановлений ресурс приладу, год	80000
Інтервал між повірками, років	2

РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД І АНАЛІЗ СИСТЕМ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

3.1 Розробка системи предиктивного обслуговування об'єкта управління

В попередніх розділах було відмічено, що на сьогоднішній день прогнозування стану обладнання на основі аналізу вібрації вважається найефективнішим серед існуючих методів. Аналіз вібрації дозволяє виявити несправності на етапі зародження до появи інших, більш помітних «симптомів», таких як зміна потужності, шум, нагрів та інших. Загалом, можна сказати, що вібрація – це коливання механізму і його компонентів. В свою чергу, наявність вібрації – не є проблемою або сигналом про наближення несправності, а саме відхилення параметрів вібрації від заданих норм сигналізують про можливу наявність внутрішніх проблем які скорочують строк служби, а саме: порушення балансу, несправність підшипників, порушення співвісності та інші.

3.1.1 Особливості конструкції та статичне моделювання

Процес статичного моделювання, досліджуваної парової турбіни повністю описано нижче. На першому етапі система моделюється в CATIA/ Analysis and Simulation для статичного аналізу.[22] Потім розглядається модель парової турбіни в програмному забезпеченні MSC ADAMS для вібраційного аналізу.

В даній частині аналізується реакція валу парової турбіни в статичній формі. Характеристики матеріалів, що використовуються для виготовлення валу даної турбіни приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3. 1 - Технічні характеристики матеріалу валу

Характеристика	Значення
Модуль Юнга, Н/м ²	$2 \cdot 10^{11}$
Коефіцієнт Пуассона	0,266
Густина, кг/м ³	7860
Межа міцності, МПа	500

Для моделювання валу, приймемо що два його кінці та середина жорстко зафіксовані, таким чином створено граничні умови. На рисунку 3.1 зображено отриману модель валу.

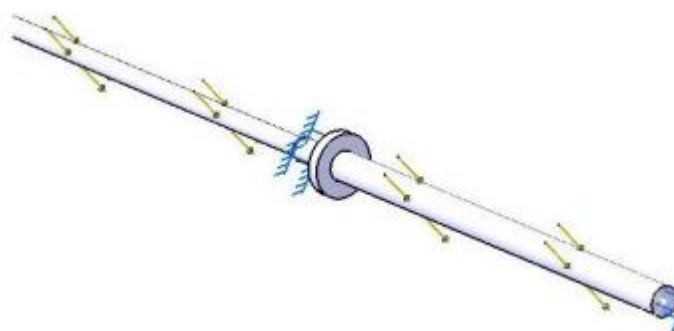


Рисунок 3. 1 Модель валу з накладеними граничними умовами

На основі створеної моделі виконуємо побудову діаграми зміщення валу (рис. 3.2) та діаграми напружень валу (рис. 3.3).

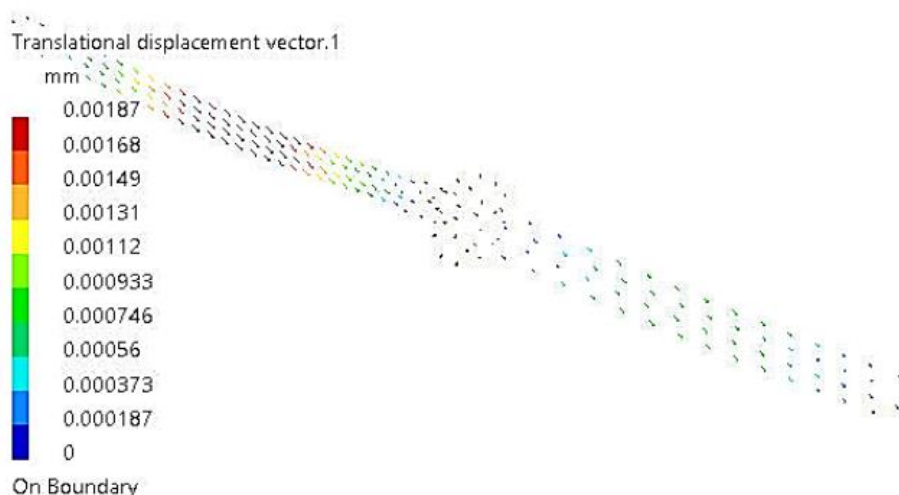


Рисунок 3. 2 Діаграма зміщення валу

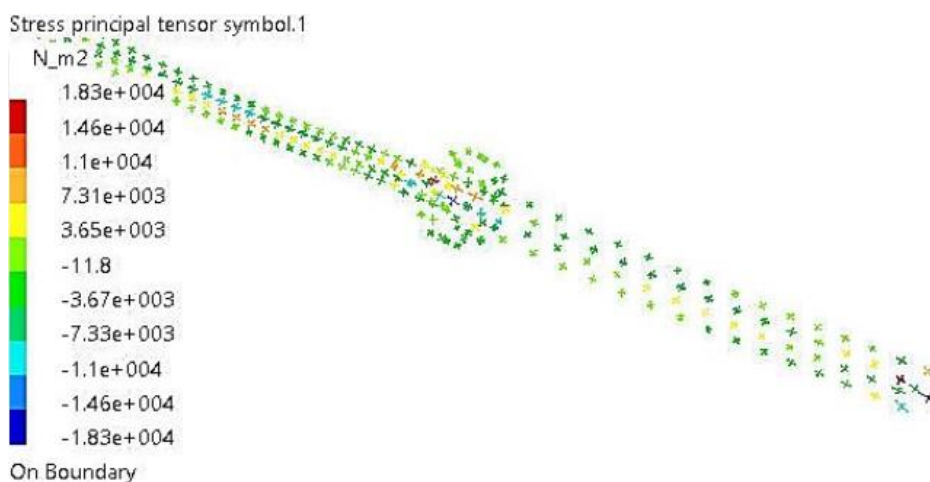


Рисунок 3. 3 Діаграма напружень валу

За результатами діаграм бачимо, що максимальне навантаження на вал – 200 Н/ м^2 , ця величина визначається як інтенсивність навантаження, що

представляє собою поверхневі тягові поля однакової величини, прикладені до поверхні валу. Робимо висновок, що максимальна деформація валу зовсім незначна, а це означає що матеріал, який використовується для виготовлення валу, є прийнятним.

На наступному етапі створюється модель в середовищі MSC ADAMS щоб максимально наближено імітувати парову турбіну що розглядається. Для моделі додаються з'єднання, обмеження, матеріали та інші параметри.

Використовуючи дані з датчика вібрації будуються графіки зміщення валу по кожній з осей (рис. 3.4-3.6).

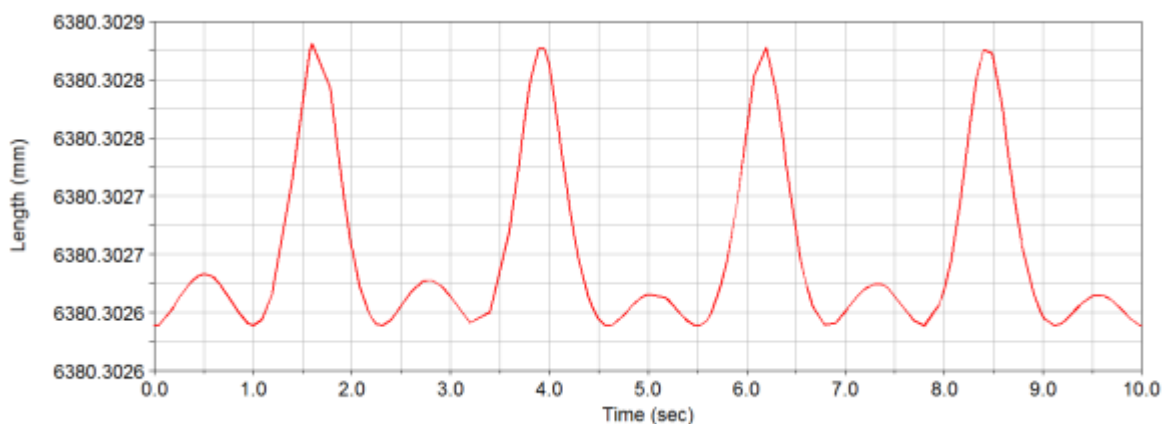


Рисунок 3. 4 Зміщення валу турбіни по осі X

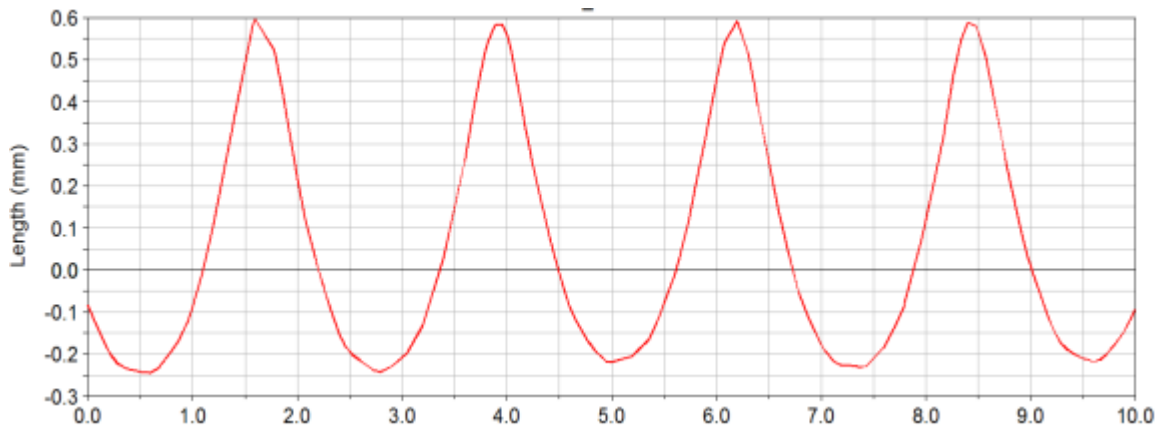


Рисунок 3. 5 Зміщення валу турбіни по осі Y

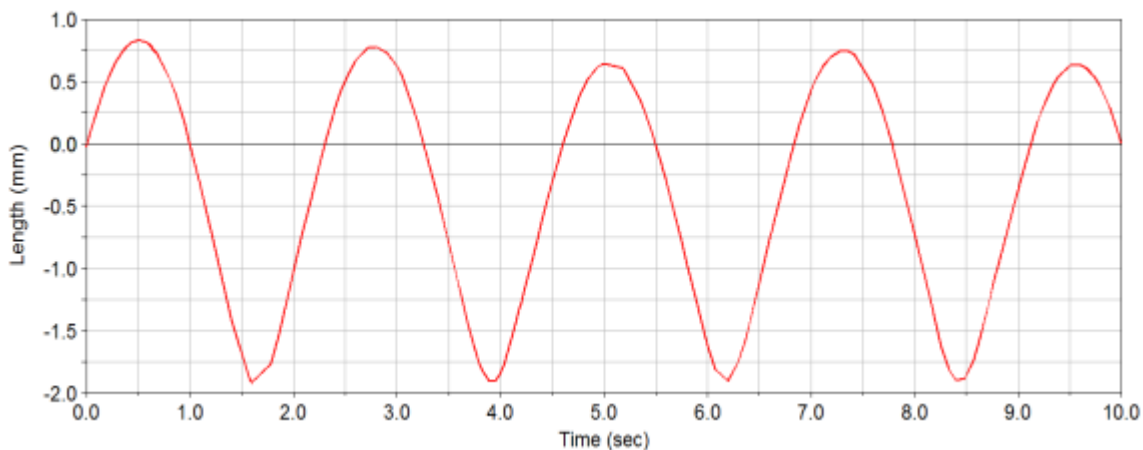


Рисунок 3. 6 Зміщення валу турбіни по осі Z

З графіків видно, що максимальний зсув становить майже 2мм, це пов'язано з використанням в системі підшипників ковзання. На рисунку 3.7 зображено кутову швидкість валу, на рисунку 3.8 – порівняння між переміщенням валу та кутовою швидкістю.

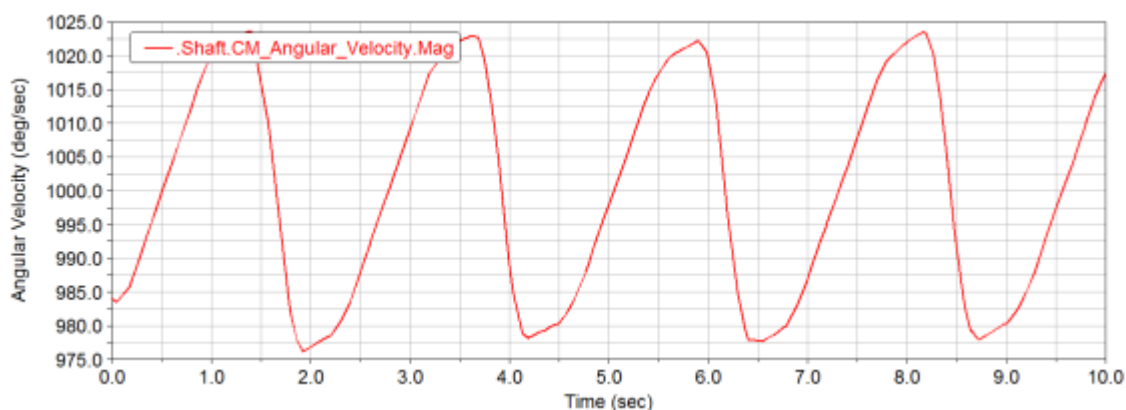


Рисунок 3. 7 Кутова швидкість валу

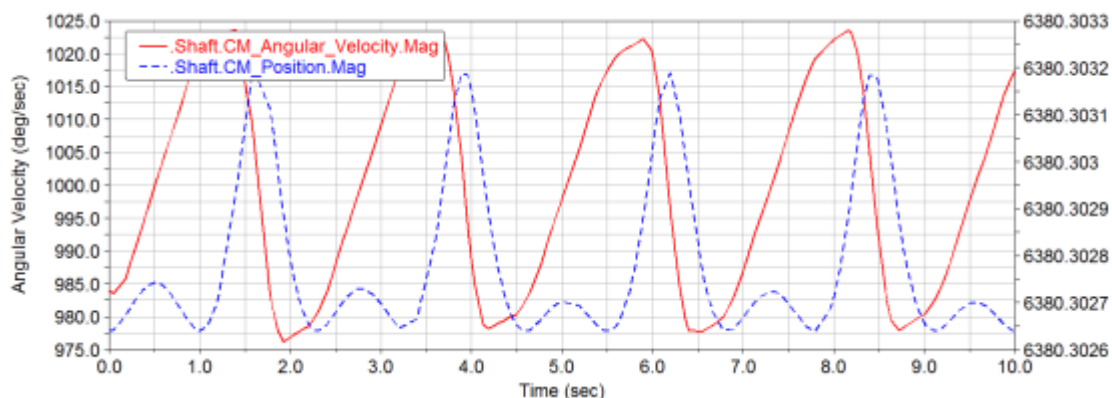


Рисунок 3. 8 Порівняння між переміщенням та кутовою швидкістю валу

Максимальна величина зміщення центра мас валу турбіни знаходиться на відмітці 1020, близько 1мм.

Далі вал парової турбіни формально перетворюється на гнучку частину, тому що коли система розглядається як жорстка частина, то вплив вібрації на неї не можна відстежувати в MSC ADAMS. На валу визначено чотири точки для контролю впливу різних зусиль на вал. Запропоновані місця розташування точок зображено на рисунку 3.9.

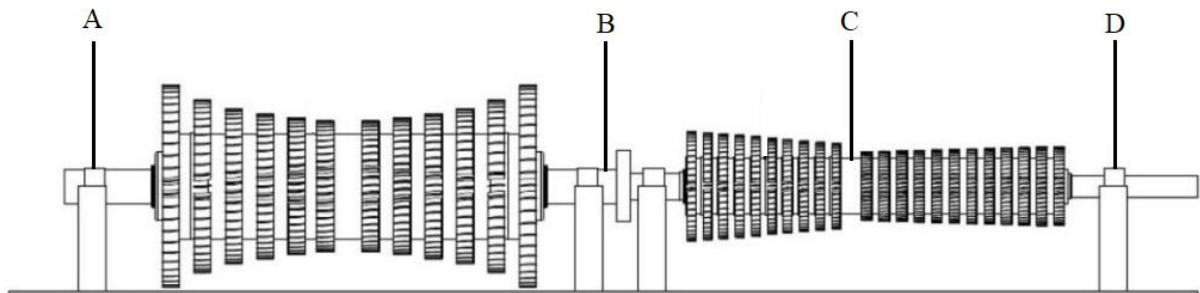


Рисунок 3. 9 Положення точок які використовуються для моделювання системи

Частина валу визначається як гнучке тіло в MSC ADAMS/View, а далі файл імпортується в MSC ADAMS/Flex. Тепер будуються графіки кутової деформації валу в заданих точках по всім трьом осям. На рисунку 3.10-3.13 зображені графіки кутової деформації для точок А-D по осі X.

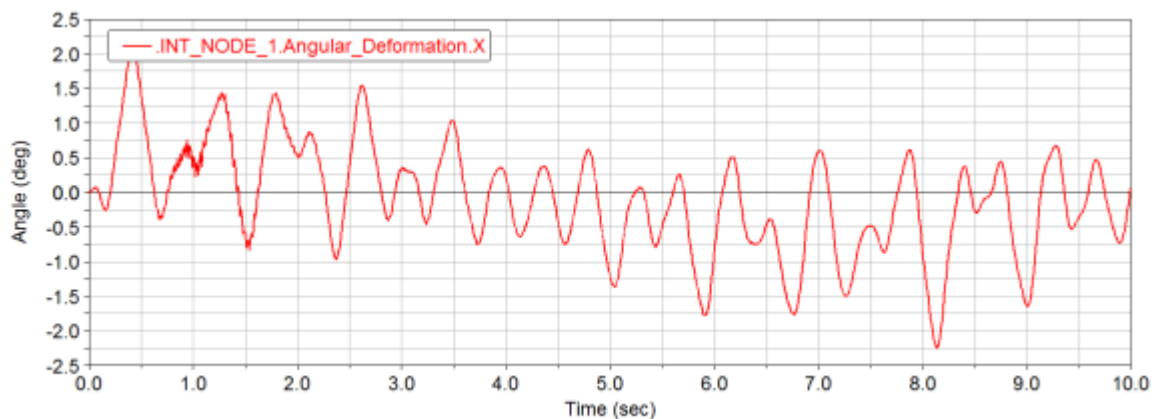


Рисунок 3. 10 Кутова деформація по осі X для точки А

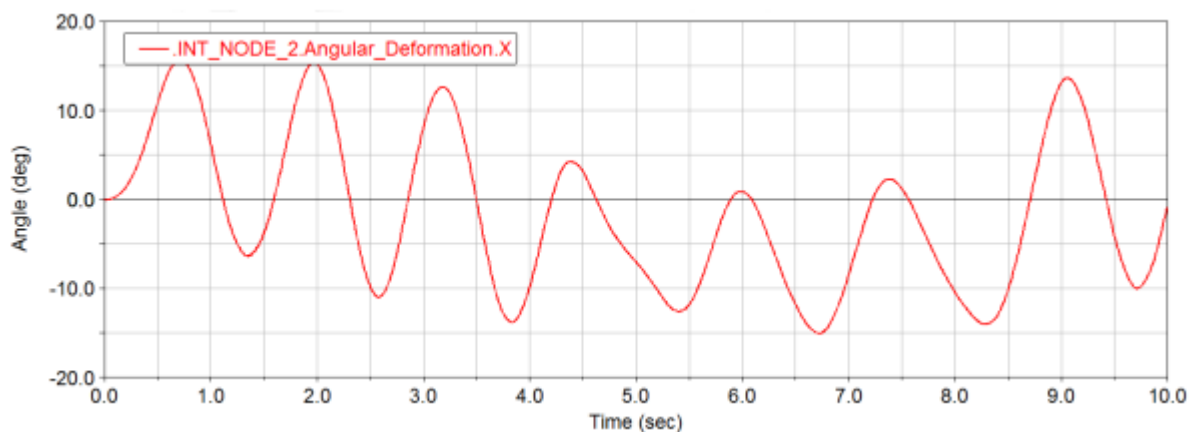


Рисунок 3. 11 Кутова деформація по осі X для точки В

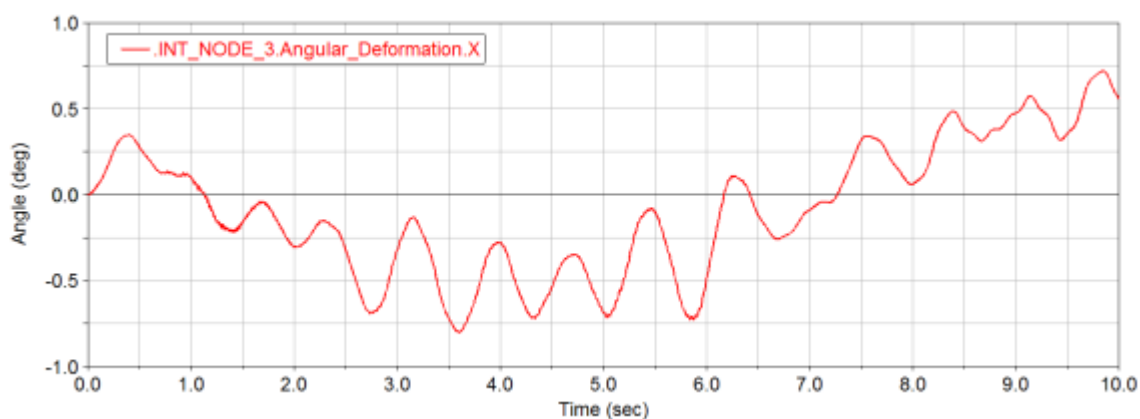


Рисунок 3. 12 Кутова деформація по осі X для точки С

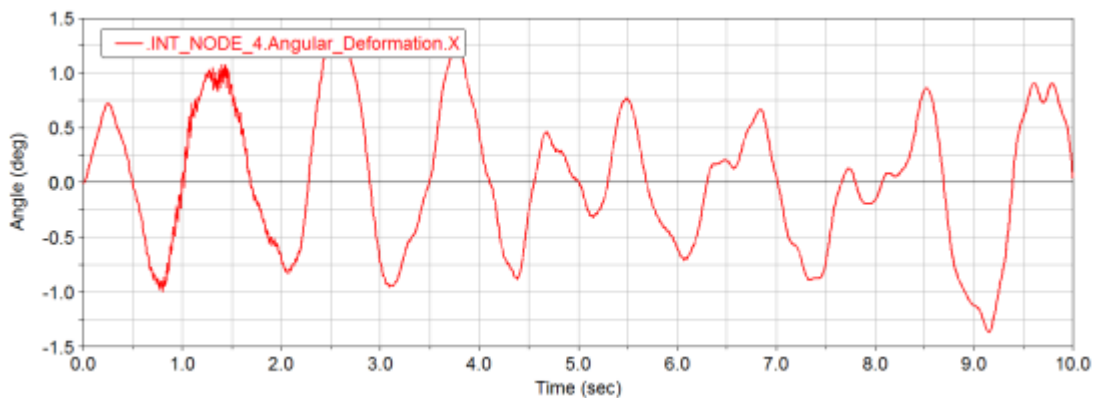


Рисунок 3. 13 Кутова деформація по осі X для точки D

Згідно з отриманими даними, максимальна кутова деформація виникає в точці В, а отже максимальний вплив коливань по осі X буде відбуватися в точці В. На рисунку 3.14-3.17 зображені графіки кутової деформації для точок А-D по осі Y.

