

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
кафедра електромеханіки та машинобудування

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Калиниченко В.В.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2021 р.

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему Обґрунтування параметрів і структури технічної діагностики
видобувного комбайну/ The substantiation of the structure and parameters of
technical diagnostics of mining combine

Виконав: студент 2м курсу, групи ГМКМ-20
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 133 Галузеве машинобудування
(Гірничі машини та комплекси)

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Коротун Сергій Валерійович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник проф. каф. ЕМ, д-р техн. наук, проф. Семенченко А.К.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент: _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент: _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Покровськ – 2021 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
 Кафедра електромеханіки та машинобудування
 Освітній ступінь магістр
 Спеціальність 133 Галузеве машинобудування(Гірничі машини та комплекси)
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Завідувач кафедри
 _____ Калиниченко В.В.
 «_____» _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Коротуну Сергію Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Обґрунтування параметрів і структури технічної діагностики видобувного комбайну / The substantiation of the structure and parameters of technical diagnostics of mining combine
 керівник проекту (роботи) Семенченко Анатолій Кирилович, д-р техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від _____ року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07.12.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) матеріали звітів про практику, гірничо-геологічні умови та техніко-економічні параметри шахти; перелік електромеханічного обладнання шахти

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- аналіз існуючої структури технічного обслуговування електромеханічного обладнання вугільних підприємств
- аналіз робочих параметрів та можливих пошкоджень електроприводу вугледобувних комбайнів
- розробка заходів з удосконалення структури технічної діагностики електромеханічної частини видобувного комбайну
- висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 1,2,3,4,5,6,7 – спеціальна частина

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20.09.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)
1	<i>1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВУГІЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ</i>	27.09.2021
2	<i>1.1 Аналіз можливості зниження витрат на обслуговування гірничого обладнання за рахунок уніфікації структури планово-попереджувальних ремонтів</i>	23.09.2021
3	<i>1.2 Визначення оптимальної структури технічної діагностики та визначення залишкового ресурсу електромеханічного обладнання</i>	27.09.2021
4	<i>2. АНАЛІЗ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МОЖЛИВИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВУГЛЕДОБУВНИХ КОМБАЙНІВ</i>	07.10.2021
5	<i>2.1 Побудова комп'ютерної моделі електроприводу видобувного комбайну</i>	30.09.2021
6	<i>2.2 Дослідження розробленої комп'ютерної моделі ЕП</i>	05.10.2021
8	<i>2.3 Аналіз пошкоджень електродвигунів видобувних комбайнів</i>	07.10.2021
9	<i>3. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНУ</i>	02.12.2021
10	<i>3.1 Обґрунтування вибору підходу до розробки системи моніторингу, технічної діагностики та визначення залишкового ресурсу електромеханічної частини вугледобувного комбайну</i>	13.10.2021
11	<i>3.2 Огляд існуючих методів технічної діагностики електродвигунів за електричними параметрами</i>	11.11.2021
12	<i>3.2.1 Обґрунтування критеріїв діагностування несправностей електродвигунів за електричними параметрами</i>	18.10.2021
13	<i>3.2.2 Виконання діагностики несправностей ротору шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів</i>	21.10.2021
14	<i>3.2.3 Виконання діагностики несиметрії повітряного зазору шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів</i>	28.10.2021
15	<i>3.2.4 Виконання діагностики несиметрії статора шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів</i>	04.11.2021
16	<i>3.2.5 Використання методу ватметрографії задля визначення пошкоджень в електродвигунах вугледобувного комбайну</i>	11.11.2021
17	<i>3.3 Обґрунтування методів ватметрографії та спектрального аналізу при діагностиці технічного стану електродвигунів видобувних комбайнів</i>	18.11.2021
18	<i>3.3.1 Застосування методології визначення поточного стану і залишкового ресурсу за допомогою ватметрографії з урахуванням графіків потужності</i>	15.11.2021
19	<i>3.3.2 Використання об'єднаної методології оцінювання залишкового ресурсу за допомогою ватметрографії та спектрального аналізу</i>	18.11.2021
20	<i>3.4 Формування алгоритму виконання моніторингу порушень і оцінювання залишкового ресурсу з використанням баз даних несправностей</i>	22.11.2021
21	<i>3.5 Обґрунтування використання нечіткої логіки для процесу формування інформаційної бази даних несправностей і пошкоджень електродвигунів очисного комбайну</i>	25.11.2021
22	<i>3.6 Дослідження програмної реалізації запропонованої комп'ютерної моделі нечіткого класифікування пошкоджень системи технічної діагностики електродвигунів очисних комбайнів</i>	02.12.2021
23	<i>Оформлення дипломної роботи та підготовка до захисту</i>	07.12.2021

Студент

Сергій КОРОТУН

Керівник проекту (роботи)

Анатолій СЕМЕНЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Коротун С. Ю. Обґрунтування параметрів і структури технічної діагностики видобувного комбайну / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Випускна кваліфікаційна робота присвячена досить актуальному на вугільному підприємстві питанню оптимізації структури технічної діагностики гірничого обладнання шляхом переходу на техобслуговування за фактичним станом. Виконано аналіз існуючої системи планово-попереджувальних ремонтів на підприємстві та можливості зниження значних витрат шляхом її оптимізації. Виконано дослідження параметрів електромеханічної частини видобувного комбайну та визначені переважні несправності і пошкодження, що виникають в ній. Виконано розробку заходів з оптимізації системи діагностики технічного стану електродвигунів.

Ключові слова: структура системи планово-попереджувальних ремонтів, несправності, електродвигун, видобувний комбайн, комп'ютерна модель, нечітка логіка

Список публікацій здобувача:

1. Калиниченко В. В., Коротун С. В., Шамрило І. С. Формування алгоритму проведення моніторингу порушень технічного стану електродвигуна видобувного комбайну. Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні: Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Бахмут, 25-26 листопада 2021 р.) / Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії [упоряд. П.О. Чикунів]. – Бахмут: ННППІ УІПА, 2021. – С. 48-49.

ANNOTATION

S. Korotun. The substantiation of the structure and parameters of technical diagnostics of mining combine / Graduation qualification work for obtaining an educational degree «Master» in specialty 133 Industry engineering. - SHEE «DonNTU», Pokrovsk, 2021.

Graduation qualifying work is devoted to the issue of optimizing the structure of technical diagnostics of mining equipment by switching to maintenance on the actual state. The analysis of the existing system of planned and preventive repairs at the enterprise and the possibility of reducing significant costs by optimizing it. The parameters of the electromechanical part of the mining combine have been studied and the main faults and damages that occur in it have been identified. The development of measures to optimize the system for diagnosing the technical condition of electric motors.

Keywords: structure of system of planned and preventive repairs, malfunctions, electric motor, mining combine, computer model, fuzzy logic

List of applicant's publications:

1. Kalinichenko V., Korotun S., Shamrylo I. Formation of the algorithm for monitoring violations of the technical condition of the electric motor of the mining combine. Modern technologies in energy, electromechanics, control systems and mechanical engineering: Proceedings of the IV All-Ukrainian scientific-practical Internet conference (Bakhmut, November 25-26, 2021) / Educational-scientific professional-pedagogical institute of the Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy [ed. ON. Chikunov]. - Bakhmut: NNPI UIPA, 2021. - P. 48-49.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВУГІЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ	10
1.1 Аналіз можливості зниження витрат на обслуговування гірничого обладнання за рахунок уніфікації структури планово-попереджувальних ремонтів.....	10
1.2 Визначення оптимальної структури технічної діагностики та визначення залишкового ресурсу електромеханічного обладнання.....	12
2. АНАЛІЗ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МОЖЛИВИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВУГЛЕДОБУВНИХ КОМБАЙНІВ	20
2.1 Побудова комп'ютерної моделі електроприводу видобувного комбайну	20
2.2 Дослідження розробленої комп'ютерної моделі ЕП.....	24
2.3 Аналіз пошкоджень електродвигунів видобувних комбайнів	27
3. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНУ	28
3.1 Обґрунтування вибору підходу до розробки системи моніторингу, технічної діагностики та визначення залишкового ресурсу електромеханічної частина вугледобувного комбайну.....	30
3.2 Огляд існуючих методів технічної діагностики електродвигунів за електричними параметрами	35
3.2.1 Обґрунтування критеріїв діагностування несправностей електродвигунів за електричними параметрами	35
3.2.2 Виконання діагностики несправностей ротору шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів.....	38

3.2.3 Виконання діагностики несиметрії повітряного зазору шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів	40
3.2.4 Виконання діагностики несиметрії статора шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів.....	42
3.2.5 Використання методу ватметрографії задля визначення пошкоджень в електродвигунах вугледобувного комбайну	42
3.3 Обґрунтування методів ватметрографії та спектрального аналізу при діагностиці технічного стану електродвигунів видобувних комбайнів.....	43
3.3.1 Застосування методології визначення поточного стану і залишкового ресурсу за допомогою ватметрографії з урахуванням графіків потужності	43
3.3.2 Використання об'єднаної методології оцінювання залишкового ресурсу за допомогою ватметрографії та спектрального аналізу	51
3.4 Формування алгоритму виконання моніторингу порушень і оцінювання залишкового ресурсу з використанням баз даних несправностей.....	57
3.5 Обґрунтування використання нечіткої логіки для процесу формування інформаційної бази даних несправностей і пошкоджень електродвигунів очисного комбайну.	61
3.6 Дослідження програмної реалізації запропонованої комп'ютерної моделі нечіткого класифікування пошкоджень системи технічної діагностики електродвигунів очисних комбайнів	65
ВИСНОВОК.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТОК А.....	80

ВСТУП

На сьогоднішній день на вугільних підприємствах застосовується досить багато різноманітної видобувної техніки, що характеризуються високою енергоємністю та потребує, в свою чергу, підвищення надійності експлуатації та більш ефективного технічного обслуговування через специфічні умови її роботи [1].

Основним і переважним аспектом при експлуатації видобувних комбайнів є їх електроприводи, які і дозволяють працювати машинам, проте вони повинні відповідати ряду вимог: простота конструкції, висока надійність, компактність, високий ККД використання, вибухобезпечним [2]. Однак з урахуванням важкості роботи видобувних комбайнів виникає необхідність здійснювати контроль за технічним станом електроприводу комбайнів, хоча на вугільних підприємствах існує система технічного обслуговування за планом виконання робіт, проте вона досить неефективна через те, що найчастіше за все виникають незаплановані аварійні ситуації, через які зупиняється технологічний процес видобутку вугілля та підприємство несе значні матеріальні, часові і економічні втрати. Тому виникає необхідність у розробці уніфікованого підходу до виконання технічного обслуговування за фактичним станом задля запобігання небажаних наслідків на шахтах.

В таких роботах, як [3-4], Рудаков В. В., Марієв П. Л. і Зирянов І. В. вирішують проблеми підвищення ефективності працездатності гірничотранспортних комплексів за умови зниження часу простоїв та оптимізації технологічного обслуговування, проте не розглядається питання об'єднання проведення діагностики і визначення залишкового ресурсу електромеханічного обладнання (далі – ЕМО). А в роботі Белліні А. [5] розглядається можливість проведення технічної діагностики стану електродвигунів (далі – ЕД) на основі спектрального аналізу живлячої

напруги і струму, проте створення єдиної бази даних пошкоджень та несправностей ЕД не передбачено.

Таким чином, з вище наведеного, формуємо **головну мету** дослідження, яка полягає в удосконаленні структури технічної діагностики шляхом переходу на технічне обслуговування за фактичним станом електромеханічної частини видобувного комбайну та задля підвищення його надійності і ефективності експлуатації.

З огляду на зазначену мету, сформовані основні завдання кваліфікаційної роботи:

1. проаналізувати існуючу структуру проведення системи планово-попереджувальних ремонтів на вугільних підприємствах;
2. виконати аналіз можливості зниження витрат на технічне обслуговування гірничого обладнання;
3. проаналізувати робочі параметри та можливі пошкодження електромеханічної частини видобувного комбайну;
4. розробити технічні рішення щодо удосконалення структури технічної діагностики електромеханічної частини видобувного комбайну.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВУГІЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Аналіз можливості зниження витрат на обслуговування гірничого обладнання за рахунок уніфікації структури планово-попереджувальних ремонтів

На даний час витрати на технічне обслуговування та проведення ремонту електромеханічного обладнання гірничих машин складають переважну статтю в структурі собівартості видобутку вугілля та можна спостерігати низько ефективну систему організації їх роботи та нераціональне застосування, що, в свою чергу, значно зменшує термін роботи гірничих машин. Ці аспекти приводять до виникнення таких небажаних наслідків, як незаплановані зупинки та простої технологічного процесу та значних збитків на підприємствах.

Задля забезпечення зниження витрат на технічне обслуговування обладнання необхідно застосувати уніфікований підхід до удосконалення існуючою структури планово-попереджувальних ремонтів через те, що саме електромеханічна частина гірничих машин потребує високу кількість кваліфікованих робітників, які зможуть виконати налаштування системи керування електроприводом, здійснити технічне обслуговування обладнання, відстежити і попередити пошкодження та виконати їх ремонт.

Застосування уніфікованого підходу необхідно розглядати саме для структури та алгоритмів керування електроприводами видобувних комбайнів і, як наслідок, частково зменшить проблему висококваліфікованих кадрів на шахті, так як зменшиться номенклатура ЕМО, що обслуговується, та забезпечить однаковість його налаштування. Застосування уніфікованої

системи керування електроприводом за умови прямого керування моментом досить ефективно підходить до видобувних комбайнів, тобто, у разі подібності параметрів електродвигунів, є можливість застосування одного певного типу інвертору та принципу формування живлячої напруги, так як склад електромеханічного обладнання відносно є однаковим, то саме навчальний процес персоналу зменшиться.

За останній час підвищилося використання електроприводів (далі – ЕП) на видобувних комбайнах, так як їх застосування дозволяє знизити витрати на обслуговування та експлуатацію, проте питання кваліфікованого обслуговування потребує вирішення через те, що моделі ЕП та їх складові частини, а також структура часто змінюються. У цьому випадку, логічним буде вирішення питання уніфікації видів ЕМО видобувних комбайнів різного типу за умови подібності їх режимів та умов роботи.

Уніфікація – це раціональне зменшення видів, певних типів та розмірів виробів до однотипного функціонального призначення [7]. А уніфікований виріб – це виріб, що створений на основі декілька раніш існуючих різних його виконань шляхом перетворення в єдине виконання, що дозволить замінити будь-яке з них [8].

Оцінка ступеню уніфікації забезпечується ступенем насичення нового виробу елементами інших виробів, які є у виробництві. Його високий рівень дозволяє зменшити терміни проектування та виготовлення виробів, збільшення рівня продуктивності праці та гнучкість і мобільність виробництва за умови переходу на новий вид продукції та збільшення рівню надійності, якості та довговічності виробів. Сама ж уніфікація зменшить вартість виробництва та збільшить рівень автоматизації технологічних процесі.

Щодо об'єктів уніфікації, то до них можуть відносити модулі і блоки комплектних приладів, технологічні процеси підприємства, інформаційні системи, технічні вимоги і тому подібне. Їх уніфікація здійснюється за

допомогою певної функціональної схожості, що повинна завершуватися стандартизацією.

Щодо видобувних комбайнів, то уніфікація їх електромеханічного складу дасть змогу спростити технічне обслуговування, збільшити надійність і ефективність експлуатації та зменшити вартість при їх виробництві. Розглядати уніфікацію, в даному випадку, необхідно з огляду на структуру і алгоритми керування електроприводом за умови схожості параметрів, причому, якщо зіставити певні параметри видобувних комбайнів, що застосовуються на гірничих підприємствах, то чим ближче вони за потужністю, тим їх продуктивність майже подібна.

З огляду на це, існує значний резерв для зниження витрат задля створення та обґрунтування і реалізації саме уніфікованого підходу до технічної діагностики електрообладнання задля збільшення надійності і ефективності експлуатації видобувних комбайнів.

1.2 Визначення оптимальної структури технічної діагностики та визначення залишкового ресурсу електромеханічного обладнання

Ресурс – це напрацювання від моменту введення в експлуатацію електромеханічного обладнання до моменту його списання [9]. Справний стан будь-якого обладнання визначається відповідно до наступних факторів [10]:

- неможливість підтримки безпеки;
- неможливість підтримки безвідмовності роботи;
- неможливість ефективного використання електромеханічного обладнання на необхідному рівні;
- знос ЕМО;
- старіння обладнання.

Всі ці фактори обумовлюються необхідністю значних витрат підприємства на ремонт або необхідним рівнем відновлення працездатності, також необхідно враховувати, що термін експлуатації є важливим показником довговічності, що відповідає надійності електромеханічного обладнання.

З вище написаного видно, що ресурс та термін експлуатації – це різні показники, проте вони характеризують довговічність.

Термін експлуатації, як вторинний показник, визначається наступним чином [9]:

$$n_{\text{ЕМО}} = \frac{R_{\text{норм}}}{R_{\text{серед.річ.}}}, \quad (1.1)$$

Де $R_{\text{норм}}$ – відповідає нормативному 90% ресурсу, м. год.;

$R_{\text{серед.річ.}}$ – показник, що відповідає середньорічному напрацюванню ЕМО, м. год. [9].

Термін експлуатації, як показник довговічності, необхідний для майбутнього планування електромеханічного обладнання гірничих машин. Тоді, як ресурс буде розглядатися як запас можливого напрацювання у ймовірнісному виді. Як правило, граничний технічний стан гірничого обладнання відповідає стану його складових частин та економічної доцільності їх відновлення в необхідних умовах роботи.

Експлуатаційний ресурс – це ресурс, який представляє собою характеристику обладнання, яке експлуатується, та визначається фактичним режимом його навантаження [9]. В процесі експлуатації гірничого обладнання значну увагу приділяють саме процесу зносу його основних частин, тому вивчення залежностей цього процесу та визначення закономірності надійної роботи ЕМО від зносу його частин, що визначають необхідний ресурс, є досить важливим і актуальним питанням.

На вугледобувних підприємствах на даний час використовується система планово-попереджувальних ремонтів (далі – СППР) та технічного обслуговування за напрацюванням певної кількості годин є низько ефективною через те, що ремонтні роботи здійснюються за планом технічного обслуговування або шляхом визначення напрацювання годин гірничим обладнанням і, як наслідок, виникає значний ризик появи нових пошкоджень в ЕМО. Проте, при застосуванні СППР на працюючому обладнанні виникають значні експлуатаційні і часові витрати. Також необхідно враховувати саму якість технічного обслуговування за системою планово-попереджувальних ремонтів, яка в даний момент знаходиться на низькому рівні [11]. На рис. 1.1 відображена спрощена СППР гірничого обладнання за умови появи досить значних пошкоджень та несправностей.

