

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Федорчук Ярослав Володимирович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз методу визначення стану основних ресурсно визначних вузлів
відцентрових насосних агрегатів
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Федорчук Я. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов Микола Якович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Федорчук Я. В. Аналіз методу визначення стану основних ресурсно визначних вузлів відцентрових насосних агрегатів

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Мета роботи. Виявлення закономірностей впливу змін технічного стану ресурсовизначальних вузлів консольних ВНА на амплітудний спектр струму їхніх електродвигунів для розробки науково обґрунтованих технічних рішень з визначення граничних станів вузлів.

Відповідно, ціллю роботи являється підвищити надійності, та виявлення проблем, що впливають на ефективність та безпеку роботи відцентрових насосних агрегатів.

Ключові слова: методика діагностування, відцентровий насос, асинхронний двигун.

ABSTRACT

Fedorchuk Ya. V. Analysis of the method for determining the condition of the main resource-determining nodes of centrifugal pumping units. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Purpose of the work. Identification of the patterns of influence of changes in the technical condition of resource-determining nodes of cantilever VNA on the amplitude spectrum of the current of their electric motors for the development of scientifically substantiated technical solutions for determining the limit states of the nodes.

Accordingly, the purpose of the work is to increase reliability and identify problems that affect the efficiency and safety of the operation of centrifugal pumping units.

Keywords: diagnostic method, centrifugal pump, asynchronous motor.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРНІ ПОШКОДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНІВ РЕСУРСОВИЗНАЧАЛЬНИХ ВУЗЛІВ КОНСОЛЬНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ	8
1.1. Аналіз пошкодження вузлів, що визначають ресурс консольних відцентрових насосних агрегатів	8
1.2. Методи визначення станів вузлів консольних ВНА	15
Висновки по розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ВУЗЛІВ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ СПЕКТРІВ СТРУМУ ЇХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА ВІБРАЦІЙНИМ КРИТЕРІЄМ	24
2.1. Методика визначення стану вузлів ВНА за параметрами спектрів струму їх електродвигунів	24
2.2. Методика визначення стану вузлів консольних ВНА за вібраційним критерієм	30
2.3. Методи математичного моделювання для дослідження діагностичних параметрів	32
2.4. Реалізація методу визначення станів вузлів ЦНА аналізом спектрів струму їх електродвигунів	36
Висновки по розділу 2	38
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	39
3.1. Обґрунтування необхідності моделювання при дослідженні діагностичних параметрів	39
3.2. Імітаційна модель та параметри моделювання	40
Висновки по розділу 3	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	47

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Експлуатація на промислових об'єктах, зокрема на об'єктах перекачування рідин та газів, динамічного обладнання, до якого належать консольні відцентрові насосні агрегати (ВНА), передбачає організацію системи їх технічного обслуговування та ремонту (ТОіР), що включає моніторинг технічного стану ВНА, який проводиться з метою виявлення та відстеження зміни стану вузлів і агрегатів в цілому. Своєчасне визначення моменту часу досягнення вузлами та агрегатами граничних станів, що характеризують вироблення їх ресурсу, є найважливішим виробничим завданням, яке вирішується в рамках реалізації системи ТОіР та спрямоване на попередження відмов та ефективне планування ремонтів ВНА.

Аналіз статистики показує, що вузлами, які значною мірою визначають ресурс консольних ВНА, є підшипники кочення та сполучення валів, досягнення якими граничних станів, при розвитку в них пошкоджень, призводить до відмов агрегатів у 26% та 19% випадків відповідно.

Грунтуючись на аналізі робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників у галузі моніторингу технічного стану динамічних машин, можна виділити метод, що базується на аналізі параметрів амплітудних спектрів струму, споживаного електродвигуном агрегату, який дозволяє ефективно вирішувати завдання визначення стану вузлів консольних ВНА. У свою чергу, розробка методу для його використання з метою визначення граничних станів ресурсовизначальних вузлів промислових консольних ВНА, враховуючи необхідність дослідження підходів до попереднього визначення порогових значень діагностичних параметрів та врахування при цьому змін робочих характеристик агрегату, є актуальною технічною задачею.

Мета роботи. Виявлення закономірностей впливу змін технічного стану ресурсовизначальних вузлів консольних ВНА на амплітудний спектр струму їхніх електродвигунів для розробки науково обґрунтованих технічних рішень з визначення граничних станів вузлів.

Основними завданнями які поставлені при виконанні кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз методу визначення станів ресурсовизначальних вузлів консольних ЦНА за параметрами спектрів струму їхніх електродвигунів.
2. Формування методик досліджень з визначення граничних станів ресурсовизначальних вузлів ВНА.
3. Оцінка діагностичних параметрів при зміні робочих характеристик ЦНА на основі його імітаційної моделі.
4. Розробка методики визначення граничних станів ресурсовизначальних вузлів промислових консольних ВНА аналізом амплітудних спектрів струму їхніх електродвигунів.

Методологія та методи які використані.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи застосовано науковий аналіз, експериментальне дослідження та комп'ютерне моделювання на основі імітаційної моделі. Імітаційна модель базується на аналітичних виразах теорії електромеханіки та електрогідравлічних аналогій. Результати вимірювань і моделювання оброблено методами математичної статистики та чисельними методами обчислень.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Федорчук Я. В. АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕННЯ ВУЗЛІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РЕСУРС КОНСОЛЬНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 195-198.

Федорчук Я. В., Симоненко Н. О., Бокренко М. О. ЛОКАЛЬНИЙ ПЕРЕГРІВ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННИХ МАШИН У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії

та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року.
Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 201-204.

Федорчук Я. В., Здорик О.П. РОЗРОБКА ВАРІАНТУ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ НАРОБІТКУ ДО ЧЕРГОВОГО ДІАГНОСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року.
Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 208-210.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРНІ ПОШКОДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНІВ РЕСУРСОВИЗНАЧАЛЬНИХ ВУЗЛІВ КОНСОЛЬНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

Відцентрові насосні агрегати (ВНА) консольного типу широко застосовуються на нафтогазових промислах у системах забезпечення функціонування комплексів з видобутку, транспортування, підготовки газу, нафти та води, що використовується в системах підтримки пластового тиску (ПШТ). Консольні ВНА використовуються як основні агрегати станцій водозабору систем водопостачання та в блоках очищення і приготування бурових розчинів циркуляційних комплексів бурових установок. На дотискувальних насосних і компресорних станціях, установках підготовки нафти і газу, установках очищення пластових вод і станціях водозабору систем ПШТ нафтогазових промислів консольні ВНА застосовують як допоміжні у складі технологічних комплексів, зокрема, як циркуляційні в системах опалення та як основні й підживлювальні в системах пожежогасіння [1, 2].

Надійне функціонування ВНА забезпечується надійністю їхніх конструктивних елементів. Надійність, яка є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого технічного пристрою або системи, визначається як властивість об'єкта зберігати з часом здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання, транспортування [2].

Однією з ключових часових характеристик надійності об'єкта є його ресурс, що являє собою сумарне напрацювання від початку експлуатації або її відновлення після ремонту до моменту досягнення об'єктом граничного стану, при якому його подальша експлуатація неприпустима або недоцільна [2].

Досягнення деякими функціонально значущими вузлами ВНА граничних станів визначає перехід у граничний стан всього агрегату в цілому, що відповідає виробленню ним свого ресурсу та означає необхідність проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

Подальша експлуатація агрегату в граничному стані пов'язана з високим ризиком виходу його з ладу і настанням відмови, яка характеризує втрату агрегатом здатності виконувати задану функцію [1].

1.1. Аналіз пошкодження вузлів, що визначають ресурс консольних відцентрових насосних агрегатів

Згідно зі статистичними даними [10], основними причинами досягнення ВНА граничного стану та виникнення їх відмов на промислових та видобувних об'єктах є: дефекти ущільнень насосів, дефекти підшипників, порушення співвісності валів, дефекти елементів корпусу, валів агрегатів, робочих коліс насосів. Розподіл причин відмов промислових ВНА за часткою представлено діаграмою на рисунку 1.1.

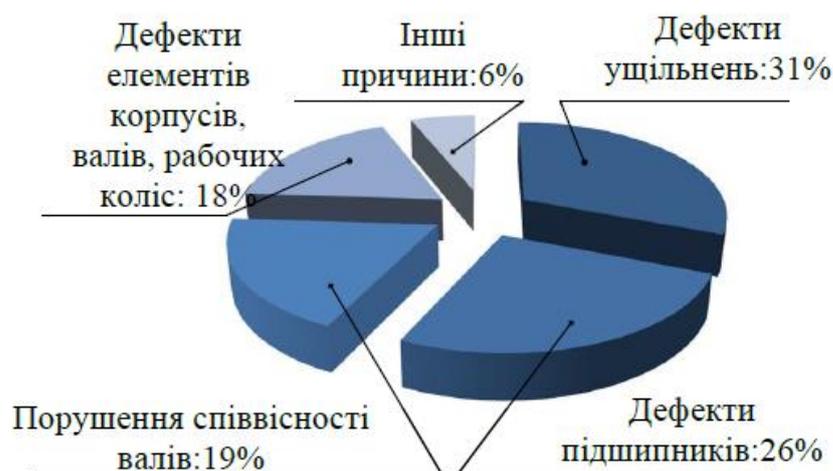


Рисунок 1.1. Причини відмов промислових ЦНА

Дефекти щільних ущільнень, що використовуються для розділення області всмоктування від області нагнітання, та торцевих ущільнень, необхідних для виключення витоків у місці виходу валу з корпусу насоса, займають значну частку із загальної сукупності причин виведення насосних агрегатів з експлуатації – 31%. До того ж, стан ущільнень визначає об'ємний ККД насоса, і як вузол, що швидко зношується, ущільнення характеризують працездатність насоса в цілому. Об'ємні втрати при зносі ущільнень можуть знизити загальний ККД насоса на 2,5% [2].

При цьому дефекти ущільнень не можна віднести ні до критичних, за наявності яких експлуатація агрегату неможлива або неприпустима за

умовами безпеки та надійності [10, 13], ні до важко визначальних, а їх ефективне діагностування зводиться до аналізу параметричних показників роботи насоса. Основним індикатором стану торцевих ущільнень є значення витоків, що вимірюється об'ємним способом, а критеріями визначення зносу щілинних ущільнень є падіння величини напору, зумовлене порушенням розподілу тиску та потоку в області робочого колеса, та зростання споживаної потужності внаслідок збільшення потужності гідравлічного гальмування колеса та виникнення додаткових осьових зусиль на ротор [14,19].

Технічному стану підшипників приділяється найбільша увага під час проведення процедур технічної діагностики на промислових ВНА, оскільки підшипники найбільшою мірою визначають ресурс ВНА, що пояснюється високою ймовірністю відмови агрегату (26% випадків) при досягненні підшипниками граничних станів [14,19].

У промислових консольних ВНА використовуються підшипники кочення, як найбільш поширений елемент опор обертання роторного обладнання [50]. В основу роботи підшипників кочення покладено принцип тертя кочення між сполученими деталями.

Підшипники кочення мають ряд переваг, що визначають їх переважне використання в порівнянні з підшипниками ковзання, в тому числі й при конструюванні консольних ВНА: знижені вимоги до змащення, що спрощує обслуговування і знижує знос при інтенсивних змінах режиму роботи (пуск, динамічне зростання і зниження частоти обертання), менші осьові габарити, широкий розмірний ряд, масовість виробництва, хороша взаємозамінність і, відносно, низька вартість [18].

Ескіз конструкції підшипника кочення представлено на рисунку 1.2.