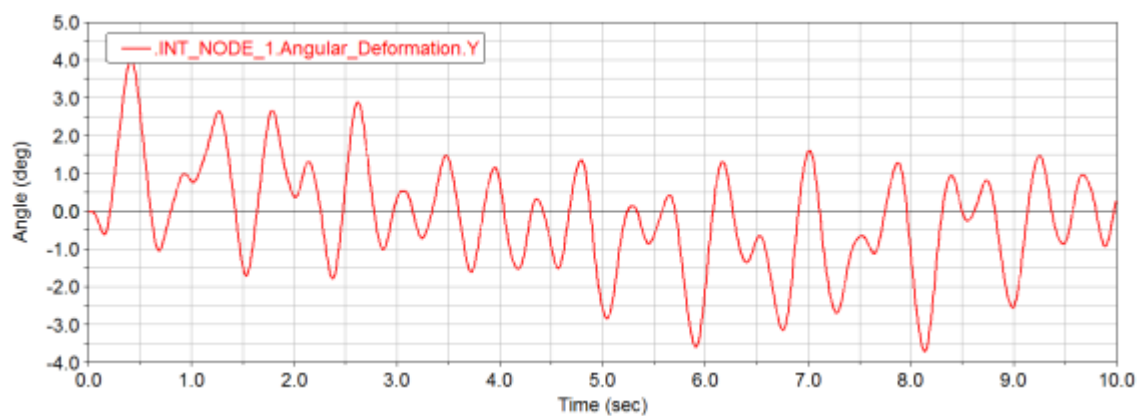


Рисунок 3. 14 Кутова деформація по осі Y для точки А

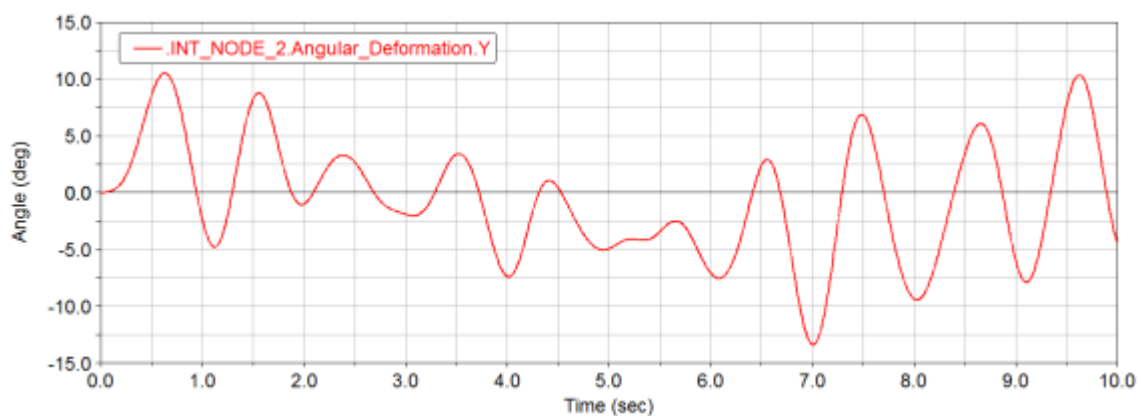


Рисунок 3. 15 Кутова деформація по осі Y для точки В

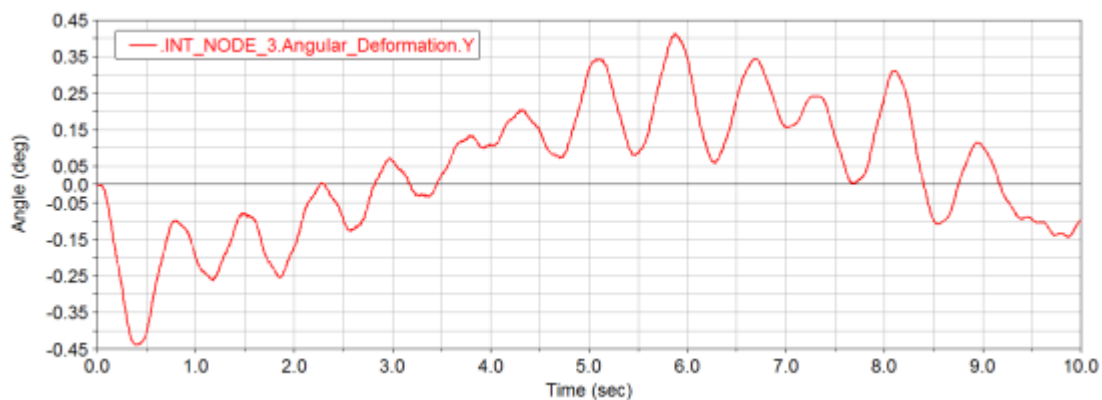


Рисунок 3. 16 Кутова деформація по осі Y для точки С

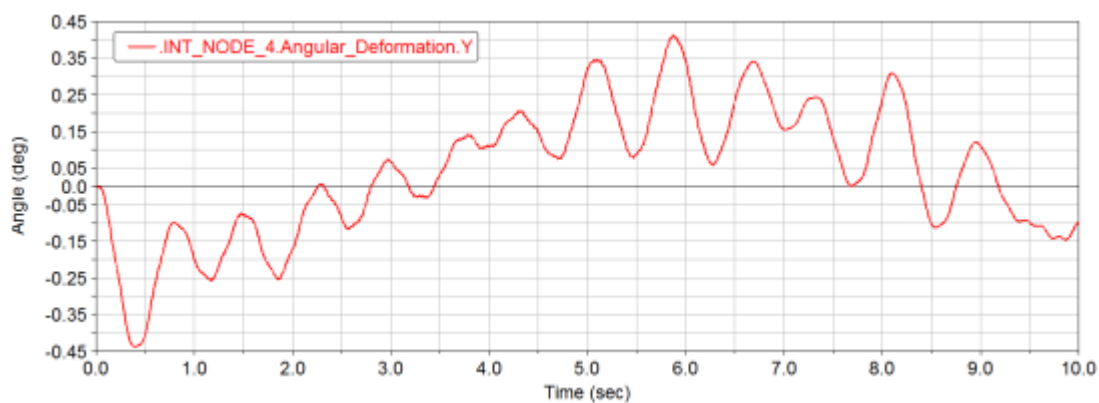


Рисунок 3. 17 Кутова деформація по осі Y для точки D

Мінімальна кутова деформація виникає в точках С та D, графіки для цих точок майже аналогічні, тому в цих точках вплив коливань має найменше значення. На рисунку 3.18-3.21 зображені графіки кутової деформації для точок А-D по осі Z.

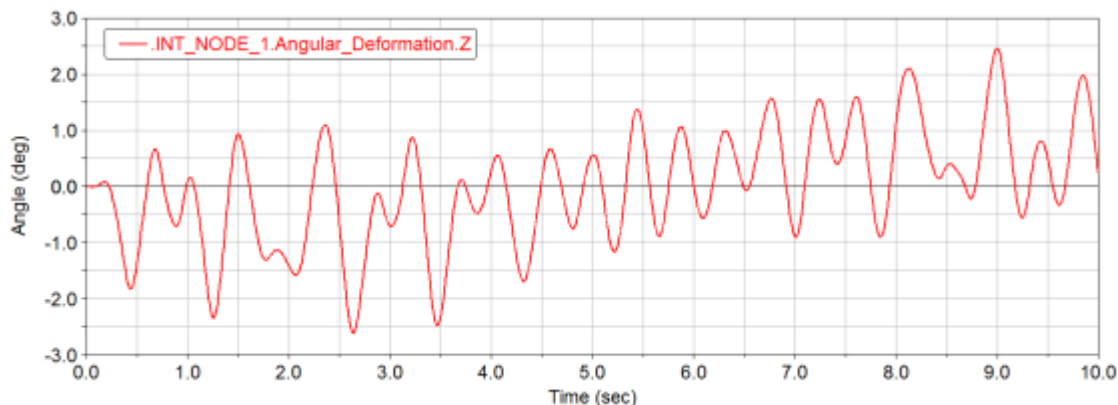


Рисунок 3. 18 Кутова деформація по осі Z для точки А

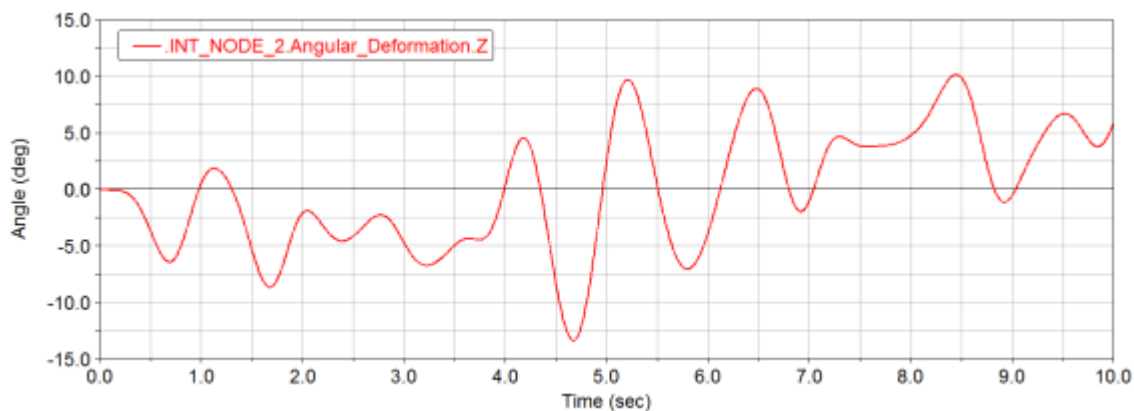


Рисунок 3. 19 Кутова деформація по осі Z для точки В

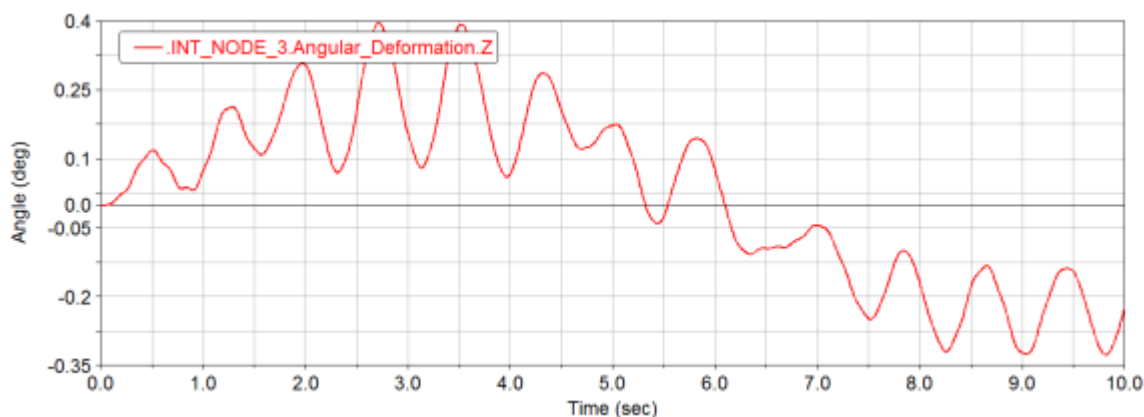


Рисунок 3. 20 Кутова деформація по осі Z для точки С

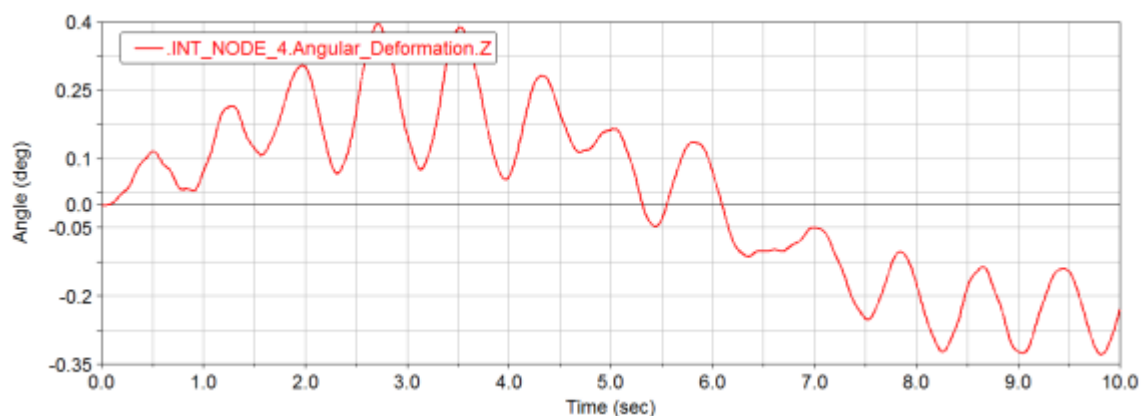


Рисунок 3. 21 Кутова деформація по осі Z для точки D

Система більш нестабільна в точці А по осі Z, це означає що ймовірність виникнення дефекту (тріщини) вздовж цієї позиції доволі висока. Далі будуються графіки поступальної деформації для всіх точок по трьох осях (рис. 3.22-3.33).