З рис. 1.1 можна побачити, що при проведенні планово-попереджувальних ремонтів за планом з'являється зупинка технологічних процесів та виникають часові втрати саме при замовленні запчастин і їх очікуванні у випадку, коли немає на складі. Так як технічне обслуговування потребує значного часу та при виявленні більш важких пошкоджень гірничого обладнання необхідно зупиняти на значний термін, це обумовлює значні часові витрати, а, як наслідок, зниження видобутку вугілля та економічні втрати. Причому така ж ситуація складається і у випадку аварійних ситуацій. Саме це і дозволяє нам стверджувати про необхідність створення більш надійної і ефективної системи, яка буде здійснювати технічне обслуговування за фактичним станом шляхом безперервної автоматичної диспетчеризації та технічної діагностики за електричними параметрами, які досить легко вимірюються, електромеханічного обладнання гірничих машин, тим сам дозволить забезпечити оптимізацію матеріально-технічних витрат та значно знизити витрати, що виникають плановими та в неплановими зупинками технологічних процесів і, як наслідок, виконання ремонтів. Окрім цього, система безперебійного контролю дозволить попередити виникнення аварій на підприємстві, що є причиною довгострокових ремонтів гірничого

обладнання або його повний вихід з ладу, не кажучи ще й про небезпеку, яка виникає внаслідок більш серйозних аварійних ситуацій. Сутність алгоритму виконання безперебійного контролю показників та здійснення технічної діагностики електромеханічного обладнання гірничих машин і визначення їх залишкового ресурсу наведено на рис. 1.2 у спрощеній формі [12].

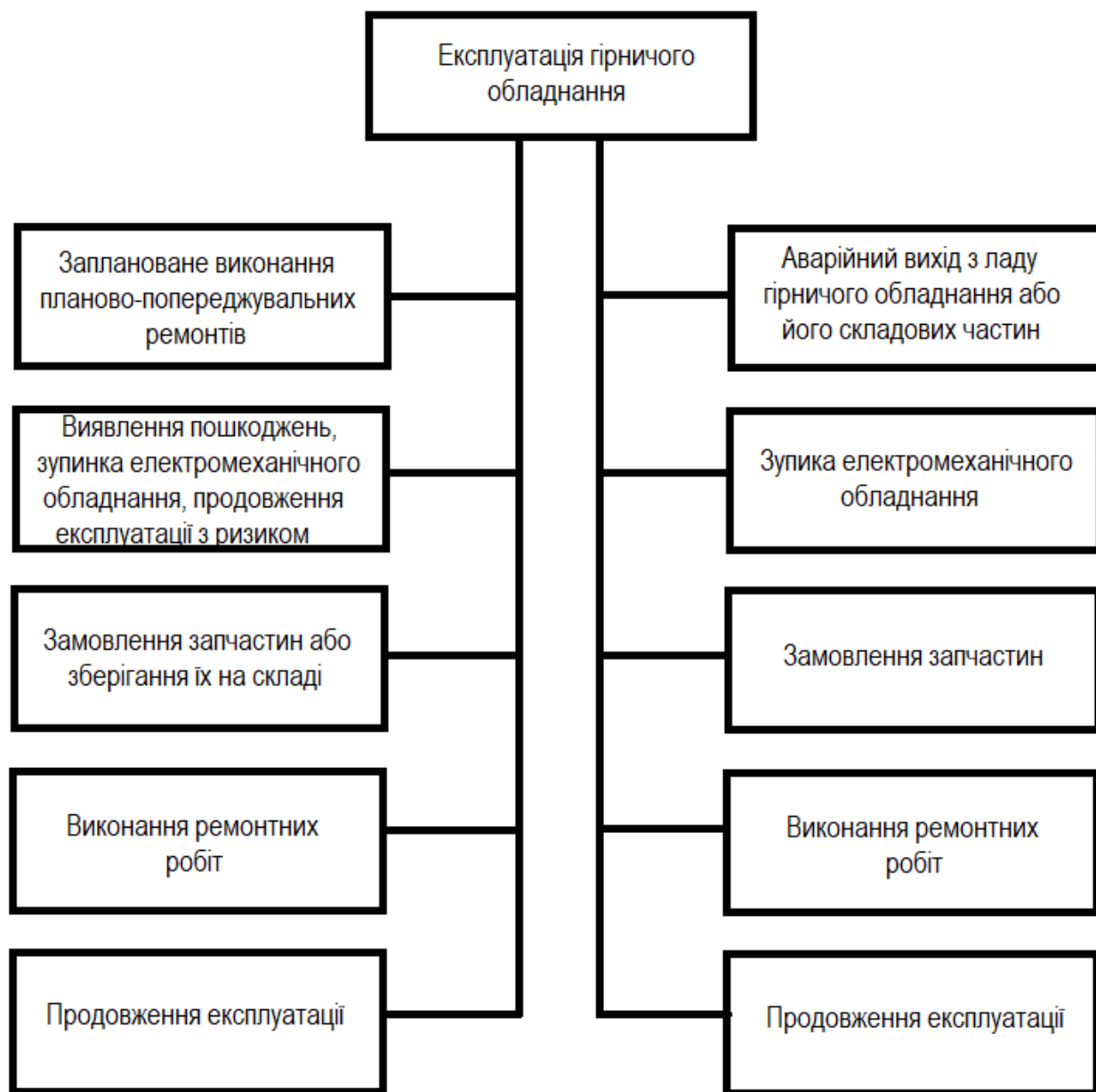


Рисунок 1.1 – Спрощена структура здійснення планово-попереджувальних ремонтів гірничого обладнання

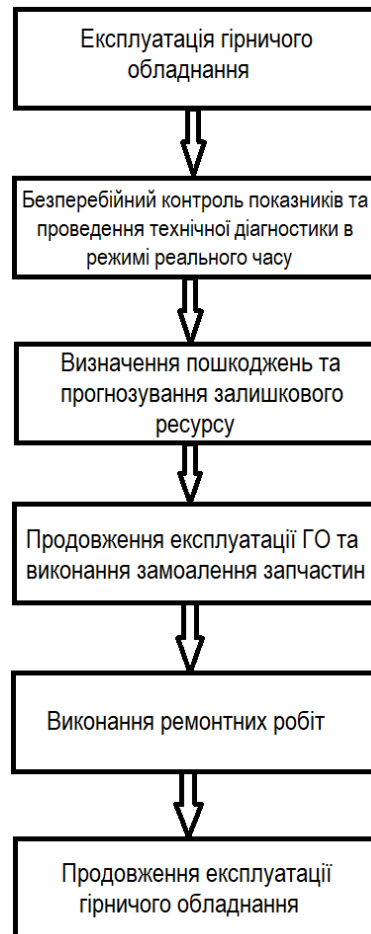


Рисунок 1.2 – Спрощена форма алгоритму виконання безперебійного контролю показників та здійснення технічної діагностики електромеханічного обладнання гірничих машин і визначення їх залишкового ресурсу

Реалізація даної форми здійснюється шляхом розробки алгоритмів технічної діагностики ЕМО, безперервної диспетчеризації експлуатації гірничого обладнання та застосування сучасних засобів вимірів показників та зчитування інформації¹, які дозволять враховувати поточний технічний стан об'єктів діагностування.

Проведення оцінювання технічного стану ГО повинно здійснюватися із застосуванням багатofакторного аналізу, що складається з визначення залежностей напруги і струму, що споживаються електроприводом, від часових показників; миттєвих потужностей в кожній фазі електродвигуна; проведення спектрального аналізу отриманих сигналів потужності, напруги і

струму; коефіцієнтів несиметрії та гармонік; потужності ЕД, що віддається; отримання вхідних координат та визначення втрат електроенергії. Також виникає необхідність врахування умов експлуатації, за умови яких виконані виміри.

Технічна діагностика забезпечується застосуванням методів безперервної диспетчеризації та надання інформації щодо діагностичних показників від засобів проведення вимірів та аналізаторів якості електричної енергії живлення електроприводу гірничих машин в базу даних. Всі існуючі закономірності виникнення пошкоджень та несправностей електромеханічного обладнання є індивідуальними, а виявлення залежностей несправностей від спектрального складу напруги, струму і потужності досягається за умови проведення аналізу подібних пошкоджень на схожому ЕМО, причому зберігання отриманих даних здійснюється саме в загальній базі. Отриманий спосіб можливо застосовувати також для отримання даних за станом системи керування електроприводом, тобто за спектрами струмів і напруги зможемо визначити точність відкривання ключів інвертору та виявити вихід їх з ладу.

Задля більш ефективного та об'єктивного визначення технічного стану гірничого обладнання складають певну базу даних щодо дефектів, несправностей та можливих пошкоджень, яка і дозволяє здійснювати його оцінювання. Ця база може бути зформована за допомогою нечіткої логіки та при виникненні перших ознак певного виду пошкоджень буде формувати і видавати звіт за технічним станом гірничого обладнання та його залишкового ресурсу шляхом виконання зіставлення еталонних показників з отриманими. Причому при введенні в експлуатацію на шахті зовсім нового електромеханічного обладнання, то здійснюється виміри його параметрів, потім отримана інформація вважаються еталоном для цього виду обладнання, а при експлуатації здійснюється відстеження всіх показників напруги, струму і потужності та гармонійного складу напруги. Тоді при виникненні несправностей і дефектів здійснюється проведення аналізу отриманої

інформації від засобів виміру та виконується відстеження тренду розвитку пошкоджень за часовою функцією. Самі ж тренди представлені у вигляді термів-множин відповідних діагностичних даних та на їх основі видається висновок про наявність несправностей. Процес обробки інформації представляє собою сукупність отриманих сигналів щодо появи пошкодження, які порівнюються з еталоном та подається висновок щодо наявності відхилень від нормативних значень. Отриманий звіт містить відомості про наявність пошкодження і їх тренди розвитку, що, в свою чергу, об'єднуються у звіт з експлуатації гірничого обладнання та тільки після певної обробки вносяться до загальної бази знань за даним типом ЕМО, яка складається з n -правил у ієрархічному вигляді.

З урахуванням цього можна бути виявити несправності на ранній стадії його розвитку та попередити складні пошкодження і, згідно чого, здійснити замовлення необхідних запчастин, що досить немало для вугледобувних підприємств.

Ефективність роботи такої системи визначається шляхом порівняння декількох варіантів роботи. До основних показників необхідності розробки системи технічної діагностики на основі безперервного контролю діагностичних ознак є: по-перше, прогнозування зменшення ризику відмови гірничого обладнання; по-друге, зниження собівартості вугілля за рахунок зменшення економічних витрат на технічне обслуговування. На рис. 1.3 наведена інформація щодо питомих експлуатаційних витрат за такими галузями, як енергетика та транспорт, за умови здійснення різних моделей технічного обслуговування електромеханічного обладнання [13].

З гістограми можна побачити, що виконання технічного обладнання за фактичним станом ЕМО більш ефективне і вигідне, проте тільки за умови необхідного рівня безпеки обладнання.

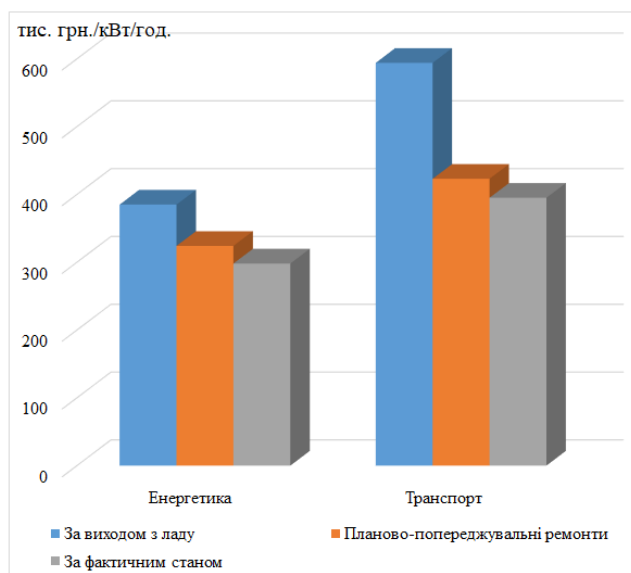


Рисунок 1.3 – Інформація питомих експлуатаційних витрат за такими галузями, як енергетика та транспорт, за різними видами технічного обслуговування електромеханічного обладнання

Таким чином, з цього видно, що така структура технічного обслуговування за фактичним станом із застосуванням безперервного контролю показників і технічного діагностування гірничого обладнання є досить доцільно.

2. АНАЛІЗ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МОЖЛИВИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВУГЛЕДОБУВНИХ КОМБАЙНІВ

Зараз проектують системи електроприводів видобувних комбайнів різного виконання, типу перетворювачів, типу електродвигунів, роду споживає мого струму, а це, в свою чергу, обумовлює необхідність використання різноманітних підходів до налаштування та технічного обслуговування гірничого обладнання і, як наслідок, збільшуються матеріальні, часові та економічні витрати на вугільному підприємстві. Тому виникає необхідність спочатку виконати дослідження параметрів роботи електроприводу.

2.1 Побудова комп'ютерної моделі електроприводу видобувного комбайну

Розробка моделі виконувалася із використанням сучасної прикладної програми MatLab/Simulink [14], де в схемі включено живлення від джерела постійного струму (рис. 2.1).

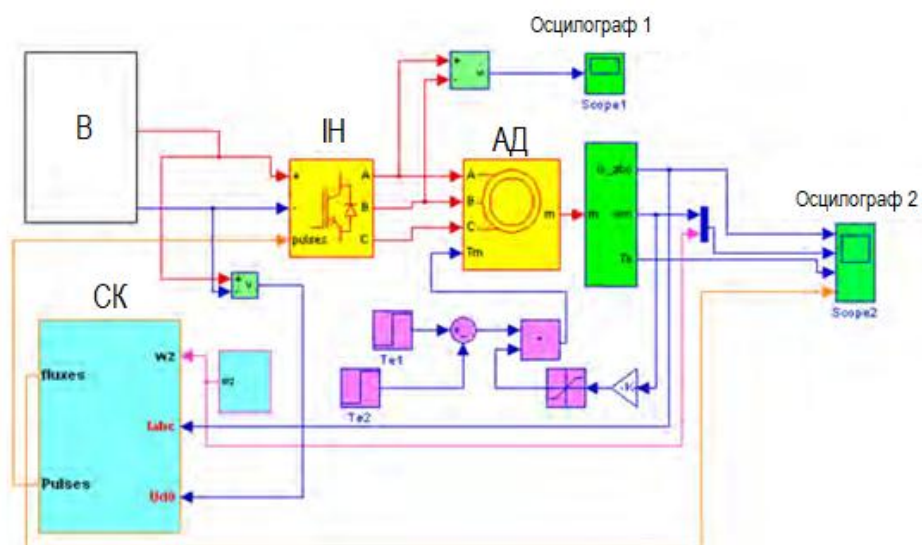


Рисунок 2.1 – Комп'ютерна модель електроприводу

Позначення на схемі: В – випрямляч напруги, ІН – інвертор напруги, АД – асинхронний двигун, СК – система керування електроприводом.

При виконанні опису заданого для моделювання електродвигуну виконано деякі допущення:

1. обмотки фаз електродвигуна мають зсув на 120° ;
2. величина повітряного зазору є постійною;
3. виконано заміну існуючої розподіленої обмотки на еквівалентну, яка має таку ж магнітнорухожучу силу;
4. обладнання містить симетричний ротор;
5. враховано, що магнітні поля та магнітнорухожучі сили розподіляються навколо повітряного зазору за синусоїдальним законом.

Асинхронний електродвигун описується у вигляді математичної моделі у вигляді системи рівнянь [15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{s1} = \frac{d\psi_{s1}}{dt} - \psi_{s2} \cdot \omega_k + R_s \cdot I_{s1} \\ U_{s2} = \frac{d\psi_{s2}}{dt} - \psi_{s1} \cdot \omega_k + R_s \cdot I_{s2} \\ 0 = \frac{d\psi_{r1}}{dt} - (\omega_k - p \cdot \omega) \cdot \psi_{r2} + R_r \cdot I_{r1} \\ 0 = \frac{d\psi_{r2}}{dt} - (\omega_k - p \cdot \omega) \cdot \psi_{r1} + R_r \cdot I_{r1} \\ M_d = \frac{m \cdot p}{2} \cdot |\psi_s \times I_s|, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

На рис. 2.2 наведена комп'ютерна модель системи керування, яка містить регулятор швидкості ПІ-типу з коефіцієнтами $k_p=2000$ та $k_i=10000$, блок обчислення координат та блок реалізації [14]. Також встановлено ширину регулятора потоку в межах $\pm 0,02$ та регулятора моменту ± 30 . Сама ж S-функція формує вибір вектору напруги шляхом комбінації сигналів релейних регуляторів, а потім з масиву отримується певне число, яке

відповідає необхідному положенню ключів. На рис. 2.3 представлено текстовий опис S-функції.

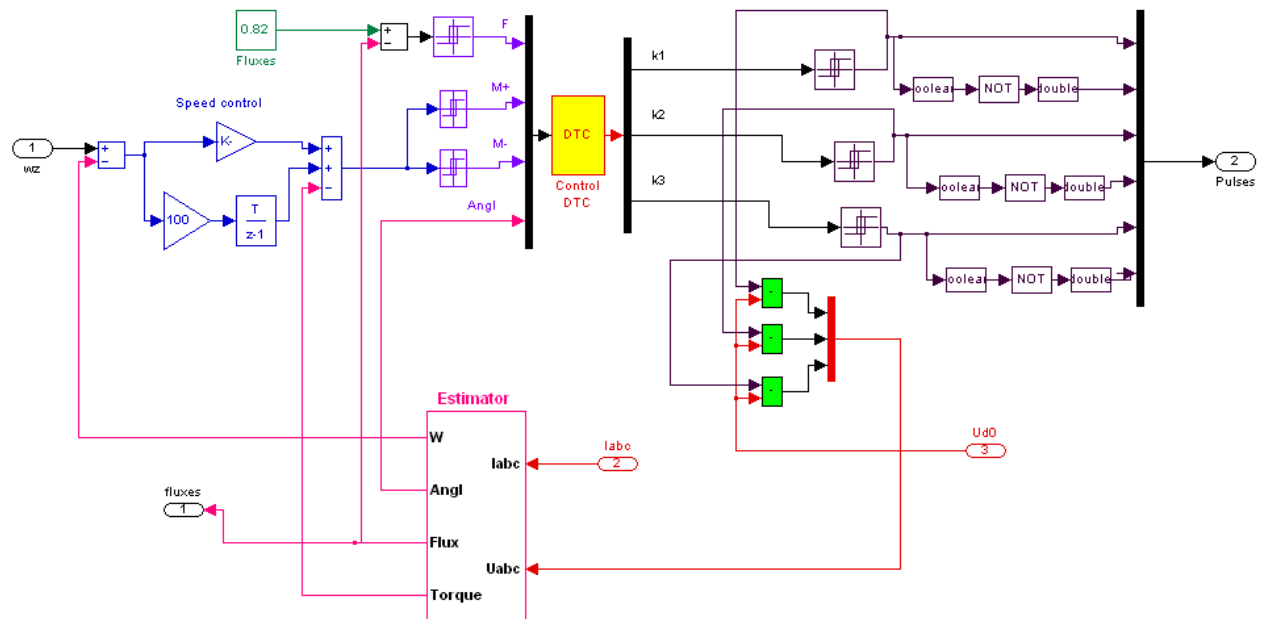


Рисунок 2.2 – Комп'ютерна модель системи керування

```
static int_T ast[6][6]={6,2,3,1,5,4, 0,7,0,7,0,7, 5,4,6,2,3,1, 2,3,1,5,4,6, 7,0,7,0,7,0, 1,5,4,6,2,3};
//таблиця перемикань
static real_T pi=3.141592653;
real_T R; int_T icl, ivr1, ivul, isk; //обчислення сектору кута
R=U(3); //кут
if (R<=pi/6&&R>pi/6) icl=0;
if (R<=pi/2&&R>pi/6) icl=1;
if (R<=5*pi/6&&R>pi/2) icl=2;
if (R<=-5*pi/6||R>5*pi/6) icl=3;
if (R<=-pi/2&&R>-5*pi/6) icl=4;
if (R<=-pi/6&&R>-pi/2) icl=5; //комбінація вхідних сигналів
if(U(0)==1) ivul=0; //потік
else ivul=3; //потік
if(U(1)==1) ivr1=0; //момент
if(U(1)==0&&U(2)==0) ivr1=1;
if(U(2)==1) ivr1=2;
isk=ast[ivul+ivr1][icl]; //вибір елемента таблиці
//увімкнений ключ
y[0]=(isk & 0x0004)/4;
y[1]=(isk & 0x0002)/2;
y[2]=isk & 0x0001;
```

Рисунок 2.3 – Текстовий опис S-функції

Наступний блок системи керування – це блок обчислення координат неповного порядку, які визначаються за виконаними вимірами струму електродвигуну та вектором напруги. У блоці також визначаються проекції на нерухомі вісі вектору потокозчеплення обмотки статора ЕД з його модулем, обмотки ротора та його швидкість оберту, а також швидкість обертання валу ЕД та кутове положення вектору потокозчеплення ротору і електромагнітний момент. В існуючих схемах блоку реалізації сектора можуть визначатися за умови отримання кутового положення вектору потокозчеплення статора, причому в них не враховується кутового положення вектору потокозчеплення ротору, однак вони призводять до збільшеної пульсації моментів в секторах, проте ця реалізація показала, що ефективніше сектора визначати саме за ними [16].