Конструктивно підшипник складається із зовнішнього (1) та внутрішнього (2) кілець (обойм) і тіл кочення (3), що розташовуються між кільцями та розділяються сепаратором (4) (див. рисунок 1.2).

Підшипники кочення виготовляють з високоміцних підшипникових сталей з термічною обробкою.

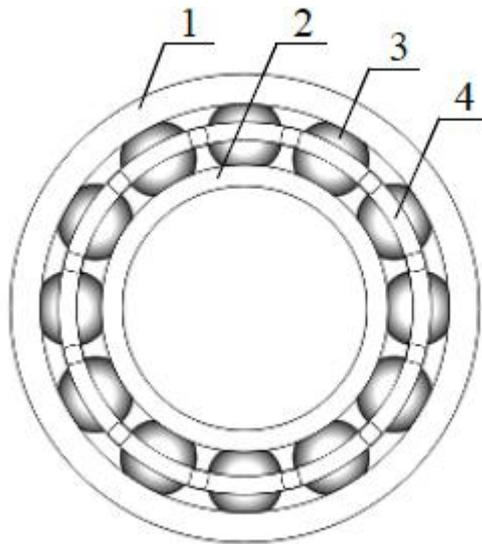


Рисунок 1.2 – Підшипник качення

Кільця та тіла кочення виготовляються, як правило, з шарикопідшипникових високовуглецевих хромистих сталей та цементованих легуваних сталей, а у випадку їх роботи при підвищених температурах та в агресивних середовищах, виготовляються з жароміцних та корозійностійких сталей. Сепаратори, з причини їх роботи в умовах інтенсивного зношування внаслідок тертя ковзання з тілами кочення та кільцями, виготовляють з антифрикційних матеріалів, наприклад, штампуванням з м'якої вуглецевої сталі, що володіє гарними антифрикційними властивостями, або, при високій швидкості обертання, з текстоліту, фторопласту, дюралюмінію, латуні та бронзи [19,25].

Згідно з даними [16], не більше 10 % підшипників кочення повністю відпрацьовують проектний термін служби. При цьому, за даними статистики [10], основними причинами виходу з ладу підшипників кочення є: порушення змащування – 40%, порушення збирання та встановлення – 30%, порушення умов експлуатації, підвищена вібрація – 20%, природний знос – 10%.

Досягненню підшипником граничного стану передують зміна його стану з причин зародження та розвитку пошкоджень, які, умовно, можна розділити на дві групи: дефекти виготовлення та збирання підшипникових вузлів і дефекти експлуатації. Дані групи включають в себе множинні дефекти, що

відрізняються за належністю до елемента підшипника та за характером виникнення та прояву. Це можуть бути дефекти кілець, тіл кочення, сепараторів, зниження жорсткості в місцях посадок, перевищення номінальних значень зазорів, перекоси підшипника, всілякі порушення, пов'язані із забезпеченням змащування підшипника [10].

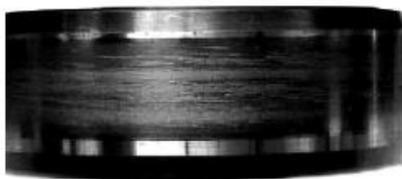
До найбільш поширених пошкоджень підшипників кочення слід віднести наступні: абразивний знос та втомне викришування доріжок внутрішнього і зовнішнього кілець, тіл кочення, внутрішньої поверхні гнізд сепаратора, тріщини та розриви перемичок сепаратора [15, 19]. В роботі [19] основним наслідком зносу підшипників відмічається контактна ерозія поверхонь кочення. На рисунку 1.3 представлені ілюстрації елементів підшипників кочення при різних пошкодженнях [14].



а.



в.



б.



г.

а – втомне викришування внутрішнього кільця,

б – абразивне зношування доріжки кочення,

в – викришування матеріалу тіла кочення, г – руйнування сепаратора

Рисунок 1.3 – Елементи підшипника кочення при різних видах зношування

В роботі [18] представлено результати дефектоскопії підшипників кочення, які експериментально піддавалися прискореному зносу. Визначено, що збільшення радіального та осьового зазорів у підшипнику в середньому до 24,7%, було спричинене викришуванням матеріалу на бігових доріжках

внутрішнього та зовнішнього кілець, корозійно-механічним зношуванням поверхонь тертя тіл кочення та зношуванням бічних стінок гнізд сепаратора.

Слід зазначити, що при роботі підшипника кочення, яка супроводжується його зношуванням, спостерігаються порушення мікро- та макрогеометрії елементів підшипника, які, навіть при невеликих значеннях, суттєво впливають на точність підшипника, яка характеризується величиною відносних зміщень внутрішнього та зовнішнього кілець при обертанні [19].

Надмірне зношування підшипників, що сприяє періодичному зміщенню вала з осі обертання, призводить до зростання величини неспіввісності валів агрегату, яка є характеристикою стану сполучення валів муфтою, і визначається як неспівпадання осей валів в зоні сполучення. Неспіввісність, також може бути викликана похибками при посадці півмуфт на вали, неякісним центруванням валів перед введенням агрегату в експлуатацію, порушенням центрування в процесі роботи через прогини вала та просідання фундаменту, тріщинами в тілі півмуфти, зношуванням отвору в півмуфті під вал, порушенням геометрії півмуфти, збільшеним отвором під пружний елемент (у випадку пружної втулково-пальцевої муфти) [19].

При підвищеній неспіввісності валів зростають динамічні навантаження на підшипникові опори та елементи муфти, підвищується вібрація машини, і можуть виникати згинні деформації вала, що скорочує ресурс півмуфт, елементів їх з'єднання і, особливо, підшипників [3,19].

На рисунку 1.4 показані види неспіввісності валів, що зустрічаються.

Поява і розвиток розглянутих пошкоджень підшипників і неспіввісності валів є причинами росту в агрегаті коливальних сил, переважно, механічної природи, наступних видів [3,10,19]:

- відцентрова сила (визначається зміщенням центром мас);
- кінематична сила (визначається рухом тіл по нерівностях);
- параметрична сила (визначається змінною жорсткістю тіл);
- ударна сила (визначається пружною взаємодією і відхиленням тіл);
- сила сухого тертя (визначається взаємодією тіл по нерівностях)

на поверхнях контакту).

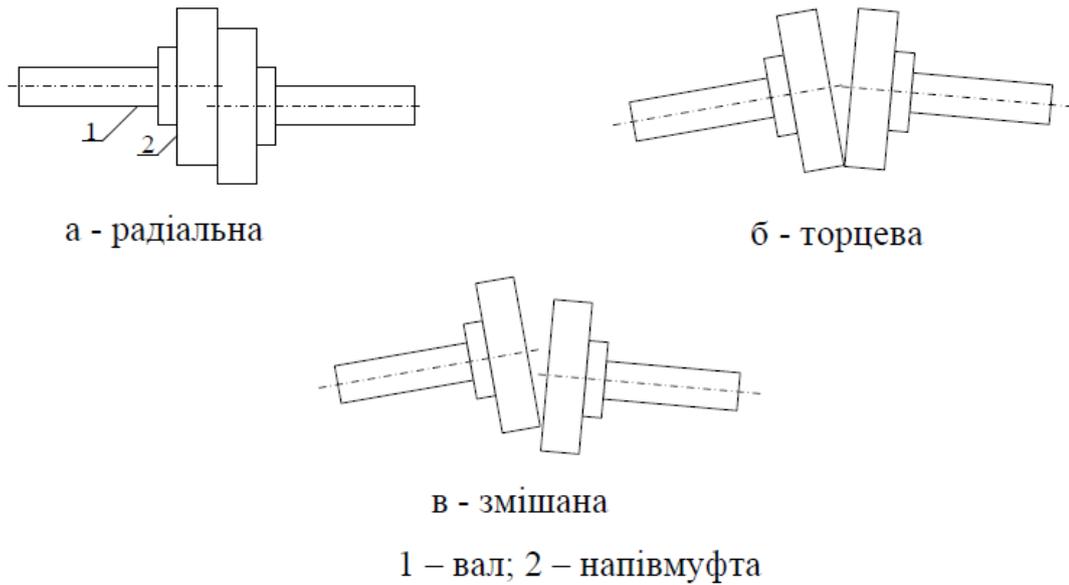


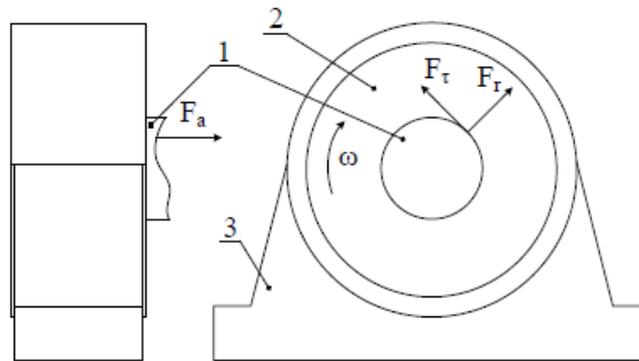
Рисунок 1.4 – Види неспіввісності валів

Механічні коливальні сили в ЦНА, що залежать від стану підшипників, сполучення валів та режиму роботи агрегату, поряд з силами електромагнітної та гідродинамічної природи, найбільшою мірою визначають вібрацію машини [23]. При цьому рівень вібрації є ключовим показником стану ВНА в цілому.

В загальному випадку, будь-яка з представлених механічних сил, що в кінцевому підсумку впливають на підшипникову опору, яка передає зусилля між ротором і корпусом агрегату, в частині напрямку дії може включати наступні складові: радіальну (F_r), осьову (F_a) і тангенціальну (F_t) [20]. Напрямки дії сил в підшипниковій опорі показані на рисунку 1.5. За характером зміни напрямку і величини сили поділяють на статичні, які постійні за модулем і напрямком у часі, і динамічні, що змінюються як за значенням, так і за напрямком дії [19].

При дії радіальної відцентрової сили інерції динамічного характеру (відносно системи координат нерухомої до ротора), що обумовлюється нерівноваженим станом вала внаслідок технологічних відхилень від осьової симетрії, неоднорідності матеріалу, 1 2 17 похибок виготовлення, спостерігаються періодичні згинальні коливання вала, що призводять до

динамічних навантажень на підшипникові опори, які визначають деформацію елементів підшипника в зоні контакту з валом.



1 – вал; 2 – підшипник; 3 – корпус

Рисунок 1.5 – Напрямки дії сил у підшипниковій опорі

Відцентрова сила інерції, що діє на опори, визначається кутовою швидкістю обертання некомпенсованих мас ротора – ω , значенням цих мас – m та радіусом кола обертання мас – r [19]:

$$F_{y,i} = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t). \quad (1.1)$$

Зі збільшенням значення відцентрових сил інтенсивно зростає ступінь зносу підшипників, спостерігається зростання вібрації агрегату з періодом коливань, що відповідає частоті обертання ротора [19,20].

При обертанні ротора в підшипниках мають місце сили тертя, кінематичні, ударні та параметричні сили в місці сполучення деталей, які проявляються внаслідок наявності нерівностей, пошкоджень в місцях тертя, особливостей роботи механізму підшипника і значно посилюються з появою та ростом неспіввісності валів агрегату.

Вектори дії цих сил можуть мати радіальну, осьову та тангенціальну складові (див. рисунок 1.5). У зв'язку з можливістю дії вищеперелічених сил в дотичному напрямку до поперечного перерізу вала, вони визначають змінні напруження від кручення у валах, крутильні коливання вала, пов'язані з кутовою деформацією його лінії в напрямку дії сили.

