

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ЧОРНА ОЛЬГА АНАТОЛІВНА



УДК 004.891.3:621.313.34:519.718:537.531

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ
СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ОЗНАК**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Бісікало Олег Володимирович, Вінницький національний технічний університет, декан факультету комп'ютерних систем і автоматики, професор кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Маєвський Дмитро Андрійович, Державний університет «Одеська політехніка», завідувач кафедри електромеханічної інженерії

доктор технічних наук, професор
Теслюк Василь Миколайович, Національний університет «Львівська політехніка», в.о. завідувача кафедри «Автоматизовані системи управління»

Захист відбудеться «03» вересня 2021 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, Україна, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий « 28 » липня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Електричні машини використовуються в приводах практично у всіх галузях техніки і технологічного оснащення виробництва. Їх позапланова зупинка або раптова відмова супроводжуються значними економічними втратами. Найбільші з них – на великих енергетичних установках і об'єктах, тому технічна діагностика їх досить розвинена і є обов'язковою для попередження відмов і своєчасного ремонту. Значно менша увага приділяється моніторингу енергетичних установок середньої та малої потужностей, проте їх значимість, з огляду на розвиток автономних приводів і масовості останніх, постійно зростає. Діагностика, в основному, здійснюється тепловими, електричними та віброакустичними методами, які в певних ситуаціях, таких як низькі температури, віброакустичні перешкоди тощо, не можуть бути застосовані або не забезпечують необхідної достовірності інформації. Сучасні методи моделювання, моніторингу та діагностики електричних машин розглянуті у працях: щодо процесів перетворення енергії в електричних двигунах – Кузнєцова В.Г., Шидловського А.К.; з діагностики і характеристик асинхронних двигунів – Бешти О.С., Биргера І.А., Кириленка О.В., Кучерука В.Ю.; з моніторингу, оцінки надійності і працездатності АД – Баркова А.В., Закладного О.О., Труфанова І.Д.; з аналізу магнітного поля – Загірняка М.В., Кузнєцова Б.І., Тонкіх В.Г., Хайрулліна І.Х.; з побудови діагностичних систем – Осіпова Г.С., Поспелова Д.А., Цейтіна Г.С.; питання розробки прикладних інформаційних технологій та експертних систем представлено у роботах Біскала О.В., Дубового В.М., Кветного Р.Н., Кузьміна І.В., Мокіна Б.І., Мокіна В.Б., Штовби С.Д., та інших дослідників.

Вирішення сучасних завдань діагностики потребує залучення принципово нових методів та засобів, до яких можна віднести моніторинг за картиною зовнішнього магнітного поля (ЗМП), акустичні і, навіть, органолептичні методи, які передбачають використання органів чуття людини (огляд, прослуховування). При цьому вимірювання діагностичних параметрів проводиться безконтактним методом і, що важливо, у робочому режимі. Використання ЗМП як основного, так і додаткового джерела діагностичної інформації дозволяє більш достовірно оцінити технічний стан і прогнозувати можливі відмови електричних машин. Зовнішні ознаки є множиною діагностичних ознак, які відображають взаємозв'язки внутрішніх і зовнішніх параметрів. Такими ознаками можуть бути параметри сталого режиму, що змінюються за характерними законами, залежать від місця виникнення і типу первинних несправностей. Для моніторингу, діагностики і прогнозування стану електричної машини та привода необхідно знати характер зміни параметрів при різних первинних несправностях і вибрати з них найбільш характерні. Це дозволить здійснювати попередню діагностику двигуна з визначенням його поточного стану та виданням рекомендацій про можливість і доцільність його подальшої експлуатації.

Тому, *актуальним* науковим завданням є розробка інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу на основі зовнішніх ознак їх роботи, що дозволить здійснювати попередню діагностику двигуна з визначенням його поточного стану та виданням рекомендацій про можливість і доцільність його подальшої експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводилися протягом 2009–2021 років. Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі», а також проблематиці науково-дослідних робіт, що є базовими для дисертації: «Теоретичні основи керування процесами перетворення енергії в електромеханічних комплексах для підвищення енергоефективності їх роботи» (№ ДР 0114U002629, 2015 р.), «Дослідження індукції магнітного поля змінного струму промислової частоти зовні асинхронних двигунів» (№ ДР 0114U002173, 2015 р.), у яких авторка була виконавцем і продемонструвала можливість моніторингу і діагностування АД за параметрами вимірної індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна, зокрема визначила чинники, що впливають на розподіл магнітної індукції та провела експериментальні дослідження.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у забезпеченні процесів моніторингу та попередньої діагностики асинхронного двигуна з визначенням його поточного стану та формулюванні рекомендацій щодо можливості і доцільності подальшої експлуатації шляхом розробки інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Здійснити аналіз існуючих методів і засобів моніторингу та діагностики асинхронних електричних двигунів.
2. Розробити комплекс методів визначення поточного стану двигуна на основі зовнішніх ознак його роботи.
3. Розробити і дослідити методи визначення зміни параметрів асинхронного двигуна при поточному моніторингу з урахуванням зовнішнього шуму від працюючого електротехнічного та електромеханічного обладнання.
4. Розробити структуру інформаційної технології і, відповідно до неї, створити програмне забезпечення для реалізації запропонованих методів та засобів інформаційної технології.
5. Провести випробування розробленої інформаційної технології в реальних умовах виробництва та здійснити економічну оцінку її впровадження.

Об'єкт дослідження – процес моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час реалізації відповідного технологічного процесу.

Предмет дослідження – методи та інформаційна технологія моніторингу асинхронних двигунів на основі комплексу зовнішніх ознак їх роботи.

Методи дослідження. У дослідженнях використовувались такі методи: під час моделювання розподілу індукції магнітного поля – теорія поля, методи

опису магнітних полів, чисельні методи розрахунку магнітних полів, зокрема метод кінцевих елементів; під час оцінки стану та терміну експлуатації асинхронного двигуна – теорія електричних машин, теорія нагріву, теорія подібності і метрики відстані, зокрема Буземанова метрика; під час експериментальних досліджень – методи обробки даних, бібліотеки пакета програм Matlab, теорія вірогідності і математична статистика, методи короткото- та середньо-термінового прогнозування, зокрема метод кумулятивних сум; під час комплексного моніторингу – методи технічної діагностики, зокрема теорія графів і функції чутливості, об'єктно-орієнтоване моделювання на основі мови програмування C#.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Набула подальшого розвитку експериментальна модель несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, яка враховує нерівномірність розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора двигуна, що дозволяє отримати значиму інформацію про технічний стан асинхронного двигуна, зокрема про наявність внутрішніх дефектів обмоток.

2. Уперше отримано аналітичну модель стану асинхронного двигуна у вигляді лінійного рівняння відносного залишкового ресурсу ізоляції від коефіцієнту, розрахованого на основі Буземанової метрики, що дозволяє врахувати зміну розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна при виникненні параметричної несиметрії його обмоток.

3. Удосконалено метод моніторингу асинхронних двигунів, який відрізняється від існуючих тим, що добір діагностичних параметрів ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, причому параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового, а добір діагностичних параметрів здійснюється методом послідовних доповнень, що дозволяє вирішити задачу діагностування на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів.

4. Уперше отримано інформаційну технологію комплексного моніторингу асинхронних двигунів, яка відрізняється від існуючих застосуванням моделі стану асинхронного двигуна на основі Буземанової метрики та методу моніторингу на основі зовнішніх ознак режиму роботи двигунів, що дозволяє за рахунок попередньої діагностики підвищити ефективність їх експлуатації на основі актуальної інформації про поточний стан і рекомендацій щодо доцільності подальшої експлуатації.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій.