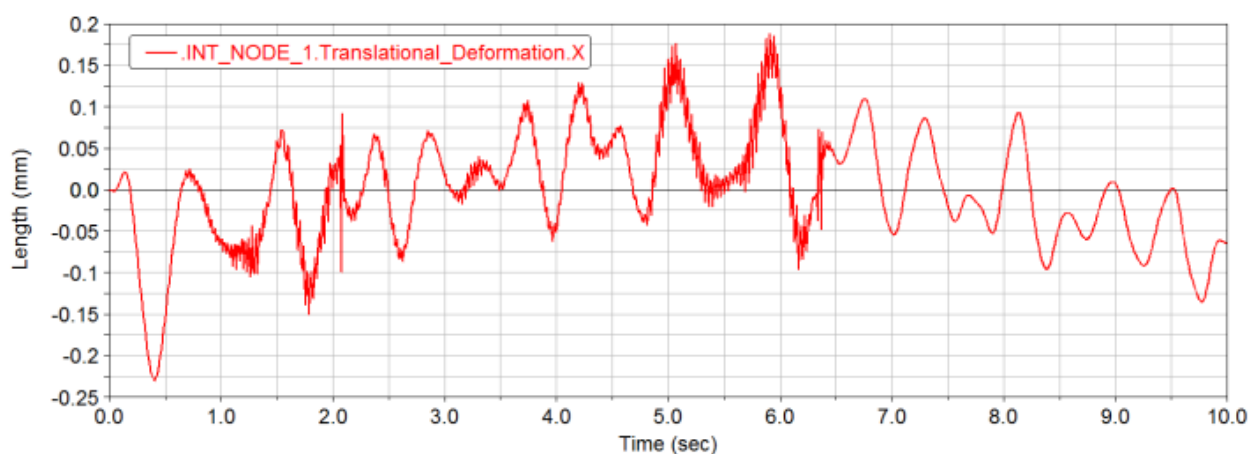


Рисунок 3. 22 Поступальна деформація по осі X для точки А

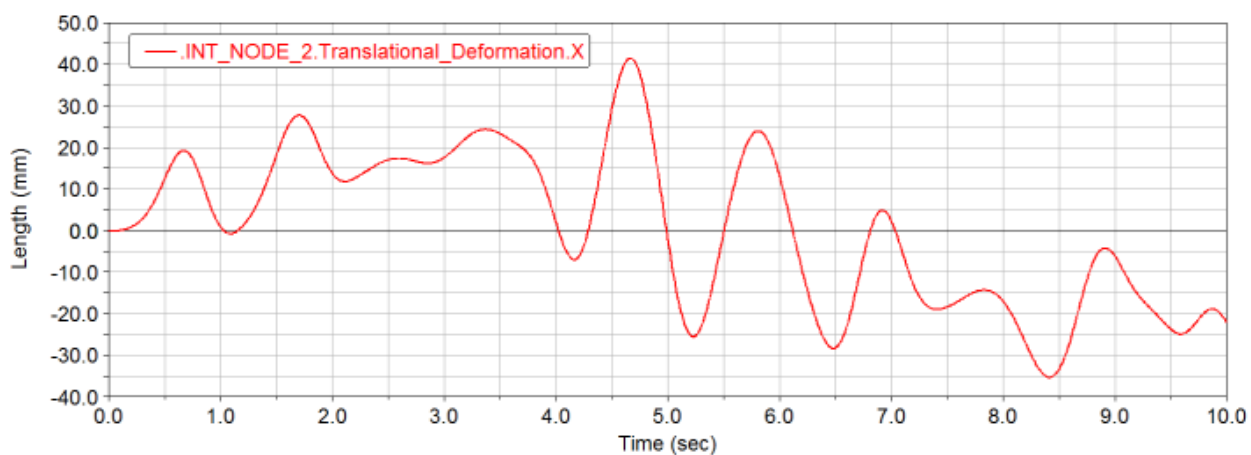


Рисунок 3. 23 Поступальна деформація по осі X для точки В

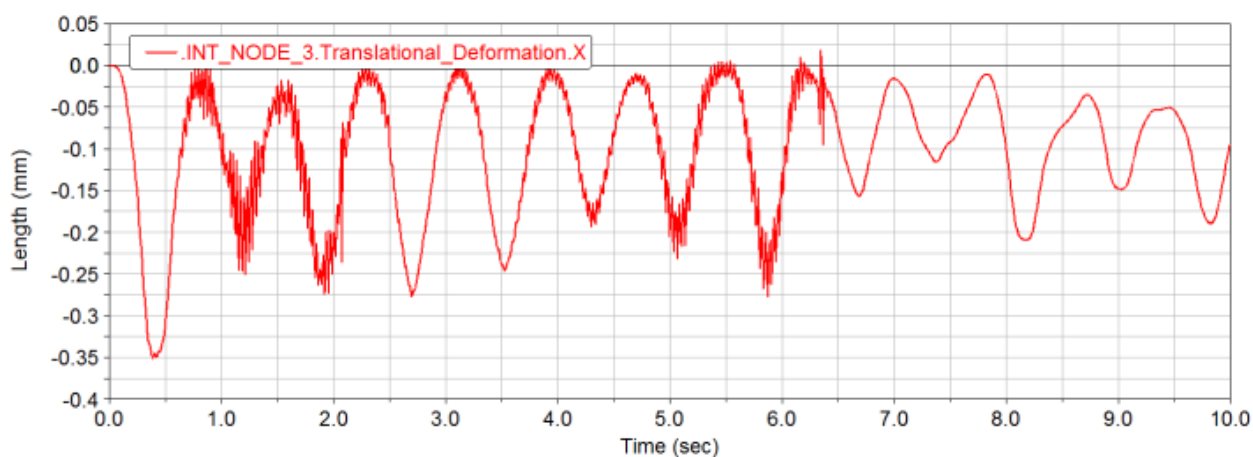


Рисунок 3. 24 Поступальна деформація по осі X для точки С

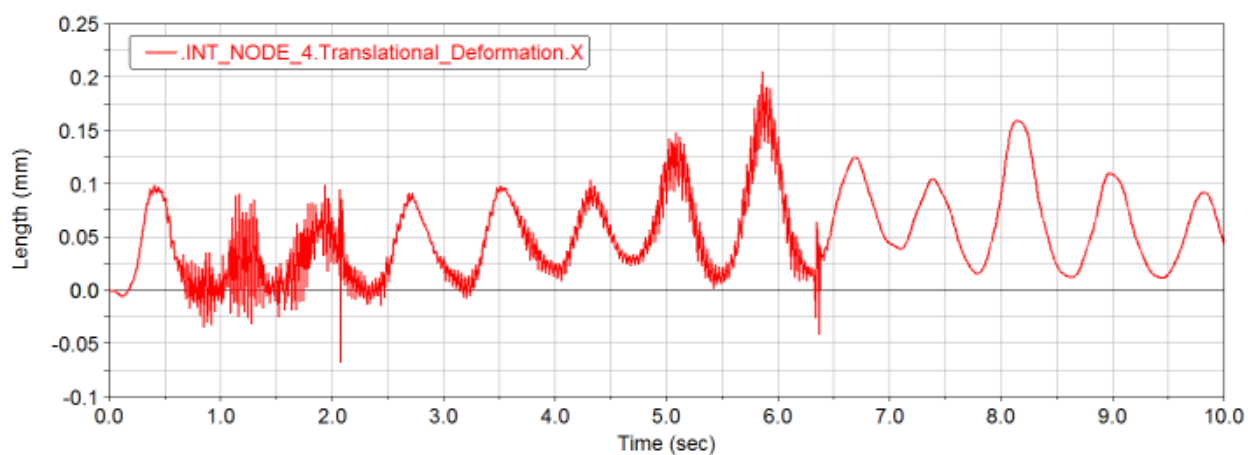


Рисунок 3. 25 Поступальна деформація по осі X для точки D

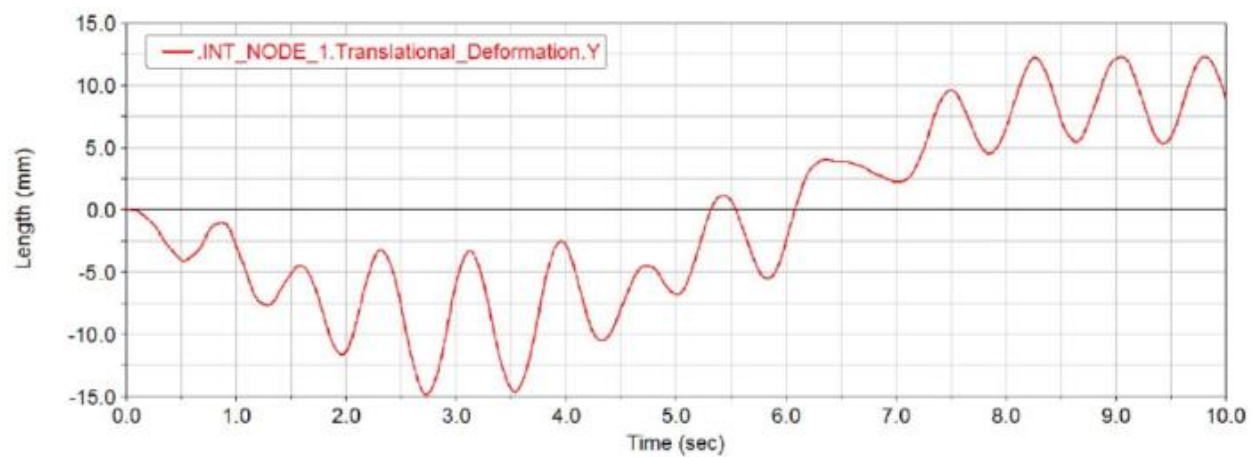


Рисунок 3. 26 Поступальна деформація по осі Y для точки А

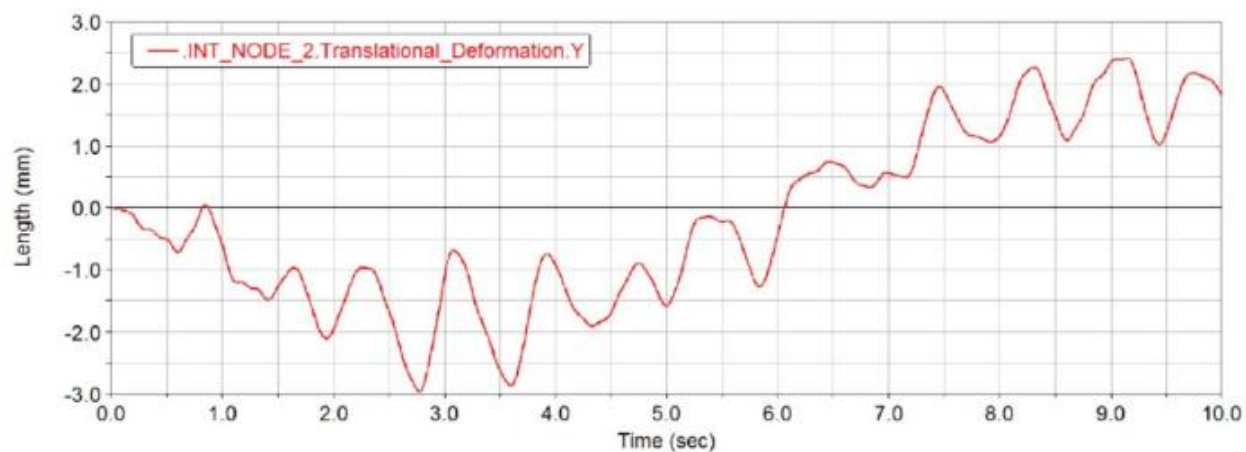


Рисунок 3. 27 Поступальна деформація по осі Y для точки В

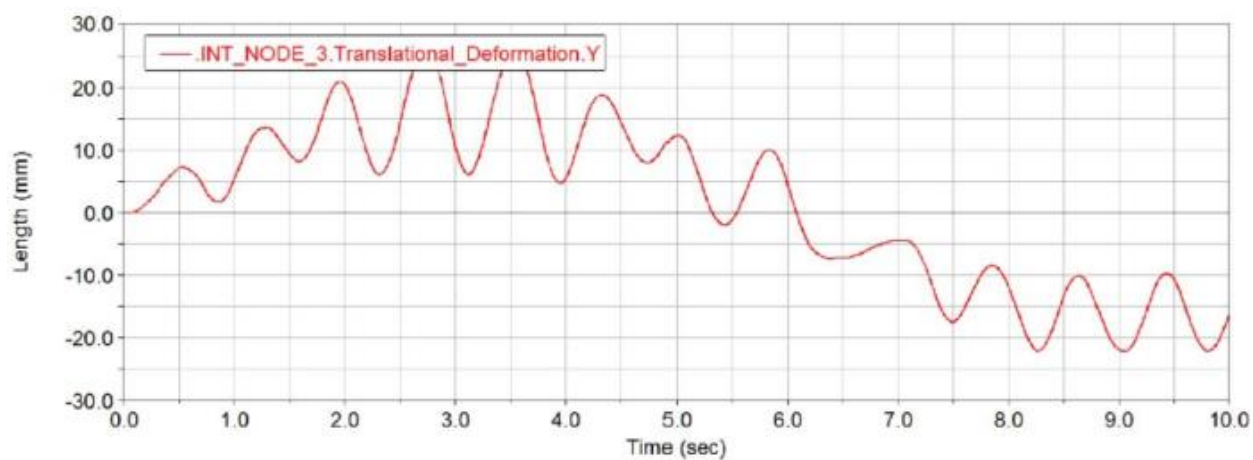


Рисунок 3. 28 Поступальна деформація по осі Y для точки С

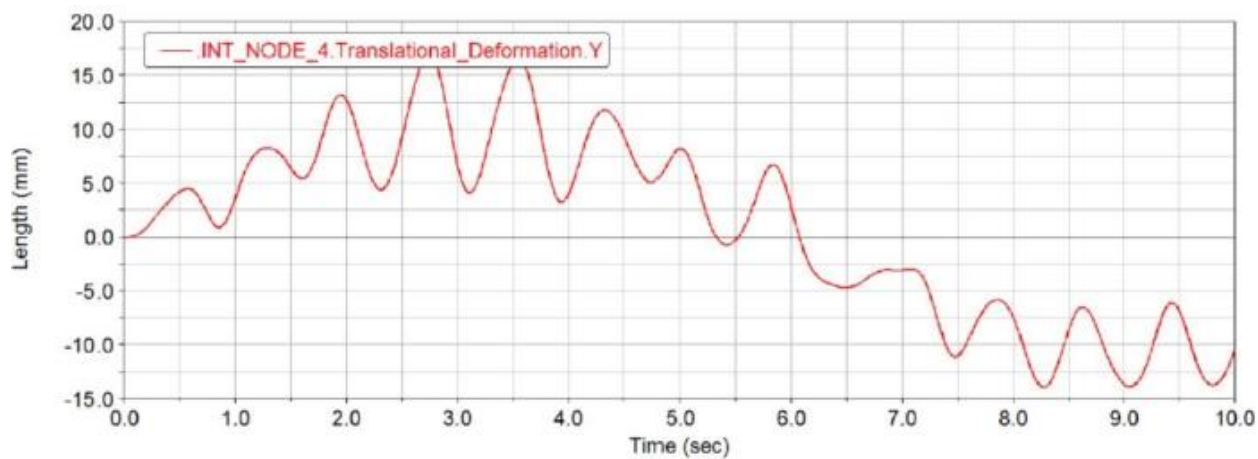


Рисунок 3. 29 Поступальна деформація по осі Y для точки D

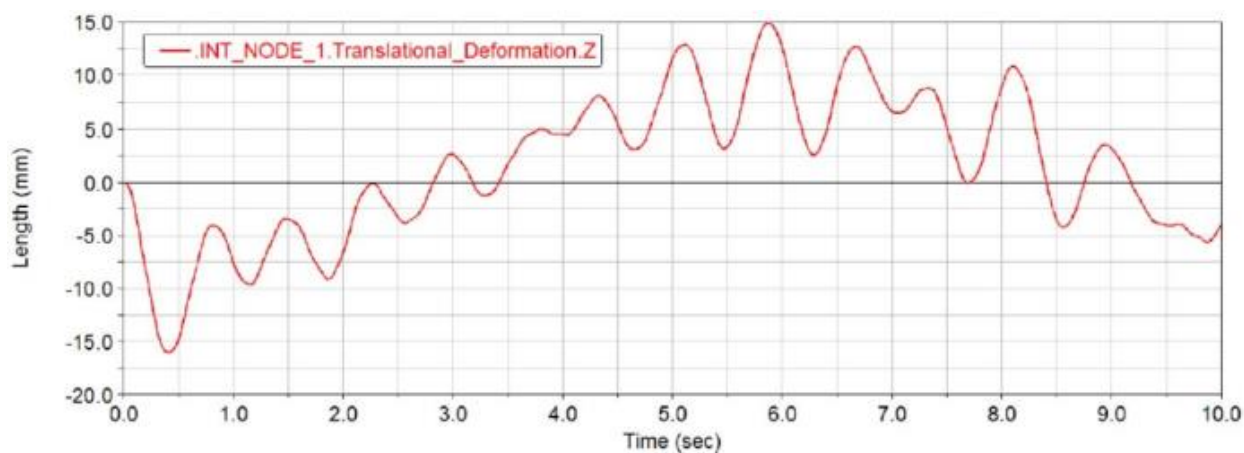


Рисунок 3. 30 Поступальна деформація по осі Z для точки А

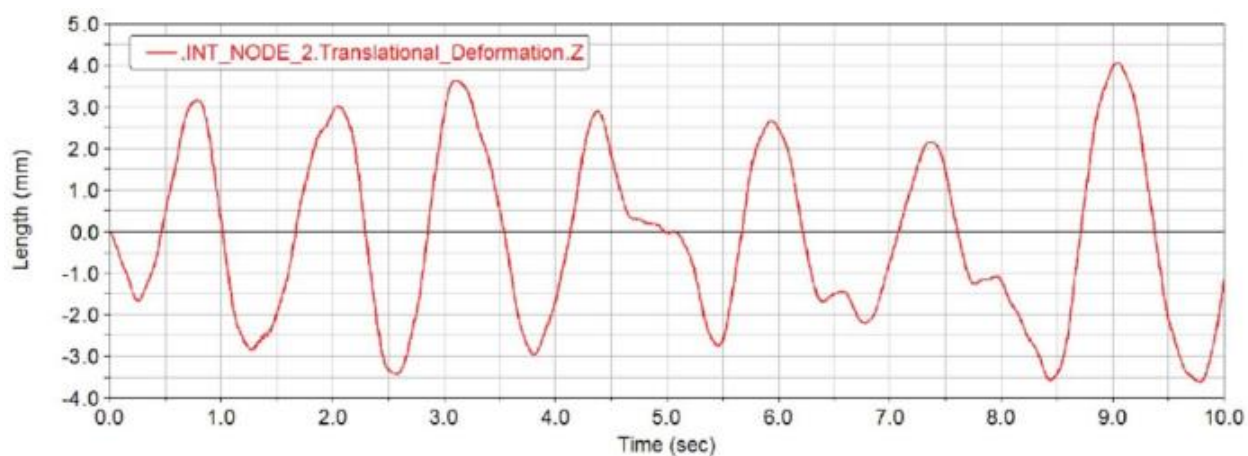


Рисунок 3. 31 Поступальна деформація по осі Z для точки В

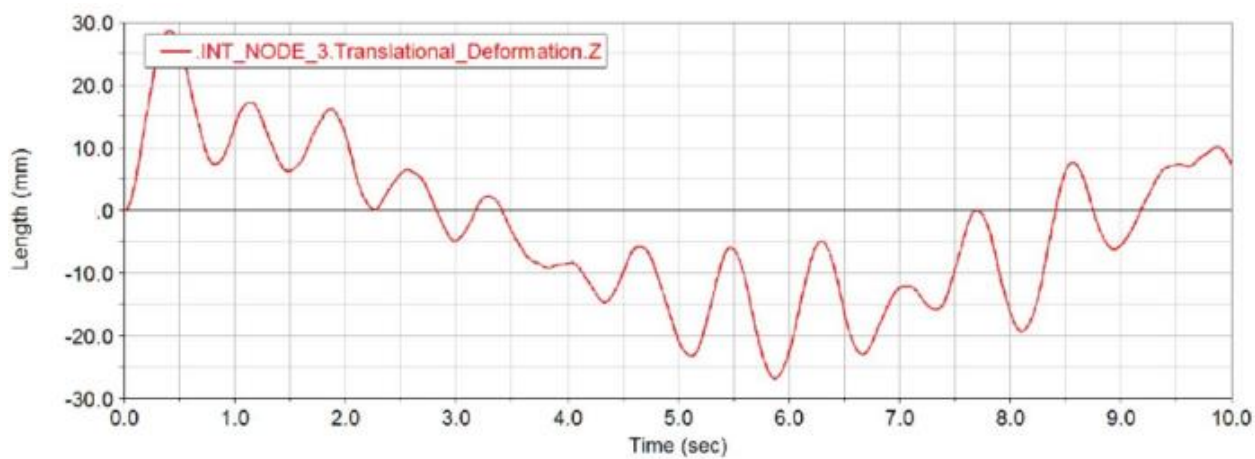


Рисунок 3. 32 Поступальна деформація по осі Z для точки С

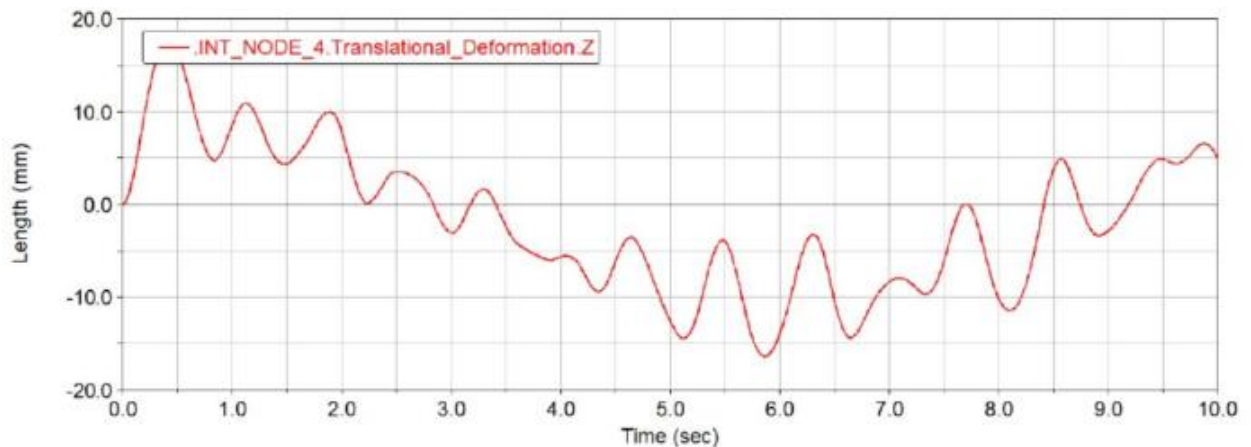


Рисунок 3. 33 Поступальна деформація по осі Z для точки D

Результати статичного аналізу показують стійкість валу турбіни до внутрішніх пошкоджень які можуть виникнути в результаті його експлуатації та впливу на нього різноманітних зовнішніх сил. Статичний аналіз дозволяє з'ясувати рівень схильності валу до різного типу деформацій, а також досить точно виявити місця ймовірних дефектів та їх характер.

3.1.2 Моделювання системи моніторингу та аналізу вібрації

Дані за датчика, а саме сигнал вібрації надходить на сервер безперервно в режимі реального часу. Основний аналіз сигналу відбувається в програмному забезпеченні LabVIEW. Обробка сигналу здійснюється в часовій та частотній області. На сьогоднішній день програмне забезпечення LabVIEW користується попитом саме для вирішення завдань аналізу сигналу. Дане ПЗ має вражаючий функціонал, а основною перевагою є покладена в основу графічна мова програмування, що значно спрощує процес моделювання. Від датчика ми отримуємо віброзміщення, віброшвидкість та віброприскорення.

Для початку потрібно отримати такі параметри як віброшвидкість та вібропереміщення. Для отримання віброшвидкості потрібно проінтегрувати віброприскорення, а для отримання вібропереміщення – інтегруємо віброшвидкість. Для цього використовується модель зображена на рисунку 3.34.