Крутильні коливання вала, крім вібрації, зумовлюють наявність пульсації крутного моменту на валу машини, оскільки при крученні внутрішні дотичні

сили повністю зводяться до крутного моменту, а напруження від кручення вала пов'язане з крутним моментом наступним співвідношенням [11]:

$$\tau_{\kappa} = \frac{M}{W_{\kappa}} = \frac{M}{(\pi \cdot d^3 / 16)} \approx \frac{M}{0,2 \cdot d^3}, \quad (1.2)$$

де M – крутний момент на валу;

W_{κ} – полярний момент опору перерізу вала;

d – діаметр вала.

Варто зазначити, що вплив радіальної сили, створюваної при обертанні ротора, забезпечує зростання контактних напружень у підшипнику та додаткову модуляцію ударних, кінематичних сил і сил тертя в зоні контакту [19, 21].

Таким чином, зміна стану підшипників консольних ВНА через пошкодження, зокрема втомне викришування та абразивне зношування поверхонь доріжок кочення, тіл кочення, руйнування сепаратора, що супроводжуються збільшенням радіальних та осьових зазорів у підшипнику, призводить до зростання механічних коливальних сил [23], що визначає підвищення динамічних навантажень на опору, зростання рівня вібрації та коливання крутного моменту на валу агрегату.

У свою чергу, погіршення стану сполучення валів ВНА, що характеризується зростанням неспіввісності валів, також призводить до наростання механічних коливальних сил в агрегаті та вібрації, переважно, на обертових частотах обертання вала, а також коливань крутного моменту на валу. До того ж, викликаючи згинні деформації вала, пов'язані з нею коливання та збільшення динамічних сил в опорі, неспіввісність визначає підвищений знос підшипників агрегату [19, 23].

1.2 Методи визначення станів вузлів консольних ВНА

Установлення поточного стану вузлів працюючих ВНА забезпечується під час проведення процедур моніторингу технічного стану, що реалізується в рамках системи ТОіР обладнання на підприємстві. Переважне використання методів моніторингу, що дозволяють фактично в режимі реального часу без

виведення з експлуатації агрегату визначити стан ресурсовизначальних вузлів, є очевидним. Такі методи забезпечують мінімізацію ймовірності раптових відмов обладнання, що сприяє зростанню надійності та безпеки протікання технологічних процесів виробництва, в тому числі і з економічної точки зору. Крім того, розглянуті методи діагностики дозволяють підприємствам ефективно організувати систему ППР на основі поєднання регламентованого ремонту та ремонту за технічним станом, що використовується для більшої частини обладнання підприємств, в тому числі і для консольних ВНА на нафтогазових промислах. У цьому випадку базу структури ремонтного циклу ВНА складають заходи з регламентованого ремонту основної частини вузлів агрегату з встановленими термінами. Терміни ремонтів за технічним станом окремих вузлів, якими можуть бути підшипники та сполучення валів, визначаються додатково [13].

Реалізація системи ППР з виконанням ремонтів за технічним станом дозволяє знизити обсяги ремонту, оптимізувати його терміни та забезпечити диференційований підхід до обслуговування обладнання, що має різний ступінь зносу вузлів. За деякими даними впровадження ремонтів за технічним станом може принести вигоду підприємству, еквівалентну 30% від загальної вартості обладнання, що експлуатується [23].

Процедури оцінки поточного стану вузлів машин без виведення з експлуатації полягають у проведенні робіт з реєстрації, як правило, непрямих параметрів, що опосередковано характеризують технічний стан, а також у виконанні аналізу отриманих діагностичних даних для визначення виду, глибини розвитку дефекту та прогнозування залишкового терміну збереження агрегатом працездатного стану [13]. Моніторинг 20 стану, в загальному випадку, регламентується державними стандартами, керівними документами та технологічними регламентами підприємств [6,7], і реалізується різними методами, що передбачають обробку характерних непрямих діагностичних параметрів.

Відповідно до [2], основними аналізованими параметрами при виконанні процедури моніторингу стану насосів і, пов'язаних з ними, приводних електродвигунів є наступні: температура вузлів, напір та витрата рідини насоса, електричні параметри двигуна, споживана потужність, шум, вібрація, витрата і тиск масла, частинки зносу в мастилі.

За результатами аналізу ряду джерел можна коротко представити методи визначення станів вузлів електроприводних консольних ВНА без виведення з роботи [16].

Контроль робочих характеристик

Полягає у порівнянні базових робочих характеристик насосного агрегату (залежності значень напору (напірна характеристика), потужності та ККД від значень подачі насоса), отриманих після монтажу, або капітального ремонту з фактичними, які зазнають змін в процесі експлуатації агрегату у зв'язку зі збільшенням гідравлічних, механічних та об'ємних втрат в насосі через зношування торцевих та щілинних ущільнень, робочого колеса, проточної частини корпусу та інших елементів агрегату, зміну умов перекачування [4,6,16]. Параметрична діагностика, в першу чергу, має на меті оцінку енергоефективності експлуатації та прогнозування моменту часу неприйняттого зниження ККД і виведення агрегату з експлуатації в ремонт [80].

Температурний контроль

Реалізується контактними способами контролю температури поверхні та безконтактними способами моніторингу параметрів температурного поля для перевірки працездатності вузлів насосних агрегатів, визначення механічних та електромагнітних несправностей [17].

Температурний контроль відцентрових насосних агрегатів проводиться в рамках оперативного та планового діагностичних контролів з урахуванням вимог ДСТУ [1,2,4].

Вібраційний контроль

Моніторинг та аналіз вібраційних параметрів є основними та обов'язковими заходами в рамках оперативних та планових діагностичних контролів технічного стану насосного обладнання. Контроль вібрації дозволяє оцінити якість виготовлення, монтажу та технічний стан обладнання: наявність надмірних зазорів у з'єднаннях, деформацію та зношування деталей, просідання фундаментів, порушення центрування валів, ослаблення кріплень і т.д. [1,3,6].

Загальні положення про вібраційну діагностику, технічні вимоги до засобів контролю, точок вимірювання та способів розташування вимірювальної апаратури, нормування діагностичних параметрів, порядку збору та аналізу даних встановлюються відповідними нормативними документами [1,3,5].

Контроль параметрів амплітудного спектра тока електродвигателя

Наразі активно вивчається та має практичне значення метод оцінки технічного стану електроприводних динамічних машин, зокрема консольних ВНА, що входить до складу групи методів електричного неруйнівного контролю та базується на реєстрації й аналізі електричних характеристик об'єкта діагностики [5], який передбачає використання як діагностичні дані параметрів сигналів фазних (лінійних) струмів і напруг ланцюга живлення електродвигуна, отриманих шляхом представлення даних сигналів у різних формах, зокрема, у формі амплітудного спектра сигналу.

У роботі [20] за допомогою скінченно-елементного моделювання зазначено про можливість визначення обриву стержня короткозамкненого ротора електродвигуна за формою кривої залишкового пускового струму та коефіцієнтами вейвлет-перетворення з використанням алгоритму виділення з сигналу струму основної складової. Також задача діагностики дефектів короткозамкненої обмотки високовольтних асинхронних електродвигунів вирішується в роботі [17] шляхом виділення ознак у компонентах вейвлет-розкладання осцилограм модуля узагальненого вектора струму статора при пуску двигуна та реалізації діагностичної системи на основі нечіткої логіки. За результатами досліджень, викладених у роботах [22,23], визначаються

діагностичні ознаки міжвиткових замикань в обмотках статора у спектрі огинаючих осцилограм струмів статора та механічних дефектів підшипників електродвигуна в амплітудних спектрах узагальненого вектора струму. Несправність типу ексцентриситету ротора електродвигуна досліджено за аналізом частотних складових спектрів струму фази обмотки статора [16] та за часовими характеристиками фазних струмів електродвигуна в режимі пуску [10]. Відомості про визначення частот діагностичних ознак несправностей обмоток статора, ротора, пошкоджень підшипників, статичного та динамічного ексцентриситетів ротора електродвигуна при аналізі спектрів статорного струму містяться в роботі [7].

У працях закордонних авторів [22] викладаються підходи до визначення дефектів ротора та міжвиткових замикань в обмотках асинхронних машин за характеристиками огинаючих загального сигналу струму статора трьох фаз двигуна при зміні моменту опору на валу. У роботах [24,26] визначено частотні компоненти амплітудного спектра струму статора двигуна, що реагують на зміну стану підшипників кочення при їх деградації забрудненням та подальшою відмовою в умовах варіювання навантаження на валу [20], а також при зміні габаритів заглиблення в доріжці кочення зовнішнього кільця підшипника [26]. Результати іншого дослідження [23] містять кількісну оцінку діагностичних ознак розвитку дефекту зовнішньої обойми підшипника кочення асинхронного двигуна потужністю 370 Вт у формі наскрізного отвору трьох різних діаметрів. Ознаки визначено в графіках квадрата огинаючої спектра сумарного сигналу фазних струмів статора двигуна. Також вивченню можливостей визначення такого дефекту в зовнішній обоймі підшипника асинхронного двигуна потужністю 3 кВт за 24 параметрами амплітудного спектра струму статора присвячена робота [25]. У статті [18] представлено підсумки комп'ютерного моделювання та експерименту з оцінки ступеня розвитку ексцентриситету ротора синхронної машини за діагностичними параметрами у формі вектора коефіцієнтів, що отримується обробкою спектра струму статора та вейвлет-перетворенням сигналу струму. Авторами роботи

[24] проведено дослідження з визначення ознак пошкоджень внутрішньої та зовнішньої обойми, тіл кочення підшипників асинхронних машин спільно в спектрах вібрації, струму статора та крутного моменту на валу. У роботі [19] показано можливість встановлення поточного стану підшипників кочення двигуна за коефіцієнтами вейвлет-перетворення сигналу струму статора з приведенням алгоритму аналізу. За результатами досліджень [19] при наявності та розвитку коротких замикань в статорі синхронного двигуна отримано ознаки в амплітудних спектрах сигналів та вейвлет-перетворених сигналах струму статора і вібрації двигуна.

У рамках розглянутих робіт досліджуються діагностичні параметри та ознаки несправностей виключно електродвигунів у складі агрегатів. При цьому можливі дефекти в приводному механізмі, зокрема насосних установках, не розглядаються.

Представлені в роботах [15,16], а також в описах до дослідницьких комплексів [24] результати містять діагностичні ознаки пошкоджень обмотки статора і ротора двигуна, ексцентриситету ротора, неспіввісності валів двигуна і механічного навантаження, пошкодження підшипників кочення, механічні пошкодження приводного обладнання, в тому числі насосних установок, з лопатковою частотою, що визначаються в амплітудних спектрах сигналів фазного струму, і в спектрах модуля узагальненого вектора фазних струмів. В описі до способу [18] відзначається можливість ефективного використання інструментів аналізу амплітудного спектру сигналів фазних струмів при діагностиці заглибних електроцентробіжних насосів. У роботі [22] містяться результати досліджень з оцінки зношеності підшипників, наявності міжвиткових і 25 міжфазних замикань в обмотках двигунів, визначення режиму роботи електроприводних машинних агрегатів нафтогазових виробництв за інтегральним діагностичним параметром, що формується за значеннями коефіцієнтів амплітуд частотних складових струму і напруги. Дослідженню методу діагностики машинних агрегатів спектральним аналізом струму і напруги двигуна присвячені роботи [8,9], в яких визначається

інтегральний діагностичний параметр пошкодженості агрегату при наявності дефектів підшипників, погіршенні стану ізоляції обмотки, наявності дефектів стрижнів ротора двигуна і пошкодженнях робочого колеса насоса.