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю прийнятих у математичних моделях припущень і підтверджується збігом результатів аналітичних розрахунків з результатами математичного та фізичного моделювання. Достовірність результатів дослідження забезпечується використанням перевірених експериментальних даних, одержаних з дотриманням відповідних вимог, а також адекватністю отриманих розв'язків, що підтверджується результатами практичного

впровадження.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Отримано методику аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів та інтерпретації отриманих результатів для висновку про наявність в двигуні дефектів. На основі аналізу вимірних сигналів отримана методика забезпечує можливість виділення в сигналі зміни параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. На основі функції Changepoint та методу кумулятивних сум CUSUM, методика дозволяє з різним ступенем точності та швидкодії визначити точку часу зміни параметрів.

2. На основі Буземанової метрики розроблена методика оцінювання ступеню несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. У методиці застосовується встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції обмоток і відносним значенням Буземанової дистанції та відповідний критерій оцінки відхилення розподілу магнітної індукції. Застосування методики дозволяє оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна за вимірними значеннями індукції на поверхні його статора, а також зробити висновок про поточний стан АД.

3. Отримано алгоритмічне забезпечення діагностичної системи, що дозволяє автоматично інтерпретувати результати діагностики. Комплекс алгоритмів реалізовано у вигляді програмного забезпечення, що дозволяє використовувати результати дослідження на практиці.

Результати роботи впроваджено в:

- проектні та організаційні рішення з обстеження потужних високовольтних асинхронних двигунів цеху виробництва окатишів ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Горішні Плавні);

- навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при підготовці фахівців, за першим та другим освітнім рівнем, спеціальностей 123 – Комп'ютерна інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка, 151 – Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних і практичних робіт.

Упровадження результатів дисертаційних досліджень підтверджені відповідними актами.

Повнота викладення наукових і практичних результатів в опублікованих роботах.

За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, із них: 4 статті у періодичних фахових виданнях, що включені до переліку фахових видань України, 1 стаття у закордонному періодичному виданні (Польща), 14 статей і тез доповідей у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, з них 6 у таких, що індексовані у наукометричній базі Scopus, та 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на науковий твір.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані авторкою самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: [2] – ідея визначення несправностей електричних машин за зовнішніми ознаками; [3] – розробка архітектури побудови експертної

системи визначення несправностей електричних машин з розширеними функціональними властивостями, [12] – реалізація алгоритмів діагностичної системи, [13] – програмне забезпечення комп'ютерної програми визначення несправностей електричних двигунів на основі зовнішніх ознак їх роботи; [4] – алгоритми діагностичної системи оцінки стану асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак їх роботи, [10] – алгоритми функціонування і принципи побудови діагностичної системи, програмна реалізація діагностичної системи, [15] – алгоритми функціонування і принципи побудови діагностичної системи, програмна реалізація діагностичної системи, [19] – алгоритми функціонування і принципи побудови діагностичної системи, програмна реалізація діагностичної системи; [1] – експериментальні дослідження на основі розробленої інформаційної технології проведені на підприємстві, [14] – експериментальні дослідження індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна, [18] – експериментальні дослідження індукції магнітного поля на поверхні статора асинхронного двигуна; [5] – експериментальні дослідження в умовах навчально-виробничих лабораторій, [11] – експериментальні дослідження поширення магнітного поля асинхронних двигунів в умовах навчальних лабораторій; [6] – всі теоретичні та практичні результати, окрім постановки задачі, [9] – аналіз методів екранування магнітного поля електромеханічних перетворювачів енергії змінного струму; [16] – чисельне моделювання і аналіз розподілу індукції магнітного поля назовні асинхронних двигунів; [17] – експериментальні дослідження і аналіз впливу завад від зовнішніх електротехнічних об'єктів при вимірюванні індукції магнітного поля; [7] – розробка моделі діагностування і визначення стану асинхронного двигуна; [8] – модель ідентифікації асинхронних двигунів в динамічних режимах безпосередньо під час технологічного процесу, [20] – розробка принципів визначення поточного стану асинхронного двигуна за даними вимірювання індукції магнітного поля.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень докладалися та обговорювалися на : International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – IEEE, 2017, 2019; 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – IEEE, 2018; 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP). – IEEE, 2020; XI, XVII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2011–2017); VIII, IX, XVI, XVII Міжнародних науково-технічних конференціях молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації», (Кременчук, 2009–2019).

Робота обговорювалася та була схвалена на засіданнях науково-технічного семінару «Електромагнітні та електромеханічні процеси в електричних машинах і апаратах» наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові проблеми електроенергетики», 2017-2018 рр.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 197 сторінок друкованого тексту й містить анотацію, вступ, п'ять розділів,

висновки, список використаних джерел і чотири додатки. Основна частина викладена на 119 сторінках. Список використаних джерел складається зі 145 найменувань на 17 сторінках. Дисертація містить 74 рисунків і 41 таблиць, з яких 9 рисунків і 21 таблиця на окремих 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, зазначено її зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та напрям досліджень. Визначено ключові задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення основних результатів, а також відомості про їх впровадження, апробацію та публікації.

У першому розділі виконано огляд джерел за темою дисертаційної роботи та аналіз сучасного стану проблеми. Розглянуто методи і засоби оперативної діагностики асинхронних двигунів, діагностичні комплекси (ДК) електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ). Показано, що наведені ДК, незважаючи на свою багатофункціональність, мають ряд недоліків: мають обмеженість набору методів, що характеризують ДК; не дозволяють однозначно оцінити результати діагностики: «придатний» – «брак», виявляють лише наслідки несправностей, а не функціональний стан ЕМПЕ.

Розглянуто дефекти електричних машин, що діагностуються та промислові системи контролю стану асинхронних двигунів, проаналізовані їх діагностичні алгоритми.

Незважаючи на велику кількість методів діагностики електродвигунів, питання продовжує залишатися актуальним з ряду причин. Серед них відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, відсутність методів прогнозування залишкового ресурсу, недостатня дослідженість окремих несправностей АД, а також те, що не визначені спеціальні діагностичні параметри, які характеризують зміну процесів функціонування при виникненні відповідних несправностей. Наявні критерії враховують тільки граничні або допустимі стани параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх появи. Значний перелік відомих діагностичних ознак можна поділити на два класи: прямі та зовнішні ознаки режиму роботи, класифікація показана у табл. 1.

Отже, проблема моніторингу асинхронних двигунів полягає в необхідності створення універсального, простого методу визначення технічного стану електродвигунів. Це дозволить до мінімуму знизити збиток від пошкоджень АД за рахунок раннього виявлення можливих потенційних дефектів.

З огляду на вищевикладене можна стверджувати, що для підвищення достовірності оперативної діагностики технічного стану ЕМПЕ виявлена необхідність удосконалення існуючих та розробки нових методів і технологічних засобів моніторингу ЕМПЕ, зокрема інформаційної технології комплексної діагностики АД середньої і малої потужності на основі зовнішніх ознак роботи двигунів – за зовнішнім магнітним полем, тепловим, акустичним та вібраційним станом.

Таблиця 1 – Діагностичні ознаки та їх характеристика

Ознаки	Переваги	Недоліки
Прямі		
Швидкість обертання ротора	Висока точність вимірювання, відсутність впливу завод.	Вимірювання потребує механічного або електричного зв'язку з двигуном; доцільні лише на потужних та відповідальних механізмах.
Спектр струму		
Активна та реактивна потужність		
Зовнішні		
Вібрація	Вимірювання без механічного або електричного зв'язку з двигуном.	Вимірюваний сигнал може містити шуми та завади від зовнішнього електротехнічного обладнання, розміщеного поряд
Магнітне поле		
Шум		
Іскріння		
Температура		

Узагальнення матеріалів першого розділу стало основою для постановки завдань дослідження, вирішення яких забезпечує досягнення мети роботи.