Дана система забезпечує швидкодіюче і пряме керування обертаючим моментом та підтримку відповідного рівня потокозчеплення статора асинхронного електродвигуна (далі – АД), причому в обов'язковому порядку повинна містити блок обчислення координат електроприводу. При цьому виконується безпосереднє обчислення вектору напруги на базі моменту та потокозчеплення без використання регуляторів, проте виникає необхідність в налаштуванні регулятора швидкості, яке залежить від певної частоти перемикання ключів інвертора [16].

Налаштування комп'ютерної моделі здійснювалося за технічними характеристиками електродвигуна видобувного комбайну РКУ-13 (табл. 2.1). Таблиця 2.1 – Технічна характеристика електродвигуна ЕКВЕ4-200 видобувного комбайну РКУ-13 [6, 17]

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	200
Номінальна напруга, В	660/1140
Струм статора, А	230/133
ККД, %	91

Продовження таблиці 2.1 –

Параметр	Значення
$\cos \varphi$	0,84
Максимальний момент, Нм	3900
Пусковий момент, Нм	3000
Пусковий струм, А	1400/800

2.2 Дослідження розробленої комп'ютерної моделі ЕП

В процесі дослідження даної моделі були отримані діаграми роботи електроприводів з АД гірничого комбайну в динамічних режимах роботи ЕП.

Моделювання режимів роботи електроприводу видобувного комбайну виконувався у врахуванням режиму з перевантаженням тягових електродвигунів[18]:

$$M = 2,5 \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.2)$$

де $M_{\text{ном}}$ – номінальний момент електродвигуна ЕКВЕ4-200, Нм [18]:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, \quad (2.3)$$

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність ЕКВЕ4-200, кВт [17];

$n_{\text{ном}}$ – кількість обертань за хвилину.

На отриманій діаграмі, що наведена на рис. 2.4, зображено виникнення максимального перевантаження в момент початку роботи, а потім здійснюється зменшення моменту до значення [18]:

$$M = 1,8 \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.4)$$

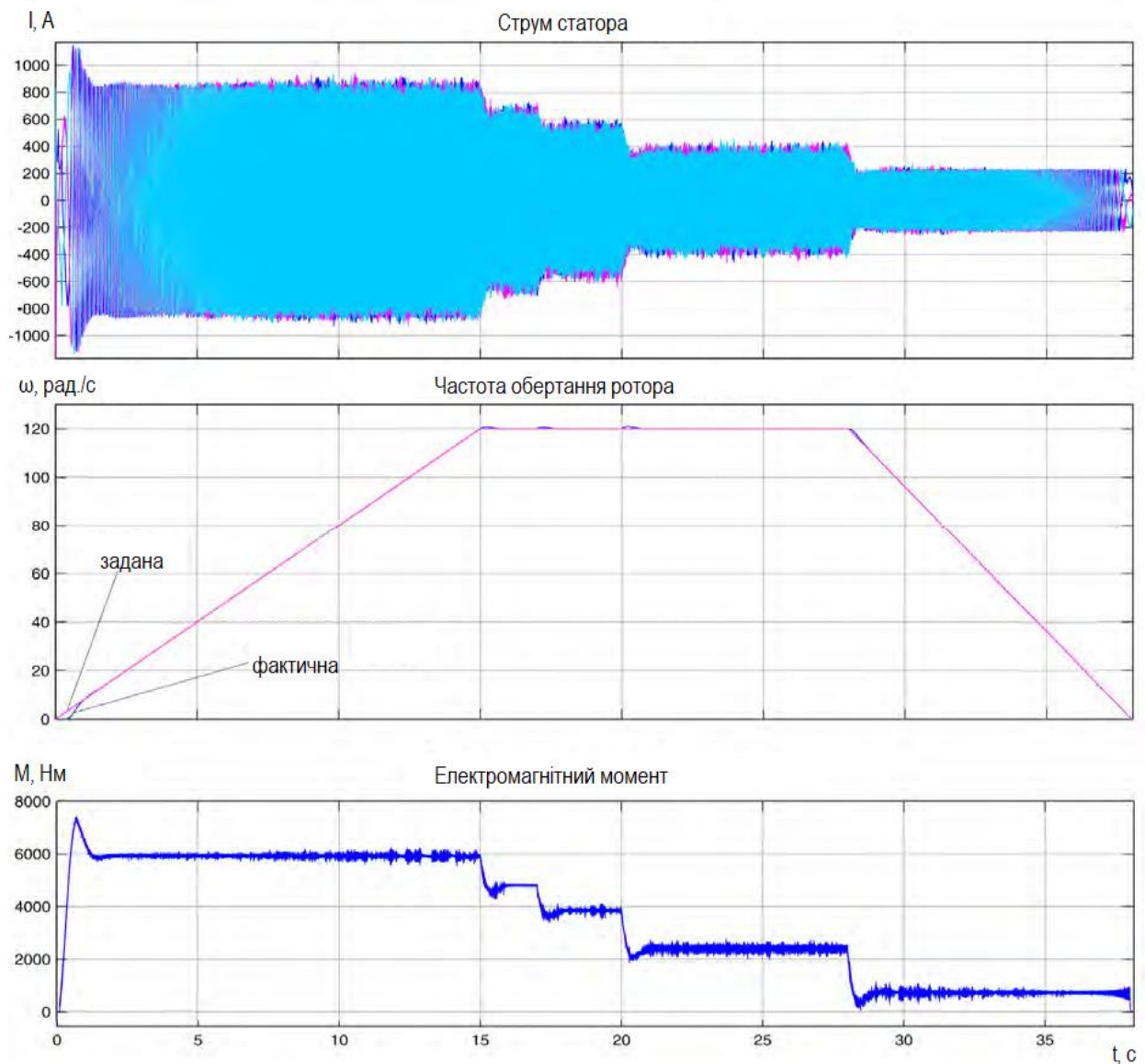


Рисунок 2.4 – Результати виконання дослідження за моделлю на рис.2.1

Після зміни частоти обертання двигуна до номінального значення (рис. 2.5) здійснюється зменшення моменту опору до наступного значення [18]:

$$M = 1,5 \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.5)$$

а також зниженням живлячого дійсного струму до [18]:

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.6)$$

де I_m – максимальний показник струму ЕД.

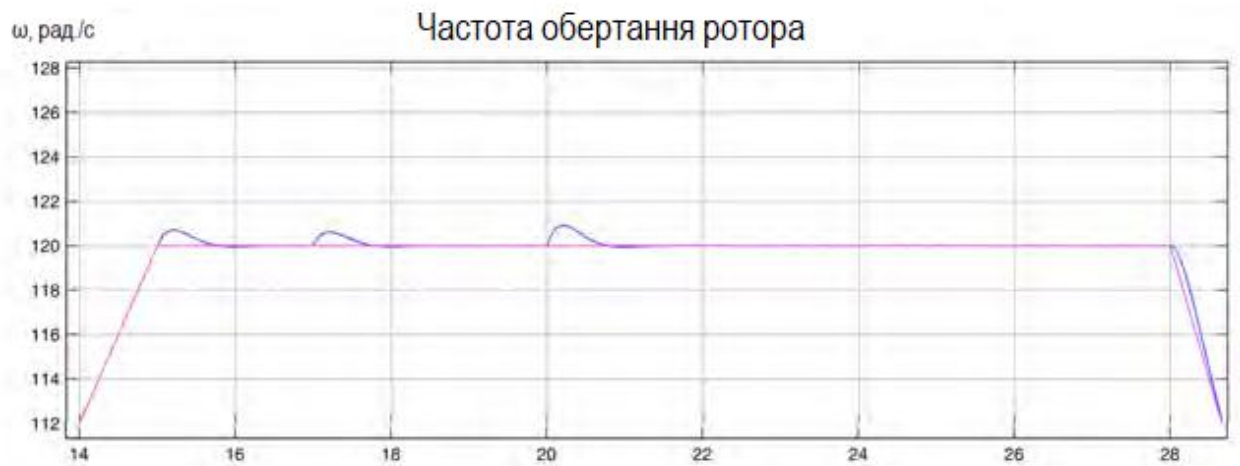


Рисунок 2.5 – Частота обертання валу електродвигуна гірничого комбайну

Наступна зміна моменту електродвигуна здійснюється відповідно виразів (2.7) та (2.8):

$$M = 1,1 \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.7)$$

$$M = 0,5 \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.8)$$

а вже потім здійснюється плавне гальмування з майже нульовим електромагнітним моментом. Відхилення еталонних даних з даними при моделюванні знаходилося в межах $\pm 5\%$, причому струми фаз, значення швидкості обертання та електромагнітного моменту практично відповідають реальним показникам електродвигуна.

2.3 Аналіз пошкоджень електродвигунів видобувних комбайнів

До основних пошкоджень ЕД відносять наступні, що відображені на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Ймовірні пошкодження ЕД

3. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНУ

Система планово-попереджувальних ремонтів, яка використовується на шахтах, є малоефективною в наслідок значної кількості зупинок гірничого обладнання, які призводять до економічних збитків, а також його технічне обслуговування буває не на відповідному рівні, що спричиняє появу різноманітних неврахованих пошкоджень [11].

Існуючи недоліки такої СППР вимагають виконувати модернізацію процесу технічного обслуговування, тобто повний перехід на обслуговування за фактичним станом та періодичною діагностикою гірничого обладнання на наявність пошкоджень і визначення його залишкового ресурсу. Нова система технічного обслуговування зображена на рис. 3.1.

Виконання робіт за такою системою передбачає безперервний контроль діагностичних параметрів обладнання та періодичну оцінку пошкоджень, що розвиваються протягом певного періоду. Система технічної діагностики здійснює автоматичний контроль обмеженого ряду параметрів в режимі реального часу, а інші показники вручну контролюються шляхом експертного оцінювання несправностей, тим самим досягаючи цілісності отриманої інформації та підвищується швидкість її обробки і об'єктивність визначення поточного технічного стану гірничого обладнання.

Після введення в експлуатацію обладнання здійснюється оцінка початкових параметрів, що зводяться до бази даних і вважаються еталоном при виконанні діагностики. Наступна оцінка технічного стану вже при експлуатації здійснюється в автоматичному режимі та виконується порівняльний аналіз отриманої інформації з еталоном, а вже за його результатами проводиться оцінка технічного стану гірничого обладнання та

формується звіт з рекомендаціями щодо подальшої роботи або проведення поточного або капітального ремонту.

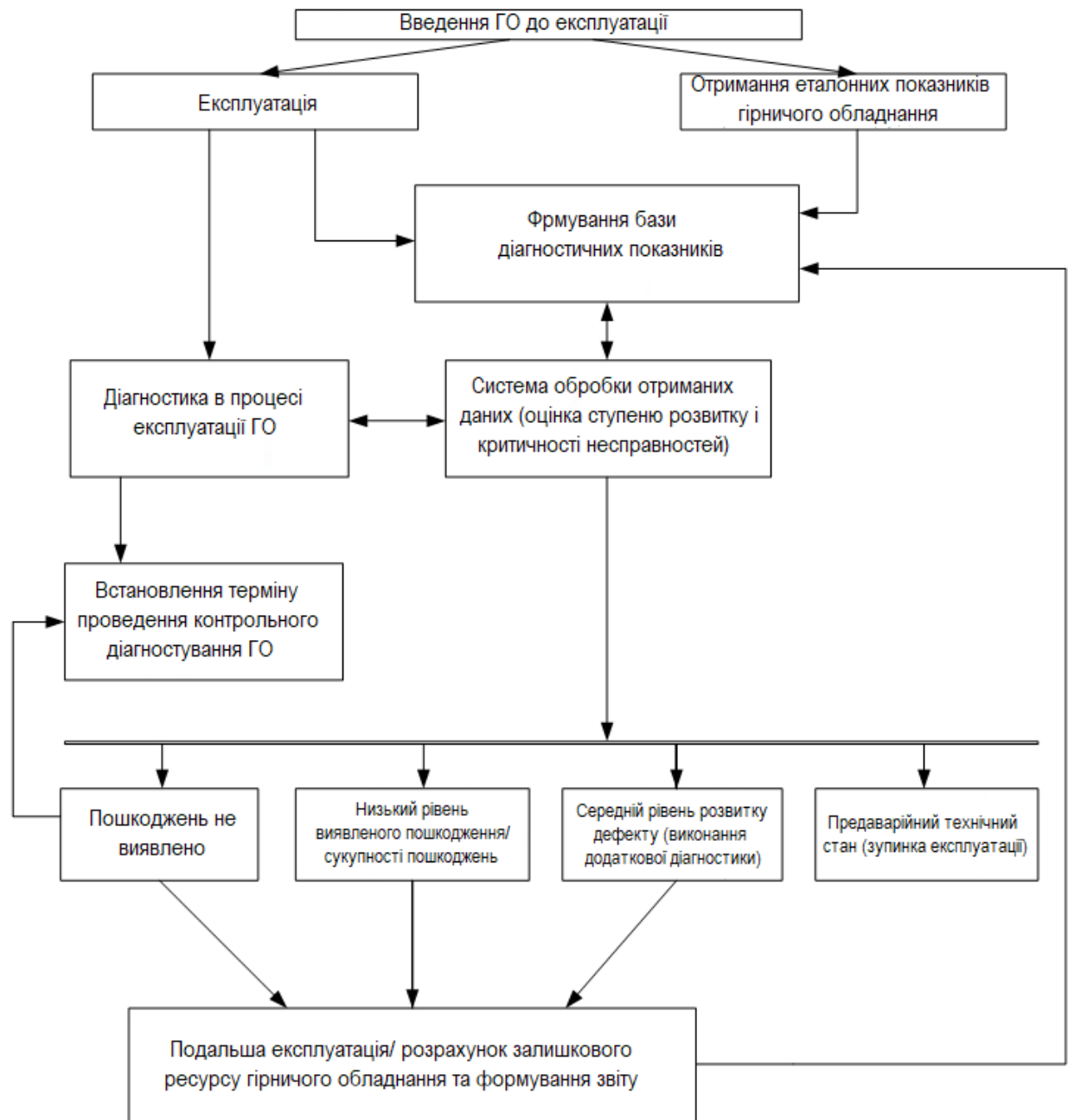


Рисунок 3.1 – Структура системи технічного обслуговування гірничого обладнання за фактичним станом

Виконання ремонтів за фактичним технічним станом дозволить оптимізувати витрати на вугільному підприємстві та знизити матеріальні і часові втрати.

3.1 Обґрунтування вибору підходу до розробки системи моніторингу, технічної діагностики та визначення залишкового ресурсу електромеханічної частина вугледобувного комбайну

Технічна діагностика (далі – ТД) – це галузь знань, яка ґрунтується на теорії, методах та засобах визначення поточного технічного стану об'єктів контролю [19].

Витрати на проведення ремонтів та техобслуговування гірничого обладнання становлять значну частку загальних витрат на вугільних підприємствах, однак зі зростом напрацювання ресурсу ці витрати поступово збільшуються. З огляду на це, питання оцінювання поточного стану та визначення залишкового ресурсу і своєчасного діагностування аварійних і перед аварійних ситуацій є досить важливими. Складність виконання технічної діагностики залежить від великої кількості обладнання, що застосовується, його специфікою виконання та режимами роботи [9, 10].

Метою виконання ТД гірничого обладнання полягає у визначенні його поточного технічного стану та оцінки залишкового ресурсу, що дозволить збільшити надійність і ефективність роботи ГО та збільшити його ресурс експлуатації. Збільшення надійності досягається шляхом виявлення заздалегідь пошкодження та дефектів, що, в свою чергу, дозволить їх усунути під час техобслуговування та виключити аварійні відмови під час експлуатації. Підвищення ресурсу забезпечується шляхом переходу техобслуговуванню за станом. Так в науковій роботі [20] відображено даний перехід, який дозволив отримати 30% вигоду від вартості загального обладнання. Також необхідно сказати, що в даних системах ресурс буде визначатися за найбільш слабкими виробами та потребує певної кількості статистичної інформації за аналогічними системами.

Сучасний розвиток багатьох галузей промисловості передбачає перехід від техобслуговування за регламентом чи виходу з ладу ЕМО до його

проведення за фактичним станом, що значно зменшує експлуатаційні витрати [20]. Проте виконання такого переходу до зовсім нових форм технічного обслуговування на вугільному підприємстві передбачає систему технічного діагностування з урахуванням об'єктивної оцінки поточного технічного стану та прогнозування його майбутньої зміни.

Система такої діагностики повинна містити наступні елементи, що наведені на рис. 3.2.