Шведські дослідники у своїй роботі [28] визначили діагностичні ознаки виникнення кавітації під час роботи ВНА. Процедури визначення механічних дефектів не описані. У роботі [29] розглядається виявлення дефектів зубів шестерень редуктора, який приводиться асинхронним двигуном, за складовими амплітудного спектру та спектру огибаючої сигналу струму статора двигуна. Представлено математичну модель формування сигналу струму та експериментальні дослідження. Стаття [29] містить результати з визначення пошкодженості робочого колеса та підшипників відцентрового насосного агрегату за допомогою методу емпіричної модової декомпозиції сигналу струму статора двигуна, а також побудовою та аналізом спектру огибаючої сигналу струму. Результати роботи [31] представляють можливість та алгоритм визначення пошкодження робочого колеса відцентрового насоса за струмами фаз статора двигуна, представленими діаграмами в системі координат $d-q$, при різних рівнях закриття крана на всмоктувальній лінії. Дослідження [29] містять теоретичне обґрунтування та експериментальні результати виявлення дефектів робочого колеса та внутрішнього і зовнішнього кілець підшипника за відхиленням середнього квадратичного значення та зміною форм часових представлень сигналів струму статора. Авторами роботи [32] показано діагностичні ознаки в спектрі струму статора двигуна та спектрах віброшвидкості, що фіксується в трьох напрямках на приєднувальному фланці напірного трубопроводу при виникненні пошкодження у внутрішній порожнині робочого колеса відцентрового насосного агрегату. Дано кількісну оцінку реакції різних частотних складових спектрів на появу дефекту.

З точки зору апаратного та програмного інструментарію для реалізації процедур діагностики насосних агрегатів методом аналізу спектрів струму електродвигуна розроблено безліч технічних рішень та пропозицій. В роботах

[22,24] містяться не тільки алгоритмічні аспекти методу, а й представлені рекомендації та вказівки щодо komponування вимірювальних комплексів, елементами яких є апаратура та пристрої затвердженого типу, що серійно випускаються промисловістю, та функціональним можливостям ПЗ. Тим не менш, існують наступні передумови, що визначають необхідність подальшого розвитку методу:

1) Недостатнє опрацювання апарату класифікації технічного стану обладнання за пороговими значеннями діагностичних параметрів, зокрема, при оцінці технічного стану агрегатів за наявності в ньому механічних несправностей, що найбільш суттєво визначають працездатність машини, таких як несправність підшипників та порушення співвісності валів. При цьому існуючі пропозиції щодо визначення порогових значень діагностичних параметрів, спільних для всіх дефектів, мають розбіжності. Так, за рекомендацією [2] початкове порогове значення діагностичного параметра для визначення дефекту в механізмі середнього рівня визначається різницею амплітуд основної гармоніки та інформативної частотної складової у 40 дБ, а рівня сильного дефекту в 34 – 30 дБ. У свою чергу, в ДСТУ 809:2015 [2] зазначається гранична різниця в амплітудах 50 дБ при визначенні деяких дефектів високого рівня.

2) Необхідність визначення діагностичних ознак несправностей в агрегатах з урахуванням можливих змін структурних параметрів та режимів роботи машини відповідно до вимог ДСТУ 2862-94. [5]. Під структурними параметрами розуміються особливості конструкції агрегату та його вузлів, робочі характеристики, режимні параметри і т.д.

Висновки по першому розділу

З точки зору апаратного та програмного інструментарію для реалізації процедур діагностики насосних агрегатів методом аналізу спектрів струму електродвигуна розроблено безліч технічних рішень та пропозицій.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ВУЗЛІВ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ СПЕКТРІВ СТРУМУ ЇХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА ВІБРАЦІЙНИМ КРИТЕРІЄМ

2. 1 Методика визначення стану вузлів ВНА за параметрами спектрів струму їх електродвигунів

При аналізі джерел, що містять вимоги та рекомендації щодо розробки методик визначення технічного стану вузлів консольних ВНА аналізом амплітудних спектрів струму електродвигуна, встановлено, що основні вимірювання виконуються за величиною струму в одній фазі лінії живлення електродвигуна різними пристроями безконтактного типу з подальшою аналого-цифровою обробкою інформації про сигнал та аналізом параметрів амплітудного спектра.

У ДСТУ 8312:2015 [4] містяться загальні вказівки та рекомендації щодо організації методик контролю технічного стану електродвигунів та приводних механізмів аналізом амплітудних спектрів струму.

Вимірювання рекомендується виконувати при повному нормальному навантаженні двигуна у фазному проводі безпосередньо, або у вторинній обмотці вимірювального трансформатора за допомогою струмовимірювальних кліщів. Рівень дефекту оцінюється за різницею амплітуд між основною складовою спектра струму та інформативною складовою на частоті дефекту.

Методика діагностування механізмів з електроприводом за споживаним струмом [10] може застосовуватися для діагностики консольних ВНА, оскільки передбачає діагностику електродвигунів та механізмів з однією лінією вала.

Основним вимірюванням за методикою [2] є фіксація параметрів спектра струму в одній з фаз електродвигуна за допомогою штатно встановленого вимірювального трансформатора, струмових кліщів, або пояса Роговського. Додаткові вимірювання струму проводяться в трьох фазах і нейтральному

проводі для розширення спектра визначених несправностей. Також зазначено, що постановка діагнозу виконується з урахуванням інформації про несиметрію та нелінійні спотворення напруги живлення двигуна.

Нормованими діагностичними параметрами за наявними в методиці діагностичними ознаками дефектів виступають значення амплітуд інформативних складових спектрів струму, віднесених до амплітуди основної складової. Якщо для дефекту є інформативними дві та більше складових, то кінцеве відношення визначається або за амплітудою максимальної з інформативних компонент, або за середнім значенням з амплітуд інформативних складових.

Пропонується встановлювати два рівні дефектів: «попередження» та «небезпека». Граничні значення діагностичних параметрів на початковому етапі рекомендується визначати в логарифмічних одиницях відносно значення основного струму: мінус 40 дБ для середнього дефекту, мінус 34 – 30 дБ для сильного. У подальшому порогові значення уточнюються в задачі групової діагностики, і створюється маска порогів.

Порядок виконання методики передбачає: вибір вимірювальних перетворювачів та їх встановлення, визначення режиму роботи агрегату, визначення виду системи діагностики (стаціонарна, переносна та ін.), оптимізацію кількості вимірювань відповідно до типу системи і вимог до періодичності контролів, виконання вимірювань, накопичення результатів, постановку діагнозу, прогнозу та формування звітної документації.

Проаналізувавши ряд робіт [2,4,18] та вимоги ДСТУ ISO 20361-2021 [1], можна представити в узагальненій формі послідовність операцій методики визначення стану вузлів консольних ВНА аналізом амплітудного спектра струму двигуна на рисунку 2.1 [13].

На першому етапі, в залежності від значущості об'єкта контролю, його розташування, можливостей інформаційно-вимірювальної мережі підприємства, необхідно визначити тип системи контролю: стаціонарна, встановлена на постійній основі з можливістю безперервного моніторингу та

аналізу діагностичних параметрів в режимі реального часу, напівстаціонарна та мобільна, що дозволяють здійснювати контроль в періоди часу в залежності від стану обладнання та графіків контролів.

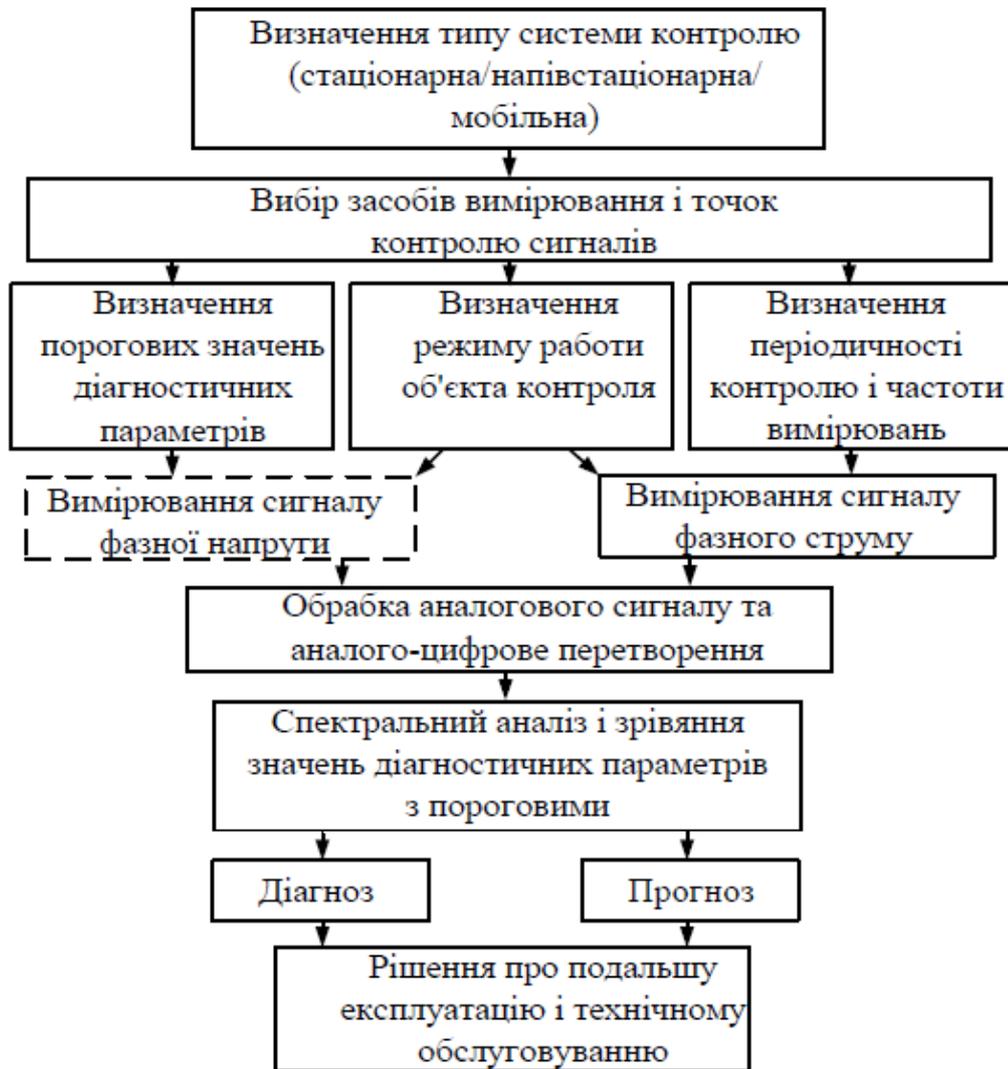


Рисунок 2.1 – Порядок оцінки стану вузлів ВНА аналізом спектрів струму двигуна

Наступним кроком здійснюється вибір засобів вимірювання сигналів та точок їх розміщення.

Вимірювання фазних струмів в лініях живлення електродвигунів діагностованих агрегатів може виконуватися безконтактними вимірювальними перетворювачами різної конструкції, в тому числі: струмові кліщі з аналоговим вихідним сигналом (див. рисунок 2.2 а), вимірювальні трансформатори струму та датчики струму на ефекті Холла з нормованим

коефіцієнтом трансформації (див. рисунок 2.2 б), гнучкі струмові трансформатори на немагнітних каркасах (пояс Роговського) (див. рисунок 2.2. в) [2,12].

Приклади безконтактних вимірювальних перетворювачів показано на рисунку 1.7.