У **другому розділі** висунуто і доведено гіпотезу – зміна індукції магнітного поля на поверхні статора АД є ознакою, яка може свідчити про зміну стану двигуна. Дослідження проведені шляхом математичного моделювання і експериментально. Чітку ідентифікацію причини, яка привела до зміни індукції магнітного поля, визначити надважко унаслідок дії багатьох чинників: зміна опорів статора через виткові замикання чи обриви витків, виникнення локальних точок замикання пластин пакету сталі та навіть зміна опорів статора і ротора через перегрів, викликаний перевантаженням. Усе це веде до погіршення стану і зниження ресурсу роботи двигуна. Безпосередня причина може бути встановлена під час огляду або ремонту, рішення на проведення якого буде прийнято за фактом зміни індукції магнітного поля й інших зовнішніх ознак роботи двигуна.

Для встановлення рівня інформативності індукції магнітного поля як зовнішнього показника зміни стану АД за допомогою програми FEMM виконане моделювання індукції магнітного поля на поверхні статора симетричного АД, що не має пошкоджень (рис.1, а), та такого, що має несиметрію активних опорів обмоток статора (рис.1, б). Для АД, обмотки якого є несиметричними за величиною опору, на поверхні спостерігаються

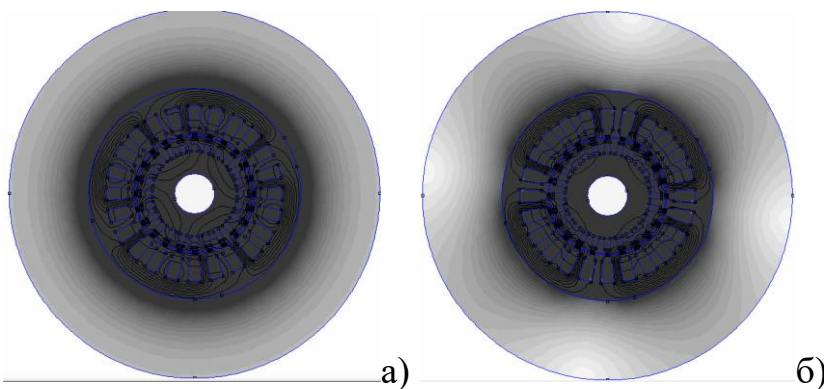


Рисунок 1 – Розподіл індукції магнітного поля змінного струму на поверхні статора АД

викривлення, які є свідченням наявності дефекту.

Експериментальні результати отримані шляхом вимірювання розподілу індукції магнітного поля навколо двигуна лабораторної установки (рис.2,а) при живленні його від мережі та від

перетворювача частоти. Для вимірювання індукції магнітного поля використаний прилад TES 1394. Епюра магнітної індукції навколо несиметричного двигуна, що живиться ПЧ, має суттєві викривлення (рис.2, б). Наявність пошкоджень спотворює загальну картину розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора АД: у зоні пошкоджень зменшуються її значення. Якісний характер спотворення зберігається при зміні частоти напруги живлення двигуна та напрямку його обертання.

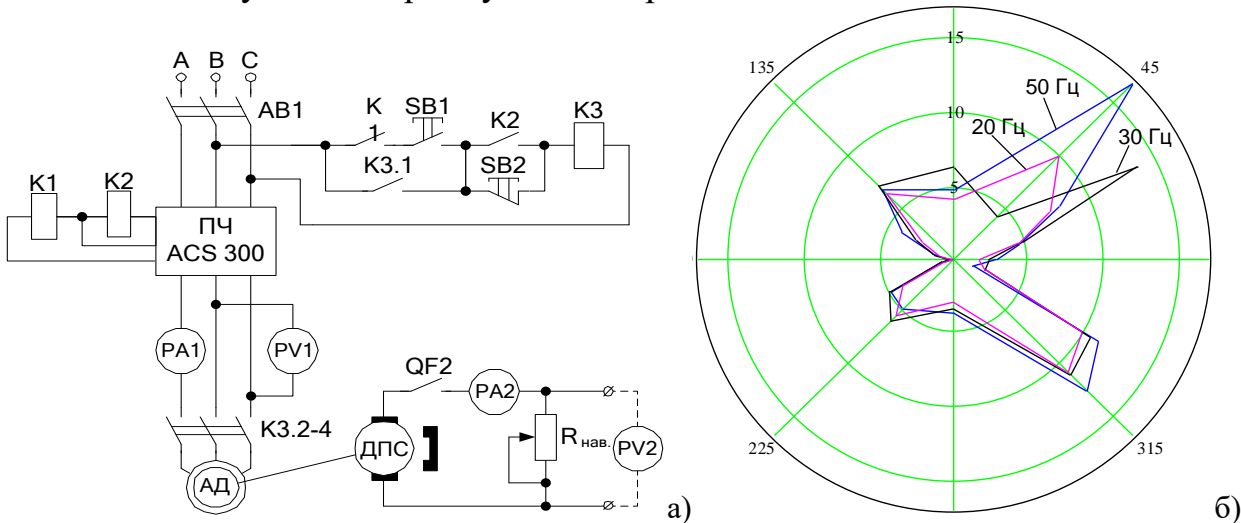


Рисунок 2 – Лабораторна установка для експериментальних досліджень – а) і карта розподілу індукції навколо АД – б)

Картини індукції магнітного поля навколо асинхронних двигунів, отримані у результаті проведення експериментальних досліджень, якісно співпадають з результатами математичного моделювання і мають різко виражену нерівномірність, що несе значиму інформацію про технічний стан двигуна.

У третьому розділі здійснена оцінка стану та терміну експлуатації асинхронного двигуна на основі вимірювання зовнішнього магнітного поля, отримана модель оцінки стану та виявлення зміни параметрів АД при його моніторингу шляхом вимірювання індукції магнітного поля на поверхні статора.

Розв'язок завдання побудови моделі оцінки стану проведено на основі ідентифікації подібності вимірюного розподілу індукції B_k магнітного поля на поверхні асинхронного двигуна до тестового розподілу індукції B_{1st} магнітного поля, вимірюного для симетричного двигуна. Для синтезу критеріїв подібності при оцінюванні стану асинхронного двигуна застосовано теорію відстаней і, відповідно, ряд метрик. Вибір метрики обґрунтований топологією індукції магнітного поля на поверхні АД, яка для симетричного двигуна має у тримірному просторі вид, наближений до витягнутого еліпсоїду, а у горизонтальному перерізі – вид подібний до еліпсу. Запропоновано застосувати Буземанову метрику, яка на дійсному $\mathcal{R}P^n$ n -мірному проективному просторі, задана виразом

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{n+1} \left| \frac{x_i}{\|x\|} - \frac{y_i}{\|y\|} \right|, \sum_{i=1}^{n+1} \left| \frac{x_i}{\|x\|} + \frac{y_i}{\|y\|} \right| \right\},$$

де довільні $x = (x_1; \dots; x_{n+1})$, $y = (y_1; \dots; y_{n+1}) \in \mathbb{R}P^n$, а $\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} x_i^2}$, $\|y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} y_i^2}$,

причому $\min \{ \cdot \}$ визначає нижню межу відстаней.

Пронормуємо показники оцінювання відхилення розподілу індукції B_k магнітного поля досліджуваного АД до тестового розподілу індукції B_{tst} магнітного поля, виміряного для симетричного АД: $k_{b(k)} = db_{(k)} / db_0$, де

$$db_0 = 2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst}}{\|B_{tst}\|} \right| - \text{дистанція, розрахована для симетричного двигуна, } db_{(k)} -$$

вектор дистанцій, розрахований для k -го виміряного розподілу індукції.

Для множини розрахованих значень $k_{b(k)}$ шляхом апроксимації отримано аналітичну залежність. При досягненні та перевищенні максимально допустимого значення $k_{b(k)} \geq k_{mpv}$, експлуатація АД стає недоцільною.

Дослідження з оцінки стану асинхронного двигуна були виконані експериментальним шляхом для штучно створюваної параметричної несиметрії статорних обмоток. При проведенні дослідження був використаний асинхронний двигун АОЛС2-21-4, потужністю 1,3 кВт.