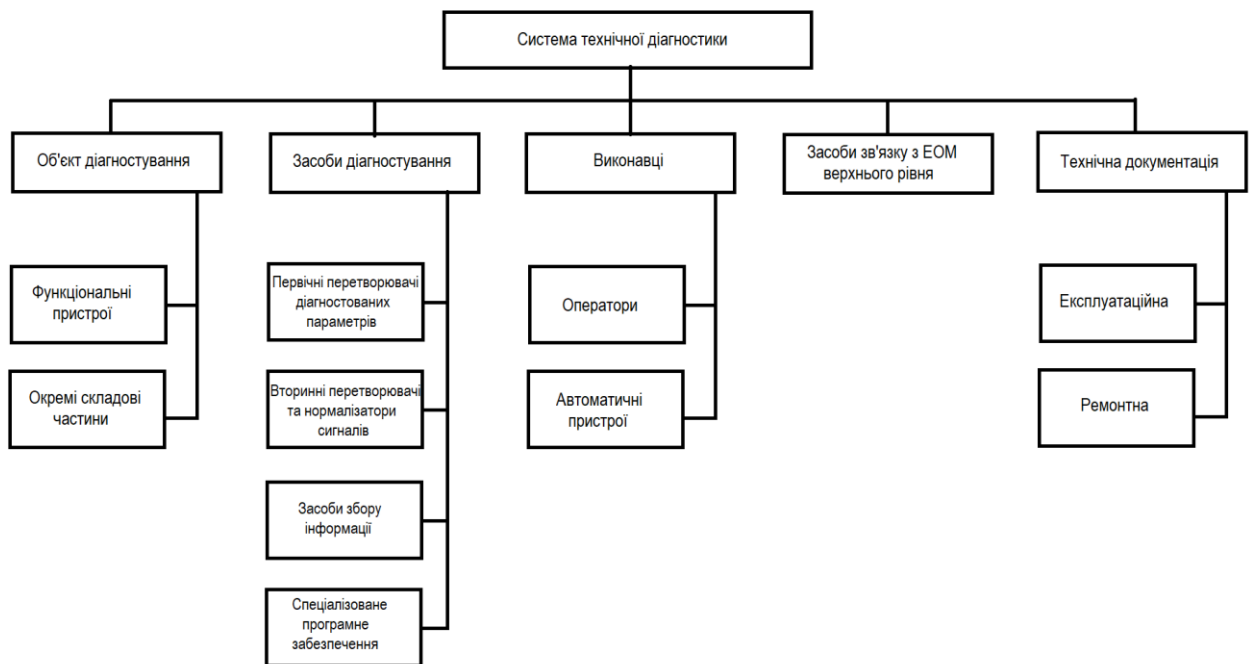


Рисунок 3.2 – Складові частини системи технічної діагностики

Головним завданням виконання діагностичних процесів є розпізнавання стану технічної системи в умовах незначної інформації. Розпізнавання характеризується віднесенням певного стану системи до одного з декількох класів, тобто діагнозів, шляхом виконання аналізу сукупності діагностичних ознак k , причому обробка даних повинна здійснюватися за допомогою експертних систем ЕОМ.

Технічний стан видобувного комбайну в процесі виконання діагностики обумовлюється комплексом ознак:

$$K = (k_1 + k_2 + \dots k_j, \dots k_v), \quad (3.1)$$

причому кожна частина системи відповідає деякої їх реалізації:

$$K^* = (k_1^* + k_2^* \dots k_j^*, \dots k_v^*), \quad (3.2)$$

Таким чином, загальний технічний стан візуалізується у вигляді v –вектору у просторі. Математичною основою статистичних методів діагностики вважається теорія статистичних рішень, причому перевагу надається саме байєсівському методу обробки даних [21].

В основу даного методу лежить досить простий вираз Байєса [21], відповідно до якого, у випадку діагнозу D_i з ознакою k_j обчислюється вірогідність їх сумісної появи відповідно до наступного:

$$P(D_i k_j) = P(D_i) \cdot P\left(\frac{k_j}{D_i}\right) = P(k_j) \cdot P\left(\frac{D_i}{k_j}\right), \quad (3.3)$$

Якщо система знаходиться в одному з технічних станів, що вказуються, а умова не забезпечується через можливість існування одночасно існуючих станів, то починають введення окремих діагнозів відповідно до окремого стану.

Для постановки діагнозу за допомогою визначення вірогідності байєсівським методом створюється діагностична матриця, яка містить діагностичні ознаки при всіх існуючих діагнозах:

$$D_i = \begin{pmatrix} P\left(\frac{k_{11}}{D_1}\right) & \dots & P\left(\frac{k_{NM}}{D_1}\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P\left(\frac{k_{11}}{D_i}\right) & \dots & P\left(\frac{k_{NM}}{D_i}\right) \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

Процес навчання системи технічної діагностики передбачає корегування виразу (3.4) під час експлуатації гірничого обладнання шляхом

проведення діагностичних операцій. Об'єктивність проведення діагностики залежить від статистичної вибірки за обладнанням відповідного типу та підвищується за результатами накопичення інформації. Проте даний метод має незначний недолік, а саме виникнення незначної похибки при появі досить рідких діагнозів. Тому використовується принцип правдоподібності за умови декількох ймовірних діагнозів при даному комплексі ознак [21]:

$$K^* \in D_i, \text{ якщо } P\left(\frac{k_j}{D_i}\right) > P\left(\frac{k_j}{D_i}\right), \quad (3.5)$$

Тоді у відповідності до умови (3.5) буде встановлений той діагноз, який має найбільшу вірогідність для даного комплексу діагностичних ознак. Проте необхідно враховувати виникнення під час прийняття рішення за діагнозом такі діагнози, як «хибна тривога» та «пропуск дефекту», що призведуть до відповідних наслідків, саме тому оцінку щодо прийняття рішення за діагностичним станом здійснюється з використанням теорії ризику. Однак цього методу існують методи статистичних розпізнавань і рішень, розподілених ознак, розпізнавання образів та інші види інтелектуальної діагностики.

Так як основна частина гірничого обладнання складаються електропривід, в тому числі і видобувних комбайнів, то загалом застосовують регульовані ЕП з різною потужністю, а для їх діагностики переважно використовують методи, що наведені на рис. 3.3.

В існуючих гірничо-геологічних умовах вугільних підприємств використання даних методів досить обмежено через неможливості повного доступу до об'єкту діагностики, тому найбільшу перевагу мають методи на основі вимірів їх енергетичних параметрів та без необхідності встановлення засобів зчитування сигналів на гірничому обладнанні. Дані методи забезпечує ефективність за умови, що існуючі пошкодження можуть приводити до виникнення електромагнітної несиметрії поля в зазорі ЕД та виникненню

спектрального складу струму і напруги [20, 26-27], а самі пошкодження призводять до значних змін енергетичних показників.

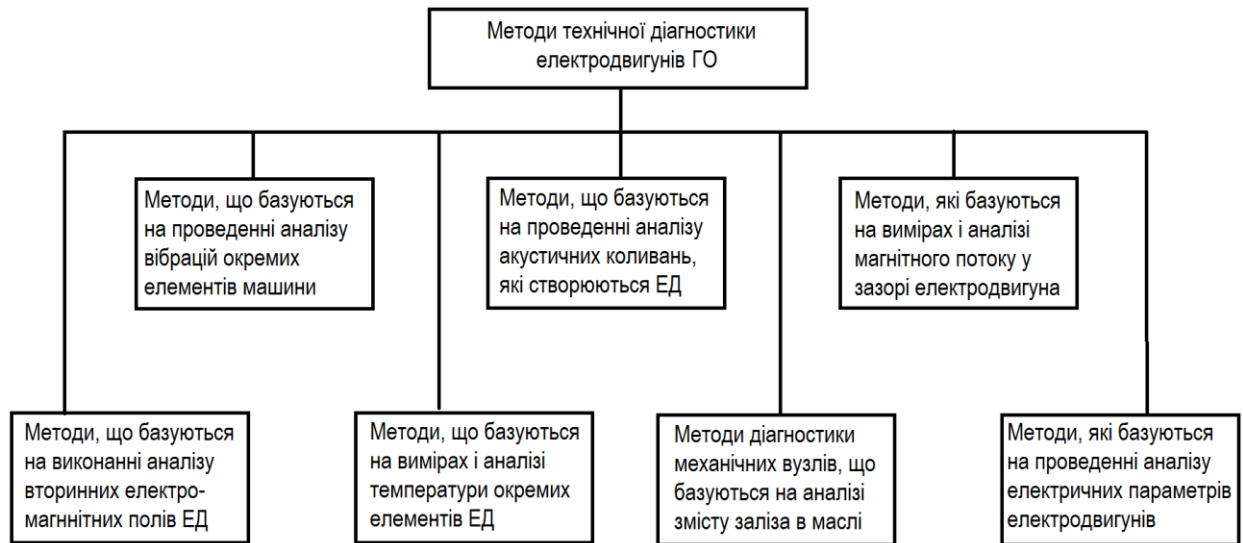


Рисунок 3.3 – Методи, що використовуються для проведення технічної діагностики ЕД [22-27]

Дані методи мають ряд недоліків:

1. в електромеханічному обладнанні передбачає інерційність;
2. вплив на спектральний склад струму і напруги несиметрії та сам склад живлячої мережі;
3. вплив на спектральний склад струму і напруги характер завантаження електродвигунів.

Через ці недоліки, саме безпосередня оцінка технічного стану вугледобувного комбайну повинна виконуватися шляхом виконання контролю рівня складових струмів і напруги за умови фіксації діапазону частот, тому створення нового методу діагностики необхідно розробляти за умови спостереження електричних сигналів та їх спектрів, причому є ймовірність об'єднання декількох методів, що дозволять доповнювати їх один одним.

3.2 Огляд існуючих методів технічної діагностики електродвигунів за електричними параметрами

3.2.1 Обґрунтування критеріїв діагностування несправностей електродвигунів за електричними параметрами

Одним з критеріїв для виконання оцінювання енергетичних процесів в роботі електродвигуна, що володіє нерівномірним полем у повітряному зазорі та, в наслідок чого, утворюється гармонічний склад струму і напруги, є коефіцієнт потужності [28]:

$$k_{\text{ЕД}} = \eta \cdot k_{\text{м}} \cdot k_{\text{с}}, \quad (3.6)$$

η – ККД електродвигуна вугледобувного комбайну;

$k_{\text{м}}$ – середньозважений коефіцієнт потужності;

$k_{\text{с}}$ – коефіцієнт врахування спотворень [28].

У випадку гармонійного сигналу ККД для електродвигуна гірничої машини визначається наступним чином:

$$\eta = \frac{P_2}{\sum_{k=1}^m \sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}, \quad (3.7)$$

P_2 – показник механічної потужності на валу ЕД, кВт;

m – параметр, що відповідає кількості фаз в електродвигуні ГО;

P_{nk} – показник відповідає потужності n –ї гармонійної складової k –ї фази ЕД, кВт [28].

Обчислення середньозваженого коефіцієнту потужності здійснюється за наступної формули [29]:

$$k_m = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}{\sum_{k=1}^m \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}}, \quad (3.8)$$

U_{nk}^2 – квадратне значення напруги n –ї гармонійної складової k –ї фази ЕД, В;

I_{nk}^2 – квадратне значення струму n –ї гармонійної складової k –ї фази ЕД, А [29].

Коефіцієнт врахування спотворень знаходиться з урахуванням того, що він характеризується наступним відношенням:

$$k_c = \frac{P_{20}}{P_{2 \text{ несим}}} = \frac{\eta_{\text{ном}} \cdot P_{2\text{ном}}}{\eta \cdot \sum_{k=1}^m \int_0^{\omega_{\text{max}}} P_k(\omega) d\omega}, \quad (3.9)$$

P_{20} – показник потужності поля основної гармонійної складової, Вт;

$P_{2 \text{ несим}}$ – загальна сума потужностей спотворень всіх гармонійних складових, Вт;

$P_{2\text{ном}}$ – показник номінальної потужності на валу електродвигуна;

$P_k(\omega)$ – миттєва складова потужності, що відповідає частоті ω ;

$\eta_{\text{ном}}$ – показник номінального ККД електродвигуна вугільного комбайну.

Необхідно сказати, що динамічний коефіцієнт потужності відповідає загальному стану електродвигуна гірничого комбайну за умови оцінки відношення спектру отриманого сигналу до потужності та впливу спотворень електричних показань, однак також необхідно враховувати те, що важливим аспектом є амплітудний спектр, а не фазовий [28], тим самим встановлення показників коефіцієнтів потужності і спотворень постійними.

Також, вирази (3.6-3.9) не враховують ряд ознак:

1. різноманітну природу появи гармонійних складових;
2. нелінійність залежностей електричних показників відповідно поточного технічного стану об'єкту контролю від спектру складових.

Наступним етапом за визначенням ККД електродвигуна гірничого комбайну є отримання інформації щодо частот, на яких здійснюються втрати, тим самим дозволить отримати інформацію за видом несправності. Саме для цього виникає необхідність у розподіленні спектру миттєвих потужностей на певні діапазони таким чином, щоб вони відповідали тільки для одного виду пошкоджень [30, 31].

Внаслідок чого, виконується визначення наступних критеріїв для кожного з діапазонів частот:

1. Середній квадратичний показник (СКП) миттєвого значення потужності в межах певного діапазону:

$$P_{\text{СКП}i} = \frac{1}{\Omega} \cdot \int_{\omega_i - \Delta\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega_i} P(\omega) d\omega, \quad (3.10)$$

$$\Omega = \int_{\omega_i - \Delta\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega_i} \omega d\omega, \quad (3.11)$$

2. Пік-фактор, що відповідає певному виду пошкодження та характеризує величину втрат в визначеному діапазоні:

$$P_{\text{Пік}i} = \frac{\max_{\omega \in (\omega_i - \Delta\omega_i; \omega_i + \Delta\omega_i)} [P(\omega)]}{\frac{1}{\Omega} \cdot \int_{\omega_i - \Delta\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega_i} P(\omega) d\omega}. \quad (3.12)$$

При наявності електромеханічних пошкоджень приводить до порушення електромагнітної симетрії, величина якої забезпечується коефіцієнтом несиметрії струмів у фазах електродвигуна і їх потужностей та потребує врахування несиметрії живлячої мережі ЕД.

Основні показники, за якими необхідно здійснювати моніторинг і технічну діагностику електродвигунів вугледобувного комбайну:

- коефіцієнт спотворення електричних показників;
- коефіцієнт несиметрії;
- та інші показники енергетичних процесів в ЕД очисного комбайну.

Всі ці показники повинні визначатися для потужності, струму і напруги, причому для електродвигунів переважну роль грають показники миттєвих струмів через те, що напруга у фазах забезпечується живлячою мережею.

3.2.2 Виконання діагностики несправностей ротору шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів

На даний час існує досить багато різних шляхів проведення діагностики пошкоджень ротору електродвигуна, до яких відносять наступні аналізи:

- спектрів струмів;
- осьового магнітного потоку ЕД;
- моменту двигуна;
- втрат електроенергії;
- годографа загального вектору струму;
- впливу низьких частот на живлячу мережу;
- вібраційних сигналів [13, 32].

За умови застосування одного з представлених методів проведення аналізу щодо виникнення несправностей в роторі необхідно аналізувати наступне:

1. Справний стан ротору відповідає наступним критеріям [13]:

- визначення частоти роторної магніторушійної сили або струму в роторі:

$$f_2 = s \cdot f_1, \quad (3.13)$$

- визначення частоти обертання ротору:

$$f_p = (1 - s) \cdot f_1, \quad (3.14)$$

2. Порушення симетрії ротору у спектрі виникнення частот, що викликані потоком в повітряному зазорі, яки має напрямок в зворотному напрямку від основної частоти [13]:

$$f_{\text{пср}} = (1 - 2s) \cdot f_1, \quad (3.15)$$

3. Виникнення несиметрії в роторі через появу вібрацій в ЕД [13]:

$$f_{\text{пнср1}} = (1 \mp 2ks) \cdot f_1, \quad (3.16)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$

$$f_{\text{пнср1}} = (n(1 - s) \pm s) \cdot f_1, \quad (3.17)$$

де $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ — номер гармоніки.

3.2.3 Виконання діагностики несиметрії повітряного зазору шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів

На даний момент існує декілька видів несиметрії повітряного зазору в електродвигунах [33]:

1. Статистичний ексцентриситет ротору відносно статора, де не співвісність ротору та статора відповідно викликано як дефектами при монтажі і виготовленні, так і пошкодженням підшипників і осередків ротора і статора під час роботи електродвигуна, причому повітряний зазор в роторі за умови його обертання залишається незмінним (рис. 3.4).

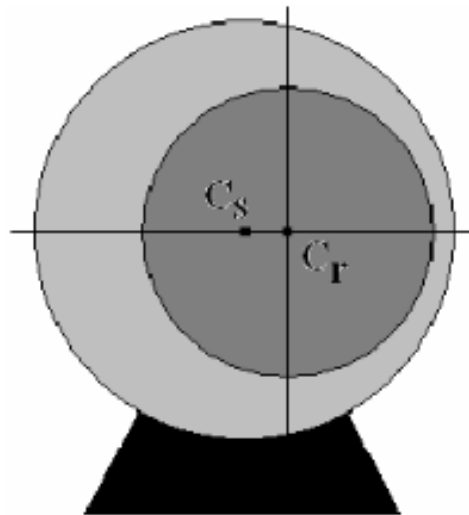


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення статистичного ексцентриситету

Статистичний ексцентриситет статора визначається шляхом отримання спектру струмів певних частот [13]:

$$f_{ce} = \left(k \cdot z_2 \cdot \frac{(1-s)}{p} \pm n \right) \cdot f_1, \quad (3.18)$$

Де z_2 – відповідна кількість стрижнів обмотки ротору;

$n = 1, 3, 5, 7, \dots$ – номер гармоніки;

$k = 1, 2, 3, \dots$

2. Динамічний ексцентриситет виникає за тих же причин як і статистичний, проте показник повітряного зазору за умови обертання ротору змінюється за функцією положення ротору (рис. 3.5).

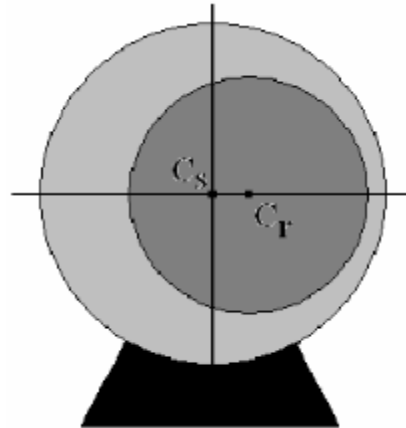


Рисунок 3.5 – Схематичне зображення динамічного ексцентриситету

Даний ексцентриситет визначається шляхом визначення наявності відповідних частот в спектрі [13]:

$$f_{ce} = \left((k \cdot z_2 \pm n_d) \cdot \frac{(1-s)}{p} \pm n \right) \cdot f_1, \quad (3.19)$$

де $n = 1, 3, 5, 7, \dots$; $n_d = 1, 2, 3$; $k = 1, 2, 3, \dots$

3. Змішаний ексцентриситет обумовлює об'єднання двох попередніх видів та визначається наступним чином [13]:

$$f_{зм.е} = (1 \pm k \cdot (1-s)) \cdot f_1, \quad (3.20)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$

3.2.4 Виконання діагностики несиметрії статора шляхом проведення аналізу спектру споживаємих струмів

В науковому джерелі [13] наведена статистична інформація, відповідно якої несправності та пошкодження статора ЕД вважаються вторинною причиною виходу з ладу асинхронного електродвигуна, проте першопричиною вважалися пошкодження підшипників, проте самою основною – несправність обмоток статора, причина якої пробій міжвиткової ізоляції.

Якщо порівнювати пошкодження через пробій міжвиткової ізоляції і пошкодження міжфазної ізоляції та при наявності безперебійного контролю опору ізоляції з міжвитковим замиканням, то останнє виявляється не одразу. Проте даний фактор виявляється підвищеною температурою в окремих частинах обмотки статора, а це призводить до швидкого розвитку дефекту та виходу з ладу електродвигуна гірничих машин. Як наслідок, виникають значні втрати у ЕД, а особливо в режимі холостого ходу, проте тільки за величиною втрат неможна стверджувати про пошкодження.