Рисунок 2.2 – Засоби вимірювання сигналів струму та напруги

Вимірювання напруги може здійснюватися датчиками напруги трансформаторного типу та на ефекті Холла з пропорційним виходом (див. рисунок 2.2 г), а також за допомогою підключення дільників напруги [2,90]. Вибір того чи іншого типу первинного вимірювального перетворювача (ПВП) обумовлюється типом вимірювальної системи (стаціонарна/мобільна), необхідністю узгодження параметрів датчиків з параметрами вторинних вимірювальних пристроїв, ергономікою використання.

Точки розміщення ПВП визначаються на лінії живлення електродвигуна в коробці виводів електродвигуна, або в розподільчому вузлі. При цьому перетворювачі підключаються напряму до жил кабелю [2,12].

Граничні значення вимірюваних струму та напруги для ПВП визначаються параметрами об'єкта контролю. Вимірювачі струму повинні бути розраховані на значення вимірюваного струму не менше подвоєного значення $3I$ номінального струму електродвигуна [2]. Параметри входних ланцюгів апаратури для аналого-цифрового перетворення сигналів повинні узгоджуватися з вихідними параметрами первинних перетворювачів. Допустима частота дискретизації перетворювачів повинна бути не менше подвоєного значення верхньої межі оцінюваного частотного діапазону спектрів сигналів. Інтерфейс вихідних ланцюгів перетворювачів повинен

відповідати необхідному типу інтерфейсу для підключення до індивідуального комп'ютера для діагностики, або автоматизованого робочого місця (АРМ) диспетчера.

Для зниження впливу на спектр струму завад, наведених іншими електроприймачами мережі, за відповідної можливості вимірювальні перетворювачі розміщуються ближче до контрольованого об'єкта у віддаленні від точки загального приєднання електроприймачів (розподільчого вузла), в якій, за наявності підключеного електрообладнання – джерел несинусоїдальності напруги, спостерігається максимальний вплив завад на вимірюваний сигнал [2,11].

Як діагностичні параметри під час аналізу амплітудного спектра струму рекомендується приймати значення амплітуд інформативних частотних складових, віднесені до значення амплітуди основної гармоніки струму (коефіцієнти частотних складових) [2,4,13]. Порогові значення діагностичних параметрів, виходячи з існуючого рівня розробки методу, на початковому етапі діагностики можна визначити згідно з рекомендаціями [2], а потім коригувати в міру накопичення відомостей про значення діагностичних параметрів і динаміку зміни технічного стану об'єкта контролю. Порогові значення діагностичних параметрів повинні коригуватися з урахуванням зміни структурних параметрів контрольованого агрегату [27].

Згідно з вимогами ДСТУ 2862-94, ДСТУ ISO 20361-2021 [27,41,43] має бути визначено режим роботи агрегату, оскільки параметри, що характеризують даний режим, є суттєвими факторами зміни діагностичних ознак несправностей.

Оптимальна періодичність контролів визначається типом системи, значущістю об'єкта контролю та його поточним технічним станом. При використанні стаціонарної системи, аналогічно методу вібраційної діагностики, можна виконувати як безперервний збір та аналіз діагностичних даних, так і періодичний [6]. При використанні напівстаціонарної та мобільної систем виконується періодичний збір та аналіз даних, який є цілком достатнім

для машин невеликих габаритів та потужності при оцінці несправностей підшипників та порушення співвісності валів [25]. Періодичність контролів для найбільш відповідальних агрегатів варіюється від одного разу на дві години при оперативному контролі до разу на три місяці при плановому контролі всіма видами систем. Менш відповідальні установки можуть піддаватися контролю з періодичністю до трьох років. З розвитком дефектів в обладнанні періодичність контролів скорочується.

З метою отримання більш достовірного значення діагностичного параметра в умовах впливу на результат вимірювання флуктуацій частотних складових в спектрах сигналів і похибок засобів вимірювання при виконанні контролів проводять багаторазовий запис значень діагностичних параметрів протягом деякого інтервалу часу. Частота вимірювань визначається заданою точністю результату і похибкою засобів вимірювання [7,19].

Вимірювання сигналів струмів проводиться або в одній фазі лінії живлення двигуна, що є достатнім для визначення більшості дефектів агрегату, або у всіх трьох фазах лінії живлення для отримання додаткової інформації про наявність несиметрії навантаження в ланцюзі статора та підвищення інформативності діагностичних ознак міжвиткових замикань в обмотці статора та обривах стержнів ротора [2,22], а також для компенсації впливу основної складової напруги промислової частоти внаслідок її взаємної компенсації по трьох фазах [18].

Вимірювання сигналів напруг виконується або в одній фазі лінії живлення двигуна, тій самій, де встановлені первинні перетворювачі струму, або у всіх трьох фазах для визначення спотворень сигналів напруги та струму від тимчасових частотних складових та несиметрії напруги живлення [2].

Подальші операції з обробки аналогових сигналів, що надходять з первинних вимірювальних перетворювачів, такі як фільтрація сигналів та аналого-цифрове перетворення, виконуються спеціалізованим апаратним забезпеченням з технічними характеристиками, узгодженими з параметрами інших елементів вимірювальних каналів вимірювальних систем контролю.

Формування спектрів виконується спеціалізованим ПЗ у складі вимірювальної системи контролю з використанням алгоритмів дискретного, а також швидкого перетворень Фур'є (ДПФ, ШПФ) [8].

За отриманими даними про значення параметрів амплітудних спектрів сигналів струму та напруги інструментарієм ПЗ виконується порівняння поточних значень діагностичних параметрів з пороговими значеннями, закладеними в базу даних програми, що дозволяє визначити наявність несправності та оцінити клас технічного стану об'єкта контролю за заздалегідь заданими алгоритмами. Існуючі алгоритми дозволяють автоматизувати процес постановки діагнозу за пороговими значеннями параметрів, забезпечити запис результатів обробки діагностичної інформації в базу даних для подальшого аналізу з цілями уточнення діагнозу, коригування порогових значень та виконання прогнозування технічного стану [2,4].

Відповідно до встановленого класу технічного стану об'єкта та результату прогнозування приймається рішення про подальшу експлуатацію із заданими режимами роботи та визначеною періодичністю контролів, або виведення агрегату з експлуатації.

2.2 Методика визначення стану вузлів консольних ВНА за вібраційним критерієм

Облік поточних параметрів вібрації при оцінці стану ВНА в цілому та його вузлів є обов'язковим і вимагається в рамках моніторингу технічного стану згідно з державними стандартами, регламентами підприємств та паспортами на агрегати.

Діагностичними параметрами вібраційного контролю стану вузлів ЦНА можуть виступати інтегральні параметри полігармонійного сигналу вібрації: середні квадратичні значення (СКЗ) віброшвидкості, прискорення, переміщення, а також характеристики спектрів, кепстрів сигналів вібрації та інші параметри, передбачені різними методиками вібромоніторингу [13].

Найбільш використовуваним параметром оцінки вібрації консольних ВНА є СКЗ віброшвидкості. Це визначається порівняною простотою технічної

реалізації контролю за даним параметром, а також його високою інформативністю з точки зору відображення енергії вібрації та руйнівної здатності коливань агрегатів у частотному діапазоні 10-1000 Гц [14].

Як вимірювальна апаратура використовуються прилади, що містять детектор СКЗ та індикатор для зчитування СКЗ вимірюваної величини, а також прилади, що містять або детектор СКЗ, або усереднюючий детектор, але калібровані для зчитування параметрів коливань [20]. У мобільних системах засобами вимірювань виступають готові скомпоновані прилади, що включають в себе ПВП вібрації, блок обробки сигналу з показуючим пристроєм та блок живлення, загальні вимоги до яких встановлені в ДСТУ ISO 2954-2014 [33]. Прикладами таких приладів є: переносний комплект віброметра модель 687A01 виробництва PCB Piezotronics, Inc., США, що вимірює СКЗ вібрації за допомогою промислового акселерометра на магніті, який має навушники для звукового моніторингу; цифровий віброметр AR63B виробництва SmartSensor, що вимірює СКЗ вібрації за допомогою датчика на магнітному кріпленні, або контактного щупа, а також дозволяє вимірювати температуру.

Точками вимірювання СКЗ віброшвидкості є зони поблизу підшипникових опор на корпусах насоса та електродвигуна ВНА. Найбільш повним є вимірювання вібрації в трьох взаємно перпендикулярних напрямках: вертикальна та горизонтальна радіальні та осьова складові. При цьому в процесі експлуатації достатньо виконувати вимірювання за двома радіальними складовими [24].

На початкових етапах моніторингу для визначення порогових значень діагностичних параметрів виконують розрахунок граничних СКЗ віброшвидкості для границь видів станів у відповідних частотних діапазонах з встановленням попереджувальних рівнів та рівнів зупинки за рекомендаціями [24, 30], а також користуються, встановленими в стандартах, значеннями для машин, в тому числі насосів та електродвигунів, з визначеними характеристиками за [24, 25].

За рівень вібрації приймається максимальне з вимірних значень параметра по всіх точках на корпусі в визначених умовах та усталеному режимі роботи [24]. Аналогові сигнали з датчиків надходять на входи пристроїв аналогово-цифрової обробки для реєстрації та представлення даних про вимірювання в наочній формі.

За результатами вимірювань визначається вид технічного стану агрегату та приймається рішення про допустимість його подальшої експлуатації без обмежень, з обмеженням за часом, зупинку агрегату, а також можливе коригування періодів контролю на підставі результатів прогнозу зміни діагностичного параметра в часі [24, 25].

2.3 Методи математичного моделювання для дослідження діагностичних параметрів

Розробка та аналіз моделей об'єктів контролю є ефективним інструментом при дослідженні методів діагностики динамічного обладнання. Моделювання дозволяє формалізовано описати найбільш суттєві властивості об'єкта в їх взаємозв'язках за параметрами та представити реакції об'єкта, що виражаються у значеннях величин, властивих розглянутому методу контролю, на впливи за різними параметрами, властивими даному об'єкту і залежними від конструктивних особливостей об'єкта, режиму роботи, умов експлуатації та інших факторів.

2.3.1 Методи моделювання об'єктів контролю

На рисунку 2.1 представлені методи моделювання, які використовуються для аналізу поведінки динамічного обладнання в рамках досліджень методів контролю технічного стану [17,24].

Методи статистичного моделювання передбачають побудову моделей, заснованих на виявлених статистичних закономірностях поведінки об'єкта. Методи передбачають використання значних обсягів статистичних даних та застосування спеціалізованого програмного забезпечення для спрощення обчислювальних операцій [14]. Щодо досліджень методів контролю технічного стану динамічних машин за електричними параметрами,

статистичне моделювання застосовується досить широко як з метою визначення діагностичних ознак деградаційних процесів у вузлах обладнання та накопичення бази даних, так і для апробації розроблених методик в реальних умовах на діючому обладнанні [26].