Вимірювання індукції магнітного поля проводилось у 16 точках навколо двигуна на відстані 0,1 м від корпусу та в горизонтальній площині на рівні валу. Всього було проведено п'ять серій вимірювань ($k = \overline{1..5}$). Кожна наступна серія вимірювань відповідала поступовому погіршенню стану двигуна, що відображається у збільшенні коефіцієнту $k_{ns(k)}$ несиметрії опорів обмоток статора АД.

За отриманими значеннями побудована діаграма розподілу індукції зовні асинхронного двигуна та розраховано відхилення розподілу магнітної індукції у відносних одиницях за Буземановою метрикою

$$k_{b(k)} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst.i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{tst.i}^2}} - \frac{B_{(k)i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{(k)i}^2}} \right| \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst.i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{tst.i}^2}} + \frac{B_{(k)i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{(k)i}^2}} \right| \cdot \left(2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_{tst.i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} B_{tst.i}^2}} \right| \right)^{-1}.$$

Використаємо рівняння відносного терміну експлуатації ізоляції при температурі \mathcal{G} : $z = e^{-\delta \Delta \tau}$, де $\Delta \tau = \mathcal{G} - \mathcal{G}_n$ – перевищення температури над номінальною \mathcal{G}_n , δ – сталий коефіцієнт для відповідного класу ізоляції. Об'єднавши його з розрахованою залежністю k_b від коефіцієнту несиметрії обмоток k_{ns} , отримаємо

$$z = a_z \left(1 - \frac{k_b}{a_b} \right)^{\frac{b_z}{b_b}}$$

рівняння, що пов'язує відносну тривалість життя ізоляції асинхронного двигуна та відхилення розподілу магнітної індукції зовні двигуна (рис. 3), де a_z, b_z, a_b, b_b коефіцієнти апроксимації.

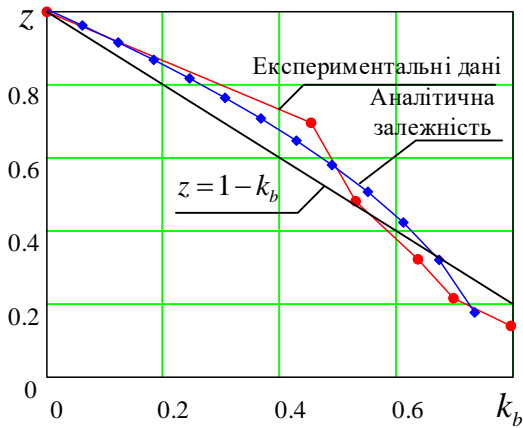


Рисунок 3 – Зміна відносної тривалості життя ізоляції АД від розподілу магнітної індукції на поверхні двигуна

Апроксимуємо розраховану за експериментальними даними $z = f(k_b)$ лінійною функцією. Отримаємо рівняння виду:

$$z = 1 - k_b.$$

Розраховане значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0,92$, тобто варіація значення тривалості життя ізоляції АД на 92% обумовлена відхиленням розподілу індукції магнітного поля. Таке значення R^2 , за співвідношенням Чеддока, означає що зв'язок досить тісний.

Отримана модель стану АД дозволяє використовувати її в умовах виробництва, але необхідно враховувати наявність різноманітних завод і шумів, а також визначення моменту зміни параметрів двигуна.

Для автоматичної обробки даних запропоновано використати методи, що легко алгоритмізуються і дозволяють здійснювати аналіз вимірної індукції магнітного поля на поверхні статора АД при проведенні моніторингу. Так, з метою виділення сигналу, що відображає зміну параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації застосовано функції Changepoint та CUSUM.

Відтворимо процес моніторингу – регулярних вимірювань з контролем змінювання сигналу. Для дослідження процесу виділення сигналу з шуму, штучно сформуємо його зміну. Приймемо, що коефіцієнт k_b за Буземановою метрикою, у точці $k = 500$ змінився від початкового значення $k_b = 0,453$ до значення $k_b = 0,53$.

Очевидно, що на початку вимірювань функція не знаходить точки зміни сигналу і лише після 500-го вимірювання це стає можливим. Однак, враховуючи характер статистичних характеристик сигналу, знайдена точка не буде відповідати 500-у вимірюванню, а буде знайдена з деяким запізненням. При цьому вимірний сигнал містить шум. Для підвищення точності знаходження точки змінювання сигналу застосовано алгоритм фільтрації сигналу на основі ковзного середнього з різними вагами $x_i^{filter} = 0,25x_{i-1} + 0,5x_i + 0,25x_{i+1}$. Виділення такого сигналу дає стійкий результат

із запізненням понад 20 вимірювань та з похибкою у 5 вимірювань; крім того при цьому можуть виникати помилкові знаходження точок зміни сигналу. Відносна похибка точності значення початкового рівня складає 2,7%, а кінцевого рівня -7,7%. Попередня фільтрація шуму забезпечує впевнене і точне виділення точки зміни сигналу з запізненням у двічі меншим, – у 9 вимірювань. Майже утричі зменшуються похибки визначення рівнів: початкового до 0,8%, кінцевого до -2,9%. Від’ємне значення похибки означає, що функція Changerpoint дещо перебільшує погіршення стану двигуна.

Застосування функції CUSUM дозволяє виявити невеликі зміни в середньому на основі методу кумулятивних сум, що забезпечує зниження зашумленості при виділенні сигналу. Приймаючи стандартну установку $n = 5$, отримуємо стійкий результат з запізненням лише на 2 точки після зміни сигналу. При цьому визначення точки зміни практично не залежить від наявності шуму і числа розрахункових стандартних відхилень. Виділення такого сигналу дає стійкий результат із запізненням, що не перевищує 3 вимірювання.

Отримані результати показують, що застосування алгоритмів «step-detection» дозволяє виділити точку зміни сигналу, який характеризує зміну внутрішніх параметрів АД, що відображається в індукції магнітного поля, виміряної на поверхні статора.

Поєднання методів визначення точки зміни сигналу дозволяє суттєво підвищити точність, а також розрахувати значення початкового та кінцевого рівня сигналу. Для цього точка зміни сигналу локалізується на основі методу кумулятивних сум функцією CUSUM, а потім уточнюється при застосуванні функції Changerpoint.

У четвертому розділі розглянута побудова інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних електричних двигунів.

На основі аналізу предметної області та відповідно до вимог стандарту IDEE0, засобами пакету AllFusion Process Modeler BPWin створена контекстна діаграма, яка описує аналіз даних в інформаційній технології моніторингу стану електричних двигунів на основі зовнішніх ознак. Дана діаграма відображена на рис. 4:



Рисунок 4 – Контекстна діаграма процесу моніторингу АД на основі зовнішніх ознак

У результаті функціонального аналізу головної роботи побудовано діаграму декомпозиції, що деталізує основні функції системи (рис. 5).