В [13] визначення наявності появи короткого замикання в статорі витків здійснюється за умови присутності певних частот в спектрі струму:

$$f_{\text{нсс}} = \left(\frac{n}{p} \cdot (1 - s) \pm k \right) \cdot f_1, \quad (3.21)$$

3.2.5 Використання методу ватметрографії задля визначення пошкоджень в електродвигунах вугледобувного комбайну

Даний метод передбачає застосування електромеханічного обладнання з сумісними пристроями для можливості перетворення електроенергії, причому дана енергія в них частково втрачається та обумовлює значні втрати

і зниження ККД за умови виникнення пошкоджень в ЕМО. Відносно справного електромеханічного обладнання виникають зміни у залежності втрат від навантаження, тому під ватметрографією розуміється виявлення залежностей показників середньоквадратичних миттєвих потужностей за часом. Враховуючи ватметрограми, то є можливість оцінки за втратами показників технічного стану ЕМО при його діагностуванні, тобто виконуючи їх знімання за певні визначені періоди часу, можна побачити зміну стану обладнання та його складових частин за певні проміжки часу. За умови відповідної інформації щодо статистики в достатній кількості є змога побачити динаміку змін у майбутньому та визначити залишковий ресурс електродвигунів видобувного комбайну, причому більш точну інформацію щодо виникнення втрат ватметрограми показують за умови їх побудови окремих частотних складових потужності.

Даний метод передбачає реєстрацію та накопичення інформації відносно енергетичних показників об'єкту, що підлягає діагностуванню, і узагальнення цієї інформації для створення еталону, який відповідає ресурсу об'єкту контролю.

Таким чином, з огляду на вище написане, здійснюється розробка алгоритму і системи проведення технічної діагностики з визначенням залишкового ресурсу шляхом порівняння еталонних показників з виміряними.

3.3 Обґрунтування методів ватметрографії та спектрального аналізу при діагностиці технічного стану електродвигунів видобувних комбайнів

3.3.1 Застосування методології визначення поточного стану і залишкового ресурсу за допомогою ватметрографії з урахуванням графіків потужності

Для виконання оцінювання поточного стану і залишкового ресурсу з

застосуванням даної методології використовуються середні величини втрат електроенергії [13]. На рис. 3.6 зображена структурна схема енергетичних процесів, що проходять в електроприводі очисних комбайнів.

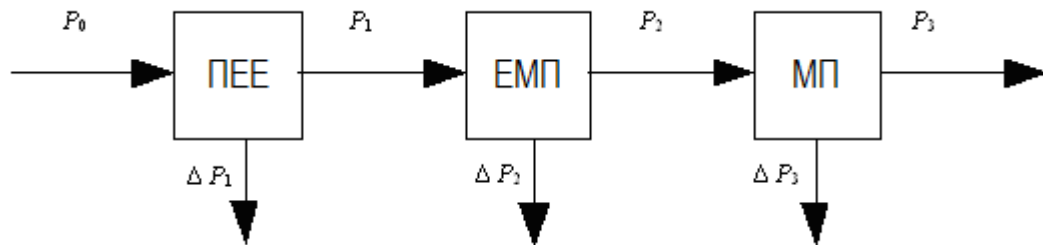


Рисунок 3.6 – Структурна схема енергетичних процесів, що проходять в електроприводі очисних комбайнів: ПЕЕ – перетворювач електроенергії; ЕМП – електромеханічний перетворювач; МП – механічний перетворювач

Система електроприводу очисного комбайну отримує від загальної мережі електроенергію потужністю P_0 , кВт, тоді ПЕЕ перетворює електричні параметри і на виході утворюється енергія з потужністю P_1 , кВт, в наслідок чого з'являються втрати $\Delta P_1 = P_0 - P_1$. Далі на ЕМП подається енергія P_1 , кВт, і при перетворенні також виникають відповідні втрати $\Delta P_2 = P_1 - P_2$, а вже при направленні енергії на МП при перетворенні виникають наступні втрати $\Delta P_3 = P_2 - P_3$.

За умови статистичного режиму блоки схеми при перетворенні характеризуються постійними коефіцієнтами передачі, і тоді потужність на виході з кожного перетворювача має вигляд [13]:

$$P_{i+1} = \eta_i \cdot P_i, \quad (3.22)$$

P_{i+1} – відповідна потужність енергії на виході з перетворювача, кВт [13];

P_i – відповідна потужність енергії на вході до перетворювача, кВт [13];

η_i – ККД перетворювача [13];

$$\eta_i = \frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{P_i - \Delta P_i}{P_i} = 1 - \frac{\Delta P_i}{P_i}, \quad (3.23)$$

ΔP_i – показник втрат енергії в перетворювачі, кВт [13].

Враховуючи те, що $\frac{\Delta P_i}{P_i}$ представляє відношення величини втрат до споживаної потужності в перетворювачі, то введемо відповідне позначення:

$$\rho_i = \frac{\Delta P_i}{P_i}. \quad (3.24)$$

За умови різного показнику потужності, що віддається, то коефіцієнт корисної дії також є різним, тоді його залежність $\eta_i = \eta_i(P_{i+1})$ зазвичай наведена в технічних характеристиках певного перетворювача або визначається експериментально. Враховуючи, що дана залежність є нелінійною, то отримане співвідношення визначається наступним чином [13]:

$$\rho_i = 1 - \eta_i(P_{i+1}) = \rho_i(P_{i+1}). \quad (3.25)$$

Так як електропривод передбачає послідовне з'єднання трьох перетворювачів, то:

$$P_3 = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot P_0, \quad (3.26)$$

з урахування вище написаного:

$$P_3 = (1 - \rho_1(P_1)) \cdot (1 - \rho_2(P_2)) \cdot (1 - \rho_3(P_3)) \cdot P_0. \quad (3.27)$$

Під час роботи електроприводу у існуючих перетворювачах здійснюється накопичення пошкоджень, які обумовлюються погіршенням енергетичних показників, тобто за віддачі однакової потужності споживана

починає збільшуватися, однак отримані втрати при різних несправностях будуть різними, тоді:

$$P_3 = (1 - \rho_1(P_1) - \xi_i(P_i)) \cdot (1 - \rho_2(P_2) - \xi_i(P_i)) \times \\ \times (1 - \rho_3(P_3) - \xi_i(P_i)) \cdot P_0 \quad (3.28)$$

Втрати в перетворювачах визначаються за умови справного електродвигуна та його поточного технічного стану, причому їх порівняння дозволяє оцінити додаткові втрати, що виникають з розвитком дефекту і які використовуються для об'єктивності оцінювання стану ЕД очисного комбайну. Саме даний підхід застосували при діагностиці вугледобувних комплексів [13], залежності втрат яких зображені на рис. 3.7.

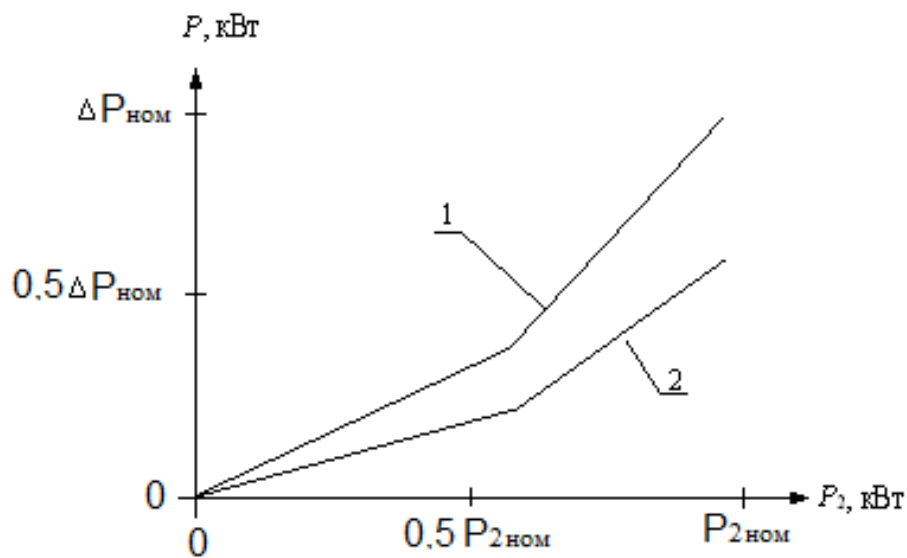


Рисунок 3.7 – Залежності втрат в ЕП очисних комбайнів за умови динамічного (1) та статичного (2) навантаження

Впродовж напрацювання ресурсу електроприводу гірничого обладнання втрати потужності збільшуються за умови одному і тому ж навантаженні. І як наслідок, коефіцієнт зміни втрат відповідає показнику технічного стану ЕП:

$$\Delta\rho(P_2) = \frac{(P_{1\text{пот}} - P_{1\text{поч}})}{P_{1\text{поч}}}, \quad (3.29)$$

$P_{1\text{пот}}$ і $P_{1\text{поч}}$ — відповідно показники поточного та початкового значення потужності електроприводу за умови навантаження P_2 , кВт, причому дане навантаження є випадковою функцією за часом.

В літературі [13] наведено стаціонарний процес визначення об'єктивності розрахунку навантаження електроприводів видобувної техніки та має нормальний розподіл функції. Таким чином, для визначення втрат енергії пропонується наступний метод, де спочатку роботи справного електродвигуна здійснюються певна кількість вимірів N потужності, що споживається ЕП, протягом виробничої зміни за певний проміжок часу:

$$\Delta t_i = \frac{T_{\text{зм}}}{N}, \text{кВт} \quad (3.30)$$

$T_{\text{зм}} = 6\text{год.}$ — час виробничої зміни;

N — відповідна кількість замірів діагностичних показників.

Також необхідно сказати, що чим нижчий проміжок часу Δt_i , тим зростає об'єктивність отримання вимірів.

Наступним етапом виконується обчислення середнього показника потужності ЕМ, що ним споживається, $\overline{P_1}$, за наступними виразами:

$$\overline{P_1} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{1i}}{N}, \text{кВт} \quad (3.31)$$

$$S_{\overline{P_1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P_1 - P_{1i})^2}{N - 1}}, \text{кВА} \quad (3.32)$$

$$P_1 \in (P_{1max}, P_{1min}) \quad (3.33)$$

$$P_{1min} = P_1 - 3S_{\overline{P_1}} \quad (3.34)$$

$$P_{1max} = P_1 + 3S_{\overline{P_1}} \quad (3.35)$$

Наступним виконуються виміри споживаємої потужності за певні інтервали часу, показники якого отримуються шляхом збору інформації щодо відмов електродвигунів, потім здійснюється визначення показників середнього, мінімального та максимального значення цієї потужності протягом зміни, а вже наступним визначається змінний коефіцієнт втрат:

$$\Delta\rho_{серед} = \frac{\overline{P_1'} - \overline{P_1}}{P_{1ном}}, \quad (3.36)$$

$P_{1ном}$ — показник номінальної механічної потужності ЕП, кВт.

Змінний коефіцієнт втрат за умови мінімального та максимального значення споживаної потужності:

$$\Delta\rho_{min} = \frac{P'_{1min} - P_{1min}}{P_{1ном}}, \quad (3.37)$$

$$\Delta\rho_{max} = \frac{P'_{1max} - P_{1max}}{P_{1ном}}. \quad (3.38)$$

Виконання обчислень за виразами (3.36-3.38) обумовлює визначення технічного стану електродвигуна гірничого комбайну, тому в наслідок їх зміни понад граничні значення, що відповідають еталону нормальної експлуатації ЕД, робиться висновок щодо наявності пошкоджень.

Якщо в спектрі спожитого струму присутні гармоніки з певними частотами ω_i , що відповідають пошкодженням та несправностям електродвигунів, то і в спектрі навантаження також відображуються частотні складові з частотами, які мають велике значення та відповідають частотам спектру струму $2\omega_i$, тоді виявлення певних пошкоджень виконується на ту частоту, де є значні втрати:

$$\Delta\rho(\omega_i) = \frac{\overline{P_1'}(2\omega_i) - \overline{P_1}(2\omega_i)}{P_{1\text{поч}}}, \quad (3.39)$$

Визначення технічного ресурсу здійснюється за умови отримання певного інтервалу часу, протягом якого з певною вірогідністю об'єкт контролю не здійснює перехід в граничний стан. Також необхідно врахувати, що ймовірні причини відмови тих чи інших частин електродвигунів є витрати енергії та термін експлуатації ізоляції ЕД визначається нагрівом обмотки і пропорційний квадрату споживаємого струму та втратам потужності.

Енергоресурс A обумовлюється величиною втрат в електродвигунів з певний проміжок часу до моменту переходу в граничний стан:

$$A = \rho \cdot T_p, \quad (3.40)$$

тоді номінальне значення енергоресурсу

$$A_{\text{ном}} = \rho_{\text{ном}} \cdot T_{p\text{ном}}, \quad (3.41)$$

Врахування енергетичних втрат за умови перевантаження проводиться шляхом визначення коефіцієнтом перевантаження $k_{\text{пер}}$, що обумовлює збільшення втрат в електродвигуні за умови перевантаження та забезпечується експлуатаційними характеристиками даного ЕД. Таким

чином, виконуючи безперервний контроль споживаної потужності впродовж певного інтервалу часу, здійснюється оцінювання ресурсу, що відпрацьований електродвигуном очисного комбайну:

$$J_0 = \sum_{i=1}^N k_{\text{пер.}i} \cdot \rho_i \cdot \Delta t_i, \quad (3.42)$$

$k_{\text{пер.}i}$ — показник коефіцієнту перевантаження за умови i -го виміру параметрів;

ρ_i — показник приведених втрат за умови i -го виміру параметрів, обумовлений експлуатаційною характеристикою ЕД;

Δt_i — показник тривалості часу поміж виконаними вимірами за умови незмінного навантаження, год.

У відповідності до (3.42) розраховується залишковий ресурс роботи електродвигуна очисного комбайну:

$$T_{\text{зр}} = \left(1 - \frac{J_0}{J_{\text{ном}}}\right) \cdot T_{\text{рном}}. \quad (3.43)$$

За умови гармонічного складу споживаємої потужності ЕД визначаємо наступне:

$$\rho_i = \sum_{k=1}^M \rho_{ik}(\omega_k), \quad (3.44)$$

$\rho_{ik}(\omega_k)$ — відповідна складова втрат у спектрі;

M — кількість проаналізованих гармонійних складових.

Однак, при врахуванні того, що окремі гармоніки мають значний вплив на енергетичний ресурс, то:

$$\rho_i = \sum_{k=1}^M k_{bk} \cdot \rho_{ik}(\omega_k), \quad (3.45)$$

k_{bk} — відповідні коефіцієнтів ваг, що дають можливість врахувати значущість певної гармоніки спектру.

З вище зазначеного, можна описати відпрацьований ресурс наступним чином:

$$J_0 = \sum_{i=1}^N k_{\text{пер.}i} \cdot \left(\sum_{k=1}^M k_{bk} \cdot \rho_{ik}(\omega_k) \right) \cdot \Delta t_i. \quad (3.46)$$

В такому випадку залишковий ресурс експлуатації електродвигуна буде дорівнювати:

$$T_{\text{зр}} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N k_{\text{пер.}i} \cdot \left(\sum_{k=1}^M k_{bk} \cdot \rho_{ik}(\omega_k) \right) \cdot \Delta t_i}{J_{\text{ном}}} \right) \cdot T_{\text{рном}}. \quad (3.47)$$

3.3.2 Використання об'єднаної методології оцінювання залишкового ресурсу за допомогою ватметрографії та спектрального аналізу

Проведення технічної діагностики електромеханічної частини гірничого обладнання необхідно здійснювати спектральним аналізом напруги і струму через те, що від є досить об'єктивним відносно виявлення несправностей електроприводу. Експериментальні і теоретичні дослідження дозволяють виявляти несправності та їх розвиток шляхом отримання спектру вищих гармонік струмів і напруги. Функціональний зв'язок поміж режимами роботи ЕД, певними пошкодженнями електромеханічної частини гірничого

обладнання та параметрами вищих гармонік струму і напруги, що виникають в електродвигуні, обумовлює вирішення завдання безперервного контролю поточного технічного стану і визначення залишкового ресурсу даного гірничого обладнання. Головною перевагою спектрального аналізу вважається виконання діагностики ЕМО без безпосереднього доступу до обладнання шляхом підключення необхідних засобів до щитка керування та немає необхідності у відключенні від мережі видобувного комбайну для техобслуговування.

Створення комплексної системи технічної діагностики передбачає об'єднання декількох методів, які забезпечать більш ефективне та об'єктивне виявлення пошкоджень і несправностей електродвигунів ГО. Оцінювання поточного технічного стану забезпечується багатофакторним аналізом наступних параметрів:

- залежності напруги і струму, що споживається ЕД, впродовж певного терміну;
- миттєві потужності фаз ЕД;
- аналіз спектрів напруги і струму та потужності, що були отримані;
- коефіцієнтів несиметрії і гармонік;
- потужності, що віддається ЕД в мережу;
- вихідні координати;
- втрати електроенергії.

В процесі виконання такого аналізу здійснюється розподілення отриманих сигналів струму і напруги відповідно до низьких та високих частот, обчислення миттєвих потужностей в кожній фазі електродвигуна, проводять спектральний аналіз отриманої інформації щодо сигналів напруги, струму і навантаження, виконується обчислення коефіцієнтів несиметрії і гармонік з урахування початкових вихідних координат та визначаються втрати електроенергії і, як наслідок, проведення багатофакторного аналізу виконується визначення поточного технічного стану електродвигуна

видобувного комбайна та обчислюється його залишковий ресурс за умови порівняльного аналізу еталону з отриманою інформацією.

Отримання результату здійснюється з урахуванням того, що пошкодження ЕД приводять до виникнення електромагнітної несиметрії в зазорі електродвигуна, а це, в свою чергу, до значної зміни спектрального складу. Ще одним критерієм вважається порівняння втрат потужності за умови частот, які відповідають несправностям.

Перетворення отриманих сигналів з аналогової форми до цифрової здійснюється аналогово-цифровим перетворювачем, який забезпечує виділення проаналізованих частот шляхом програмної фільтрації низьких частот за допомогою ЕОМ. Також здійснюється проведення аналізу якості живлячої напруги на наявність несиметрії, імпульсів спотворень сигналів перенапруги і гармонік, що, в свою чергу, дозволяє виявити причину появи пошкодження та виходу з ладу електродвигуна. Виконання вимірів та аналізів необхідне періодично для створення бази знань отриманих результатів і, як наслідок, визначення поточного стану обладнання та його залишкового ресурсу.

Працездатність електродвигунів очисного комбайну буде знаходитися за відповідними рівнями технічного стану, а саме відмінне, добре, задовільне та незадовільне, отримана інформація за якими надається до бази даних, яка обумовлює введення, зберігання, відображення, сортування та обробки даних за діагностичними ознаками ЕД. Окрім цього, вона дозволяє проводити аналіз отриманих результатів, забезпечує пошук і вибірку за відповідними параметрами, а також реєструє у журналі поточного стану та визначає залишковий ресурс електродвигунів комбайну за результатами проведеного аналізу.