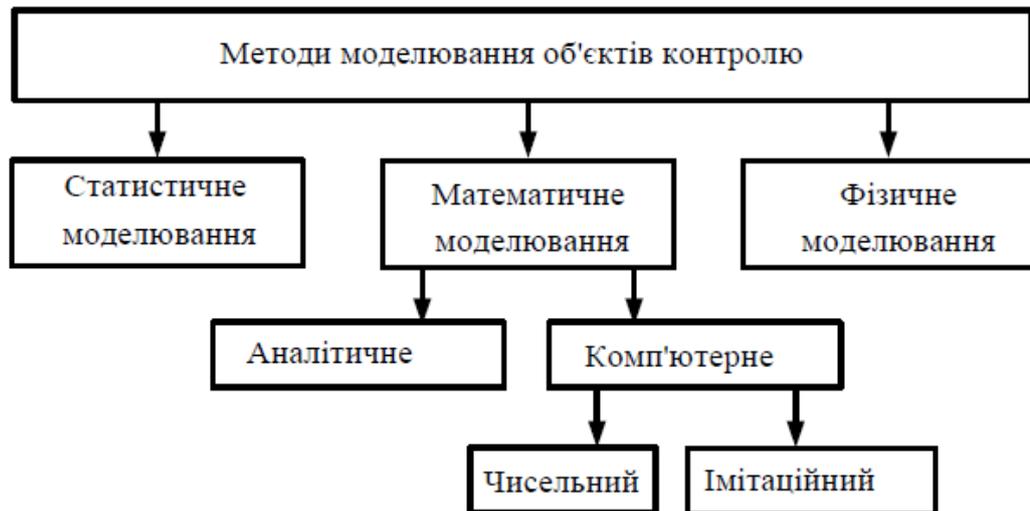


Рисунок 2.3 – Методи моделювання об'єктів контролю

Фізичне моделювання полягає в реалізації експериментальних досліджень на моделі, фізично подібній до реального об'єкта, але меншій за розмірами. Методи дозволяють досліджувати поведінку передбачуваного об'єкта без необхідності його відтворення в реальному розмірі. При цьому методи дають коректні результати за умови суворого дотримання фізичної подібності моделі реальному об'єкту [14]. В рамках розробок методів контролю електричних параметрів об'єктів фізичне моделювання виконується на спеціалізованих лабораторних стендах [4, 17].

На етапах теоретичних досліджень при розробці методів діагностики за електричними параметрами ефективно використовується математичне моделювання, що реалізується аналітичними та комп'ютерними методами. Таке моделювання дозволяє виконати попередній аналіз можливої поведінки об'єкта при зміні параметрів і впливі врахованих факторів без суттєвих витрат на реалізацію моделювання. При цьому варто відзначити складність створення багатопараметричних моделей, що дозволяють враховувати значну кількість факторів [24].

Аналітичний метод передбачає створення формалізованих образів реальних об'єктів із застосуванням алгебраїчних, диференціальних, інтегральних рівнянь і логічних умов. Комп'ютерне моделювання може виконуватися числовим та імітаційним методами, за допомогою яких можливо здійснювати розв'язання рівнянь та імітувати поведінку досліджуваного об'єкта [27].

За допомогою аналітичного та числового методів моделювання розробляються і досліджуються аналітичні математичні моделі електродвигунів, що дозволяють враховувати різні дефекти електромагнітної системи [12], зміну параметрів двигуна в перехідних режимах [15], несправності при роботі двигуна в складі відцентрових насосних агрегатів [24].

Імітаційне моделювання дозволяє створити модель, яка з достатньою точністю описує реальний об'єкт, і проводити з нею експерименти для вивчення поведінки об'єкта за певних умов. Метод імітаційного моделювання дозволяє виконувати складні обчислювальні операції за відносно невеликий час, має гарну повторюваність, точність, відрізняється наочністю структури моделі та результату моделювання [20], що визначає перевагу його використання для моделювання безлічі процесів та об'єктів за наявності комп'ютерної техніки з достатньою продуктивністю.

Застосування інструментів імітаційного моделювання в рамках розробок методик діагностики за електричними параметрами досліджує електродвигуни та насосні агрегати з урахуванням різних несправностей шляхом складання моделей методом кінцевих елементів [24], а також з використанням візуальних блок-діаграм у вигляді орієнтованих графів у графічних середовищах імітаційного моделювання, наприклад, Matlab Simulink [20].

2.3.2 Імітаційне моделювання об'єктів контролю побудовою візуальних блок-діаграм

У розпорядження сучасного дослідника надається декілька програмних продуктів з графічним інтерфейсом, що дозволяють розробляти моделі динамічних об'єктів з використанням візуальних блок-діаграм.

Програма Jigrein має функціональний інтерфейс і дозволяє будувати візуальні схеми об'єктів моделювання, однак не надає можливості роботи з вихідними даними моделі [20].

Досить відомий програмний продукт Scilab має широкий спектр функцій, в тому числі розробку та аналіз візуальних блок-діаграм моделей при використанні застосунку Xcos. Програмі властива відкритість, функціональність, підтримка мов програмування високого рівня і т.д. При цьому відзначається недолік в різноманітності інструментарію Xcos для створення блок-діаграм складних моделей [24].

Найбільш поширеним програмним продуктом, що забезпечує можливість створення візуальних блок-діаграм складних моделей об'єктів, є Matlab з пакетом візуального програмування Simulink.

Перевагою даного продукту є найбільш великий набір інструментів для створення блок-діаграм складних динамічних моделей, різнопланового аналізу даних моделі та оформлення результатів аналізу [24].

Simulink дозволяє за допомогою організації певних взаємозв'язків між бібліотечними візуальними блоками проводити імітацію різних режимів роботи систем, досліджуючи при цьому структурні зміни, що в них відбуваються, і контролюючи характер модуляції основних параметрів моделі [16]. На рисунку 2.4 представлений приклад спрямованого об'єднання блоків у блок-діаграму в програмному середовищі Simulink Matlab R2015a (8.5.0.197613).

Бібліотека Simulink включає в себе блоки математичних операцій різної складності, блоки передавальних функцій, блоки введення параметрів з різними властивостями і виведення в графічних і числових формах і багато інших.

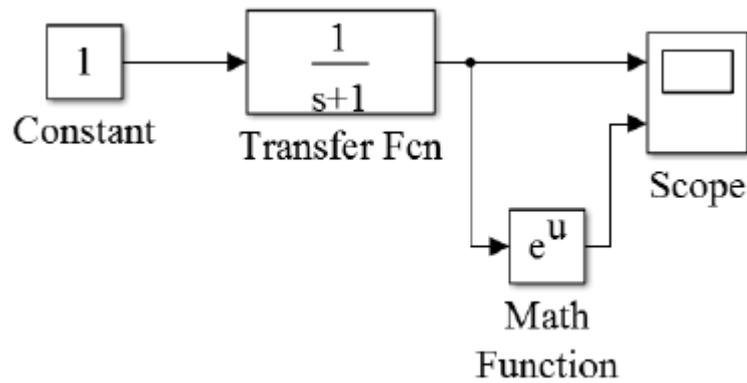


Рисунок 2.4 – Приклад блок-діаграми Simulink

Широкі можливості програмного середовища Matlab Simulink у вирішенні задач аналізу моделей складних динамічних об'єктів визначають її використання в даній роботі при дослідженні методу аналізу спектрів струму електродвигуна ЦНА для визначення станів їх вузлів.

2.4 Реалізація методу визначення станів вузлів ЦНА аналізом спектрів струму їх електродвигунів

Відповідно до методики, представленої в параграфі 1.2, апаратурна частина вимірювальних систем для аналізу спектрів струму електродвигуна, в загальному випадку, повинна включати в себе первинні вимірювальні перетворювачі струму та напруги, пристрої для аналого-цифрового перетворення та обробки аналогових і цифрових сигналів, узгоджені з ними, індивідуальний комп'ютер, або АРМ диспетчера. Далі розглянуто існуючі технічні рішення щодо реалізації апаратурної частини систем контролю.

Для оцінки ексцентриситету ротора асинхронних електродвигунів за параметрами амплітудно-частотного спектра струму розроблено систему, що складається з трансформатора та датчика струму, комп'ютера (ЕОМ) та пристрою, що містить елементи вводу/виводу, обробки аналогових і цифрових сигналів, елементи живлення, аналого-цифрового перетворення, пам'яті, перетворення інтерфейсів, скомпоновані на єдиній платі в загальному корпусі [26]. У роботі [17] представлено систему контролю пошкоджень ротора асинхронного електродвигуна, що складається з плати з датчиками струму, резистивними дільниками напруги та оптоізольованими вимірювальними

підсилювачами, плати аналого-цифрового перетворення сигналів та комп'ютера.

Системи контролю технічного стану динамічного обладнання з електроприводом, описані в роботах [24], можна представити узагальненою структурою, зображеною на рисунку 2.5. Представлена структура знайшла відображення в описі корисної моделі, розробленої автором у складі авторського колективу [27].

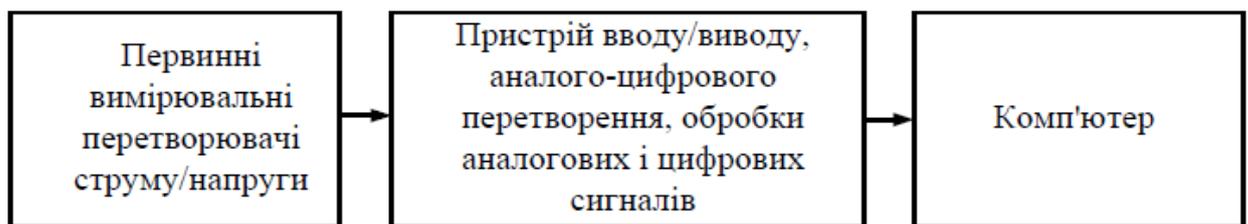


Рисунок 2.5 – Структура систем контролю технічного стану

В роботі [27] як первинні вимірювальні перетворювачі пропонується використовувати струмовимірювальні кліщі виробництва фірми Fluke, або роз'ємні струмові датчики, а також дільники напруги, або трансформатори напруги. Вимірювачі повинні мати лінійну амплітудно- частотну характеристику з відхиленням від лінійності в межах ± 3 дБ в діапазоні 20 кГц. Пристроєм обробки сигналів є аналого-цифровий перетворювач з розрядністю не менше 14 розрядів. Дані передаються на комп'ютер для обробки.

Деякі існуючі системи контролю передбачають використання в якості пристроїв обробки сигналів вимірювальну апаратуру, яка самостійно дозволяє реалізовувати функції прийому, обробки та представлення результатів аналізу сигналів струму і напруги, тим не менш, підключену до комп'ютера для виконання алгоритму оцінки технічного стану [32]. Вимірювальною апаратурою є: вимірювачі та аналізатори показників кількості та якості електричної енергії AR5 [25], Ресурс-UF2М [4,25] та енерготестер ПКЕ [14], що комплектуються первинними вимірювальними перетворювачами видів струмових кліщів класами точності 0,5 і 1, і проводами із затискачами типу «крокодил».

Діагностична система, запропонована в роботі [20], включає в себе безконтактні датчики струму, дільники напруги, з'єднані за схемою «зірка», комп'ютер і аналого-цифровий перетворювач Zet 210 з сумарною частотою дискретизації по всіх каналах до 400 кГц, розрядністю 16 і динамічним діапазоном 84 дБ.

Апаратна реалізація системи контролю технічного стану, представлена в роботі [18], передбачає використання вимірювальних трансформаторів струму, струмових кліщів і поясів Роговського (див. параграф 1.2) з верхньою границею частотного діапазону не менше 10 кГц, показниками нелінійності функції перетворення і амплітудно-частотної характеристики не гірше 0,3% і 10% відповідно, а також дільників напруги. Для аналізу сигналів пропонується використовувати аналізатори спектра з верхньою границею частотного діапазону не менше 10 кГц і динамічним діапазоном не менше 70 дБ.

Треба зазначити, що розглянуті технічні рішення щодо апаратного забезпечення контролю технічного стану обладнання методом аналізу параметрів спектрів струму електродвигунів представляють собою вимірювальні системи мобільного і напівстаціонарного типів. При цьому можливість створення стаціонарних систем з підключенням до загальної мережі підприємства позначається [90], але детально не розглядається.