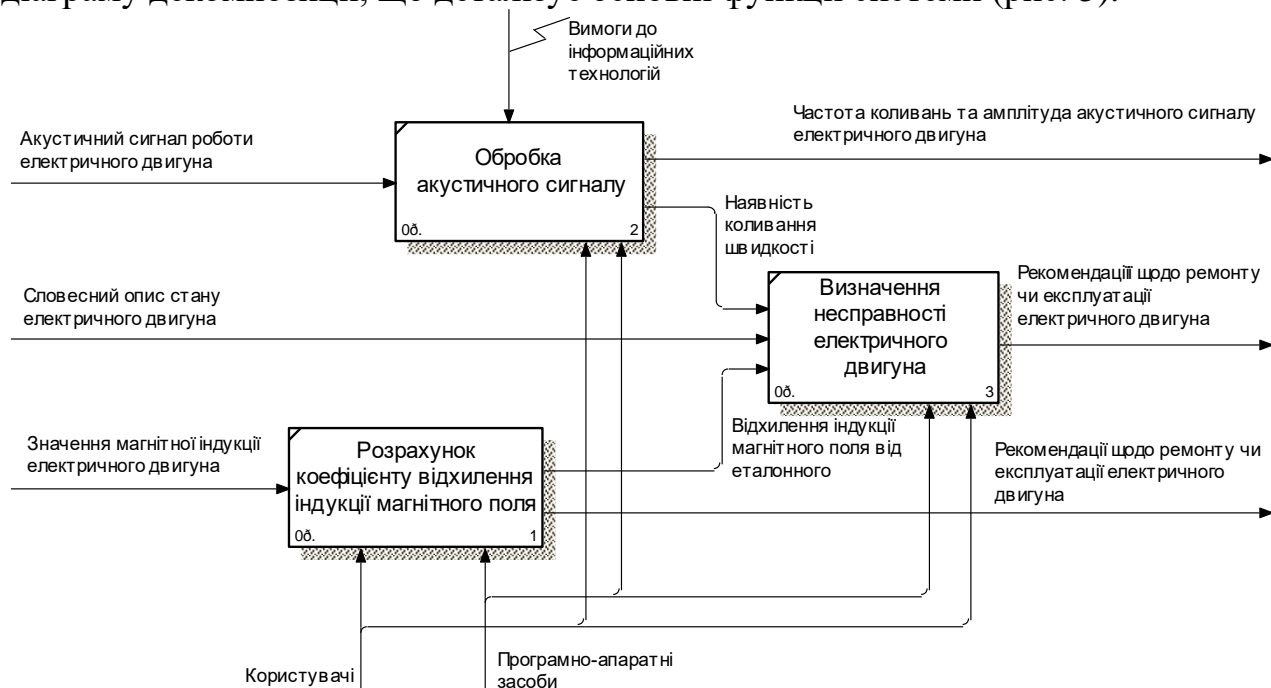


Рисунок 5 – Діаграма декомпозиції процесу моніторингу АД на основі зовнішніх ознак

Методологічно система моніторингу (СМ) може бути представлена наступним чином: {(експертна система), (динамічна підсистема)} → динамічні властивості → логічні правила → властивості (ідентифікація стану) → (динамічна підсистема) → логічні правила → властивості (модулі експертної системи) → (експертна система)}.

Математичний опис архітектури експертної системи має вигляд:

$$ES = \left\{ \left(D \left(P(t) \left(x_0(t), x_1(t), x_2(t), z(t), k(t), y(t), d(t) \right) \right) \right), \right. \\ \left. R(t), \left(P_i(t) \left(x_i(t), z_i(t), k_i(t), y_i(t) \right) \right) \right\}$$

де ES – експертна система; D – динамічна підсистема; P – властивості елементів експертної системи; R – логічні відносини; x – впливи; z – параметри, що діагностуються; k – коефіцієнти; y – вихідні параметри; d – динамічні параметри; t – час; індекси: 0, 1, 2 — початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер дій; i – число елементів експертної системи.

Описана архітектура експертної системи реалізована в системі моніторингу та визначення несправностей ЕМ за зовнішніми ознаками, що характеризують режим роботи. На рис. 6 показані основні потоки інформації і взаємозв'язки між ними. Необхідність накопичення, зберігання і обробки великих обсягів інформації вимагає створення відповідного програмного забезпечення, що відповідає за введення оперативної інформації, подальшої її обробки на основі використання баз даних системи, підтримки цих баз даних в актуальному стані, верифікації отриманих результатів тощо.

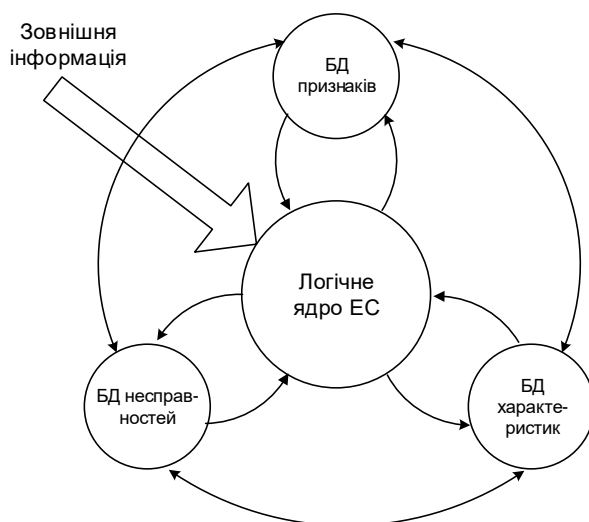


Рисунок 6 – Структура потоків інформації в системі моніторингу та визначення несправностей ЕМ за зовнішніми ознаками

На основі запропонованих діаграм (рис. 4, 5) та архітектури СМ розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення (ПЗ) інформаційної технології визначення несправностей АД за зовнішніми ознаками. Узагальнену структуру інформаційної технології можна представити у вигляді програмних модулів, які реалізують процеси обробки інформаційних потоків та здійснення розрахунків.

Згідно з процесною моделлю модульна структура інформаційної технології відображена через представлену на рис. 7 структурно-функціональну схему. Підсистеми програмних процедур, що забезпечують основний функціонал кожного з модулів, реалізуються на мові SQL з використанням відповідних її бібліотек.

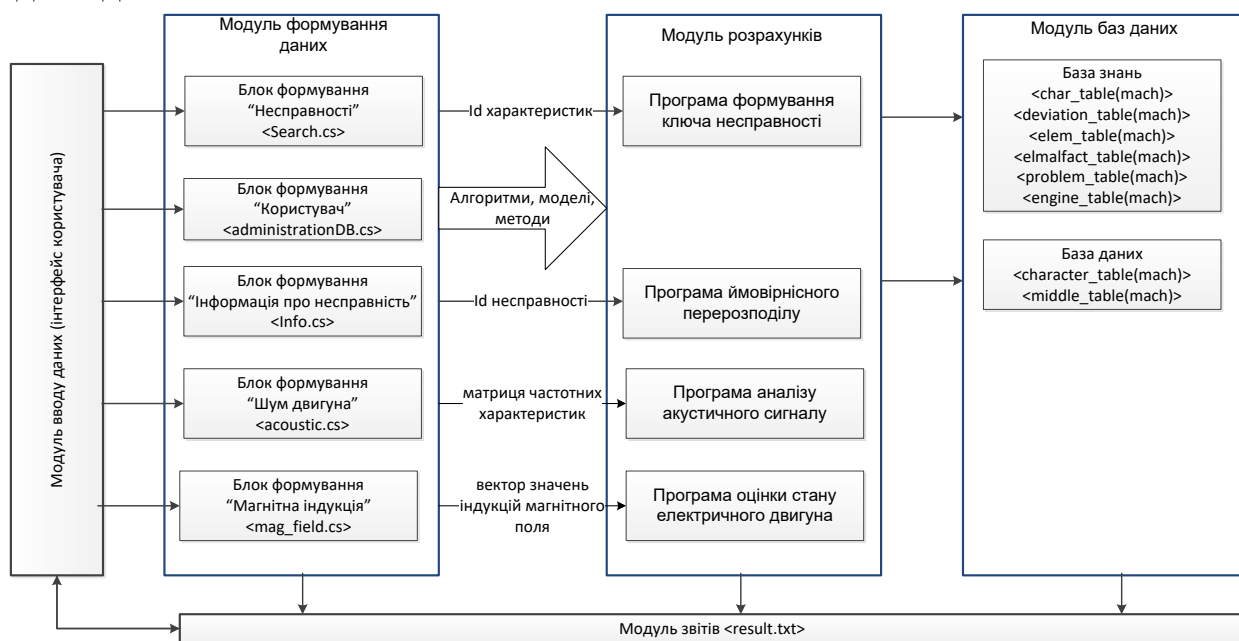


Рисунок 7 – Структурно-функціональна схема інформаційної технології

Основне призначення ПЗ – видача рекомендацій обслуговуючому персоналу в разі виявлення відхилень у роботі електричних двигунів. Після

ідентифікації користувача відкривається вікно, що надає доступ до функцій користування та редагування бази знань. Надається можливість її поповнення, зміни та редагування. У результаті вибору одного з елементів вікна редагування відкривається доступ до зазначеного довідника бази знань.