Залишковий ресурс за умови використання об'єднаного методу виконається за наступним виразом:

$$\begin{aligned} \delta = & k_1 \cdot K_{I_A}^2 + k_2 \cdot K_{I_B}^2 + k_3 \cdot K_{I_C}^2 + k_4 \cdot K_{EP}^2 + k_5 \cdot K_{\Gamma_1}^2 + k_6 \cdot K_{\Gamma_P}^2 + \\ & + k_7 \cdot K_{P_A}^2 + k_8 \cdot K_{P_B}^2 + k_9 \cdot K_{P_C}^2 + k_{10} \cdot K_{\text{несим}_U}^2 + k_{11} \cdot K_{\text{несим}_I}^2 + \\ & + k_{12} \cdot K_{\text{несим}_P}^2 + k_{13} \cdot K_{\Delta P}^2 + k_{14} \cdot K_{U_A}^2 + k_{15} \cdot K_{U_B}^2 + k_{16} \cdot K_{U_C}^2, \end{aligned} \quad (3.48)$$

$K_{I_A}, K_{I_B}, K_{I_C}$ — показники коефіцієнтів розходження амплітуд сигналів струму на певних частотах з рівнем сигналу відповідному частоті живлячої мережі для фаз електродвигуна;

$K_{U_A}, K_{U_B}, K_{U_C}$ — відповідні показники коефіцієнтів розходження амплітуд сигналів напруги на певних частотах з рівнем сигналу відповідному частоті живлячої мережі для фаз електродвигуна;

K_{EP} — показник динамічного коефіцієнту потужності;

$K_{\text{несим}_U}, K_{\text{несим}_I}, K_{\text{несим}_P}$ — відповідно коефіцієнти несиметрії напруги, струму та потужності;

$K_{\Delta P}$ — показник коефіцієнту втрат потужності.

За отриманими результатами виконання багатофакторного аналізу діагностичних ознак отримується висновок за технічним станом електродвигуна та забезпечується визначення залишкового ресурсу шляхом використання статистичних баз даних, а після виконується його порівняння з критичним показником $\delta_{\text{кр}}$, тобто повинна виконуватися вимога $\delta \leq \delta_{\text{кр}}$, проте при невиконанні її електромеханічне обладнання зупиняється на ремонт або повністю виводиться з експлуатації. Постійний моніторинг електроприводу видобувного комбайну дозволить виявлення пошкоджень на ранній стадії виникнення і розвитку, а також визначати залишковий ресурс та здійснювати планування графіків раціонального технічного обслуговування за фактичним станом.

При розробці алгоритму проведення технічної діагностики поточного стану ЕМО в першу чергу необхідно врахувати додаткові гармоніки, які з'являються в робочому гірничому обладнанні у спектрі струму за умови

живлення від синусоїдного джерела напруги. Під час появи будь-якого пошкодження в ЕД виникає пульсація отриманих сигналів з відповідними частотами, що відрізняються від основних. Наступним здійснюється отримання різниці амплітуди сигналів спектрограм об'єкту діагностики на визначених частотах з еталоном та критичними показниками, що отримані з працюючого обладнання, так на рис. 3.8 наведено спектрограму струму працюючого електродвигуна видобувного комбайну, а вже на рис. 3.9 і 3.10 зображено спектрограми ЕД в яких є пошкодження.

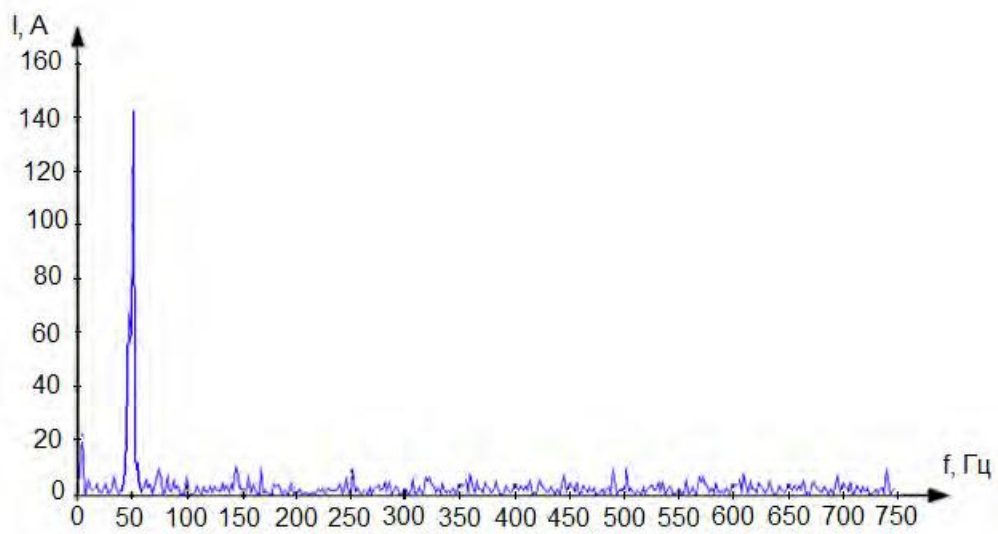


Рисунок 3.8 – Результати аналізу амплітуд сигналів струму (спектрограма) справного електродвигуна видобувного комбайну

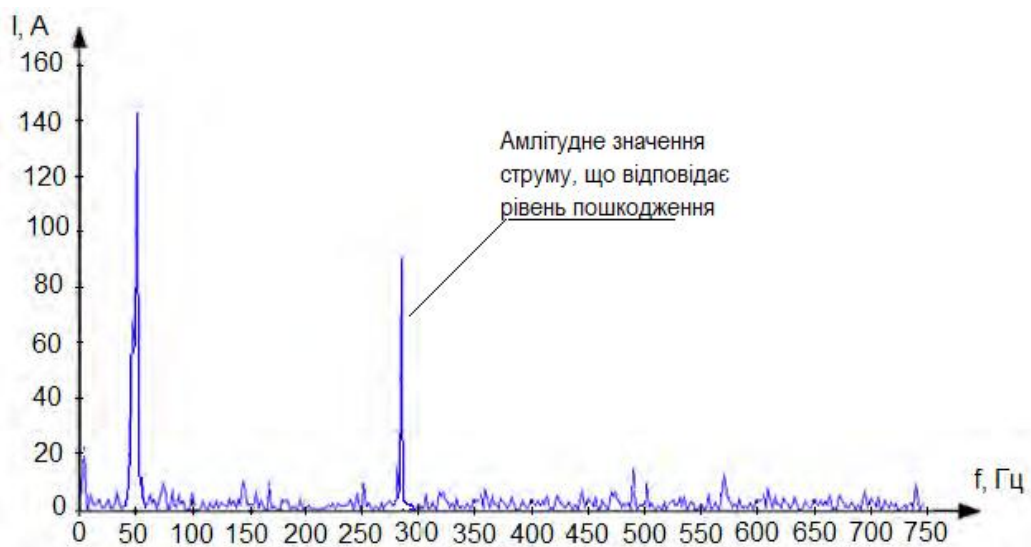


Рисунок 3.9 – Результати аналізу амплітуд сигналів струму (спектрограма) електродвигуна видобувного комбайну, який має пошкодження підшипників

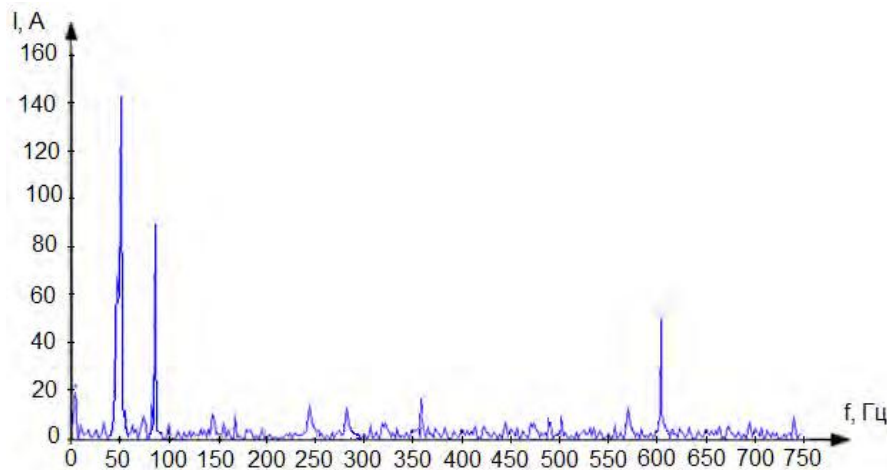


Рисунок 3.10 – Результати аналізу амплітуд сигналів струму (спектрограма) електродвигуна видобувного комбайну, який має пошкодження витків обмотки статора

Пошкодження можуть характеризуватися не тільки однією частотною складовою, а і декілька, та різноманітністю величини амплітуд струму, що, в свою чергу, показує на появу декілька дефектів в одному і тому ж вузлі електродвигуна. Так, наприклад, для підшипнику ЕД – це появу розриву зовнішнього або внутрішнього кільця, несправності елементів кочення і т.д. За умови отримання на несправному електродвигуні інформації щодо швидкості розвитку пошкодження, то є можливість визначити приблизний термін виконання заміни вузла, рівень розвитку пошкоджень витків обмотки діагностованого електродвигуна видобувного комбайну. Також при визначенні спектрограми струму здійснюється отримання її за напругою і потужністю та проведення аналізу виконується аналогічно. За отриманою інформацією вимірів забезпечується визначення потужності для кожної частотної складової. І вже тоді при збільшенні втрат потужності в тому ж режимі експлуатації можна зробити висновок більш чіткий за характером і рівнем розвитку пошкодження, що підлягає контролю.

Також необхідно враховувати, що у електродвигунів за різною конструкцією та подібними номінальними параметрами існуюча спектри

струмів і напруги будуть відрізнятися, тому на початковому етапі фіксується еталонний спектр струму, напруги і потужності справного електродвигуна.

У зв'язку з цим пропонується використання інтелектуального методу проведення багатofакторного аналізу. За умови частотного керування швидкістю обертання електродвигуна передбачається зміна основної гармоніки відповідної частоти пропорційно заданого сигналу швидкості, проте момент навантаження має залежність від швидкості. У випадку, коли задля зміни частоти і напруги живлячої мережі використовують перетворювачі, то у спектрі живлячої мережі ЕД з'являються гармоніки, показники яких мають залежність від схеми та режимів експлуатації якогось певного перетворювача частоти.

3.4 Формування алгоритму виконання моніторингу порушень і оцінювання залишкового ресурсу з використанням баз даних несправностей

Електродвигуни видобувних комбайнів підвергаються високому ризику появи дефектів і пошкоджень та, та в свою чергу мають високий рівень аварійності, а методи профілактики і виявлення пошкоджень, що на даний час використовуються на вугільних підприємствах, низько ефективні і лише в деякій мірі знижують рівень відмов ЕМО.

Переважними завданнями технічної діагностики можна вважати наступні:

- визначення роду пошкодження та його рівень розвитку;
- визначення поточного технічного стану електродвигуна в постійно змінюючих умовах експлуатації;
- обчислення залишкового ресурсу ЕД;
- виконання прогнозування терміну експлуатації ЕД до моменту виходу його з ладу.

Останні два завдань можуть бути виконані як автоматично з використанням баз даних за пошкодженнями, так і звичайними спеціалістами вручну. Застосування баз даних з даною інформацією дозволить підвищити об'єктивність визначення залишкового ресурсу та поточного технічного стану електромеханічного обладнання, а також спрогнозувати можливу його відмову. Тому ж ця база буде реалізуватися, в нашому випадку, за допомогою нечіткої логіки та у випадку виникнення перших ознак схожих пошкоджень шляхом виконання порівняння з еталоном надаватиме сповіщення щодо даного факту. Саме на ранній стадії визначення пошкодження можливе попередження щодо виникнення суттєвих поломок.

Найбільш надійним та ефективним варіантом, в нашому випадку, є використання системи технічної діагностики шляхом безперервного контролю діагностичних ознак в режимі реального часу, тобто проведення аналізу отриманих сигналів з об'єкту контролю буде здійснюватися постійно. Така система загалом містить блоки збору і аналізу інформації, інформаційну базу даних, що вже напрацьована на схожому обладнанні, об'єднану з даними щодо об'єкту контролю з моменту його введення в експлуатацію. Диспетчеризація в цьому випадку дозволяє вивести попередження щодо появи пошкодження шляхом надання звіту щодо процесу роботи електродвигунів та іншого гірничого обладнання за певний проміжок часу.

На рис. 3.11 наведено алгоритм, за яким здійснює роботу система технічної діагностики з визначенням залишкового ресурсу електродвигунів видобувних комбайнів.

Голова сутність проведення безперебійного контролю діагностичних ознак та діагностики несправностей електродвигунів очисних комбайнів за алгоритмом (рис. 3.11) передбачає [9]:

- процедуру побудови системи класифікації пошкоджень відповідно до типу і категорією небезпеки;
- побудову залежностей розвитку дефектів та пошкоджень за часом;
- визначення факторів, що мають значний вплив на появу несправностей

- або пошкоджень;
- використання визначеної системи класифікації пошкоджень задля виконання постановки діагнозу відповідного технічного стану ЕД.

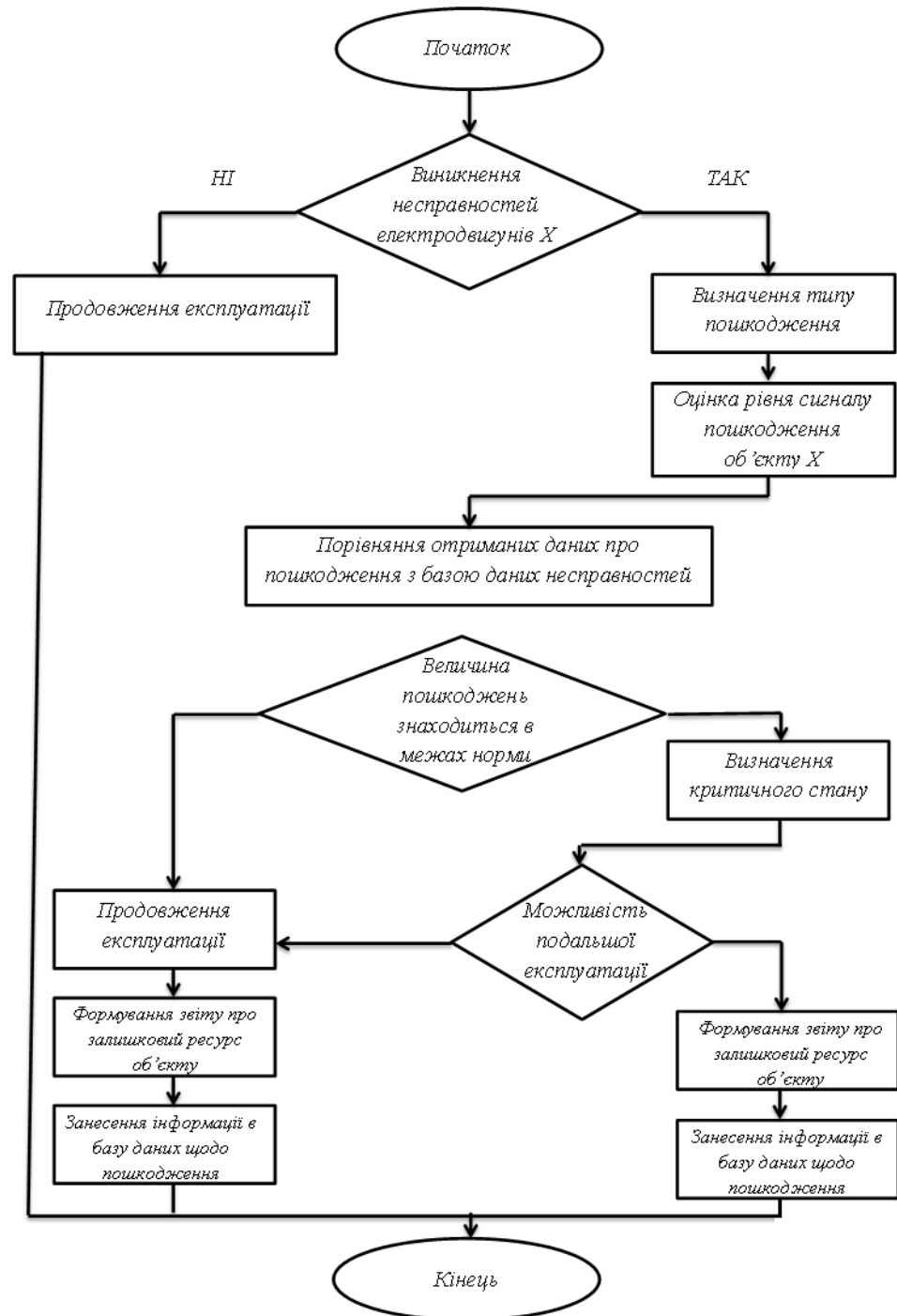


Рисунок 3.11 – Алгоритм проведення моніторингу порушень технічного стану з визначенням залишкового ресурсу електродвигуна видобувного комбайну

Система моніторингу та технічної діагностики стану електродвигунів видобувного комбайну у складі повинна мати наступні пристрої (рис. 3.12):

- датчик температури;
- датчик зчитування сигналів струму і напруги;
- аналізатор спектру струму і напруги;
- аналізатор якості живлячої мережі;
- пристрій для обчислення втрат потужності;
- пристрій для визначення коефіцієнтів несиметрії і вищих гармонійних складових;
- датчик контролю вібрацій в ЕД.



Рисунок 3.12 – Загальна структура моніторингу та технічної діагностики стану електродвигунів видобувного комбайну

3.5 Обґрунтування використання нечіткої логіки для процесу формування інформаційної бази даних несправностей і пошкоджень електродвигунів очисного комбайну.

Так як головним завдання запропонованої системи – це визначення відношення типу пошкодження та його рівня розвитку до відповідного класу несправностей, то на вхід системи контролю і діагностики спрямовуються сигнали з інформацією за діагностуючими параметрами в якості множини для проведення наступної обробки. Під час виконання діагностичного алгоритму системою обробки і оцінювання заданої множини параметрів в поточному просторі отримуємо множину вихідних, а вже потім за ними виконується формування звіту за остаточним діагнозом та визначається залишковий ресурс електродвигуна.

Процес формування діагнозу є багатокритеріальним завданням і обумовлюється складністю конструкції об'єкту контролю, то виникає необхідність у врахуванні значно більшої кількості факторів впливу, критеріїв, показників роботи електродвигунів очисного комбайну. У даному випадку виникає проблема з адекватністю математичних методів, що передбачають відображення структури об'єкту контролю, та врахуванням поданої інформації та швидкість її зміни, саме тому використання нечіткої логіки є найбільш ефективним для виконання формалізації вхідних нечітких ознак і встановлення зв'язків між ними.

Нечітка логіка заснована на використанні теорії нечітких множин, де розглядається правильність прийняття рішення у вигляді лінгвістичної змінної, множина якої є терм-множиною. Дана змінна відіграє досить важливу роль при нечіткому логічному виводі та прийнятті певного рішення з урахуванням приблизних суджень. У випадку парних множин, коли результати визначення функції відповідають 0 чи 1, то для протилежних множин отримані результати будуть нескінченні, проте в межах від 0 до 1.

Задавання нечіткої змінної виконується наступними параметрами (N, X, F), причому N відповідає назві змінної, X – відповідна множина параметрів, а A – це нечітка множина від X.

При використанні нечіткого дослідження загалом застосовують базу даних Мамдані, де причини і наслідки відповідають нечітким множинам у вигляді «Низький», «Середній» та «Високий» [34]. Дана структура бази даних є прозорою для використання та поняття кінцевому споживачу, а це, в свою чергу, є значною перевагою при забезпеченні ефективності роботи системи на підприємстві.

Після проведення технічної діагностики отримується сукупність, яка містить множину вектору інформаційних ознак $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ класифікаційного об'єкту $c_z \in C, z = \overline{1, k}$. Кожна виявлена ознака розглядається як властивість чи характеристичну зміну межі, що розглядається, а також до неї входить кінцева множина відповідних класів вирішення $d_1, d_2, \dots, d_m$.