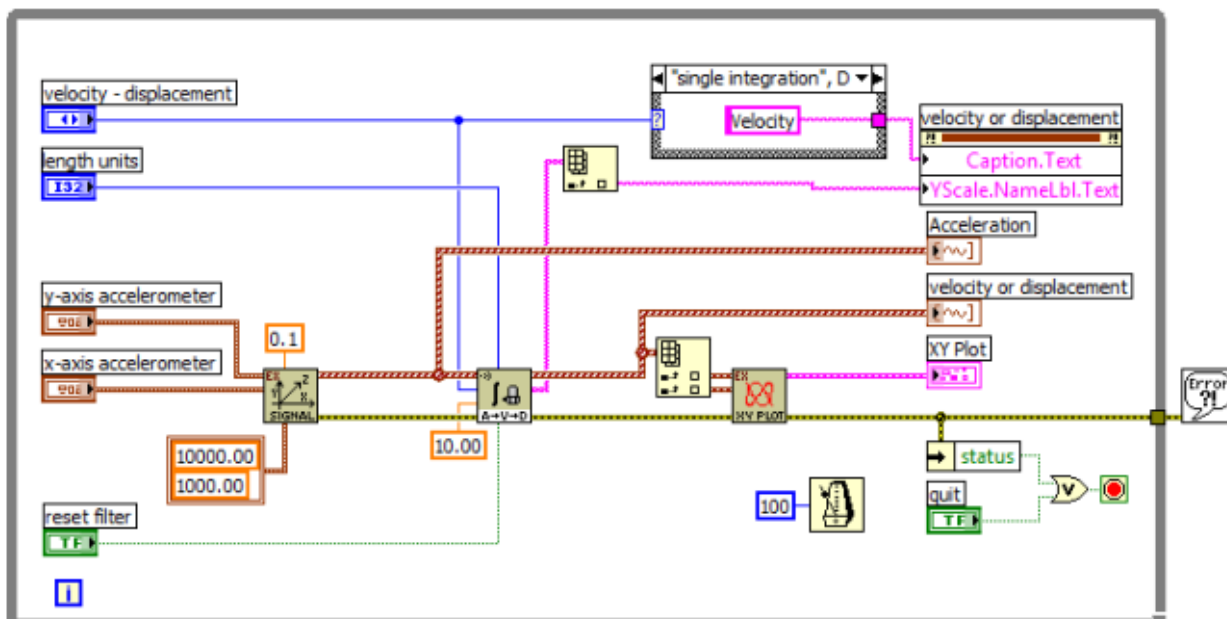


Рисунок 3. 34 Модель для інтегрування віброприскорення

Після обробки сигналу даною схемою можемо візуалізувати отримані дані вібрації по осях X та Y (рис. 3.35).

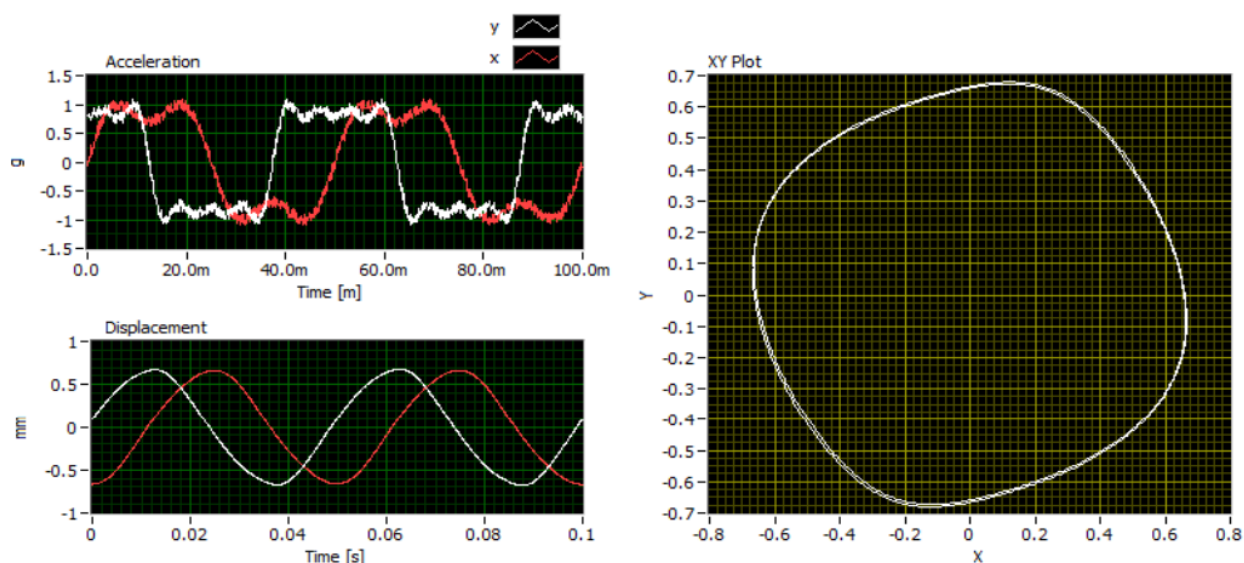


Рисунок 3. 35 Візуалізація отриманих після інтегрування параметрів вібрації (осі X та Y)

З графіка бачимо, що сигнал віброприскорення має явну флуктуацію. Це пов'язано з тим, що під час роботи турбоагрегату виникає безліч шумів, які не несуть корисної інформації, а лише спотворюють корисний вібраційний сигнал. Усунення даної проблеми буде розглянуто далі.

Основною задачею аналізу вібрації – отримати корисні параметри, на основі яких можна зробити висновки про стан обладнання. Використовується два основних види аналізу: аналіз в часовій області та аналіз в частотній області.

3.1.2.1 Аналіз вібрації в часовій області

Використовуючи засоби моделювання середовища LabVIEW розроблена модель для виконання аналізу в часовій області (рис. 3.36). Для виявлення дефектів встановлюються межі вібраційного сигналу, при відхиленні реального сигналу від заданих значень – можемо говорити про наявність дефекту агрегату. Ці значення можуть бути отримані шляхом аналізу вібрації справного обладнання

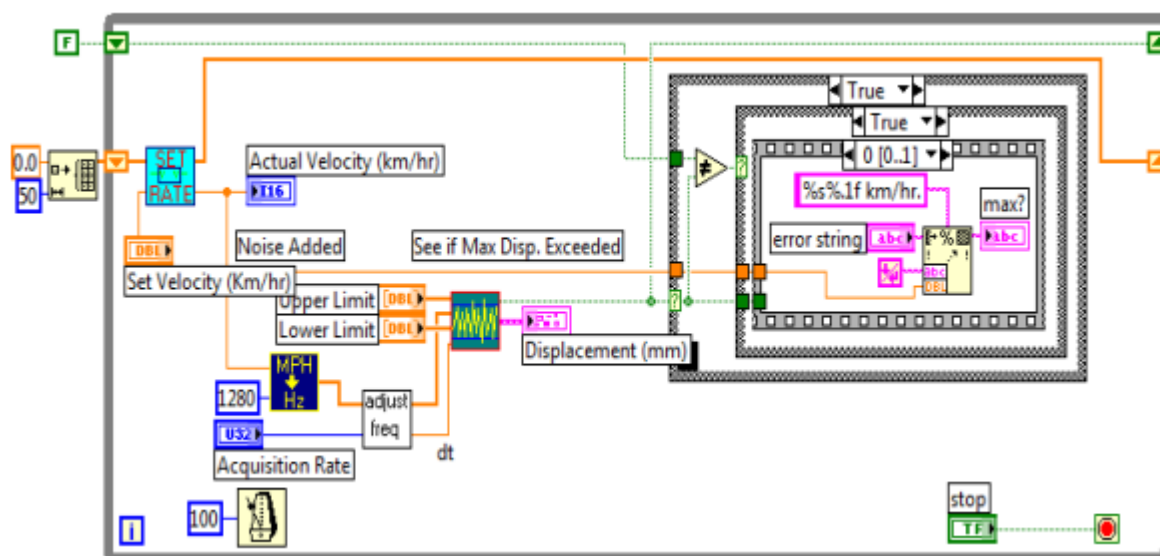


Рисунок 3. 36 Модель аналізу сигналу в часовій області

На рисунку 3.37 показано аналіз сигналу в часовій області. Використовуючи такий аналіз неможливо точно визначити тип несправності та її область. Для того щоб отримати більш детальну інформацію про тип дефекту та області його виникнення використовується аналіз вібраційного сигналу в частотній області (спектральний аналіз).

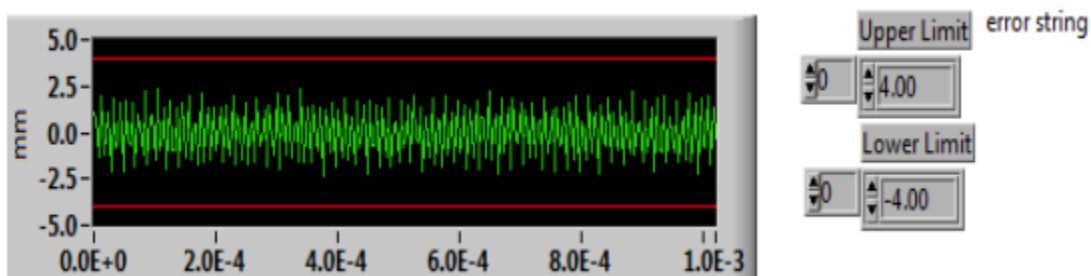


Рисунок 3. 37 Аналіз сигналу в часовій області

3.1.2.2 Аналіз вібрації в частотній області

Для переходу до частотної області використовується швидке перетворення Фур'є [23,24]. Модель обробки сигналу в частотній області зображена на рисунку 3.38.

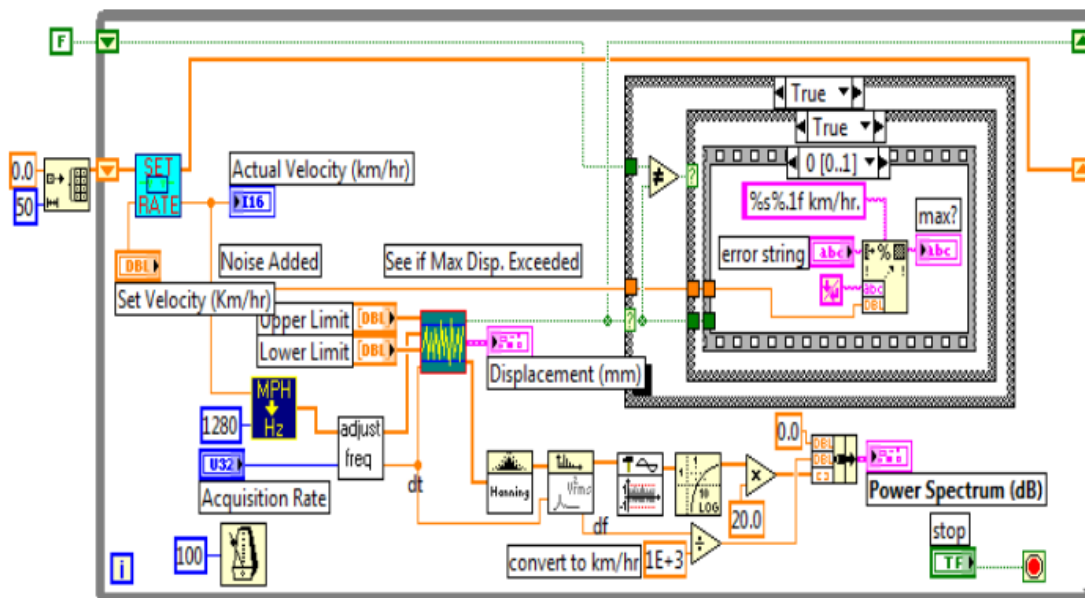


Рисунок 3. 38 Модель аналізу сигналу в частотній області

Порівняння аналізу вібраційного сигналу в часовій та частотній областях зображено на рисунку 3.39.

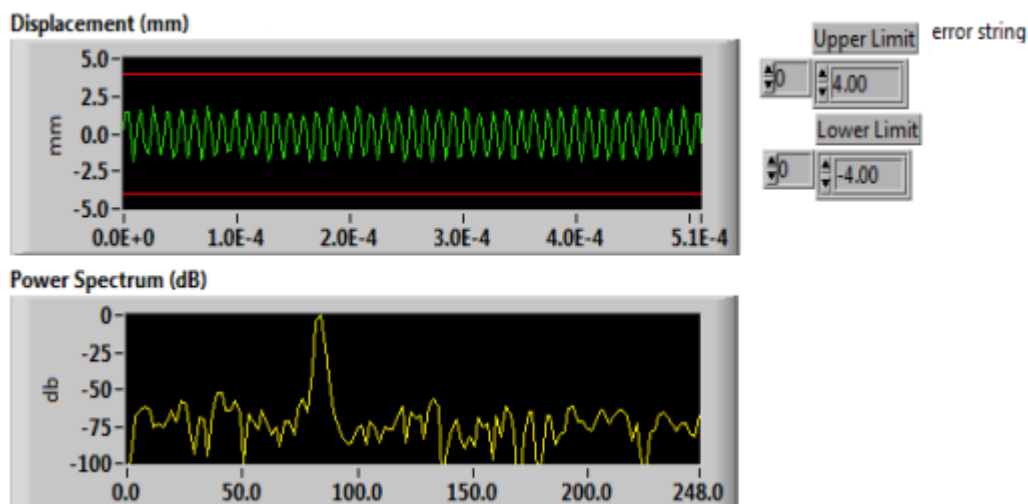


Рисунок 3. 39 Порівняння аналізу в часовій та частотній областях

Проводячи спектральний аналіз отриманий графік не має форму синусоїди, ми бачимо піковий графік. Саме тому чітко видно місця з аномальною вібрацією. Загалом аналіз спектру надає більш точну інформацію про тип вібраційного

сигналу, тим самим дозволяє більш точно визначити область збою та ступінь несправності.

На рисунку 3.40 зображені основні компоненти для запропонованої моделі вібродіагностики для парової турбіни.

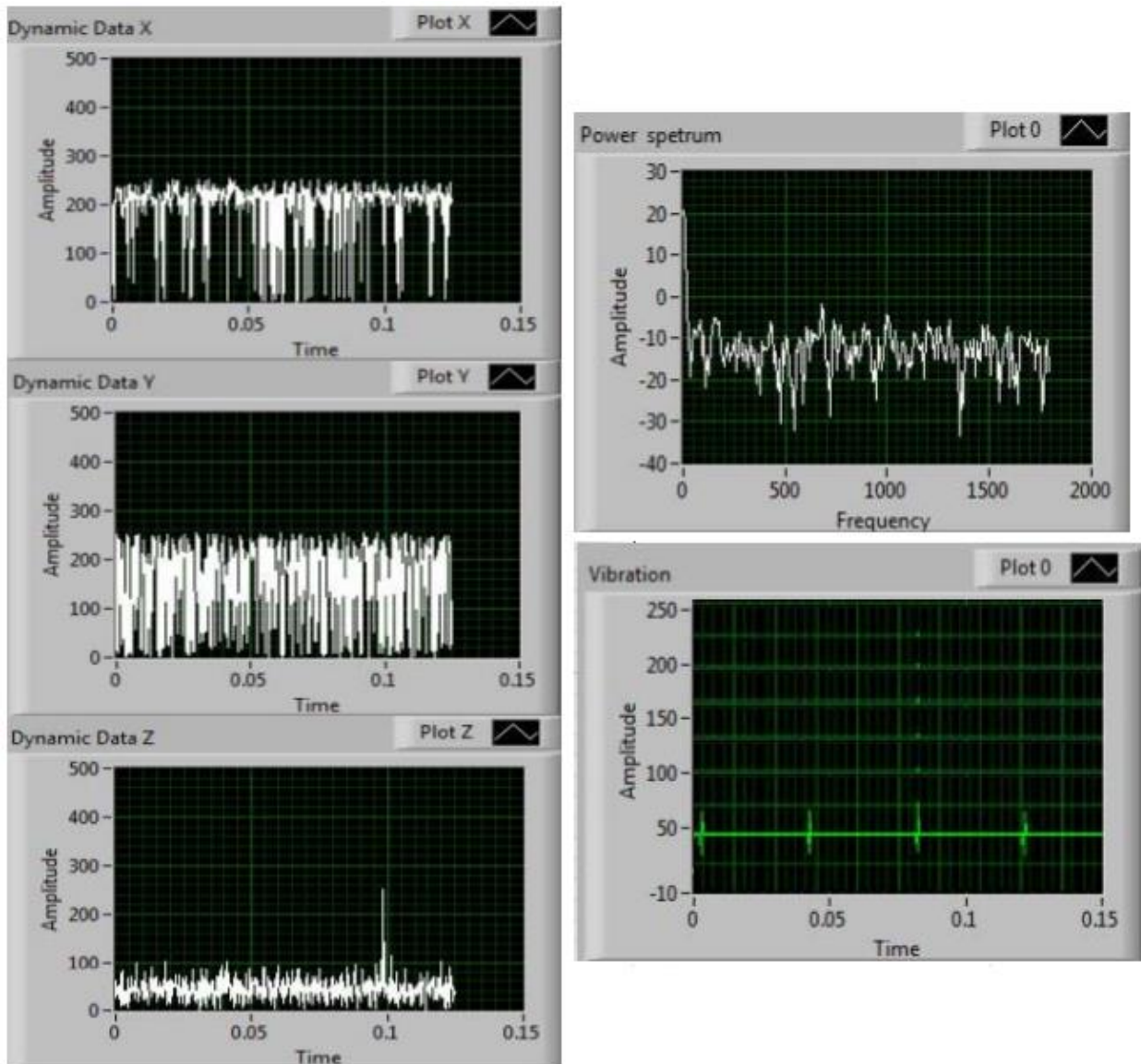


Рисунок 3. 40 Компоненти системи вібродіагностики парової турбіни

3.1.3 Частотно-часовий аналіз вібрації в умовах промислового шуму

Обладнання до якого застосовується аналіз стану – є промисловим і знаходиться у різних промислових цехах та об'єктах, де знаходиться величезна кількість об'єктів які можуть генерувати шуми, які спотворюють корисний для аналізу сигнал [12]. Існує безліч методів вирішення цієї проблеми, але всі вони засновані на складному математичному аналізі. В даній роботі буде

запропоновано більш простий, в той же час ефективний метод, який базується на частотно-часовому аналізі.

Перетворення Гільберта

Для виявлення дефектів використовується найбільш поширений метод – аналіз огинаючої. Аналіз огинаючої спочатку виконується шляхом фільтрації із смугою частот, що містить резонансну частоту, збуджену дефектами. Огинаюча витягується за допомогою перетворення Гільберта відфільтрованого сигналу [25,26], а далі виконується аналіз спектру огинаючої.

Для сигналу $x(t)$, аналітичний сигнал $z(t)$ можна виразити рівнянням 3.1.

$$z(t) = x(t) + jx^*(t), \quad (3.1)$$

Коли сигнал $x(t)$ виражається як аналітичний сигнал, його можна розширити до комплексного вигляду, що полегшить аналіз амплітуди та фази. Аналітичні сигнали можна використовувати для демодуляції амплітудно-модульованих та частотно-модульованих сигналів. Перетворення Гільберта для сигналу виражається рівнянням 3.2.

$$x^*(t) = \left(\frac{1}{\pi t}\right) x(t) = 1/\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau, \quad (3.2)$$

Рівняння 3.3 являє собою перетворення Гільберта в частотній області, при цьому фаза позитивних частот зміщується на -90° , а негативних на $+90^\circ$ [13,14].

$$X^*(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) X(\omega), \quad -j \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} j, & \omega > 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ -j, & \omega < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Вібраційні сигнали – циклостационарні процеси, вони поділяються на процеси першого, другого та вищого порядків. Процес першого порядку – детермінований, а процес другого порядку – стохастичний. Відомо, що сигнали, викликані дефектами, відповідають процесу другого порядку [15,16]. Побудуємо сигнали детермінованого та стохастичного процесу (рис. 3.41).

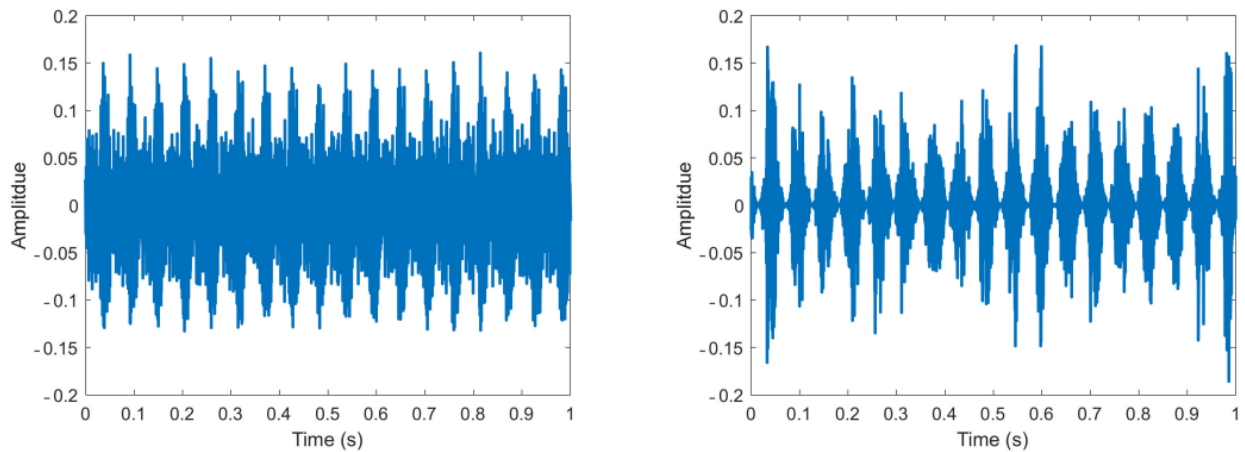


Рисунок 3. 41 Циклостационарна модель сигналу, детермінована та стохастична частина

Співвідношення 3.4 та 3.5 описують нормальний та дефектний сигнали. Рівняння 3.4 – це сума детермінованої частини $d(t)$, та білого шуму $\omega(t)$, це сигнал від справного механізму, без дефектного сигналу.