Висновки по другому розділу

Для визначення станів вузлів консольних ЦНС може ефективно застосовуватися метод, що базується на аналізі параметрів амплітудних спектрів струму електродвигуна. Метод має характерний алгоритм реалізації, що передбачає використання апаратного забезпечення, яке серійно випускається промисловістю, і достатнє методичне забезпечення. У свою чергу, для ефективного застосування методу з метою моніторингу стану вузлів консольних ВНА необхідно дослідити підходи до визначення початкових порогових значень діагностичних параметрів під час підготовки до моніторингу, зокрема, з урахуванням можливих відхилень робочих та конструктивних параметрів ВНА.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Обґрунтування необхідності моделювання при дослідженні діагностичних параметрів

Відповідно до вимог нормативно-технічної документації в області контролю технічного стану обладнання, в тому числі відцентрових насосних агрегатів [27, 31], при створенні діагностичного забезпечення будь-якого виробу алгоритми контролю стану обладнання повинні передбачати облік робочих і конструктивних параметрів обладнання як факторів, що суттєво впливають на діагностичні параметри. Під робочими параметрами відцентрового насосного агрегату слід розуміти робочі характеристики, що є вихідними показниками процесу роботи машини: розвиваємий тиск (напір), продуктивність, споживана потужність, частота обертання ротора. До конструктивних параметрів можна віднести: номінальну потужність агрегату, габарити конструктивних елементів насоса і електродвигуна, коефіцієнт швидкохідності насоса, параметри жорсткості елементів опор і т.д.

При експлуатації відцентрових насосних агрегатів в рамках більшості технологічних процесів існує необхідність регулювання робочих параметрів агрегатів, для чого застосовуються різні методи: частковий перепуск води з лінії нагнітання в лінію всмоктування (байпасування), регулювання прохідного перерізу напірного трубопроводу засувкою (дроселювання), обточування робочого колеса насоса, зміна частоти обертання ротора (частотне регулювання). Перші два методи передбачають зміну напірної характеристики трубопроводу, інші – напірної характеристики насоса. З точки зору енергоефективності найбільш прийнятним є метод частотного регулювання, однак, зважаючи на відносно високу вартість приводу для його реалізації, на сьогоднішній день, залишається досить поширеним метод дроселювання засувкою на напірному патрубку, що полягає у зміщенні

робочої точки перетину характеристик насоса і трубопроводу в сторону зростання напору шляхом підвищення гідравлічного опору трубопроводу [11].

Оскільки при регулюванні змінюються робочі параметри агрегату, такі як розвиваємий напір і продуктивність, необхідно враховувати можливість модуляції діагностичних ознак дефектів незалежно від рівня їх розвитку в агрегатах конкретного конструктивного виконання [10].

В той же час діагностичні ознаки ідентичних дефектів в агрегатах з різними конструктивними параметрами, наприклад, номінальною потужністю, також можуть суттєво відрізнятися, оскільки, навіть у випадку розгляду геометрично і динамічно подібних машин має місце масштабний фактор, що визначає пропорційну залежність між однотипними параметрами і фізичними величинами подібних машин [18, 24].

У зв'язку з цим можна вважати за доцільне постановку математичного експерименту з метою вивчення підходу до уточнення порогових значень діагностичних параметрів при можливих змінах робочих і конструктивних параметрів ЦНА з використанням інструментів імітаційного моделювання.

3.2 Імітаційна модель та параметри моделювання

Для дослідження реакції діагностичних параметрів на зміну конструктивних параметрів агрегату в якості вихідних даних моделі прийняті паспортні та розрахункові значення параметрів ряду одноступеневих відцентрових насосних агрегатів з насосами консольного типу серії «К» та асинхронними електродвигунами серії «АІР» з синхронною частотою обертання 3000 об/хв, в тому числі, агрегат, який використано при постановці експерименту: К20/30 (використовується в експерименті), К80-65-160, К80-50-200, К100-65-200. Перелік розглянутих агрегатів визначено виходячи з наступних міркувань:

- дані агрегати є представниками однієї серії та ідентичного конструктивного виконання;
- згідно з теоріями динамічної подібності для відцентрових насосів та геометричної подібності для електричних машин дані агрегати хоч і не є в

повній мірі подібними, але мають близькі за значенням коефіцієнти подібності. Так, для насосів коефіцієнтом подібності вважається коефіцієнт швидкохідності – n_s , що визначається для відцентрових насосів в діапазоні: 40-300 [11]. У розглянутих насосів коефіцієнти швидкохідності: $n_s = 63,35$ (K20/30); $68,13$ $n_s =$ (K80-65-160); $n_s = 78,59$ (K80-50-200); $86,92$ $n_s =$ (K100-65-200). Для електричних двигунів можна відзначити, що закономірності геометричної подібності, тобто наявність пропорційних взаємозв'язків параметрів, виконуються з певними відхиленнями в рамках розгляду машин одного конструктивного ряду [18].

Зазначені міркування дозволяють припустити, що, в дійсності, теоретичні характеристики діагностичних ознак, отримані за результатами моделювання для прийнятого ряду агрегатів, матимуть схожий вигляд з експериментальною для агрегату K20/30, внаслідок близькості до подібності. При цьому передбачається наявність масштабування параметрів залежності через зміну робочих і конструктивних параметрів.

В якості змінюваних робочих параметрів для моделювання прийняті параметри напірної характеристики насосного агрегату в відносних одиницях: відносні розвиваємий напір і продуктивність, оскільки, як зазначалося вище, на практиці часто виконується регулювання режиму роботи насоса зміною саме цих параметрів.

Для імітування наявності механічної несправності в модельованому агрегаті та прояву діагностичної ознаки вводиться параметр, що характеризує несправність (параметр несправності) у вигляді додаткового обертового моменту опору, що змінюється за гармонійним законом. Вибір даної величини в якості діагностичного параметра визначено залежністю електричних параметрів двигуна від коливань крутного моменту, які є наслідком механічних несправностей в обладнанні і тісно пов'язані з вібраційними характеристиками агрегату, про що зазначено в параграфі 2.1.

Перелік заданих параметрів моделі представлено в таблиці 3.1.

Тип параметрів	Найменування параметра, одиниця вимірювання	Позначення
Конструктивні насоса	номінальний напір, м	$H_{\text{ном}}$
	номінальна продуктивність, м ³ /г	$Q_{\text{ном}}$
	номінальний повний КПД	$\eta_{\text{ном}}$
	розрахунковий кут навантаж.	$\gamma_{\text{р}}^{\text{ном}}$
	наружний діаметр робочого колеса, м	D_2
Конструктивні	момент інерції ротора,	J

Тип параметрів	Найменування параметру, одиниця вимірювання	Позначення
електродвигуна	кг·м ²	
	число пар полюсів	p
	активний опір обмоток статора і ротора, Ом	R_s, R_r
	особисті індуктивності обмоток статора і ротора, Гн	L_{si}, L_{ri}
	взаємна індуктивність між обмотками, Гн	L_m
Робочі насосу	відносний дійсний напір	$H_{\text{д}}^*$
	номінальна частота обертання ротора, рад/с	$\omega_{\text{р.ном}}$
Робочі електродвигуна	номінальна фазна напруга обмотки статора, В	$U_{\text{ном}}$
	номінальна частота напруги живлення, рад/с	$\omega_{\text{ном}}$

Модель відцентрового насосного агрегату являє собою математичні описи відцентрового насоса та асинхронної машини [24,25].

Відцентровий насос описується рівняннями за методом електрогідравлічних аналогій, що пов'язують продуктивність, напір і потужність в абсолютних і відносних одиницях, та розрахунковий кут навантаження [22].

Асинхронний електродвигун описується системою рівнянь у координатах α, β для потокозчеплень статора, перетворених методом заміни змінних

шляхом вираження струмів статора і ротора через індуктивності та потокозчеплення, доповненою рівняннями визначення електромагнітного моменту і кутової швидкості ротора [29,30].

Рівняння опису відцентрового насоса:

$$\begin{aligned}
 Q_D^* &= \sqrt{\left[\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin \gamma_p^{ном}} - H_D^* \right] / \left(\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin \gamma_p^{ном}} - 1 \right)}; \\
 N_C^* &= \frac{1}{\eta_{ном}} \cdot \left[1 + (3 - 2 \cdot H_{Дхх}^*) \cdot (Q_D^* - 1) \right]; \\
 Q_D &= Q_D^* \cdot Q_{ном}; \quad H_D = H_D^* \cdot H_{ном}; \quad N_C = N_C^* \cdot N_{зід}; \\
 N_{зід} &= \frac{Q_{ном} \cdot H_{ном} \cdot \rho}{102}; \\
 M_c &= \frac{N_C}{\omega_p},
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

де Q_D^* – відносна дійсна продуктивність насоса;

$H_{Дхх}^*$ – відносний напір насоса в режимі холостого ходу;

N_D^* – відносна споживана потужність насоса;

Q_D, H_D – дійсні продуктивність і напір насоса;

$N_{зід}$ – гідравлічна потужність насоса;

M_c – момент опору на валу насоса.

Рівняння опису асинхронного двигуна:

$$\begin{cases}
 \Psi_{s\alpha} = [u_{s\alpha} - \Psi_{s\alpha} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \Psi_{r\alpha} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right)] \cdot \frac{1}{s}; \\
 \Psi_{s\beta} = [u_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \Psi_{r\beta} \cdot \left(\frac{R_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right)] \cdot \frac{1}{s}; \\
 \Psi_{r\alpha} = [-\Psi_{r\alpha} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \Psi_{r\alpha} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) - p \cdot \omega_p \cdot \Psi_{r\beta}] \cdot \frac{1}{s}; \\
 \Psi_{r\beta} = [-\Psi_{r\beta} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + \Psi_{r\beta} \cdot \left(\frac{R_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) + p \cdot \omega_p \cdot \Psi_{r\alpha}] \cdot \frac{1}{s}; \\
 M_3 = 1,5 \cdot p \cdot \left(\frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \right) \cdot (\Psi_{s\beta} \cdot \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \cdot \Psi_{r\beta}); \\
 \omega_p = p \cdot \frac{M_3 - M_c}{J} \cdot \frac{1}{s},
 \end{cases} \tag{3.2}$$

де $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – потокозчеплення статора та ротора за осями α, β ;

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – напруги статора за осями;

$s = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Складова струму статора за однією з осей, що містить інформацію про діагностичну ознаку, виражається через потокозчеплення та індуктивності:

$$i_{s\alpha} = \Psi_{s\alpha} \cdot \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} - \Psi_{r\alpha} \cdot \frac{L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2}. \quad (3.3)$$

Для створення імітаційної моделі використовується програмний комплекс Matlab R2015a (8.5.0.197613) з пакетом Simulink як один з найбільш ефективних інструментів наочного побудування та дослідження імітаційних моделей різних технічних систем.