Завдання класифікації з використанням нечіткої логіки має вигляд $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow y \in (d_1, d_2, \dots, d_m)$, тоді рівень приналежності множини інформаційних ознак до відповідного класу визначається за [35]:

$$\mu_{dj}(X) = \frac{s}{p = \overline{1, k_j}} \left(W_{jp} \cdot \frac{t}{i = \overline{1, n}} [\mu_{jp}] \right), \quad (3.48)$$

де $j = \overline{1, m}$;

s, t – відповідають нормам і операціям, тобто здійснюється реалізація множини логічних операцій АБО-І та функцій максимуму та мінімуму;

W_{jp} – показник нечітких вагових коефіцієнтів відносно j -го класу за p ознаками об'єкту контролю, даний показник змінюється в межах від 0 до 1;

k_j – певна кількість правил в базі для відповідного класу d_j .

Потім при прийнятті рішення обирають відповідний клас з максимальним рівнем приналежності [35]:

$$Y^* = \underset{d_1, d_2, \dots, d_m}{Arg} \max(\mu_{d_1}(X), \mu_{d_2}(X), \dots, \mu_{d_m}(X)), \quad (3.49)$$

Arg – виконання агрегування отриманих результатів нечіткого виводу за кожним з правил баз знання та здійснює реалізацію шляхом виконання операції $t(\max)$ над рівнями приналежності до нечіткої множини X .

На рис. 3.13 представлено загальний вид кінцевої терми для діагностичної системи.

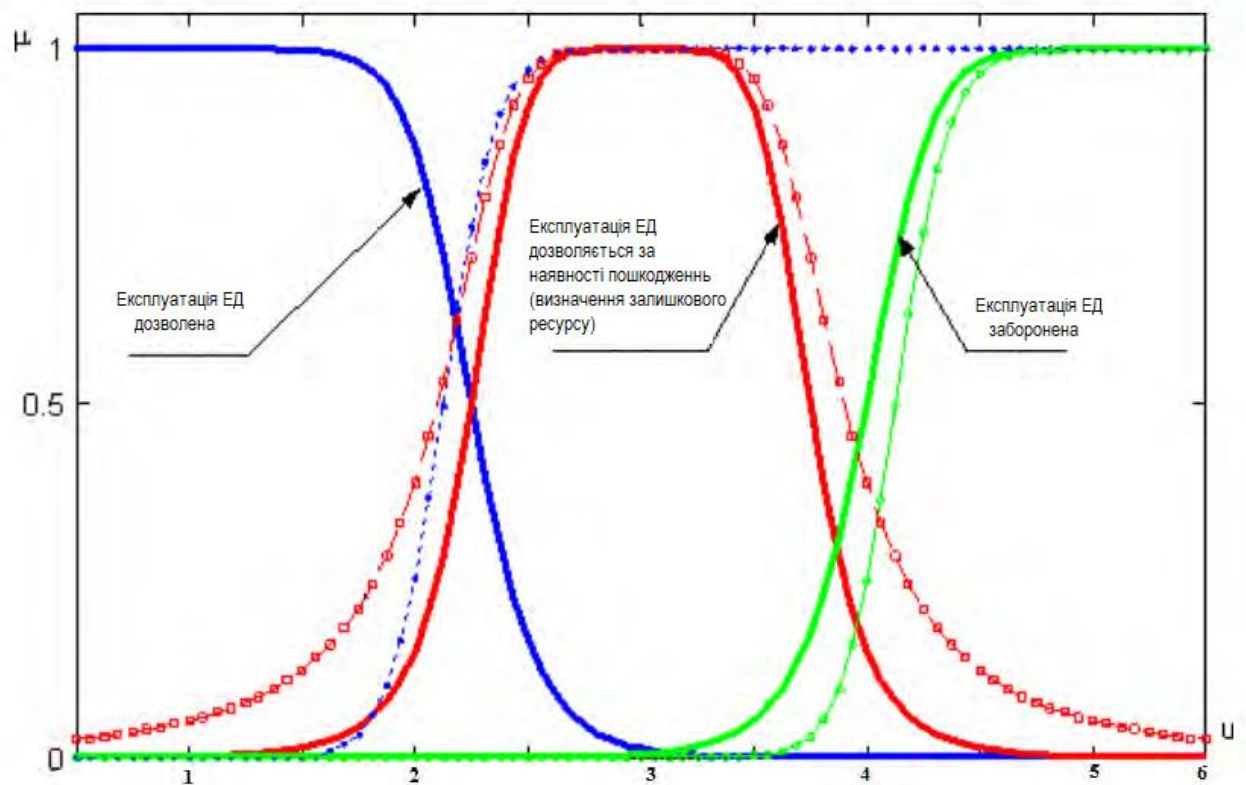


Рисунок 3.13 – Загальний вид кінцевої терми функції приналежності

На рисунку 3.14 відображена схематична структура системи діагностики з використанням обробки отриманих сигналів в базі даних пошкоджень на базі нечіткої логіки. Дана модель будується на основі необхідності виконання реалізації процесів нечіткого виводу та формальному представленні відповідних характеристик змінними, а так як при обробці даних, окрім алгоритму класифікації, основними вхідними і вихідними змінними є ознаки і дефекти відповідно, то саме вони розглядаються як змінні за умови формування баз правил нечіткої системи [35].

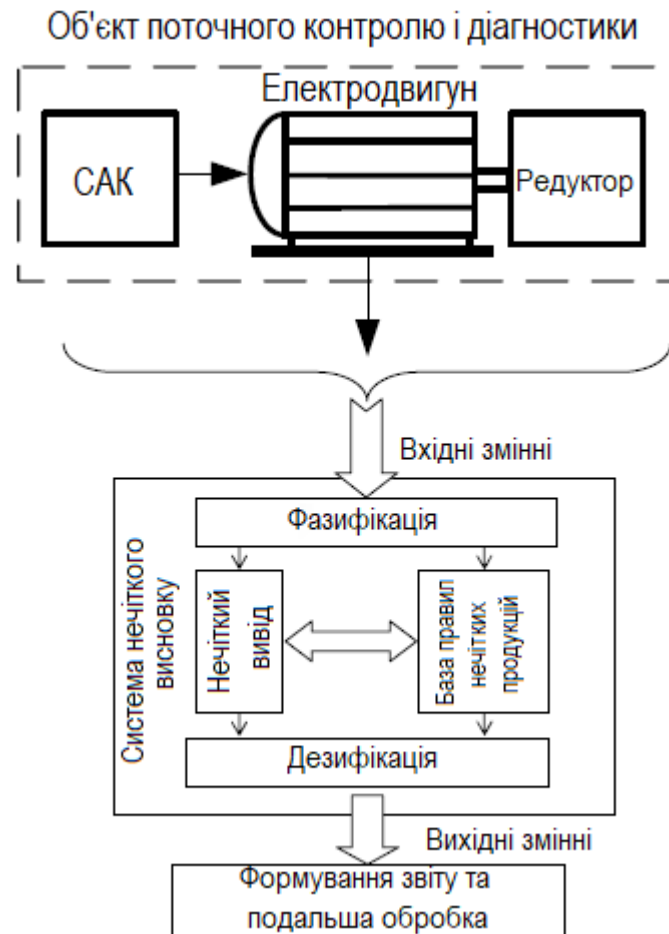


Рисунок 3.14 – Схематична структура системи діагностики з використанням нечіткої логіки

В даному випадку відбувається визначення множини класів за технічними станами $d_1, d_2, \dots, d_m$ та множину ознак $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ відповідного стану об'єкту контролю $c_z \in C, z = \overline{1, k}$, також отримуються нечіткі терми A_{iq} відповідною кількістю термів q задля виконання оцінювання ознак станів x_i і їх функцій приналежності та забезпечують розробку нечіткої бази знань з певною кількістю правил r , яка має ієрархічну структуру та дозволяє об'єктивно виконувати оцінку поточного стану електродвигуна:

$$\begin{aligned} \text{Якщо } (x_1 = a_{1j}) \text{ і } (x_2 = a_{2j}) \text{ і } \dots \text{ і } (x_n = a_{nj}) \text{ ваговим коефіцієнтом } w_j, \\ \text{тоді } y = d_j, j = \overline{1, r} \end{aligned} \quad (3.50)$$

де r – загальна кількість визначених правил;

d_j – показник консеквентну j –го правила;

$w_j \in [0,1]$ – коефіцієнт ваг, який відповідає за об’єктивність j –го правила;

a_{nj} – показник нечіткого терму, який дозволяє оцінити ознаку x_n у j –му правилі.

Наступним етапом для відповідного заданого фіксованого вектору даних вхідних змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ виконується визначення параметрів функцій приналежності за допомогою нечітких терм вхідних змінних і у відповідності до (3.48) здійснюється їх розрахунок вихідних інтегральних показників стану відповідних векторів вхідних параметрів об’єкту дослідження $x_1, x_2, \dots, x_n$.

3.6 Дослідження програмної реалізації запропонованої комп’ютерної моделі нечіткого класифікування пошкоджень системи технічної діагностики електродвигунів очисних комбайнів

Програмна реалізація комп’ютерної моделі нечіткого класифікування пошкоджень системи технічної діагностики електродвигунів очисних комбайнів здійснювалася в прикладній програмі MatLab/Fuzzy Logic Toolbox. Запропонована система моніторингу і технічної діагностики стану електродвигунів дозволяє отримати результати рівня розвитку пошкодження та загальний поточний їх стан за умови дворівневої обробки вхідних сигналів. Для дослідження отриманої системи використовувалися такі пошкодження, як дефекти в підшипниках, асиметрія ротору і повітряного зазору, а також міжвиткове замикання в статорі.

Під час виконання аналізу використовувалися наступні вхідні показники: вихідні сигнали аналізаторів спектрів струму і напруги та

отримані значення визначеної потужності з приладу для її розрахунку. Підвищення рівня втрат потужності визначалося шляхом зіставлення минулого і поточного показників спожитої потужності за умови виконання одних і тих робіт. В даній моделі виконується перетворення вхідних сигналів напруги і струму відповідної частоти пошкодження у показник терм-множин. Сам алгоритм нечіткого виведення кожного рівня системи при налаштуванні за допомогою Fuzzy Interface System зображено на рис. 3.15. В даному інтерфейсі було виконано вибір нечіткого алгоритму Мамдамі, який дозволить зменшити кількості правил, налаштування методів композиції, імплікації та агрегації локальних станів системи та визначено метод дефазифікації.

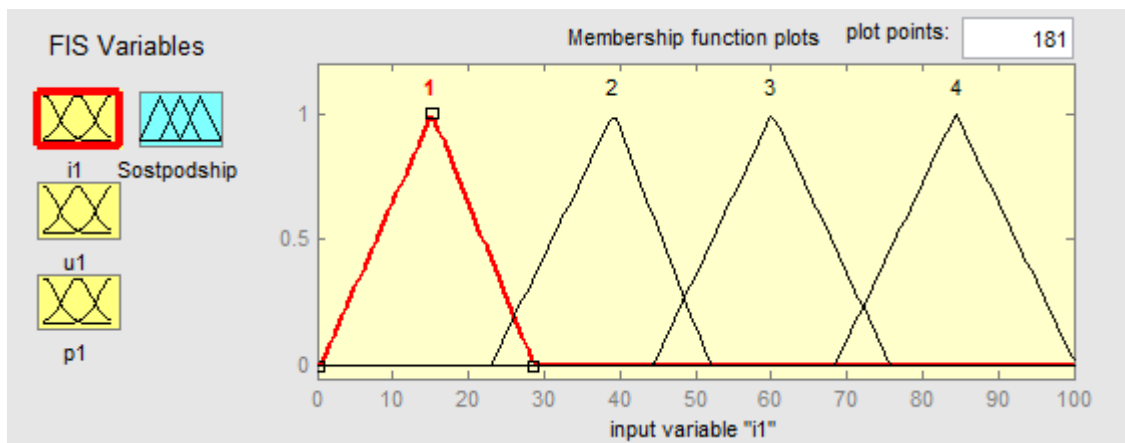


Рисунок 3.15 – Алгоритм нечіткого виведення кожного рівня системи при налаштуванні за допомогою Fuzzy Interface System

В даному випадку змінні приймалися у вигляді трикутника задля спрощення виконання обробки інформації, також форма і розмір терм за кожним пошкодженням обирали і налаштовували відносно отриманих даних статистики з електродвигунів. Показник амплітуди струму і напруги задавалися в межах від 0 до 100 згідно розвитку дефекту. Наступною величиною в межах від 0 до 100 була отримана відносно втрат потужності. На рис. 3.16 відображено визначення рівню пошкодження у відсотковому співвідношенні з поточним станом електродвигуна.

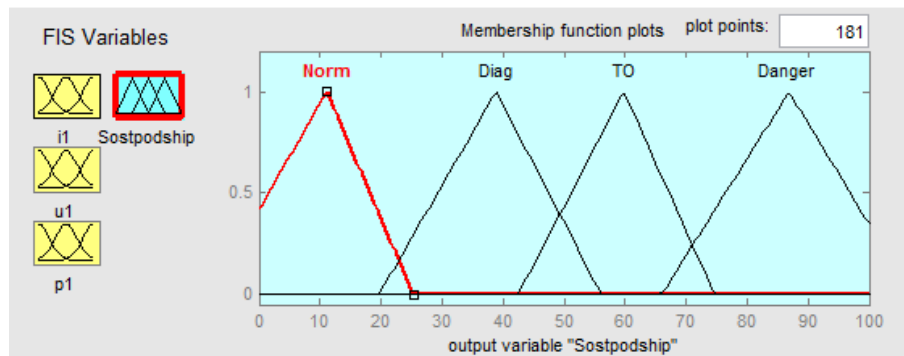


Рисунок 3.16 – Відображення показників терм-множин пошкодження об'єкту контролю

Виконання налаштування нечіткої системи висновку забезпечувалося створенням баз знань за несправностями за умови їх ваг загального технічного стану електродвигуна, причому вона виконує опис можливої комбінації терм-множин за кожним показником та містить 256 виразів за формою «ЯКЩО-ТО». Після виконання всіх дій за умови отримання показників з вище зазначених пошкоджень робиться висновок щодо поточного технічного стану електродвигунів очисного комбайну і, як наслідок, видається рекомендація щодо виконання технічного обслуговування та за умови визначення статистичних даних відносно розвитку несправностей прогнозується залишковий ресурс електромеханічного обладнання. На рис. 3.17 наведені вихідні показники терм-множин, які необхідні для отримання висновку про поточний технічний стан ЕД очисного комбайну.

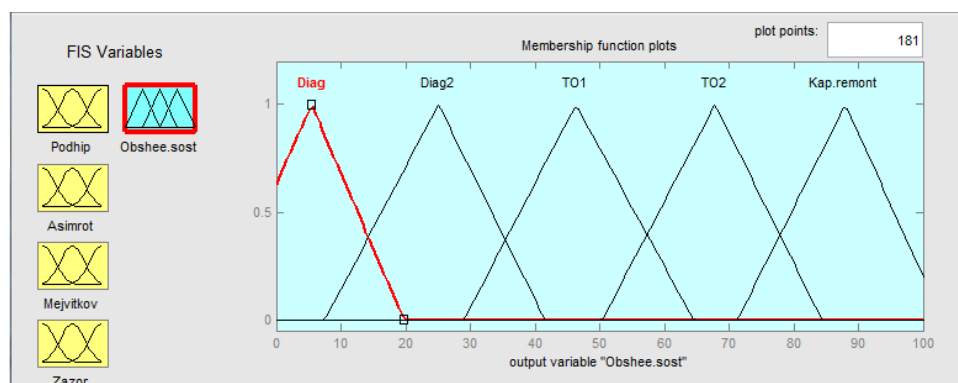


Рисунок 3.17 – Вихідні показники терм-множин, які необхідні для отримання висновку про поточний технічний стан ЕД очисного комбайну

Що стосується обробки інформації, то терм-множини мають наступні показники:

- необхідність додаткової обробки отриманої інформації «DIAG»;
- необхідність додаткової експертної діагностики «DIAG2»;
- необхідність в технічному обслуговуванні «ТО1»;
- необхідність в ремонтних роботах «ТО2»;
- вивід з експлуатації електродвигуна через наявності передав ірного стану «DANGER».

Вихідних показники термів-множин блоку, що дозволяє визначати поточний технічний стан ЕМО бувають різного виду та мають залежність від експертного оцінювання, показників амплітуди, які, в свою чергу, відповідають відповідному пошкодженню та ваговим коефіцієнтам стану електродвигуна.

На рис. 3.18 відображено основні правила виведення, де кількість строк відповідає кількості зазначених правил нечіткого висновку, тоді як кількість стовпчиків зазначають вхідні і вихідні змінні отриманої діагностичної інформації в даній системі, проте є додаткове вікно для отримання результатів нечіткого висновку та операцій дефазифікації. В ньому відображується функція приналежності та рівень її зрізу відповідно до вхідних змінних і окрема функція зрізу вихідних змінних для відображення загальних результатів.

Модель побудови баз даних пошкоджень та несправностей і визначення залишкового ресурсу електродвигунів видобувних комбайнів наведена на рис. 3.19. Вона є дворівневою, де на першому здійснюється визначення рівню розвитку за кожним пошкодженням, на другому виконується отримання інформації за поточний стан електромеханічної системи.