Рівняння 3.5 – це сума детермінованої частини $d(t)$, стохастичної частини $s(t)$ та білого шуму $\omega(t)$, сигнал який виникає в несправному обладнанні.

$$x_{norm}(t) = d(t) + \omega(t), \quad (3.4)$$

$$x_{fault}(t) = d(t) + s(t) + \omega(t), \quad (3.5)$$

На рисунку 3.42 зображено сигнали виражені рівняннями 3.4 та 3.5 (нормальний та дефектний). Бачимо що в часовій області нормальний та дефектний сигнал майже ідентичні, тому побудуємо ці сигнали в частотній області (рис.3.43).

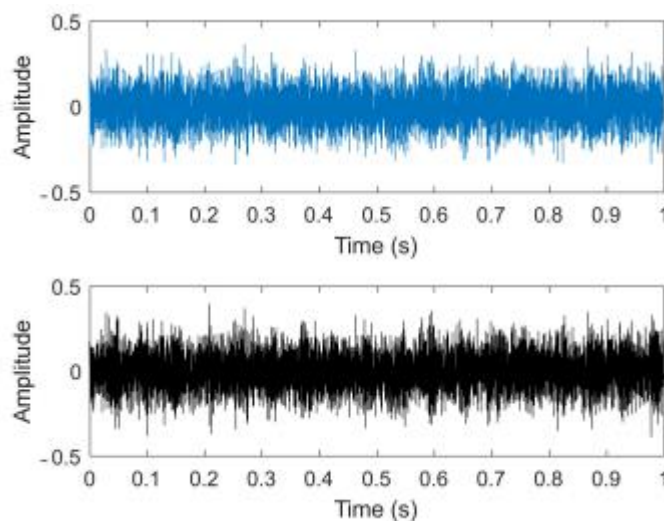


Рисунок 3. 42 Модель в часовій області нормального сигналу (синій) та сигналу з дефектом (чорний)

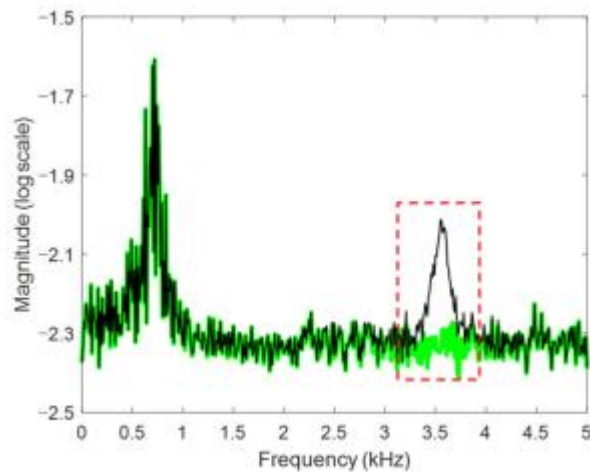


Рисунок 3. 43 Модель в частотній області нормального сигналу (зелений) та сигналу з дефектом (чорний)

Бачимо сигнал з дефектом показує чітку різницю в смузі 3,4-3,7 кГц.

На рисунку 3.44 зображено відфільтровані сигнали (смуга частот отримана за допомогою «куртограми»). Бачимо що сигнал несправної моделі майже такий самий як на рисунку 3.41 (правий графік).

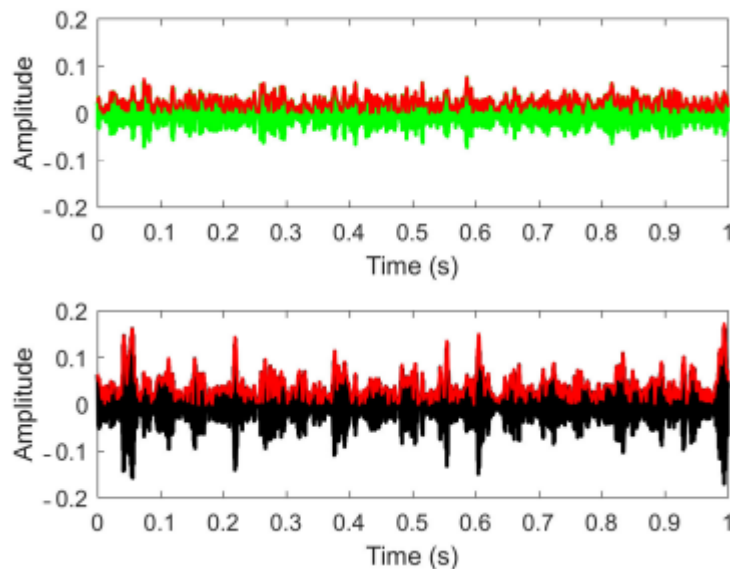


Рисунок 3. 44 Моделі в часовій області нормального сигналу та сигналу з дефектом, із смуговим фільтруванням

На рисунку 3.45 показані спектри отримані за допомогою перетворення Фур'є для двох сигналів. Значний показник потужності спектра свідчить про великий ступінь флуктуації та амплітудної модуляції, іншими словами, дуже помітна ознака дефекту.

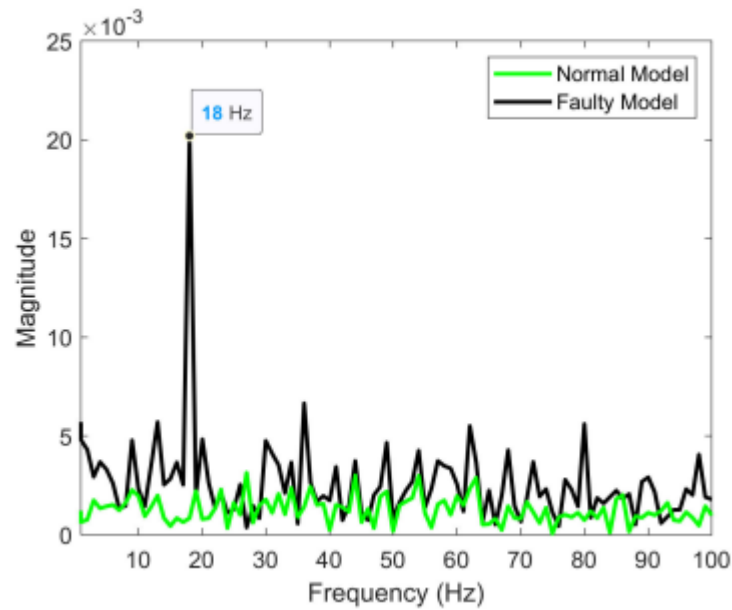


Рисунок 3. 45 Спектр сигналу

Вище було розглянуто загальний метод виявлення дефектів з використанням аналізу огинаючої для випадків, коли дефектний сигнал є періодичним. Однак, в середовищі, в якому на практиці реалізується виявлення несправностей, обумовлено наявністю шумів. Непередбачуваний шум призводить до погіршення точності аналізу сигналу. Зокрема, імпульсний шум впливає на широкий діапазон частот, що ускладнює виявлення дефектів агрегату. Рівняння 3.6 та 3.7 представляють нормальний та дефектний сигнали за наявності імпульсних шумів $i(t)$. $i(t)$ моделюється як непрямокутна хвиля з коротким часом τ .

$$x'_{norm}(t) = d(t) + \omega(t) + i(t), \quad (3.6)$$

$$x'_{fault}(t) = d(t) + s(t) + \omega(t) + i(t), \quad (3.7)$$

На рисунку 3.46 зображений сигнал в часовій області з додаванням імпульсного шуму (доданий на відмітці 0,1с), на рисунку 3.47 зображений цей сигнал у частотній області. Порівнюючи рис.3.45 та рис. 3.47, бачимо що для дефектного сигналу базова лінія спектру збільшена, а пік спектру менш чіткий.

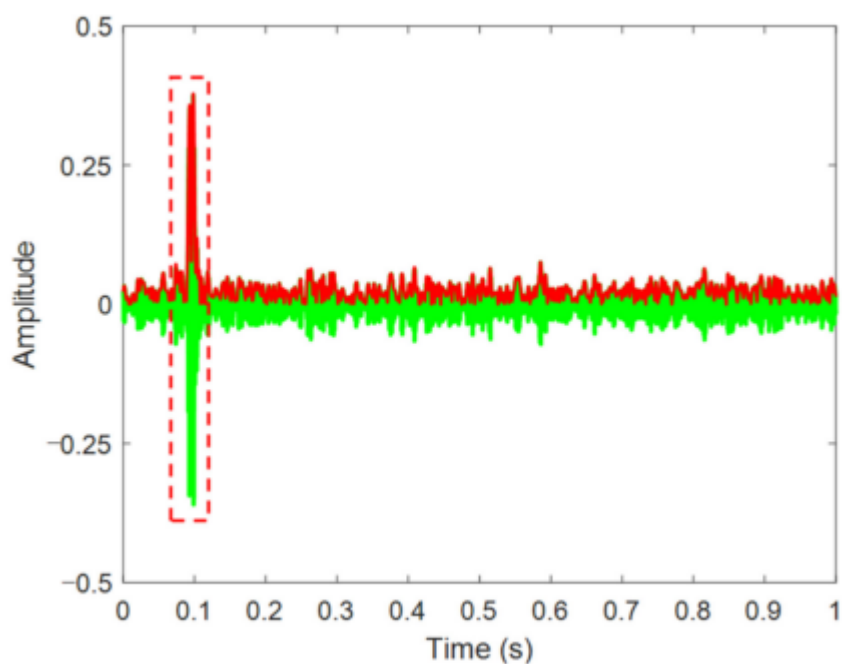


Рисунок 3. 46 Сигнал в часовій області з додаванням імпульсного шуму в одній точці

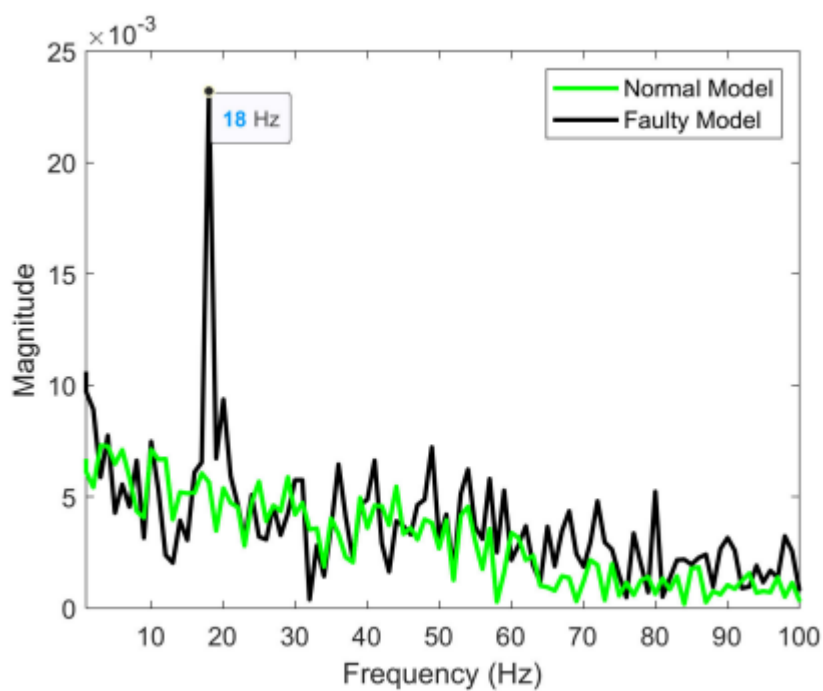


Рисунок 3. 47 Сигнал в частотній області з додаванням імпульсного шуму в одній точці

На рисунку 3.48 зображено сигнал в часовій області з додаванням імпульсного шуму в чотирьох місцях.

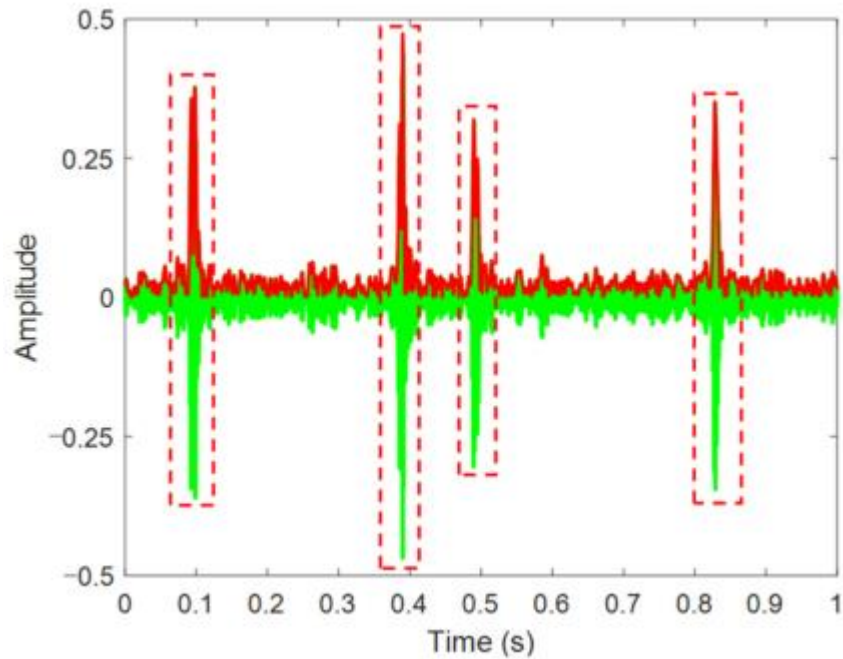


Рисунок 3. 48 Сигнал в часовій області з додаванням імпульсного шуму в чотирьох точках

На рисунку 3.49 зображено сигнал в частотній області з додаванням імпульсного шуму в чотирьох точках. Червона лінія показує дефектний сигнал без імпульсного шуму. Порівнюючи з рис. 3.47, де імпульсний шум додається в одній точці, видно, що пік спектру дефектного сигналу складніше відрізнити від піку нормального сигналу. Дуже важко розрізнити пікову величину дефектного сигналу без імпульсного шуму (червона пунктирна лінія) та пікову величину нормального сигналу з чотирма імпульсними шумами (зелена лінія). Ця неоднозначність виникає через те, що враховується не тільки збільшення базової лінії імпульсним шумом, а й періодичність імпульсного шуму.

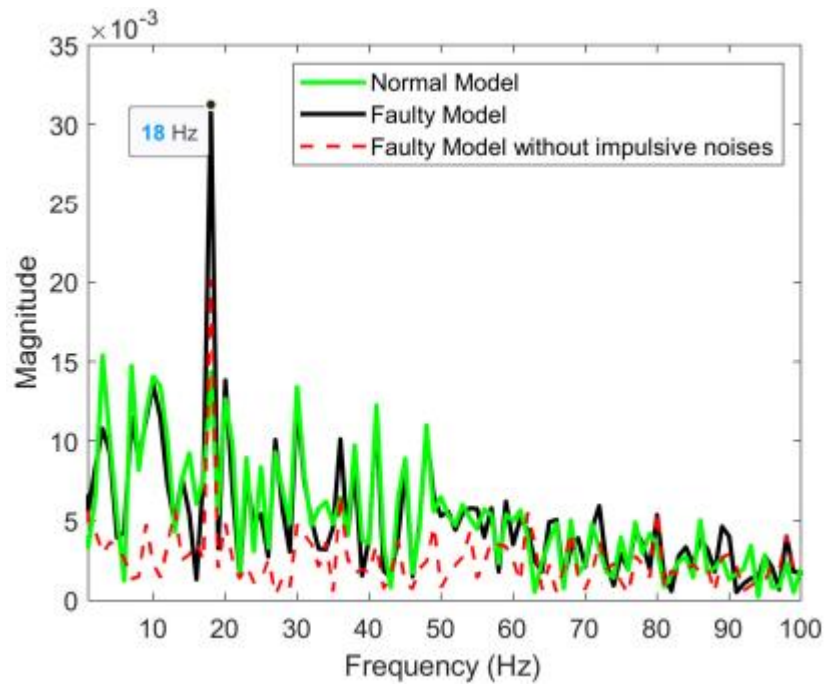


Рисунок 3. 49 Сигнал в частотній області з додаванням імпульсного шуму в чотирьох точках

Результат моделювання показав, що аналіз сигналу стає менш ефективним у випадку наявності імпульсного шуму. Для того щоб отримати задовільні результати аналізу сигналу з імпульсними шумами, слід використовувати частотно-часовий аналіз, такий як віконне перетворення Фур'є або аналіз вейвлет-перетворення [22]. На рисунку 3.50 показано віконне перетворення Фур'є з часовим вікном довжиною 0,33с. На рисунку 3.51 зображена залежність величини частоти обертання від часу. Оскільки застосовується коротке часове вікно – явно виражена невелика затримка. Бачимо, що нормальна та дефектна моделі чітко розрізняються.

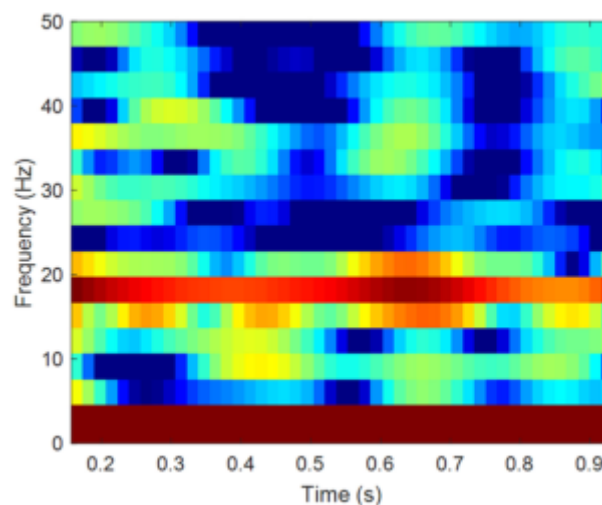


Рисунок 3. 50 Віконне перетворення для несправної моделі

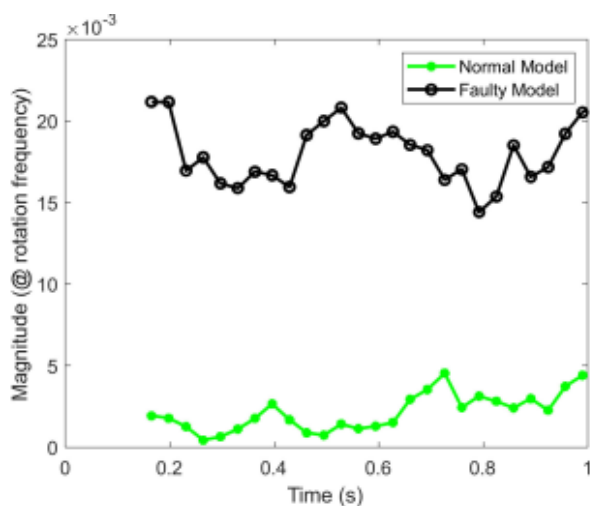


Рисунок 3. 51 Величина на частоті обертання 18Гц з часовим вікном 0,33с

На рисунку 3.52 показано віконне перетворення для дефектної огиноючої з додаванням імпульсного шуму один раз, на рисунку 3.53 залежність величини частоти обертання від часу, для дефектної моделі.