У режимі діагностування користувач за заданими відхиленнями в характеристиках чи роботі елементів електродвигуна може отримати список можливих несправностей із більш детальним описом. А після вибору несправності зі списку та натисканні кнопки «Інформація» відкриється вікно з рекомендаціями щодо усунення несправності.

У п'ятому розділі представлено експериментальні дослідження і техніко-економічна оцінка впровадження інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів.

Експериментальні дослідження інформаційної технології проведені в умовах виробництва на гірничо-збагачувальному комбінаті ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», м. Горішні Плавні. В якості асинхронного двигуна, що був обстежений, був прийнятий асинхронний двигун АКЗ-12-39-6УХЛ4, приводу стрічкового конвеєра дробильно-збагачувальної фабрики (ДЗФ). Вибір даного двигуна зумовлений тим, що обслуговуючий персонал виявив такі відхилення в ознаках нормальної роботи: акустичні коливання, у яких відчувається періодична зміна тональності з низькочастотною гармонійною складовою частотою, приблизно 0,5 – 1 Гц; частота обертання ротора двигуна при номінальному навантаженні знижена і відчуються її коливання. Це спостерігалось за незначним нерівномірним рухом стрічки конвеєра; струм статора, за коливаннями стрілки амперметра, мав пульсуючий характер, при цьому амплітуда коливань становила 5-10% від значення номінального струму.

Для встановлення причини такої роботи АД були проведені вимірювання струму фази статора, акустичного шуму та індукції магнітного поля на поверхні статора. Для діагностування можливої несправності використано розроблену інформаційну технологію і систему моніторингу. В систему вкладено базу ознак, причин і рекомендації щодо роботи АД в подібному режимі.

Фільтрація вимірних сигналів дозволила виділити з акустичного шуму періодичний сигнал, що містить періодичну низькочастотну складову частотою близько 0,16 Гц і карту розподілу магнітної індукції (рис. 8). За розрахунками значення коефіцієнту Буземанової метрики складає $k_b = 0,12$, а відносна тривалість життя ізоляції асинхронного двигуна $z = 1 - k_b = 1 - 0,12 = 0,88$.

Виділені ознаки введені до розробленої програми «Експертна система діагностики несправностей електричних двигунів» (рис.9), внаслідок чого отримані причини несправностей АД і рекомендації щодо їх усунення.

З'ясовано, що за даними ознаками роботи АД визначено наявне пошкодження ротора. Причина пошкодження полягає в поганому контакті в з'єднаннях лобових частин обмотки, перехідних опорах між стрижнями, з'єднаннях між паралельними групами, щітковому апараті або пусковому реостаті.

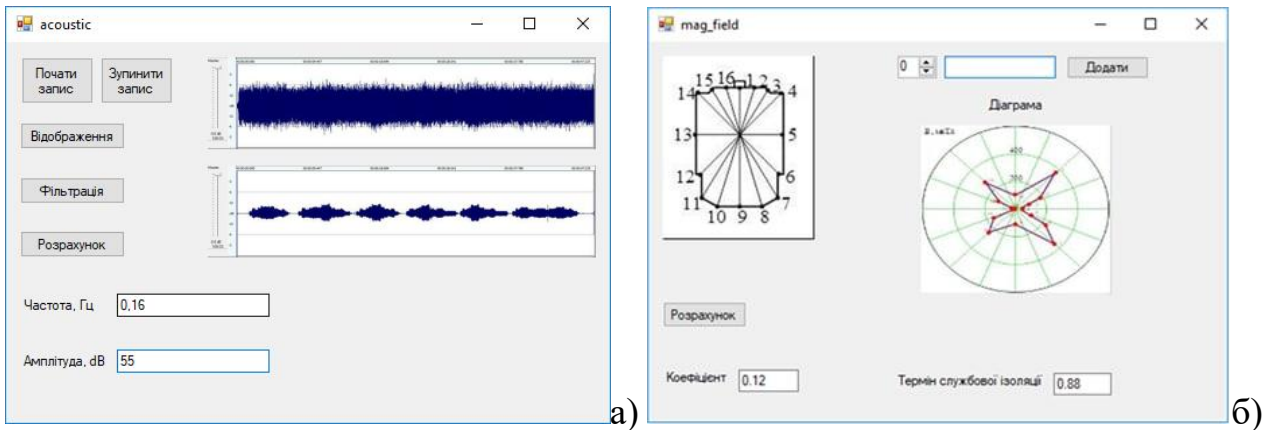


Рисунок 8 – Вікна програми з відображенням акустичного сигналу – а) і розподілу індукції магнітного поля і розрахунковою інформацією – б)

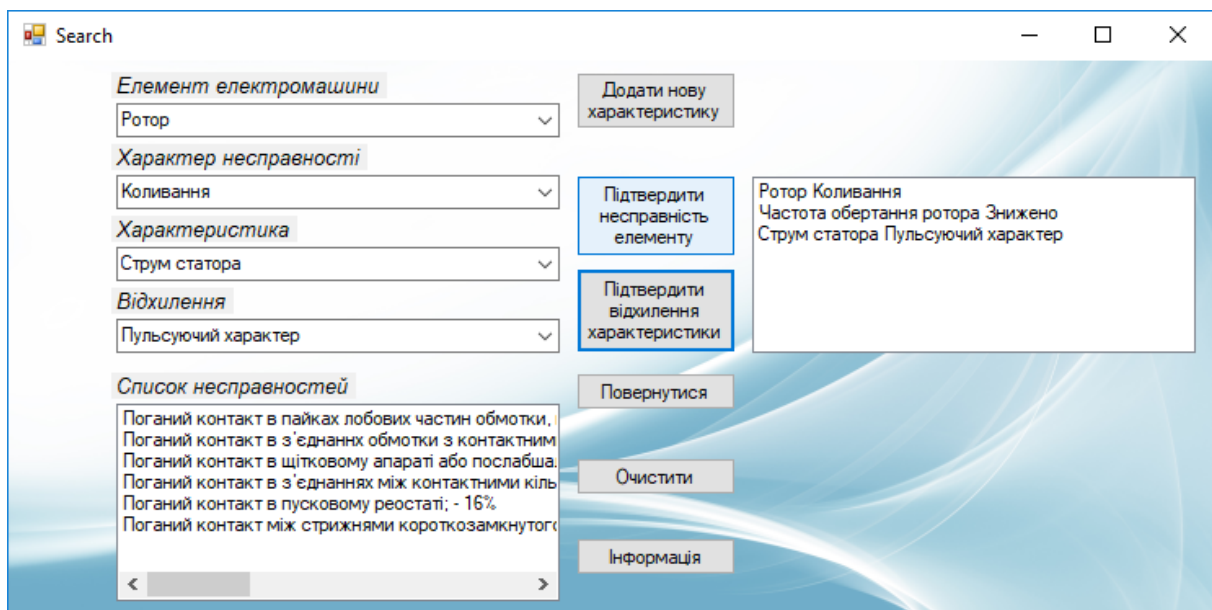


Рисунок 9 – Робота комп'ютерної діагностичної системи з розпізнавання несправностей АД

На підставі розрахунку економічної ефективності показано, що застосування інформаційної технології системи моніторингу і оцінки експлуатаційного ресурсу роботи електричних машин на підприємствах металургійної, гірничо-видобувної, нафтопереробної промисловості та транспорті на 500 асинхронних двигунах середньої потужності – 160...250 кВт дозволяє отримати річний економічний ефект 1160 тис. грн з терміном окупності три роки. Економічний ефект обумовлений зменшенням витрат на ремонт під час експлуатації асинхронних двигунів за рахунок попередження про виникнення несправності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання розробки інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів безпосередньо під час виконання технологічного процесу на основі зовнішніх ознак їх роботи, що дозволяє провести попередню

діагностику асинхронного двигуна та визначити його поточний стан, а також отримати рекомендації про можливість і доцільність подальшої експлуатації.