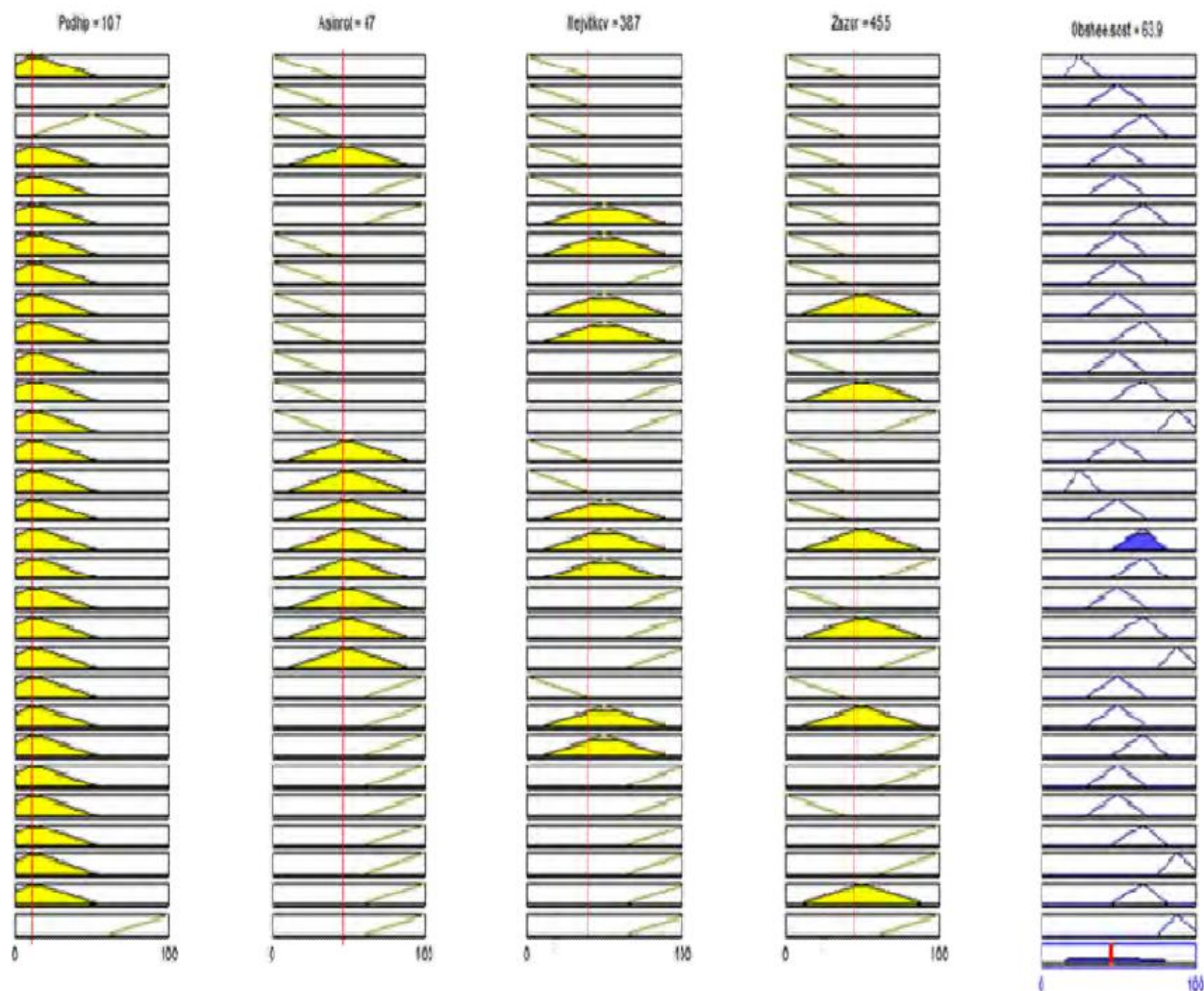


Рисунок 3.18 – Структура основных правил вывода

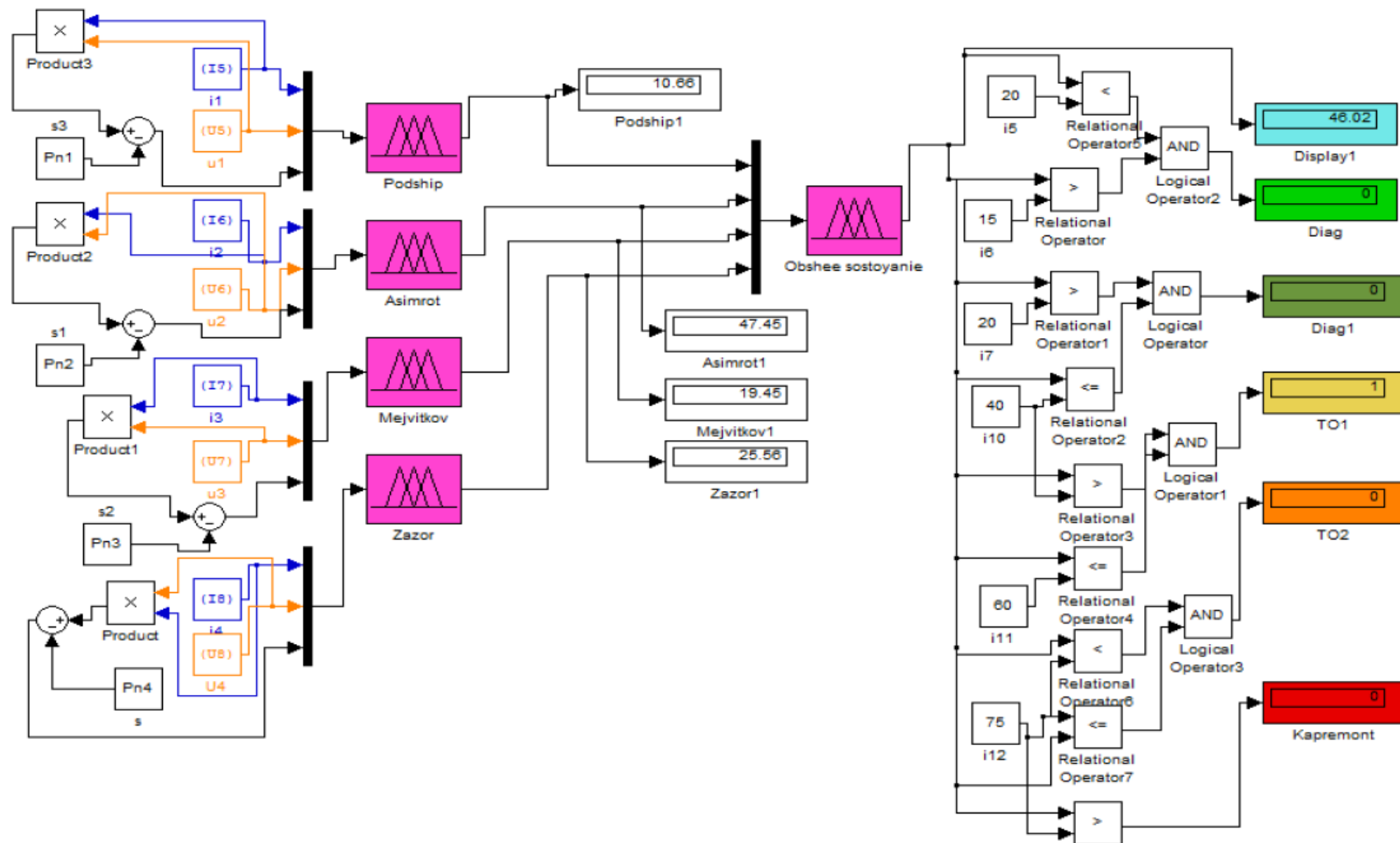


Рисунок 3.19 – Комп’ютерна модель побудови баз даних пошкоджень та несправностей і визначення залишкового ресурсу електродвигунів видобувних комбайнів

Отримана комп'ютерна модель (рис.3.19) містить наступні елементи:

- $i1, i2, i3, i4$ – показники амплітуди струму за відповідним пошкодженням відносно загального спектру;
- $u1, u2, u3, u4$ – показники амплітуди напруги за відповідним пошкодженням відносно загального спектру;
- $S, S1, S2, S3$ – показники початкових втрат за умови справного електродвигуна видобувного комбайну;
- «Podship» – контролер нечіткої логіки (НЛ) виконання аналізу пошкодження підшипнику;
- «Asimrot» – контролер НЛ виконання аналізу асиметрії ротору;
- «Mejvitkov» – контролер НЛ виконання аналізу міжвиткових замикань;
- «Zazor» – контролер НЛ виконання аналізу асиметрії повітряного зазору;
- «Obshee sostoyanie» – контролер НЛ виконання аналізу поточного стану електродвигуна.

В процесі роботи даної моделі, на її виході виводяться показники розвитку відповідного пошкодження шляхом отримання відсоткового співвідношення до загального ресурсу вузла, тоді як загальний стан електродвигуна та певні рекомендації за техобслуговуванням, де позначення «1» відповідає наявності сигналу на дисплеї. В системі сформовано процентні співвідношення загального технічного стану електродвигуна задля подальшого висновку:

- 0-15% – робочий стан роботи електродвигуна, в даному випадку виконується тільки запис отриманої інформації;
- 15-20% – відповідає рівню «DIAG», при цьому виконується додаткова обробка отриманої інформації за діагностикою електродвигуна. В даному випадку здійснюється обробка інформації щодо наявності пошкодження, які мають деякий вплив на показники амплітуд відповідних частот або втрат потужності;

- 20-40% – відповідає рівню «DIAG2», при цьому виконується додаткова обробка отриманої інформації за діагностикою електродвигуна із використанням спеціалізованого обладнання, що дозволять визначити рід та рівень розвитку пошкодження;
- 40-60% – відповідає рівню «ТО1», в даному випадку здійснюється техобслуговування на першому рівні, що містить ревізію, огляд та перевірку відповідних вузлів без відімкнення від мережі обладнання;
- 60-75% – відповідає рівню «ТО2», при цьому виконується техобслуговування на другому рівні, що містить заміну складових вузлів, налаштування системи керування та відповідно перевірка ізоляції ЕД з можливістю відімкнення від мережі обладнання;
- понад 75% – відповідає рівню «DANGER», то виникає необхідність відключення від мережі ЕМО задля попередження аварійних ситуацій внаслідок виходу його з ладу та виконання капітального ремонту.

Дослідження розробленої комп'ютерної моделі виконувалося подавання певних масивів даних, які дозволили зімітувати спектри частот струмів і напруг та визначити їх найбільше середнє значення відповідного пошкодження (рис. 3.20).

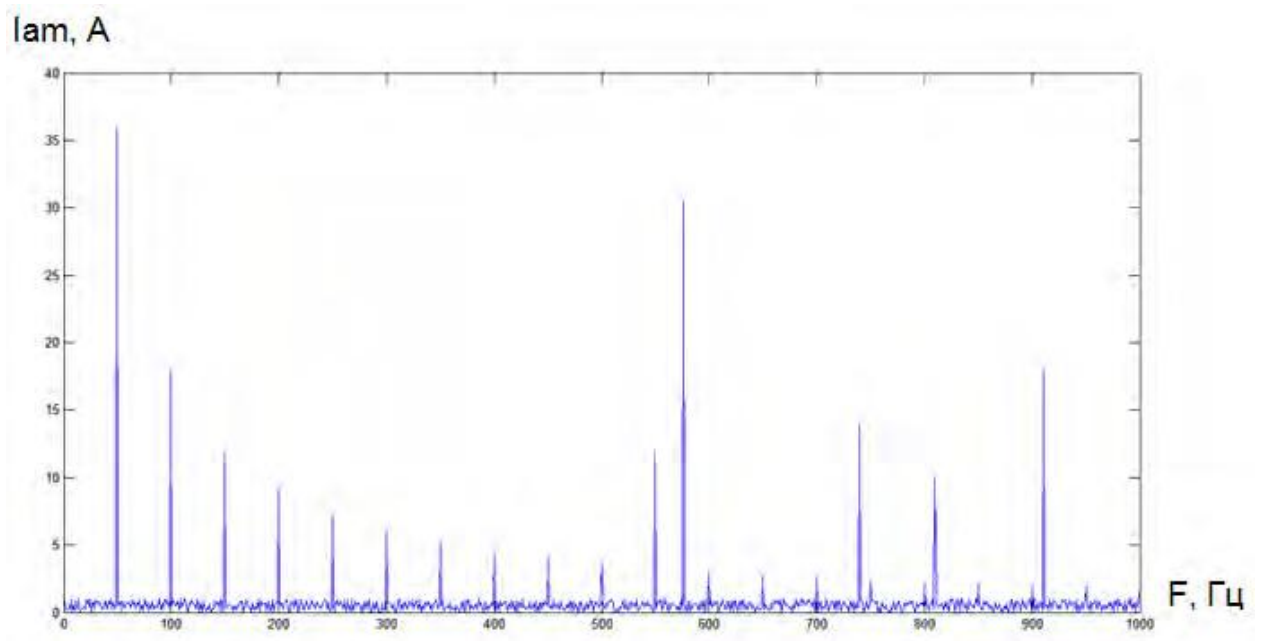


Рисунок 3.20 – Результати надання масиву даних за спектром струму

Вкінці з системи технічної діагностики буде отриманий остаточний результат щодо наявності пошкоджень електродвигуна видобувного комбайну в режимі реального часу, і тільки після додаткової обробки отриманої за архівованої інформації формується висновок щодо виникнення пошкодження, що відповідає відповідним показникам частоти та амплітуди струму і напруги за умови визначення споживаємої потужності.

ВИСНОВОК

В процесі виконаного дослідження було виконано наступне:

1. Проаналізовано існуюча систему планово-попереджувальних ремонтів, в наслідок чого було виявлено, що дана система є досить неефективної через те, що ремонтні роботи здійснюються за планом технічного обслуговування або шляхом визначення напрацювання годин гірничим обладнанням і, як наслідок, виникає значний ризик появи нових пошкоджень в ЕМО, що можуть привести до його неконтрольованого виходу з ладу.
2. Проаналізовано існуючі можливості зниження витрат на техобслуговування гірничого обладнання та виявлено, що їх зменшення можна досягти шляхом оптимізації існуючої структури виконання технічного обслуговування і ремонтів.
3. Виконано дослідження параметрів електромеханічної частини видобувного комбайну за умови його нормальної експлуатації та проаналізовані існуючі несправності, що в ній переважно виявляються.
4. Запропоновано нову структуру системи виконання ремонтних робіт і технічного обслуговування за фактичним станом, дозволить оптимізувати витрати на вугільному підприємстві та знизити матеріальні і часові втрати.
5. Виконано обґрунтування вибору підходу до розробки системи моніторингу, технічної діагностики і визначення залишкового ресурсу електромеханічної частини вугледобувного комбайну.
6. Проаналізовані відомі методи технічної діагностики електродвигунів за електричними параметрами, за результатами якого визначені основні критерії діагностування несправностей та обґрунтовано можливість виконання об'єднаної методології

оцінювання поточного стану ЕД за допомогою ватметрографії та спектрального аналізу.

7. Виконано формування алгоритму виконання моніторингу порушень і оцінювання залишкового ресурсу з використанням бази даних несправностей електродвигунів видобувного комбайну
8. Розроблена комп'ютерна модель будови баз даних пошкоджень і несправностей та визначення залишкового ресурсу електродвигунів видобувних комбайнів із використанням нечіткої логіки та виконано її дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аколелов В.Ю., Калиниченко В. В. Деякі аспекти впровадження безконтактної апаратури керування гірничими машинами видобувної ділянки [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nadoest.com/v-v-deyaki-aspekti-vprovadjennya-bezkontaktnoyi-aparaturi-keru>
2. Види приводу і основні вимоги [електронний ресурс]. Режим доступу: https://studopedia.com.ua/1_175034_elektrodivuniv.html
3. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау.— М: “Энергоатомиздат”, 1987 г. — 136 с.
4. Мариев, П.Л. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке / П.А. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов.— СПб.: Наука, 2006 г. — 387 с.
5. Bellini, A. Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis / A.Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G.B. Kliman // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol.37. P.1248-1255
6. Комбайн очистной РКУ-13 [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://rudf.ru/oborudovanie/shaht-kombain/rku-13>
7. Уніфікація [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BD%D1%96%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F>
8. Виріб [електронний ресурс]. Режим доступу: https://ukrainian_explanatory.academic.ru/19755/%D0%B2%D0%B8%D1%80%D1%96%D0%B1
9. Надійність та діагностика електрообладнання: навч. посіб. / В. М. Казак, Б. І. Доценко, В. П. Кузьмін [та ін.]. — К. : НАУ, 2013. — 280 с.

10. Куценко Г.Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электроустановок: практическое пособие / Г.Ф. Куценко. — Мн.: Дизайн ПРО, 2006.— 472 с.
11. Алтухова Т. В. Обґрунтування раціональної структури діагностування електромеханічного обладнання вугледобувних підприємств та визначення його оптимальної оцінки залишкового ресурсу. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 29 (68), № 1, 2018. – С. 1-6
12. Altukhova T. V. Analysis of the structure and systems of diagnosis of electromechanical equipment for coal mining. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27–28, 2018. Brno: Baltija Publishing. – С. 147-150.
13. Козярук, А.Е. Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов / А.Е. Козярук, А.В. Кривенко, Ю.Л. Жуковский, С.В. Бабурин, М.С. Черемушкина, А.А. Коржев. СПб.: Горный университет, 2013 г.—90 с.
14. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems И Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.
15. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
16. Емельянов, А.П. Пронин, М. В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение): учебное пособие / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов – СПб: Изд.”Силовые машины”, 2004 г.—256с.
17. Электродвигатели трехфазные асинхронные с короткозамкнутыми роторами взрывозащищенные [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pemz.ucoz.com/index/0-38>

18. Електрифікація гірничого виробництва: підручник для ВНЗ: у 2 т. / Л.О. Пучков, О.В. Ляхомський, Л.О. Плащанський, М.І. Чеботаєв, В.І. Щуцький, Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.Т. Заїка, Ю.Т. Разумний, А.Я. Рибалко; за ред. Л.О. Пучкова і Г.Г. Півняка. Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2010. Т. 1. - 503 с.

19. Технічна діагностика [електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B4%D1%96%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0

20. Разработка теоретических, экспериментальных и технологических основ методов и средств диагностирования, прогнозирования физических процессов и оценки остаточного ресурса электрооборудования машин и технических средств, эксплуатируемых в тяжелых условиях (промежуточный): отчет по НИР / Козярук А.Е. – С–Пб:СПГГИ, 2009 г.– 106с.

21. Бахрушин В. Є. Методи аналізу даних: навчальний посібник для студентів / В.Є. Бахрушин. – Запоріжжя : КПУ, 2011. – 268 с.

22. ГОСТ Р 27.004–2009 Надежность в технике. Модели отказов / М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.

23. Гурен, М.М. Ценообразование и цены на продукцию горных предприятий: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГУ, 2003 г.– 323 с.

24. Закревский, А.Д. Параллельные алгоритмы логического управления / А.Д. Закревский. – М: изд. “URSS” 2011 г.– 200с.

25. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. Учебное пособие для студентов ВУЗов / под общей редакцией В.А.Новикова, Л.М. Чернигова.– М.: «Академия», 2006 г.–368с.

26. Казарез, А.Н. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией / А.Н. Казарез, А.А. Кулешов.–М.: Недра, 1988 г.–264 с.

27. Карпа, В.М. Оценка частоты гармонического сигнала и амплитуд гармонического сигнала в шуме через спектральную оценку по методу максимальной энтропии. / В.М. Карпа, В.Д. Циделко // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах, № 2, 2003 г.– С.101-107.

28. Duhamel, P. Fast Fourier Transforms: A Tutorial Review and a State of the Art / P. Duhamel, M. Vetterli // Signal Processing. 1990. Vol. 19. С.259-299

29. Коломийцов, М. Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов / Коломийцов, М. Д. /ЛГИ. Л., 1986 г.– 96 с.

30. Bennett, S.M., Patton R.J., Rapid prototyping of a sensor fault tolerant traction control system, IEEE Colloquium on Power Electronics, 21 Apr. 1997, pp. 2/1-2/6.

31. Siemens company. Sinamics S120 6SL3 097-2AP00-0BP6 – Siemens – 1816 с.

32. Bellini, A. Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis / A.Bellini, F. Filippetti, G.Franceschini, C. Tassoni, G.B. Kliman // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol.37. P.1248-1255

33. Kölner, Walter. Gearlessly into the Mine// Metals & Mining [электронный ресурс]. 2008, №2. Режим доступа: http://www.industry.usa.siemens.com/verticals/us/en/metals/downloadcenter/customer_magazine/issue-2-2008/Documents/mm_2_08_low.pdf.

34. Официальный сайт пользователей MathLab и Simulink [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/18.php>

35. Нурматова, Е.В. Подход к решению задачи классификации технических состояний в нечеткой логической системе / Е.В. Нурматова //Известия ТулГУ. Техническое науки , Вып. 1, 2010 г. С.170–174.

ДОДАТОК А

Перелік зауважень нормоконтролера до випускної кваліфікаційної роботи
магістра Коротуна С. В. групи ГМКм-20

Позначення документа	Документ	Умовна позначка	Зміст зауваження

Дата _____

Підпис _____ Калиниченко В.В.