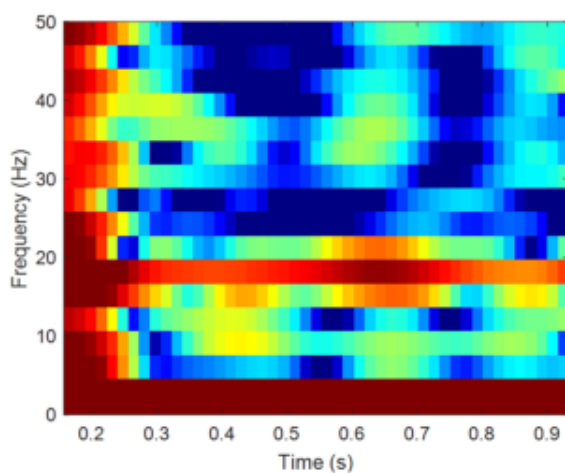


Рисунок 3. 52 Віконне перетворення для несправної моделі з додаванням шуму один раз

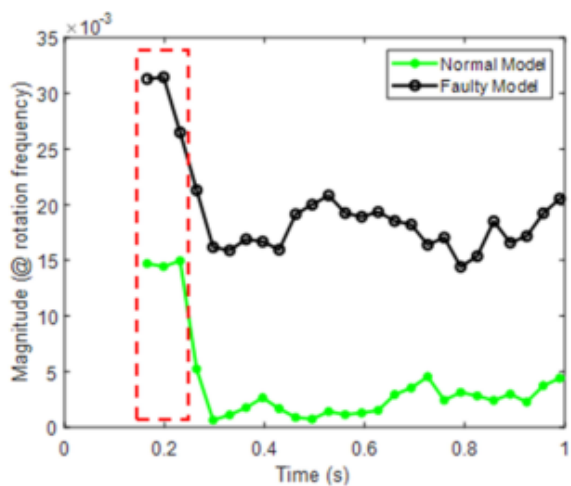


Рисунок 3. 53 Величина на частоті обертання 18Гц з часовим вікном 0,33с (додавання шуму один раз)

Порівнюючи нормальну та несправні моделі, важко встановити поріг, щоб відрізнити нормальну модель від несправної, оскільки на відмітці 0,1 с додано імпульсний шум. На рисунку 3.54 зображено порівняння пікових значень для нормальної та дефектної моделі з додаванням імпульсного шуму в чотирьох точках. Області, позначені червоним пунктиром – ділянки на які впливають імпульсні шуми.

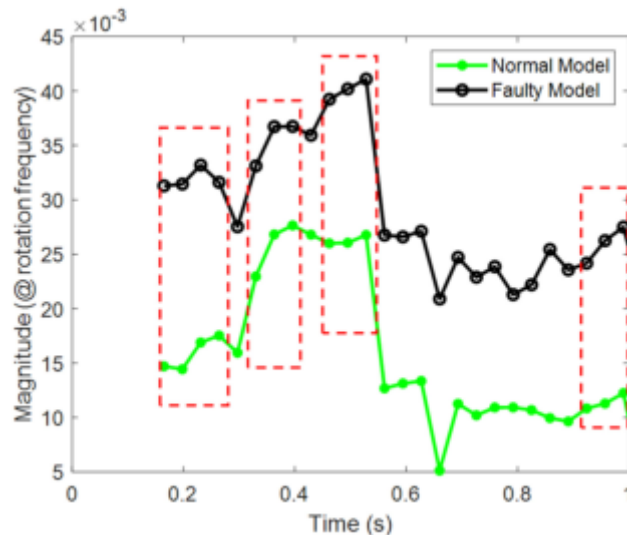


Рисунок 3. 54 Величина на частоті обертання 18Гц з часовим вікном 0,33с (додавання шуму в чотирьох точках)

Рисунок 3.54 дуже «контрастує» з рисунком 3.51, на якому відсутні шуми. Визначити деякий поріг для розрізнення нормальної та дефектної моделі доволі складно, більш того, в реальних умовах шуми не виникають в один і той самий час, а також мають різну величину.

На рисунку 3.55 зображено спектр сигналу на відмітці 0,2с з рисунка 3.52, який спотворений імпульсним шумом, а також спектр сигналу на відмітці 0,7с, на який шум має несуттєвий вплив. Порівнюючи ці два спектри, імпульсний шум значно збільшує базову лінію спектру, незалежно від того чи присутній дефект. Відносна величина піку (викликана дефектом) менша ніж в спектрі на відмітці 0,7с, це ускладнює встановлення деякого порогу для виявлення дефекту.

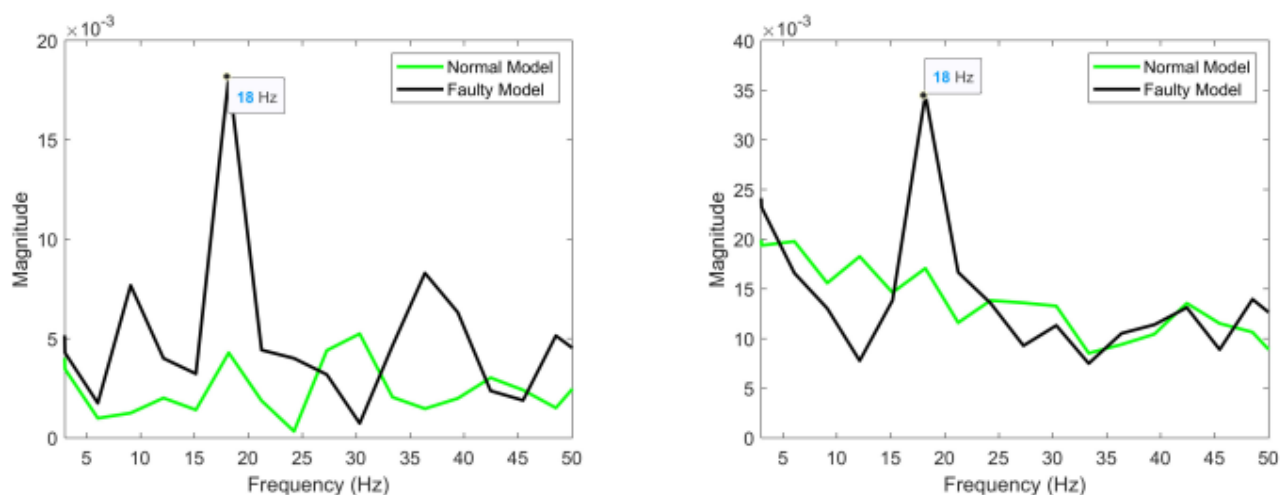


Рисунок 3. 55 Порівняння спектрів з імпульсним шумом і без

Загальний метод огинаючої передбачає виявлення дефектів за допомогою аналізу величини спектру на частоті обертання механізму. Для подолання явища імпульсних шумів пропонується використовувати різницю величини спектру на частоті обертання та величини спектру на частотах нижчих за частоту обертання, як ознаку виявлення дефектів.

На рисунку 3.56 відображено результати застосування даної стратегії для всіх випадків: без імпульсних шумів, додавання шуму в одній точці, додавання шуму в чотирьох точках. При аналізі класичним методом, якщо величина спектра перевищує деякий поріг на частоті обертання – це розцінюється як дефект, таким чином імпульсні шуми спричиняють виникнення хибних сигналів і не дозволяють чітко розпізнати саме дефектний сигнал. Даний метод дозволяє мінімізувати вплив імпульсних шумів.

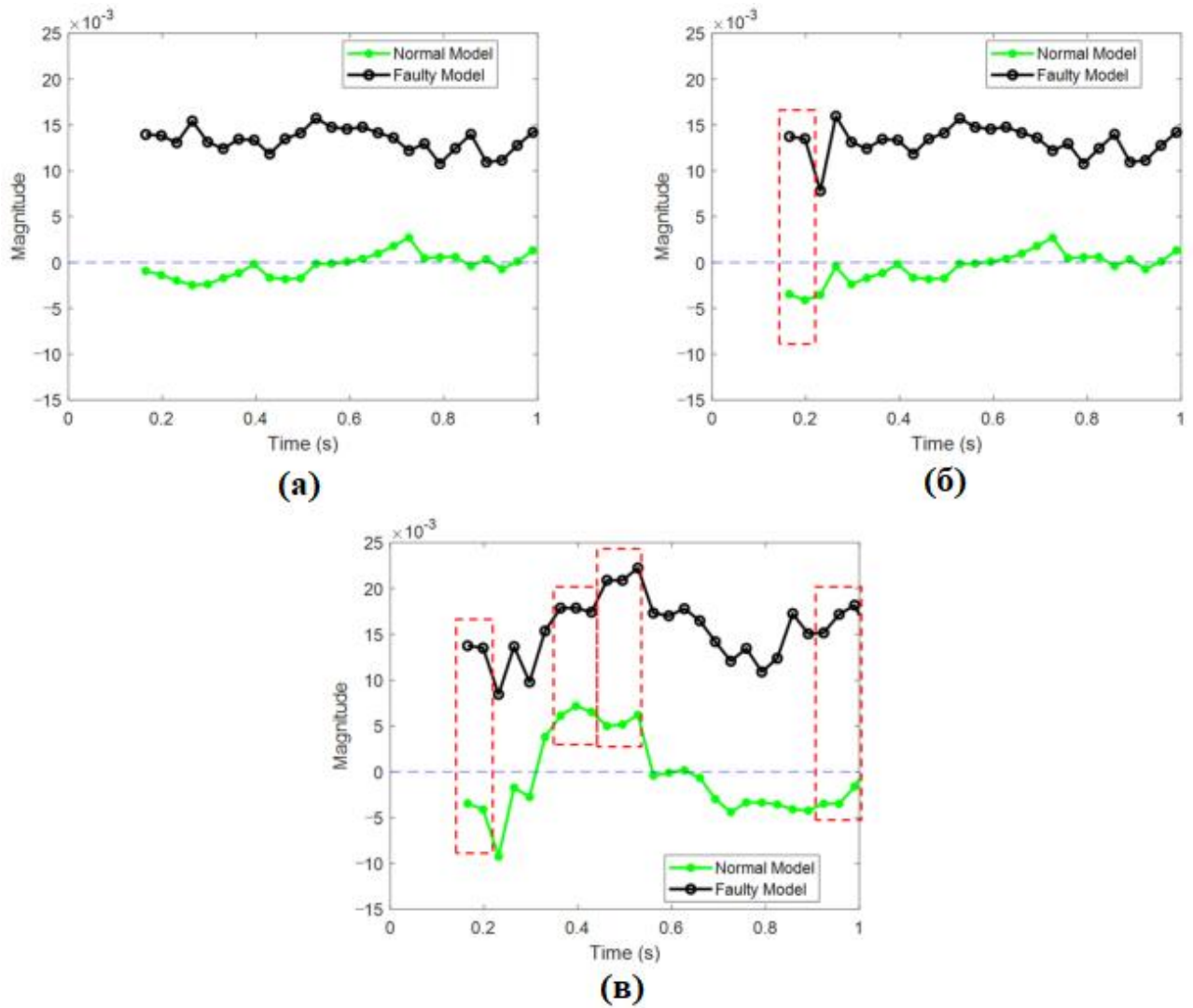


Рисунок 3. 56 Різниця між величиною на частоті обертання та нижчими частотами: (а) випадок без імпульсних шумів; (б) додавання шуму в одній точці; (в) додавання імпульсного шуму в чотирьох точках

3.1.4 Розробка системи предиктивного обслуговування турбін

Система предиктивного обслуговування повинна на основі аналізу даних прогнозувати виникнення несправностей турбоагрегату. Для реалізації точного та якісного прогнозування використовуються методи машинного навчання. Машинне навчання реалізується за допомогою сервісу Azure Machine Learning. На першому етапі відбувається «підготовка» вхідних даних, оскільки якість вхідних даних є одним з найважливіших факторів для правильного навчання моделі. Частина структури з обробкою даних зображена на рисунку 3.57. Блок «support-vibr.csv» отримує дані про вібрацію опор турбоагрегату, а блок «shaft-vibr.csv» - дані про вібрацію валу. Після цього, дані надходять до блоку «Clean Missing Dat», де відбувається видалення пустих, рядків та стовпців. Далі за допомогою блоку «Remove Duplicate Rows» виконується видалення записів що повторюються. За допомогою блоку «Join Data» відбувається об'єднання двох наборів даних, потім повторне очищення даних і далі обираються потрібні стовпці.

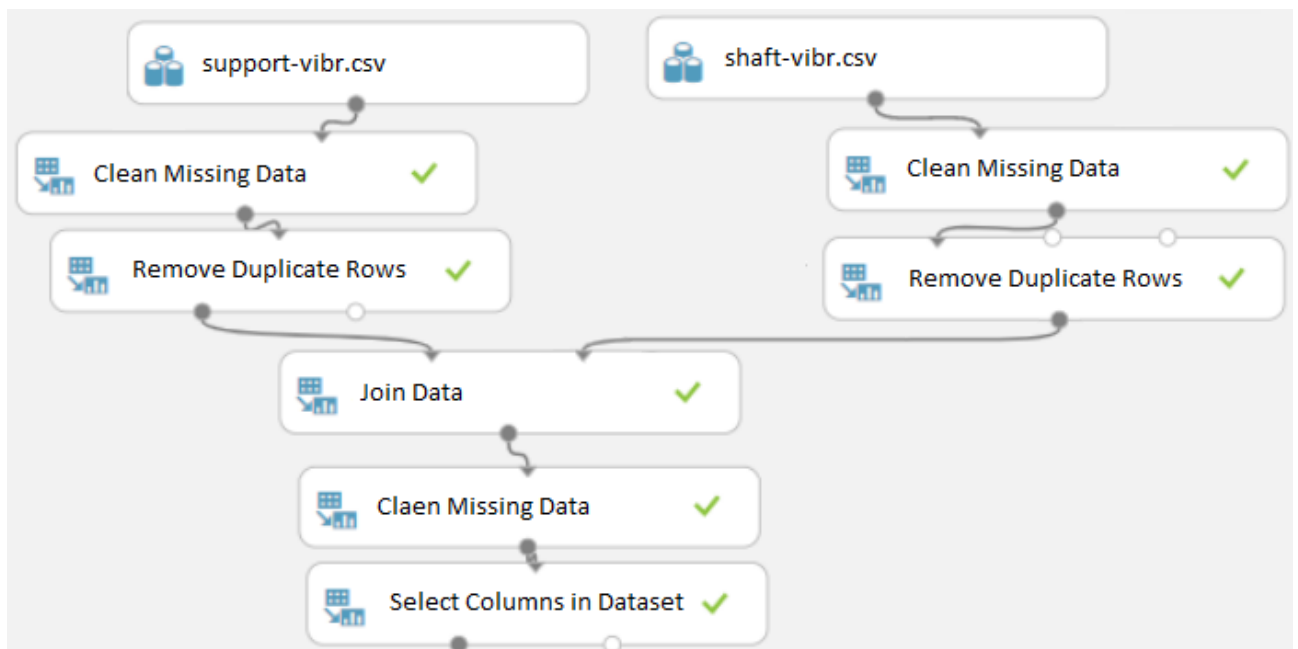


Рисунок 3. 57 Підготовка вхідних даних для навчання моделі

На наступному етапі потрібно визначитися з методом навчання моделі та реалізувати модель навчання. В даному проєкті використовується метод «Two-Class Decision Forest», це ансамблевий метод навчання. Ансамблеві методи засновані на принципі, згідно якому замість використання однієї моделі,

створюється декілька «базових» моделей, навчаються для вирішення однієї проблеми і об'єднуються для підвищення продуктивності. Однією з властивостей модуля «Two-Class Decision Forest» є «Resampling method», яка визначає за яким методом буде створюватися кожна окрема модель (дерево). Доступні два варіанти: «Bagging» та «Replicate». При виборі параметра «Bagging» кожне дерево буде створюватися з нового набору даних. Кожен новий набір даних отримується шляхом рівномірної вибірки та із заміною вхідного набору даних. Цей новий набір даних може мати дублікати та відсутність деяких екземплярів, які існують у вхідному наборі даних. При виборі «Replicate» всі дерева навчаються з однаковим набором даних.

Наступний параметр налаштування «Create trainer mode». Тут можна обрати один параметр або діапазон. Якщо вибрано один параметр, кожному гіперпараметру надається одне значення. Вибравши діапазон параметрів, кожному гіперпараметру можна надати діапазон значень.

Модуль «Tune Model Hyperparameters» будує декілька моделей з різними конфігураціями гіперпараметрів, щоб визначити їх оптимальний набір. Використовуючи модуль «Partition and Sample» виконується розділення набору даних на папки. Можна визначити на скільки папок поділяються дані. Також потрібно визначитися з яких саме вхідних даних буде складатися кожна папка. Після всіх налаштувань використовується блок «Cross Validate Model» для навчання та оцінки кожної моделі. Цей модуль отримує дані з ненавченої моделі та вхідний набір даних. Вихід з цієї моделі являє собою набір даних з оцінками. На основі цих даних модуль «Evaluate Model» обчислює різноманітні показники продуктивності моделі.

Використовуючи модуль «Split Data» набір даних ділиться на два набори. Указується, з якої частини вхідного набору даних має складатися кожен новий набір. Розподіл є чітким, кожен зразок у вхідному наборі даних поміщається в один із піднаборів. Для проведення поділу кожен вибірку можна випадковим чином призначити до підмножини.

Для збільшення кількості міноритарних класів використовується метод SMOTE. Міноритарні класи – класи даних яких не вистачає для навчання моделі.. Наскільки великий набір нових міноритарних класів, які будуть додані, наводиться в процентах і має бути кратним 100. У цьому модулі необхідно вказати скільки найближчих сусідів, з яких можна черпати ознаки для нових зразків, буде використовуватися. На рисунку 3.58 показано модель навчання без використання методу SMOTE, а на рисунку 3.59 модель з використанням цього методу.