Основні наукові та практичні результати, отримані в роботі, можна сформулювати таким чином:

1. На основі проведеного аналізу систем діагностики електричних машин та з метою реалізації принципу «оцінки за станом», для попередньої діагностики стану АД прийнято концепцію моніторингу зовнішніх ознак режиму роботи електричних машин. Розроблена інформаційна технологія комплексного моніторингу асинхронних двигунів на основі зовнішніх діагностичних показників дозволяє проводити попередню діагностику двигуна з наданням рекомендацій щодо можливості і доцільності його подальшої експлуатації.

2. Математичне моделювання несиметричних за параметрами асинхронних двигунів, при використанні програми FEMM, показало нерівномірний розподіл індукції магнітного поля, що свідчить про наявність внутрішніх дефектів обмоток. Отримані в результаті проведення експериментальних досліджень картини індукції магнітного поля навколо асинхронних двигунів якісно співпадають з результатами математичного моделювання і мають різко виражену нерівномірність, що несе важливу інформацію про технічний стан двигуна. Наявність пошкоджень спотворює загальну картину розподілу індукції магнітного поля на поверхні статора АД – в зоні пошкоджень зменшуються її значення. Якісний характер спотворення зберігається при зміні частоти напруги живлення двигуна та напрямку його обертання.

3. На основі отриманих результатів розроблені основні принципи аналізу зовнішнього магнітного поля двигунів, які дозволяють інтерпретувати отримані результати діагностики й зробити висновок про наявність у двигуні дефектів. Дані принципи стали основою методу моніторингу асинхронних двигунів на основі аналізу параметрів їх зовнішнього магнітного поля.

4. На основі Буземанової метрики розроблені критерії оцінювання ступеня несиметрії двигуна, перегріву обмоток статора та зниження тривалості життя їх ізоляції. Встановлена лінійна залежність між терміном життя ізоляції обмоток та відносним значенням Буземанової дистанції. Отримані результати дозволяють оцінити термін експлуатації асинхронного двигуна.

5. Представлений аналіз вимірної індукції магнітного поля на поверхні статора АД, за даними моніторингу, відображає можливість виділення сигналу і реєстрації зміни параметрів двигуна для прогнозування його стану, терміну та доцільності подальшої експлуатації. Використані для аналізу функції Changepoint та CUSUM з різним ступенем точності та швидкодії дозволяють визначити точку зміни параметрів.

6. На процес аналізу сигналу практично не впливає шум, викликаний наявністю працюючого електричного обладнання та його включенням-виключенням. Проведення фільтрації сигналу ковзним середнім з різними вагами дозволяє удвічі підвищити точність отримання результату. Слід зазначити, що поєднання методів визначення точки зміни сигналу дозволяє суттєво підвищити точність розрахунку значень початкового та кінцевого рівня

сигналу. Для цього точка зміни сигналу локалізується на основі методу кумулятивних сум функцією CUSUM, а потім уточнюється при застосуванні функції Changepoint.

7. Запропоновано систему комплексного моніторингу АД, яка може бути віднесена до класу експертних систем функціональної діагностики, а поповнення інформації базується на індивідуальному досвіді персоналу, який експлуатує дану систему.

8. Розроблено методику добору діагностичних параметрів, що ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, зокрема параметр максимальної індивідуальності приймається в якості базового. Добір інших діагностичних параметрів, що дозволяють вирішити задачу розпізнавання, здійснюється методом послідовних доповнень. При цьому спочатку вибирається такий параметр, комбінаційна інформативність якого у сполученні з базовим, виявляється максимальною. Потім до отриманої бази додається третій параметр і т.ін. до повного розпізнавання.

9. На підставі розрахунку економічної ефективності показано, що застосування інформаційної технології системи моніторингу і оцінки експлуатаційного ресурсу роботи електричних машин на підприємствах металургійної, гірничо-видобувної, нафтопереробної промисловості та транспорті на 500 асинхронних двигунів середньої потужності – 160...250 кВт дозволяє отримати річний економічний ефект 1160 тис. грн з терміном окупності три роки. Економічний ефект обумовлений зменшенням витрат на ремонт під час експлуатації асинхронних двигунів за рахунок попередження про виникнення несправності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] O. Chorna, M. Guchenko, O. Bisikalo, O. Chorny, and A. Artemenko, «Experimental Study of Information Technology of Integrated Induction Motors Condition Monitoring», *World Science*, vol. 1, no. 6(58), pp. 4-9, 2020. doi: 10.31435/rsglobal_ws/30062020/7098.
- [2] O. A. Дурницькая, В. Ю. Ракитин, «Экспертная система определения неисправностей электрических машин», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2009, №. 4, с. 39-42.
- [3] O. A. Дурницькая, Е. А. Карпенко, В. А. Огарь, «Расширение функциональных свойств экспертной системы определения неисправностей электрических машин» *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*, 2010, № 28, с. 546-548.
- [4] Б. М. Горкунов, О. А. Чорна, А. А. Тищенко, «Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення діагностичної системи оцінки стану електродвигунів на основі зовнішніх діагностичних показників», *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ" : сб. наук. пр. Темат. вып. : Автоматика та приладобудування*, 2016, № 15(1187), с. 12-15.

- [5] Н. В. Зачепа, О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, К. Д. Ніколаєв, І. А. Луценко, «Дослідження поширення магнітного поля асинхронної машини в умовах навчально-виробничих лабораторій», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, 2017, 3(39), с. 45-52.
- [6] M. Zagirnyak, V. Nykyforov, O. Sakun, O. Chorna, «The industrial electrical equipment screened magnetic fields effect on model organisms», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 18323434, 2017, с. 380-383, doi: 10.1117/12.2229083.
- [7] M. Zagirnyak, O. Bisikalo, O. Chorna, O. Chornyi, «A Model of the Assessment of an Induction Motor Condition and Operation Life, Based on the Measurement of the External Magnetic Field», *Proc. 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 17472097, 2018, с. 316-321, doi: 10.1109/MEES.2017.8248938.
- [8] O. Chorna, O. Chornyi, V. Tytiuk, «Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of A Magnetic Field on the Stator Surface», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, (MEES), 2019, с. 150-153, doi: 10.1109/MEES.2019.8896554
- [9] N. Zachepa, O. Chorna, D. Rieznik, «Research Levels and Zones Spatial Propagation of the Magnetic Field of the Induction Motor», *Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, (MEES), 2019, с. 158-161, doi: 10.1109/MEES.2019.8896439
- [10] B. Gorkunov, S. Lvov, Y. Borysenko, V. Shamardina, Saliba Abdel Nour, O. Chorna, «Application of Electromagnetic Transducer for Noncontact Monitoring of Shaft Torque in Electromechanical Systems», *Proc. 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, (PAEP), 2020, 9240804, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240804
- [11] V. Nykyforov, O. Sakun, M. Yelizarov, O. Chorna, «Measurement of Magnetic Induction of an Induction Motor Magnetic Field on the Basis of Biological Express Systems», *Proc. 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, (PAEP), 2020, 9240902, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240902.
- [12] О. А. Дурницкая, В. Ю. Ракитин «Экспертная система определения неисправностей электрических машин по внешним признакам», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2010, с. 386-387.
- [13] О. А. Чорна, Н. Л. Сохін, «Комп'ютерна тестова програма з розширеними можливостями», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*: наукове видання, №1/2011, с. 98–99, 2011.
- [14] К. С. Панченко, О. А. Черная, О. А. Саун, Бердай Абдельмажид, «Экспериментальные измерения магнитного поля электромеханических

об'єктів», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2013, с. 114–115.