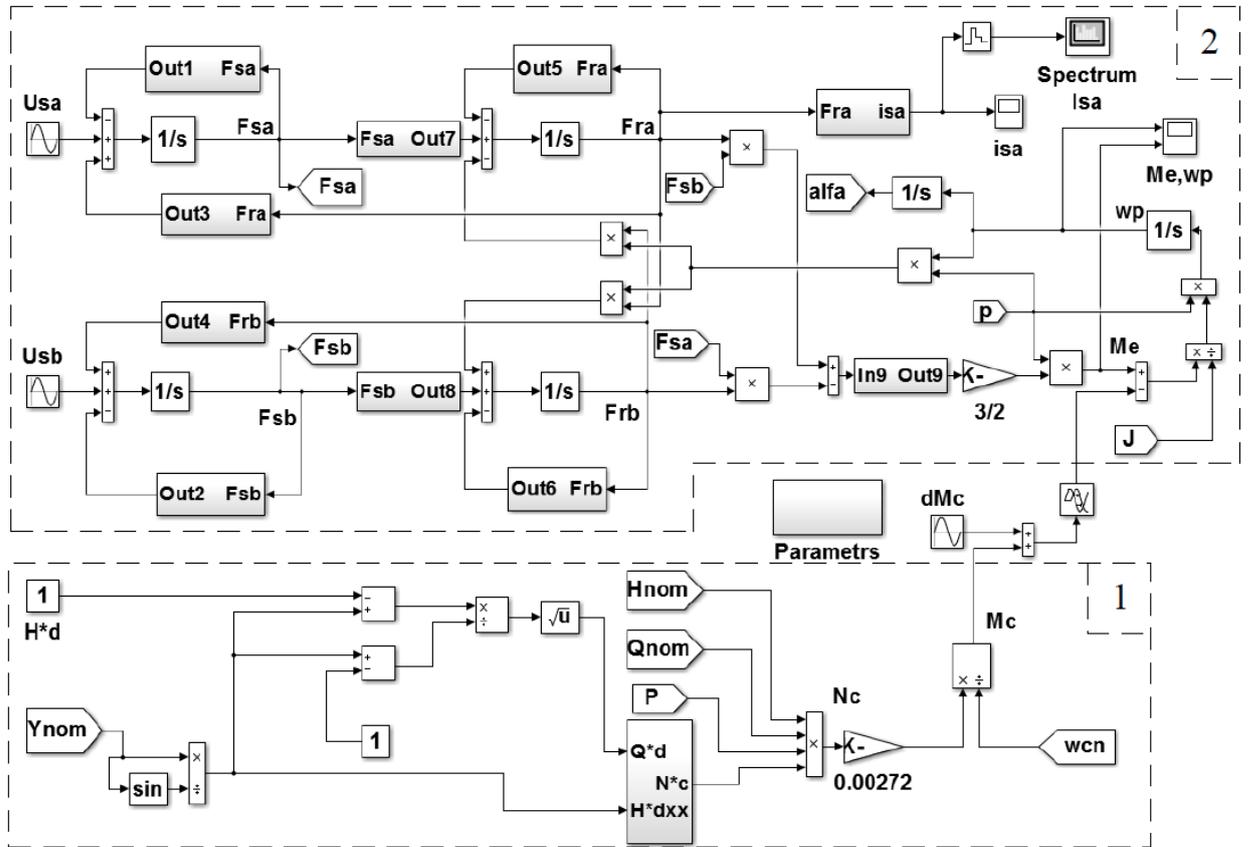
На рисунку 3.1 зображено повну імітаційну модель відцентрового насоса. Модель включає в себе сукупність блоків, що описують відцентровий насос (1) та асинхронний електродвигун (2), за раніше розглянутими аналітичними залежностями.

Зв'язок між моделями насоса та двигуна забезпечується шляхом з'єднання блоків, що визначають електромагнітний момент двигуна « M_e » і момент опору насоса « M_c ».

Як зазначалось, наявність механічної несправності в агрегаті імітується шляхом підсумовування постійної складової M_c з величиною змінного моменту « dM_c ». У блоці « dM_c » типу Sine Wave задається амплітуда, початкова фаза та частота гармонічних коливань.

Висновки по третьому розділу

З огляду на залежність параметрів вібрації та спектра струму електродвигуна ВНА від значень механічних коливальних сил, що характеризують технічний стан вузлів, передбачається можливість визначення взаємозв'язку параметра вібрації з діагностичними параметрами спектра струму, що дозволить на попередніх етапах контролю визначити початкові порогові значення діагностичних параметрів для встановлення меж видів станів вузлів ВНА.



1 – блоки для опису відцентрового насоса; 2 – блоки для опису електродвигуна

Рисунок 3.1 – Повна імітаційна модель відцентрового насосного агрегату

ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу статистики виявлення пошкоджень вузлів консольних ВНА та методів виявлення пошкоджень встановлено, що вузлами, які значною мірою визначають ресурс консольних ВНА, є їх підшипники кочення та сполучення валів, ефективно визначення граничних станів яких може виконуватися за допомогою методу, що базується на аналізі параметрів амплітудних спектрів струму електродвигунів агрегатів. Метод має характерний алгоритм реалізації, який передбачає використання апаратного забезпечення, що серійно випускається промисловістю, і достатнє методичне забезпечення. При цьому, для організації застосування методу з метою моніторингу станів вузлів консольних ВНА необхідно дослідити підходи до визначення початкових порогових значень діагностичних параметрів при підготовці до моніторингу, зокрема, з урахуванням можливих відхилень робочих і конструктивних параметрів ВНА.

2. Як основу підходу до визначення початкових порогових значень діагностичних параметрів при підготовці до моніторингу запропоновано взаємозв'язок параметра вібрації з діагностичними параметрами спектра струму, для експериментального дослідження якої сформовано методику, що містить етапи з вимірювання та аналізу параметрів спектрів струму та вібрації консольного ВНА К 20/30. Оцінку можливих відхилень порогових значень, з причин регулювання режиму роботи насоса та проведення моніторингу на консольних ВНА інших потужностей, прийнято виконати на основі моделі агрегату за допомогою ефективного методу імітаційного моделювання із застосуванням апарату візуальних блок-діаграм.

3. Розроблено методику визначення граничних станів ресурсовизначальних вузлів промислових консольних ВНА аналізом амплітудних спектрів струму їх електродвигунів, яка містить вказівки та рекомендації щодо виконання процедур моніторингу, а також технічні рішення з його апаратного забезпечення з описом переліків комплектуючої апаратури, схем і маркувань з'єднань, умов експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN ISO 20361:2021 Насоси і насосні гідравлічні агрегати. Правила випробування на шум. Ступені точності 2 та 3 (EN ISO 20361:2019, IDT; ISO 20361:2019, IDT) – Київ.: (ДП «УкрНДНЦ») 2021.
2. ДСТУ EN 809:2015 Насоси та насосні агрегати для рідин. Загальні вимоги щодо безпеки – Київ.: (ДП «УкрНДНЦ») 2016.
3. ДСТУ 8312:2015 Машини електричні малої потужності. Двигуни. Загальні технічні умови – Київ.: (ДП «УкрНДНЦ») 2017.
4. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. Чин. від 01.01.95. – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.
5. ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Чин. від 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995. – 38 с.
6. ДСТУ 2863-94 Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. Чин. від 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995. – 37 с.
7. Гераскін О. А. Вібродіагностика ушкоджень роторів потужних асинхронних двигунів на основі польових математичних моделей: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.09.01 / НАН України, Ін-т електродинаміки. Київ. 2012. 18 с.
8. М. В. Загірняк, Д. Г. Мамчур, А. П. Калінов, А. В. Чумачова Діагностика асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності : монографія. Кременчук, 2013. 208 с.
9. Сьомка О. О., В. В. Прус Урахування зміни теплових та вібраційних параметрів електричних машин із тривалим напрацюванням на відмову Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка». 2014. Вип. 2/2014. С. 52–55.
10. Сьомка О. О. Розробка методу визначення та прогнозування показників надійності електричних машин із різним ступенем напрацювання на відмову Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний

наукововиробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2013. Вип. 2/2013 (22). С. 46-51.

11. Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін Математичне моделювання та експериментальні дослідження вібрацій асинхронних двигунів Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. 2011. № 30. С. 68-75

12. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник – Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.

13. Купін А. І., Кузнєцов Д. І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2016. 200 с.

14. Сьомка О. О. Дослідження особливостей відмов підшипникових вузлів електричних машин. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції у м. Кременчук 17-19 травня 2016 р. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 1/2016 (4). С. 153-155.

15. Сьомка О. О., В. В. Прус Аналіз методів визначення та прогнозування показників надійності електричних машин. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 09-11 квітня 2013 р. Кременчук, КрНУ, 2013. С. 302-303.

16. Сьомка О. О. Розробка методів дослідження та прогнозування показників надійності асинхронних двигунів. XV Міжнародна науковотехнічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”: Матеріали конференції. Кременчук: КрНУ імені Михайла Остроградського, 2016. С. 164-165.

17. Закладний О.М., Закладний О.О. Універсальний діагностувальний комплекс для прискорених випробувань електродвигунів. Інформаційний

збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка». 2007. №4. С. 35-39.

18. В.І. Свиридов, І.М. Попов ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА МЕХАНІЗМІВ ЧЕРЕЗ ВІБРАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ // Інформаційні технології. Наук. журнал:- Херсон: Вісник ХНТУ №3(62), 2017 р., ТОМ 1, С.1-7

19. Степчин, Я. А., Отаманський, В. В., Малишев, І. П., & Пилипенко, О. М. (2023). Вібродіагностика підшипникових вузлів папероробних машин. Технічна інженерія, (1(91), 10–16. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-10-16](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-10-16)

20. Осипенко Д. В. Застосування комп'ютерних засобів для дослідження впливу жорсткісних характеристик підшипникових опор на вібраційний стан роторних машин : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 131 – прикладна механіка / наук. кер. І. В. Павленко. Суми : СумДУ, 2022. 43 с.

21. https://elprivod.nmu.org.ua/ua/science/condition_diagnostics_ua.pdf

22. Dovhan V. Development of the system for vibration diagnosis of bearing assemblies using an analog interface / V. Dovhan, V. Kvasnikov, D. Ornatskiy // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2018. - № 5(9). - С. 51-59. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_5\(9\)_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_5(9)_7).

23. Яворський І.М., Ісаєв І.Ю., Кравець І.Б. та ін. (2009) Методи підвищення ефективного статистичного аналізу сигналів вібрації підшипникових опор турбоагрегатів теплоелектростанцій. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 3, 49–59.

24. Яворський І.М., Драбич П.П., Ісаєв І.Ю. та ін. (2009) Розробка інформаційно-вимірювальної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона, 113–122.

25. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б. та ін. (2010) Методи і засоби ранньої діагностики обертових механізмів. Праці Міжнар. наук.-техн.

конференції «Ресурс, надійність та ефективність використання енергетичного обладнання», Харків, 31–38.

26. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б., Мацько І.Й. (2011) Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження обертових систем. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 2(47), 134–140.

27. І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, М.З. Варивода, І.Г. Стецько Методи та засоби ранньої вібродіагностики підшипникових вузлів обертових механізмів. Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2021, №2, Львів стор. 30-37

28. Hernandez-Solis A., Carlsson F. Diagnosis of submersible centrifugal pumps: a motor current and power signature analysis // European power electronics and drivers Journal. – 2010. – vol. 20-1.

29. Samir Alabied, Osama Hamomd, Alsadak Daraz, Fengshou Gu, Andrew D. Ball. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps based on the Intrinsic Time-scale Decomposition of Motor Current Signals // 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC). University of Huddersfield, Huddersfield, UK. 2017. DOI: 10.23919/ICoNAC.2017.8082027.

30. 130. ZETLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zetlab.com/>.

31. Muhammad Irfan, Alwadie A., Adam Glowacz. Design of a Novel Electric Diagnostic Technique for Fault Analysis of Centrifugal Pumps // Applied Sciences. – 2019. vol. 9. P. 1-13.

32. Mehran Jahangiri, Seyed Alireza Seyed Roknizadeh. Clogged Impeller Diagnosis in the Centrifugal Pump Using the Vibration and Motor Current Analysis // Journal of Applied and Computation Mechanics. – 2018. vol. 4 (4). P. 310-317.