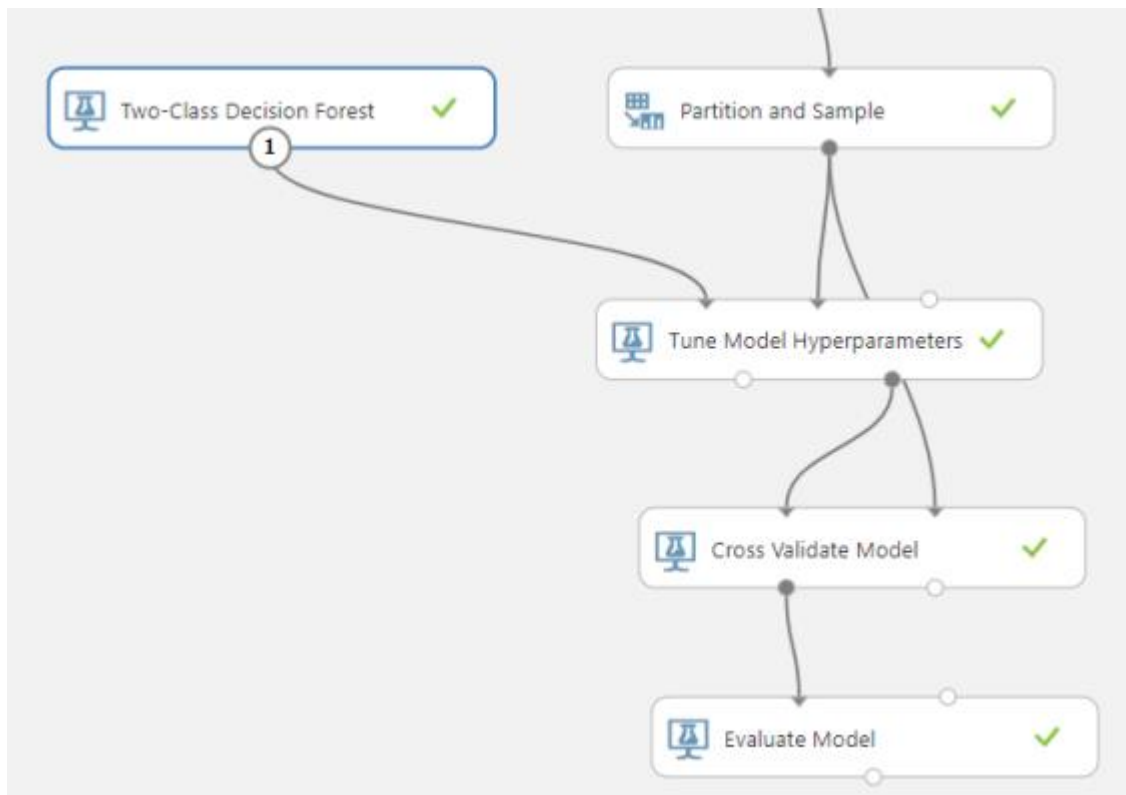


Рисунок 3. 58 Модель навчання без використання методу SMOTE

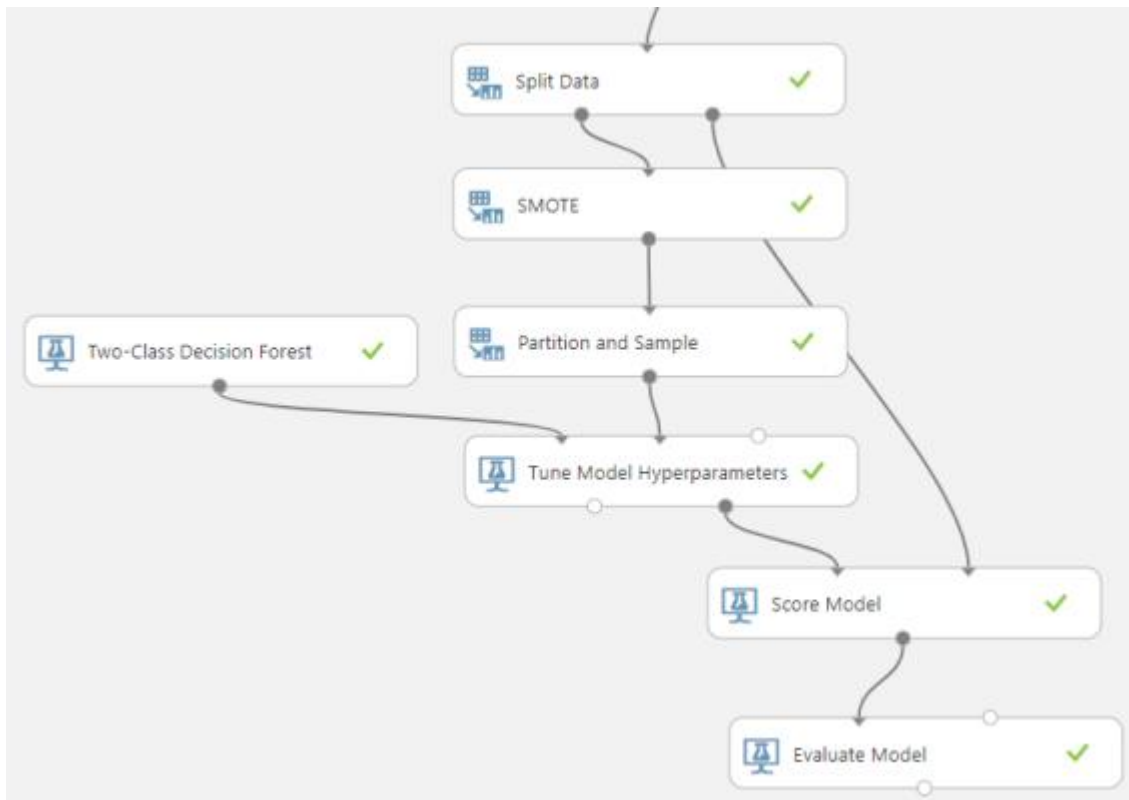


Рисунок 3. 59 Модель навчання з використання методу SMOTE

Спочатку було проведено навчання моделі на основі лише вхідних даних (без використання методу SMOTE). Експериментальним шляхом було підібрано параметри для всіх блоків. В другому випадку було виконано навчання моделі на основі більш збалансованого набору даних, створеного за допомогою методу SMOTE. Було виконано багато спроб з різною кількістю створених класів. Перед використанням методу SMOTE було виконано розділення вхідного набору даних. Завдяки поділу створюється навчальний та тестовий набори. Це зроблено для того, щоб дані які використовуються для навчання не використовувалися для тестування., це робить тестування моделі значно об'єктивнішим [28]. Метод SMOTE застосовується лише для навчального набору даних (70%). В ході проведення навчання було підібрано параметри для методу SMOTE, параметри для інших блоків залишаються такими як і у першому навчанні.

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

4.1. Імітаційне моделювання системи предиктивного обслуговування

Основним завданням системи моніторингу та контролю вібрації є оповіщення оператора або спеціального обслуговуючого персоналу про стан обладнання в реальному часі. Оператор повинен мати інформацію про поточний стан обладнання, а також бути проінформованим про всі відхилення параметрів та отримувати сповіщення про наближення відмов. Для забезпечення оператора всією необхідною інформацією розроблюється спеціальний інтерфейс, який виконує всі вище згадані функції. Даний інтерфейс розроблюється в середовищі LabVIEW. Основний екран з мнемосхемою системи зображено на рисунку 4.1.

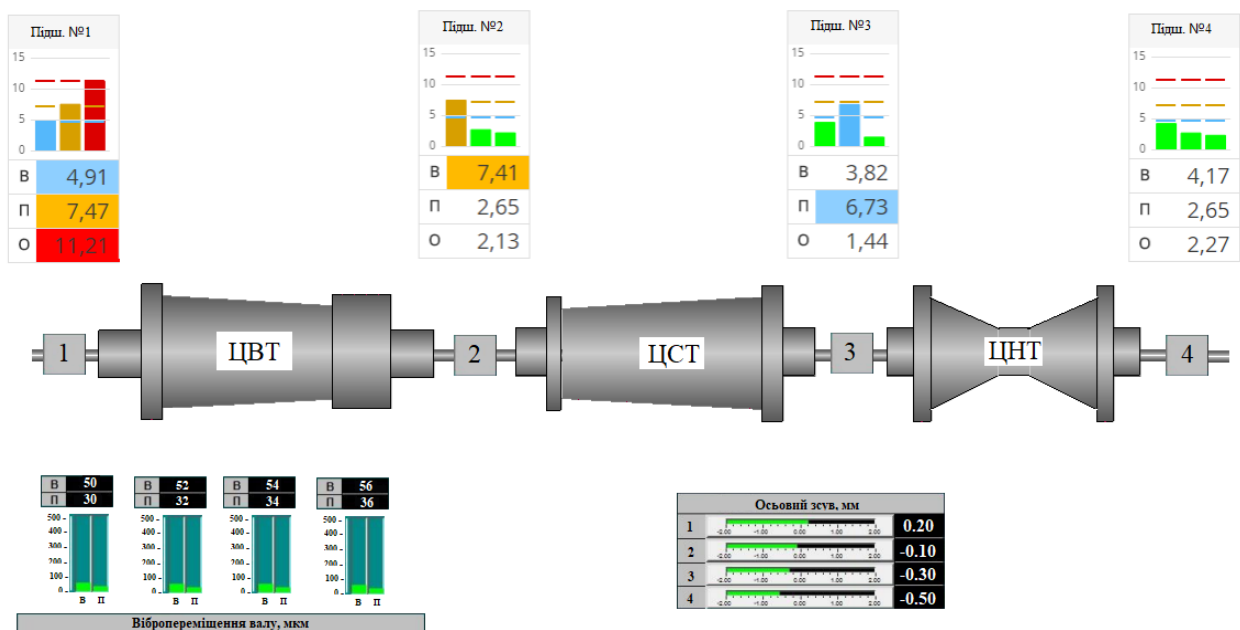


Рисунок 4. 1 Мнемосхема моніторингу параметрів турбоагрегату

Значення параметрів відображаються в числовому вигляді та у вигляді гістограм. Для кожного параметру задаються уставки. Уставки можуть бути трьох типів: попередня, попереджувальна, аварійна. Активні попередні уставки виділяються синім кольором, попереджувальні виділяються помаранчевим кольором, аварійні – червоним. На рисунку 4.2 показано вікно з інформацією про контрольовані параметри в табличному вигляді.

Віброшвидкість, мм/с				Вібропереміщення валу, мкм			
1	2	3	4	1	2	3	4
вертикальна	вертикальна	вертикальна	вертикальна	вертикальна	вертикальна	вертикальна	вертикальна
3.10	4.10	4.30	5.10	50	52	54	56
поперечна	поперечна	поперечна	поперечна	поперечна	поперечна	поперечна	поперечна
3.40	4.20	4.20	5.30	30	32	34	36
осьова	осьова	осьова	осьова				
3.30	3.90	4.40	5.80				

Осьовий зсув, мм			
1	2	3	4
0.20	-0.10	-0.30	-0.50

Рисунок 4. 2 Відображення даних в табличному вигляді

На рисунку 4.3 представлено вікно відображення гармонійних складових віброшвидкості опор турбоагрегату у вигляді гістограм.

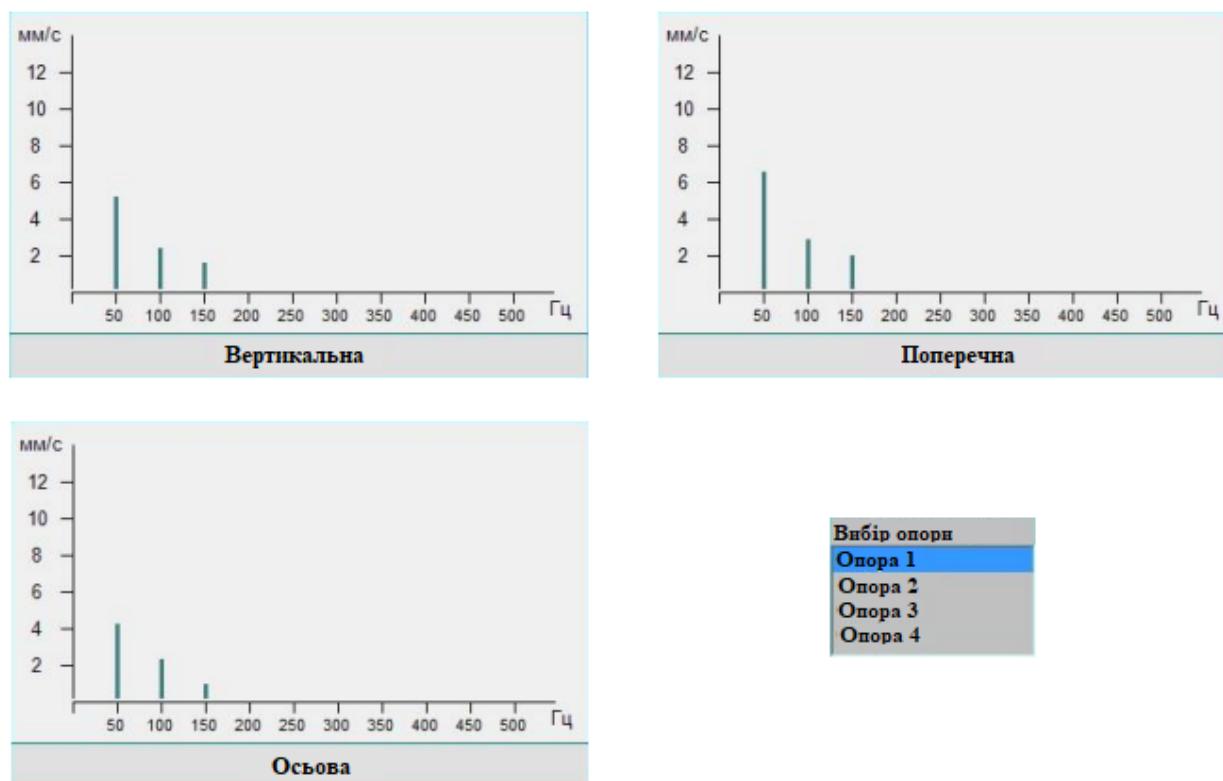


Рисунок 4. 3 Гармонійні складові віброшвидкості опор

На рисунку 4.4 представлено вікно відображення гармонійних складових вібропереміщення валу турбоагрегату у вигляді гістограм.

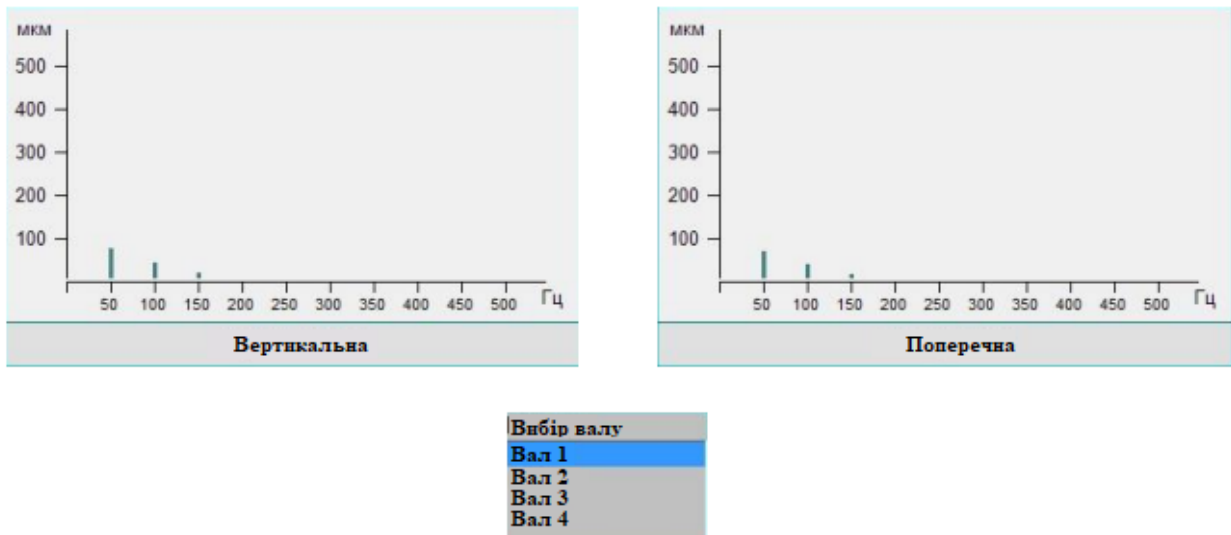


Рисунок 4. 4 Гармонійні складові вібропереміщення валу

При будь-яких відхиленнях сигналу на екран виводиться відповідне повідомлення про ступінь відхилення, а також подія заноситься до журналу подій. Розроблено «матрицю дефектів» зображену на рисунку 4.5. Матриця дефектів представляє собою систему візуального відображення даних про стан обладнання. Для зручності та розуміння використовується декілька кольорів:

- червоний – аварія;
- жовтий – попередження;
- блакитний – попереднє попередження;
- зелений – нормальний стан.

	1		2		3		4	
	ЦВТ	ЦСТ	ЦВТ	ЦСТ	ЦВТ	ЦСТ	ЦВТ	ЦСТ
+ Небаланс ротора			51,10				71,93	
+ Вигин ротора			55,56				51,00	
+ Порушення центрування				10,66				
Низькочастотна вібрація	0,00		0,00		0,00		0,00	
+ Послаблення	28,72		15,05		10,46		39,21	
+ Тріщина			2,09				2,09	

Рисунок 4. 5 Матриця дефектів

Дана система забезпечує безперервний моніторинг та контроль вібраційного сигналу турбоагрегату, таким чином дозволяючи виявити всі відхилення, які свідчать про несправність турбоагрегату.

Після навчання моделі в пункті 3.1.4 було отримано деякі результати відпрацювання алгоритму машинного навчання. Для розуміння точності отриманих даних та працездатності моделі загалом, проводиться оцінювання розробленого рішення. Поділ даних на дві категорії: для навчання та аналізу – одна з частин оцінювання системи. В даній моделі за процес оцінювання відповідають блоки «Cross Validate Model» та «Evaluate Model» (Рис. **оставить, потом допишу). Основні параметри оцінки, які розглядаються в даній роботі: accuracy, precision, recall та AUROC.

Accuracy - це показник оцінки, який показує, скільки з прогнозів, які робить прогнозна модель, є правильними. Це найбільш використовуваний показник оцінки. Ідеальна модель, яка правильно класифікує кожен зразок, досягає 100% точності. Однак слід бути обережним, використовуючи точність. Ця метрика може ввести в оману, якщо класи в наборі тестів розподілені нерівномірно. Наприклад, якщо 95% усіх даних, які використовуються для експерименту, будуть позначені як «без змін», тоді прогнозна модель може досягти точності 95% вважаючи що зміна не відбулась. Ця модель здається хорошою за точністю, але вона ніколи не дасть достовірного прогнозу.

Також для оцінки використовується бінарна класифікація, її можна розділити на чотири категорії: хибнонегативні (FN), хибнопозитивні (FP), істинно негативні (TN) і істинно позитивні (TP) [29].

Інший показник оцінки – precision. Precision схожа на accuracy, але зосереджена лише на прогнозах позитивного класу, зробленому моделлю. У цьому дослідженні мета полягає в тому, щоб визначити появу тенденції розвитку несправності. Ця величина характеризує скільки прогнозів «змін» насправді є «змінами». Найкращим результатом є 100%. Однак модель, яка досягає 100%, може також видавати хибні прогнози. Якщо тестовий набір даних складається лише із зразків «зміни», модель може досягти 100% , якщо зроблено лише одне передбачення «зміни», і воно є правильним.

Щоб доповнити попередні показники, існує інший показник оцінки, який називається recall. Його отримують шляхом ділення всіх прогнозів позитивного

класу на загальну кількість позитивних зразків у тестовому наборі. Це показник того, скільки позитивних зразків знайде модель. У цій області досліджень метрика покаже, наскільки велика частка загальних вибірок класу «зміни» буде знайдена моделлю. Звичайно, 100% є оптимальним показником, коли кожен позитивний зразок класифікується правильно. Але 100% відкликання не гарантує точність моделі. Модель, яка класифікує кожен зразок як позитивний клас, досягне 100% відкликання, але, ймовірно, матиме дуже низьку точність. Модель повинна бути збалансована, тобто мати високі значення кожного з показників, а не лише один з них.

Останнім показником, який використовується – це площа під кривою робочих характеристик (AUROC). Для побудови кривої робочих характеристик ROC використовується чутливість та специфічність. Модель тим краща, чим ближче крива до верхнього лівого кута.

Отже, результати проведення прогнозування без використання методу SMOTE відображені в таблиці 4.1. На рисунку 4.6 зображена крива робочих характеристик.

Таблиця 4. 1 - Результати роботи моделі без SMOTE

Accuracy	Recall	Precision	AUC
0.972	0.778	0.875	0.946

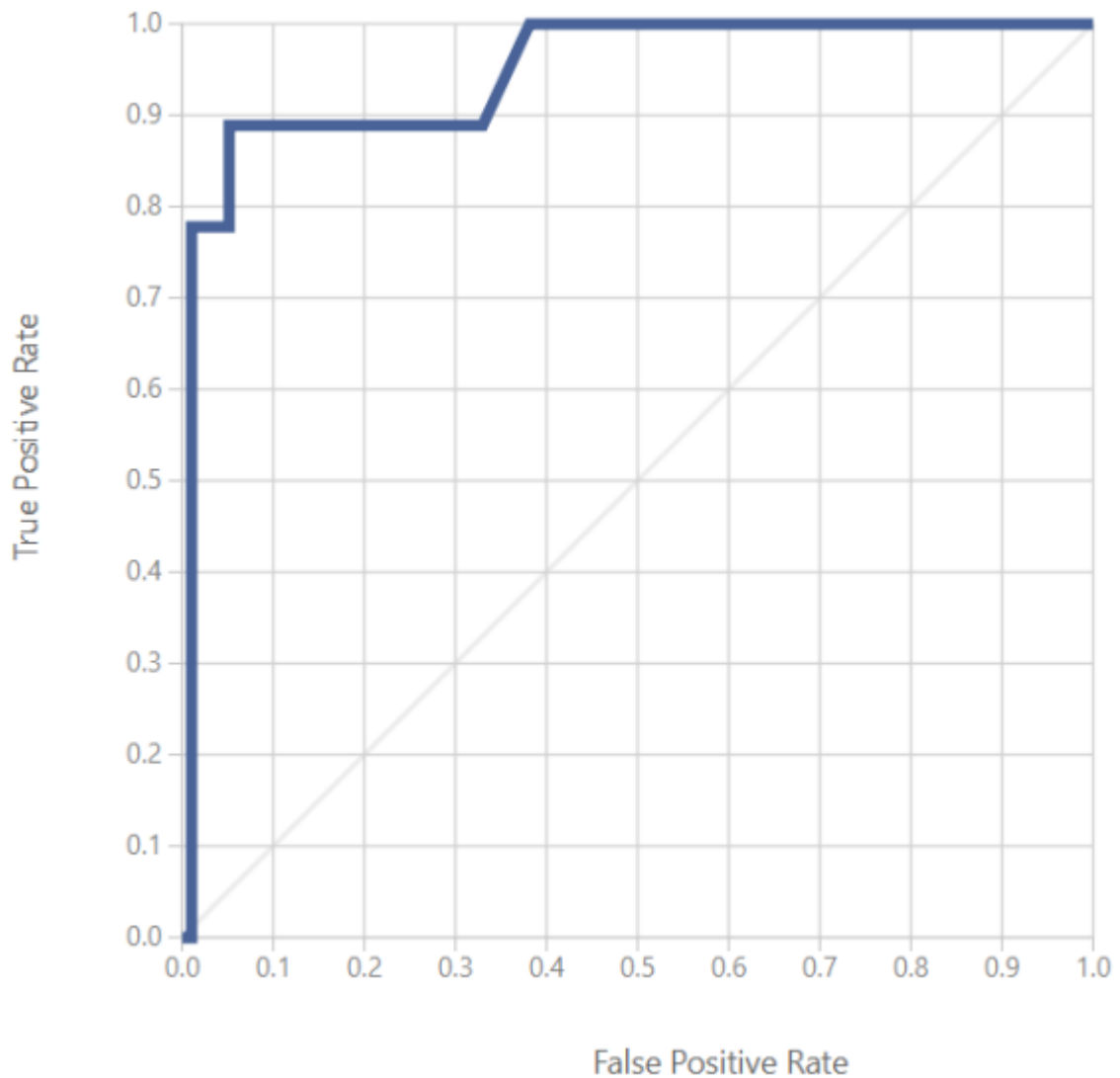


Рисунок 4. 6 Крива робочих характеристик

Для експерименту з SMOTE були спробовані різні комбінації параметрів SMOTE. Для кожної випробованої комбінації було підготовлено та оцінено 10 моделей. Початковий набір даних був випадковим чином поділений на навчальний набір і тестовий набір для кожної моделі. Показники оцінки, отримані з кожної моделі, потім усереднювалися. У таблиці 4.2-4.4 показані середні показники оцінки для кожної комбінації параметрів SMOTE. Комбінація при $k = 5$ і % передвибірки 500 показала найкращі результати. Результати моделювання для цих параметрів показані в таблиці 4.5.