- [15] О. В. Бісікало, О. А. Чорна, О. П. Чорний, «Комп'ютерна тестова програма з розширеними можливостями», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика* : наукове видання, №1/2017, с. 101–104.
- [16] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, Н. В. Зачепа, О. Ю. Кісліцин, Д. О. Кулік, Д. О. Прошин, «Чисельне моделювання розподілу індукції зовнішнього магнітного поля асинхронного двигуна», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2018, с. 91-92.
- [17] О. А. Чорна, Д. В. Рєзнік, А. І. Реуцька, Н. В. Зачепа, «Експериментальні дослідження параметрів шуму при вимірюванні індукції магнітного поля», *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 2019, с. 131-134.
- [18] О. А. Чорна, К. С. Панченко, «Исследование распределения индукции магнитного поля переменного тока промышленной частоты снаружи асинхронных двигателей», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70361, 28.04.2015.
- [19] О. А. Чорна, В. Ю. Ракітін, А. О. Гладкий, Є. О. Карпенко, «Експертна система діагностики електричних двигунів за зовнішніми ознаками режиму їх роботи», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 36743, 31.01.2011.
- [20] О. А. Чорна, О. В. Бісікало, О. П. Чорний, «Оцінка ресурсу роботи асинхронного двигуна на основі вимірювань зовнішнього магнітного поля», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 78794, 04.05.2018.

АНОТАЦІЯ

Чорна О. А. Інформаційна технологія комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів на основі зовнішніх ознак. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». – Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Вінниця, 2021.

Дисертація присвячена розробці інформаційної технології комплексного моніторингу стану асинхронних двигунів (АД) на основі зовнішніх ознак їх роботи.

Отримана аналітична модель стану АД у вигляді лінійного рівняння відносного залишкового ресурсу ізоляції від коефіцієнту, що враховує розподіл

індукції магнітного поля на поверхні статора АД при виникненні параметричної несиметрії його обмоток.

Розвинуто методи моніторингу стану АД, які дозволяють встановити зміну параметрів двигуна на основі контролю вимірної індукції магнітного поля. Обґрунтовано можливість прогнозування стану двигуна, терміну та доцільності його подальшої експлуатації.

Запропоновано методика добору діагностичних параметрів, що ґрунтується на критерії максимальної індивідуальності, добір діагностичних параметрів здійснюється методом послідовних доповнень.

Побудовано діагностичну систему, що дозволяє самонавчатися на основі знань експертів та запропонованих практичних рекомендацій з ремонту електричних двигунів для обслуговуючого персоналу.

Ключові слова: інформаційна технологія, оцінювання стану, асинхронний двигун, комплексний моніторинг, діагностична система, зовнішні ознаки.

АННОТАЦИЯ

Черная О. А. Информационная технология комплексного мониторинга состояния асинхронных двигателей на основе внешних признаков. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 «Информационные технологии». – Винницкий национальный технический университет Министерства образования и науки Украины, Винница, 2021.

Диссертация посвящена разработке информационной технологии комплексного мониторинга состояния асинхронных двигателей (АД) на основе внешних признаков их работы.

Получена аналитическая модель состояния АД в виде линейного уравнения относительно остаточного ресурса изоляции от коэффициента, учитывающего распределение индукции магнитного поля на поверхности статора АД при возникновении параметрической несимметрии его обмоток.

Развиты методы мониторинга состояния АД, которые позволяют установить изменение параметров двигателя на основе контроля измеренной индукции магнитного поля. Обоснована возможность прогнозирования состояния двигателя, срока и целесообразности дальнейшей эксплуатации.

Предложена методика отбора диагностических параметров на основе критерия максимальной индивидуальности, подбор диагностических параметров осуществляется методом последовательных дополнений.

Построена диагностическая система, позволяющая самообучаться на основе знаний экспертов и предложенных практических рекомендаций по ремонту двигателей для обслуживающего персонала.

Ключевые слова: информационная технология, оценки состояния, асинхронный двигатель, комплексный мониторинг, диагностическая система, внешние признаки.

ABSTRACT

Chorna O. Information technology of complex monitoring of induction motor states on basis of indirect stories. – Qualification scientific work as a manuscript.

The dissertation for a scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.13.06 "Information technologies". - Vinnytsia National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific problem of development of information technology of complex monitoring of the condition of induction motors (AD) directly during the performance of technological process on the basis of external signs of their work, which will allow preliminary diagnostics of the engine with the definition of its current state and the issuance of recommendations on the possibility and expediency of its further operation.

The hardware and software of monitoring have been analyzed in the work and the information technology on the basis of external signs of work of the engine is offered. The classification of external signs such as temperature of heating of elements of the engine, vibration of the case, sound indicators of work, induction of a magnetic field which is measured on a surface of a stator of BP has been created.

It has been substantiated that on the basis of the measured external signs it is possible to determine the current state of BP, in particular, numerical estimates of the life of worn or repaired electromechanical equipment have been experimentally confirmed. Mathematical models have been made and mathematical modeling of asymmetric asynchronous motors by means of the FEMM program has been carried out. The simulation showed an uneven distribution of magnetic field induction, which indicates the presence of internal defects of the windings.

The patterns of magnetic field induction around induction motors obtained as a result of experimental research coincide qualitatively with the results of mathematical modeling and have a pronounced non-uniformity, which carries significant information about the technical condition of the motor. The presence of damage distorts the overall picture of the distribution of magnetic field induction on the surface of the stator BP - in the area of damage decreases its values. The qualitative nature of the distortion is preserved by changing of the frequency of the motor supply voltage and the direction of its rotation. Based on the obtained results, an analytical model of the state of an induction motor in the form of a linear equation of the relative residual insulation resource from the coefficient calculated on the basis of the Buzeman metric has been constructed, which allows to take into account the change in the distribution of magnetic field induction on the stator surface of an induction motor in the event of parametric asymmetry of its windings.

Methods for monitoring the state of BP, which allow to establish the moment of change of engine parameters, and, accordingly, the deterioration of its state, based on the control of change in the statistical characteristics of the measured magnetic field induction have been developed. The possibility of signal extraction and registration of changes of engine parameters for forecasting its condition, term and expediency of further operation has been substantiated. The Changepoint and

CUSUM functions used for analysis with different degrees of accuracy and speed allow to determine the point of change of parameters.

A method of selection of diagnostic parameters is proposed, which is based on the criteria of maximum individuality, while the selection of diagnostic parameters that allow to solve the problem of recognition is carried out by the method of successive additions. First, a complementary parameter is selected, the combinational informativeness of which in combination with the basic is the maximum. Then the following parameter is added to the database, etc. to the full recognition.

The modular structure of information technology of complex monitoring of BP condition on the basis of external signs has been constructed, the formalization of information flows of functional diagnostics and architecture of monitoring system has been carried out. As a result of software implementation of information technology of complex monitoring, a diagnostic system has been built, which allows self-study based on the knowledge of experts and provides practical recommendations for the repair of electric motors for maintenance personnel.

The magnitude of the economic effect under the conditions of introduction of the proposed information technology at the enterprises of metallurgical, mining, oil refining industry and transport for medium power BP has been determined. The annual economic effect on 500 asynchronous motors of average power - 160...250 kW is 1160 thousand UAH with a payback period of three years. The economic effect of information technology is formed by preventing accidents through timely technical inspections and preventive measures.

Key words: information technology, evaluation of the state, induction motor, monitoring, diagnostic system, indirect signs.

Підписано до друку 23.07.2021 р. Формат 60x48.7 1/16
Наклад 100 прим. Зам. № 49-21.

Видавець і виготовлювач ФОП Щербатих О.В.
вул. Софіївська, 36-Б, м. Кременчук, 39601
свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №2129 від 17.03.2005 р.
www.novabook.com.ua