Таблиця 4. 2 - Параметри оцінки роботи моделі з SMOTE (100%)

№	Oversampling, %	Accuracy	Recall	Precision	AUC
1	100	0.938	0.643	0.783	0.944

Продовження таблиці 4.2

№	Oversampling, %	Accuracy	Recall	Precision	AUC
2	100	0.941	0.734	0.724	0.950
3	100	0.947	0.767	0.750	0.977
4	100	0.934	0.667	0.702	0.944
5	100	0.944	0.734	0.735	0.962

Таблиця 4. 3 - Параметри оцінки роботи моделі з SMOTE (500%)

№	Oversampling, %	Accuracy	Recall	Precision	AUC
1	500	0.950	0.80	0.792	0.963
2	500	0.959	0.80	0.802	0.974
3	500	0.950	0.833	0.735	0.962
4	500	0.948	0.767	0.767	0.948
5	500	0.953	0.867	0.790	0.928

Таблиця 4. 4 - Параметри оцінки роботи моделі з SMOTE (1000%)

К	Oversampling, %	Accuracy	Recall	Precision	AUC
1	1000	0.941	0.733	0.776	0.947
2	1000	0.953	0.80	0.792	0.951
3	1000	0.938	0.767	0.713	0.959
4	1000	0.944	0.80	0.788	0.947
5	1000	0.95	0.80	0.777	0.941

Таблиця 4. 5 - Результати роботи моделі з SMOTE (500%)

Run	Accuracy	Recall	Precision	AUC
1	0.969	1	0.75	1
2	1	1	1	1
3	0.969	0.667	1	0.782
4	1	1	1	1
5	0.875	0.667	0.4	0.764
6	0.969	1	0.75	0.989
7	0.906	1	0.5	0.966
8	0.938	0.333	1	0.799
9	0.906	1	0.5	0.977
10	1	1	1	1

З результатів можна зробити висновок, що обидві моделі мають високі показники. Але все ж таки при використанні технології SMOTE показники кардинально змінюються, вони не стають гіршими в середньому, просто відбувається зміна різних показників, як покращення так і погіршення. Таким чином, використовувати технологію SMOTE чи ні, залежить від того, які саме показники є критично важливими для виконання конкретного завдання. Загалом, моделі показали доволі високі та збалансовані показники, це свідчить про їх працездатність та ефективність.

РОЗДІЛ 5. СТАРТАП-ПРОЄКТ

5.1. Опис ідеї проєкту

Основною ідеєю стартап-проєкту є створення системи предиктивного обслуговування парової турбіни на основі аналізу вібрації. Зміст ідеї стартап-проєкту, напрямки застосування та вигоди для користувача наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5. 1 - Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Переваги та вигоди для замовника
Створення системи предиктивного обслуговування парової турбіни на основі аналізу вібрації	Промислові об'єкти та підприємства, які в своїй роботі використовують турбоагрегати.	<ul style="list-style-type: none"> – Зменшення витрат на обслуговування шляхом зменшення кількості ремонтів. – Зменшення витрат за рахунок зменшення часу простою обладнання та часу проведення ремонтних робіт. – Підвищення якості ремонтних робіт. – Підвищення надійності обладнання.

Система предиктивного обслуговування парової турбіни має досить вузьке коло замовників, адже такі системи використовуються переважно на ТЕС, ГЕС, АЕС. Саме тому дуже важливо розглянути та проаналізувати продукцію яку пропонують конкуренти. Порівняння слабких, нейтральних та сильних характеристик між моїм рішенням та конкурентним, наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5. 2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко– економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів		Слабка сторона (W)	Нейтраль на сторона (N)	Сильна сторона (S)
		Мій проєкт	«Прософт» АСКВД			
1.	Якість	Висока	Середня	Ні	Ні	Так
2.	Надійність	Висока	Висока	Ні	Ні	Так
3.	Ціна	Середня	Висока	Ні	Так	Так
4.	Окупність	Висока	Середня	Ні	Ні	Так

5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

Проведення технологічного аудиту дозволяє являє собою обстеження проєкту для виявлення технологій та об'єктивного оцінювання їх потенціалу.

Запропоноване рішення поєднує в собі використання механічного, електротехнічного обладнання та, відповідне до установки та вимог, програмне забезпечення.

В таблиці 5.3 розписано основні технології, що запропоновані в роботі.

Таблиця 5. 3 - Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Моніторинг вібрації турбоагрегату	Використання сучасних датчиків тиску	Широко представлена на ринку	Доступна
2.	Аналіз вібрації	Контролерна автоматизація	Широко представлена на ринку	Доступна
3.	Диспетчеризація системи	Розробка та налаштування SCADA-системи	Наявна	Доступна
Загалом, всі технології, необхідні для реалізації проєкту є доступними та не потребують значних зусиль та затрат на їх отримання.				

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Перед виходом проєкту на ринок, необхідно провести аналіз потенційного ринку, а також проаналізувати загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проєкту. В таблиці 5.4 наведено результати попереднього аналізу ринку.

Таблиця 5. 4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап- проєкт

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	30
2.	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од	700 млн
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростаюча
4.	Наявність обмежень для входу	Специфіка сфери застосування
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Наявні лише загальні вимоги
6.	Середня норма рентабельності в галузі, %	50%

За результатом аналізу, робимо висновок, що ринок є привабливим для входження проєкту.

Тепер потрібно визначити потенційні групи клієнтів (табл. 5.5).

Таблиця 5. 5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Прогнозування виникнення поломок обладнання	Компанії які використовують турбоагрегати	Точність прогнозування поломок	Надійність, якість

Після визначення груп потенційних клієнтів потрібно провести детальний аналіз ринкового середовища, а саме проаналізувати загрози та можливості при впровадженні проєкту на ринок (табл. 5.6, 5.7).

Таблиця 5. 6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Відсутність досвіду впровадження	В Україні майже відсутні системи прогнозування відмов	Використання закордонних технологій або залучення спеціалістів в даній області

Таблиця 5. 7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Навчання системи	Аналіз отриманих даних в інших (допоміжних) системах діагностики, тим самим розширення області прогнозування	Більш детальне вивчення параметрів та поведінки об'єкту

На основі отриманих даних, визначаються загальні риси конкуренції (табл. 5.8).

Таблиця 5. 8 - Ступеневий аналіз конкуренції ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - нецінова	Підвищення якості обслуговування обладнання.	Підвищення продуктивності

Продовження таблиці 5.8

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
2. За рівнем конкурентної боротьби - інтернаціональний	Наявність цієї проблеми за кордоном	Впровадження запропонованого методу
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Різна якість у реалізації товару	Контрольоване управління
4. Конкуренція за видами товарів: <ul style="list-style-type: none"> • Товарно-родова • Товарно-видова 	Наявність методів діагностики без аналізу даних, тільки сигналізація при відхиленні від уставки	Використання більш ефективного методу вібродіагностики
5. За інтенсивністю	Не марочна	Вплив не передбачається

Далі проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції, використовуючи метод 5 сил М.Портера (табл. 5.9).

Таблиця 5. 9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	Прософт, Shinkawa, Компакс	Прософт, Shinkawa, Компакс	-	-	Фактори загроз з боку заміників
Висновки	Невелика конкуренція з боку прямих конкурентів	Є можливість входу в ринок	Відсутність диктування умов на ринку	Чутливість до змін цін, контроль якості	Немає загроз

Аналізуючи дані з таблиць, можемо зробити висновок, що є можливість роботи на ринку. Основною проблемою є відсутність потенційних конкурентів. В таблиці 5.10 наведено основні фактори конкурентоспроможності

Таблиця 5. 10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1.	Неоднозначність методів діагностики несправностей	Не існує єдиного стандартизованого метода діагностики
2.	Можливість необмеженого удосконалення	Можливість використання стороннього ПО для аналізу вібрації, використання хмарних систем, туманних обчислень, технологій Industry 4.0

В таблиці 5.11 наведено дані аналізу сильних та слабких сторін стартап-проєкту.

Після визначення факторів конкурентоспроможності виконується аналіз сильних та слабких сторін запропонованого стартап-проєкту. (див. табл. 5.11).

Таблиця 5. 11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Системи предиктивного
обслуговування парової турбіни»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Прософт» АСКВД							
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
1.	Неоднозначність методів діагностики несправностей	18			+					
2.	Можливість необмеженого удосконалення	16	+							

На основі даних в таблицях 5.4-5.10 проводиться SWOT-аналіз. SWOT-аналіз – це метод стратегічного планування, який дозволяє оцінити сильні та слабкі сторони проєкту, а також його можливості та загрози. Результати аналізу наведені в таблиці 5.12.

Таблиця 5. 12 - SWOT-аналіз стартап-проєкту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Енергозбереження • Легкість впровадження • Легка окупність 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Можливі труднощі з впровадженням, оскільки досвід провадження відсутній на вітчизняній арені.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Можливість необмеженого розширення та удосконалення системи 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Відсутність потенційних конкурентів • Можлива відсутність зацікавленості даним продуктом у зв'язку з консервативними поглядами на вітчизняній арені

Після аналізу SWOT, на основі всіх наявних даних розробляється перелік заходів для виведення проєкту на ринок. Для проєкту визначається час ринкової реалізації дивлячись на проєкти-конкуренти (табл. 5.13).

Таблиця 5. 13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Впровадження в існуючі АСК/ Впровадження як самостійної АСК	Мала	1 рік

5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту

В таблиці 5.14 наведено інформацію про цільові групи потенційних споживачів.

Таблиця 5. 14 - Вибір цільової групи потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Промислові компанії та підприємства які використовують турбоагрегати	Готові але є деякі труднощі з впровадженням	55-90%	Майже відсутня	Не легка

Базова стратегія розвитку стартап-проєкту наведена в таблиці 5.15.

Таблиця 5. 15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Стандартизація вібропараметрів	Новизна методики	Можливість необмеженого удосконалення	Стратегія лідерства по якості

Далі визначається стратегія конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5. 16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Так	Буде забирати існуючих споживачів	Не буде копіювати основні характеристики товару	Стратегія лідерства по якості

Для того щоб споживач в майбутньому зміг ідентифікувати проєкт – розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17).

Таблиця 5. 17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Якість	Стратегія лідерства по якості	Можливість необмеженого удосконалення	Економічність. Швидка окупність.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

В таблиці 5.18 сформовано концепцію товару.

Таблиця 5. 18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Якість обслуговування обладнання	Прогнозування поломок та дефектів обладнання	Визначення виду та області поломок та дефектів
2.	Економічність	Зменшення часу простою обладнання	Завдяки використанню системи виключається можливість повної аварійної зупинки, викликаної несправністю обладнання

В таблиці 5.19 наведено дані про цінові межі.

Таблиця 5. 19 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники, грн	Рівень цін на товари-аналоги, грн	Рівень доходів цільової групи споживачів, грн	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу, грн
1.	Вище середнього	Вище середнього	Високий	

Далі потрібно визначити систему збуту (табл. 5.20).

Таблиця 5. 20 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Обдумані	Своєчасна реалізація	Глибока	

На останньому кроці розробляється концепція маркетингових комунікацій (табл. 5.21).

Таблиця 5. 21 - Концепція маркетингової комунікації

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Мінімізація затрат на ремонт та обслуговування	Реклама	Якість, надійність, економічність	Пояснення концепції та кінцевих результатів	Точкові

ВИСНОВКИ

В даній роботі розглядається система предиктивного обслуговування парової турбіни. Під час виконання було детально розглянуто методи та проблематику обслуговування турбоагрегатів.

Як об'єкт автоматизації розглядається парова турбіна Т-100/120-130. Для реалізації системи предиктивного обслуговування було виконано огляд існуючих методів прогнозування. Основну увагу приділено аналізу вібрації, на основі якого відбувається аналіз стану обладнання та прогнозування його можливих несправностей. Вивчено основні параметри та властивості вібрації, а також застосовано велику кількість методів її аналізу. Виконано підбір сучасного спеціалізованого обладнання для моніторингу вібрації.

Проведено статичний аналіз валу запропонованої парової турбіни. Для виконання цього аналізу було використано можливості ПЗ CATIA/ Analysis and Simulation. Виходячи з результатів, показано можливість валу витримувати навантаження що діють на нього. Для вібраційного аналізу валу була створена модель в середовищі MSC ADAMS, а саме для аналізу кутової та поступальної деформації. Результати моделювання показали, що кутова та поступальна деформації валу є прийнятними.

Основна модель моніторингу та аналізу вібрації реалізована в середовищі LabVIEW. Вибір цього ПЗ обумовлений тим, що в даному середовищі доступне створення моделі за допомогою блоків, це значно спрощує процес моделювання. Основним конкурентом при виборі ПЗ було середовище Matlab/Simulink. Вирішальним стало те, що в LabVIEW наявний модуль саме для аналізу вібрації, спеціалізовані блоки та моделі. В Matlab/Simulink також можливо реалізувати всі потрібні методи аналізу але цей процес значно складніший у порівнянні з LabVIEW. Перш за все було створено модель для перетворення сигналу від датчиків вібрації в придатний для аналізу вигляд. Після отримання перетвореного сигналу проводиться аналіз вібрації у часовій та частотній областях, для цього створено спеціальні моделі. В процесі моделювання було

доведено, що при аналізі сигналу вібрації в часовій області важко визначити тип та область несправності. Для отримання більш детальної інформації про вібрацію використовується аналіз в частотній області. Цей аналіз дозволяє визначити тип та область виникнення несправності. Порівнюючи ці два типи аналізу – безумовно аналіз в частотній області надає значно більше корисної інформації, але саме використання обох видів аналізу дозволяє максимально точно виявити тип та область виникнення несправності.

Зважаючи на те, що основною перешкодою для якісного моніторингу та аналізу вібрації є промислові шуми – запропоновано метод обробки сигналу в умовах промислового шуму. В основу метода покладено перетворення Гільберта та перетворення Фур'є. Використання даного методу дозволяє відділити імпульсний шум від реального сигналу.

Для візуалізації даних отриманих при аналізі вібрації, а також для забезпечення оператора та обслуговуючого персоналу всією необхідною інформацією – розроблено спеціальний інтерфейс. Для розробки було використано середовище

LabVIEW. Оскільки основна модель аналізу та інтерфейс користувача виконані в одному ПЗ – це виключає можливість виникнення проблем, пов'язаних з налаштуванням зв'язку між моделлю та інтерфейсом користувача. Даний інтерфейс візуалізує всю інформацію, отриману при аналізі вібрації. Всі дані відображаються в зручному та зрозумілому форматі. Система сповіщає оператора про будь-які зміни контрольованих параметрів. Головне завдання, яке виконує даний інтерфейс – надання оператору інформації про поточний стан турбіни в зрозумілому та зручному форматі.

Для реалізації підходу предиктивного обслуговування використовуються методи машинного навчання. За допомогою середовища Azure Machine Learning реалізовано навчання модулі для прогнозування відмов обладнання. Оцінка моделі показала, що вона працездатна та може використовуватися за призначенням

Загалом, реалізована система дозволяє здійснювати моніторинг і аналіз вібрації в режимі реального часу, та на основі отриманих даних прогнозувати можливість виникнення несправностей парової турбіни.

Список використаних джерел

1. Sanjay gupta and Joseph john, "Virtual instrumentation using LabVIEW", Principle and Practices of graphical programming. Second Edition. India, pp.1-21, 2010.
2. T. Naqvi, Introduction to SyDe data acquisition systems and LabVIEW, Oct. 29, 2004.
3. Z. Hua, "Application of LabVIEW in the design of data acquisition and signal processing system of mechanical vibration," Proceedings International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin, China, Aug. 19- 22 ,2011.
4. Travis, Jeffery, Kring, and Jim, "LabVIEW for Everyone Graphical Programming Made Easy and Fun," Prentice Hall PTR, 3rd Edition, 2006.
5. Asan Gani and M.J.E salami, "A LabVIEW based Data Acquisition System for Vibration Monitoring And Analysis", Proceedings of student conference on research and development (SCOReD). pp.62-65, February 2002.
6. Балицкий, Ф.Я. Современные методы вибрационной диагностики машин и конструкций / Ф.Я. Балицкий, М.Д. Генкин, М.А. Иванова, А.Г. Соколов, Е.И. Хомяков – М.: МЦНТИ, 1990. – 114 с.
7. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: Изд. центр СПб ГМТУ, 2000. – 169 с.
8. Герике, Б.Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: Учеб. пособие. – в 2-х ч. Ч.1: Мониторинг технического состояния по параметрам вибрационных процессов/ Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1999. – 188 с.
9. Герике, Б.Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: Учеб. пособие. – в 2-х ч. Ч.2: Диагностика технического состояния на основе анализа вибрационных процессов/ Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1999. – 230 с.

10. Гренке В.В. Многоканальный аппаратно-программный комплекс для мониторинга и анализа вибросигналов / В.В. Гренке, И.В. Шакиров, А.М. Самойлов // Известия Томского политехнического университета– 2007. – №2. – С. 107-112.
11. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.
12. Wodecki, J.; Michalak, A.; Zimroz, R. Local damage detection based on vibration data analysis in the presence of Gaussian and heavy-tailed impulsive noise. Meas. J. Int. Meas. Confed. 2021, 169, 108400.
13. Tyagi, S.; Panigrahi, S.K. An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis. J. Comput. Des. Eng. 2017, 4, 305–317.
14. Feldman, M. Hilbert transform in vibration analysis. Mech. Syst. Signal Process. 2011, 25, 735–802.
15. Antoni, J.; Bonnardot, F.; Raad, A.; El Badaoui, M. Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals. Mech. Syst. Signal Process. 2004, 18, 1285–1314.
16. Maiz, S.; El Badaoui, M.; Bonnardot, F.; Dudek, A.; Leskow, J. Deterministic/cyclostationary signal separation using bootstrap. IFAC Proc. Vol. 2013, 46, 641–646.
17. Peeters, C.; Guillaume, P.; Helsen, J. Vibration-based bearing fault detection for operations and maintenance cost reduction in wind energy. Renew. Energy 2018, 116, 74–87.
18. Владимир Вьюгин. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. — МЦМНО, 2013. — 390 с.
19. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л.Рутковский; пер. с польск. И.Д.Рудинского. – М.: Гор. линия – Телеком, 2006. - 452 с.
20. Галушкин, А.И. Нейронные сети: основы теории. / А.И. Галушкин. - М.: РиС, 2014. - 496 с.

21. Brett Lantz. Machine Learning with R. Packt Publishing, Birmingham - Mumbai, 2013.
22. Allmark, M. J., Prickett, P. W., Frost, C., Grosvenor, R. I., 2015. Tidal Steam Turbine blade fault diagnosis using time-frequency analyses.
23. 12. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989.
24. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования : Учебное пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, Е. В. Тарасов ; под ред. В. Н. Костюкова. — Омск : НПЦ «Динамика», 2007. — 286 с
25. Неразрушающий контроль: справ.: в 7 т. — Т. 7: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий [и др.] // М.: Машиностроение, 2005. — 829 с.
26. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.
27. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. М.:Наука, 1984. 129 с.
28. Ron Kohavi. “A Study of Cross-validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection”. In: Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2. IJCAI’95 (1995), pp. 1137–1143.
29. Jesse Davis and Mark Goadrich. “The relationship between Precision-Recall and ROC curves”. In: Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning - ICML ’06 (2006), pp. 233–240.