

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

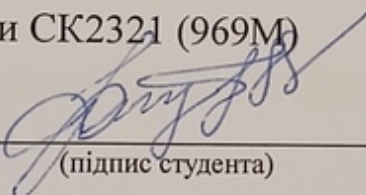
Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

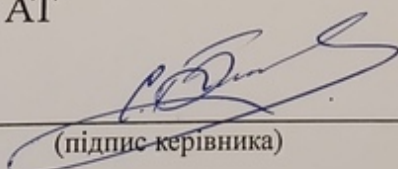
на тему: Дистанційне діагностування стрілочних електропроводів змінного струму

за освітньою програмою «Системи керування рухом поїздів»
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»

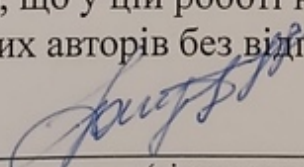
Виконав: студент(ка) групи СК2321 (969М)


/ Владислав ГРИНЕНКО /
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ


/ Сергій БУРЯК /
(підпис керівника)

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

Студент 
(підпис студента)

Дніпро – 2025 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Remote diagnostics of AC turnout electric drives

according to educational curriculum «Train movement control systems»
in the Specialty: 273 Railway transport

Done by the student of the group CK2321 (969M)

/ Vladyslav Hrynenko /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Serhii Buriak /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології та системи
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: магістр
Освітня програма: Системи керування рухом поїздів
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АТ
_____ Володимир ГАВРИЛЮК
(підпис)

Дата 10 січня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

_____ магістра

(ступінь вищої освіти)

студенту Гриненко Владислав Валерійович

(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Дистанційне діагностування стрілочних електропроводів змінного струму

Керівник роботи: Буряк Сергій Юрійович, к.т.н., доц.

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від «05» січня 2024 р. № 20ст

2. Строк подання студентом роботи: 10 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Стрілочні електроприводи з асинхронним двигуном, стрілочні переводи, несправності та дефекти в роботі під час переведення стрілок

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: Привести особливості будови стрілочних електроприводів змінного струму та визначити причини його відмов окремо та у складі стрілочних переводів

4.2 Основна частина: Виконати виміри та провести дослідження складу кривої струму стрілочного електроприводу в робочому колі для переведення стрілки у справному стані і для переведення стрілки зі штучно створеними чи виявленими пошкодженнями, дефектами, несправностями, недоліками чи відмовами в роботі. Зробити аналіз отриманих даних.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	04.11.24-10.11.24	30%
2	Основна частина	09.12.24-15.12.24	60%
3	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	06.01.25-12.01.25	100%
4	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	23.01.25	

Студент

_____ (підпис)

Владислав ГРИНЕНКО

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Сергій БУРЯК

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

62 сторінки, 25 рисунків, 4 таблиці, 25 джерел літератури.

Об'єкт розробки – перевідні стрілочні пристрої.

Мета роботи – визначення технічного стану стрілочних електроприводів.

Методи дослідження – методи математичного моделювання, аналітичного розрахунку параметрів моделі, експериментальні дослідження.

У першому розділі проведено аналіз існуючих стрілочних електроприводів. У другому розділі проаналізовано відомі дефекти стрілочного переводу та визначені можливості їх дистанційної діагностики. У третьому розділі розглянуто критичні відмови стрілочних переводів, для чого приведено базові та математичні основи їх поділу. У четвертому розділі приведено дослідження іноземного досвіду у питанні оцінки рівня деградації та онлайн-прогнозування відмови. Виконано аналіз формування відмов з точки зору структурування утворення пошкоджень. Проведено вилучення та вибір індикатора справності та оцінка рівня деградації на основі кластеризації. Представлена модель деградації для прогнозування відмов.

Висновок. Застосування системи дистанційного діагностування стану стрілочних електроприводів в автоматизованому режимі дозволить економити час на пошуки несправностей, засоби та обсяг робіт із заміни та ремонту елементів обладнання, що вийшли з ладу, призведе до скорочення кількості затримок поїздів та значного підвищення безпеки руху.

Ключові слова: СТРІЛОЧНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЦЕНТРАЛІЗОВАНА СТРІЛКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СТРІЛОЧНИЙ ПЕРЕВІД, АНАЛІЗ ВІДМОВ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИВОДІВ СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ.....	9
2 АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ І МОЖЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ.....	15
3 КРИТИЧНІ ВІДМОВИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ.....	20
3.1 Основи поділу відмов з точки зору їх критичності.....	20
3.2 Математичні основи.....	21
3.3 Аналіз та візуалізація результатів.....	24
3.4 Оцінка похибки.....	26
3.5 Діагностика та прогнозування відмов.....	27
3.6 Висновок.....	43
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНОЗЕМНОГО ДОСВІДУ У ПИТАННІ ОЦІНКИ РІВНЯ ДЕГРАДАЦІЇ ТА ОНЛАЙН-ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВИ.....	44
4.1 Аналіз формування відмов з точки зору структурування утворення пошкоджень.....	44
4.2 Вилучення та вибір індикатора справності та оцінка рівня деградації на основі кластеризації.....	46
4.3 Експериментальна установка та збір даних.....	49
4.4 Модель деградації для прогнозування відмов.....	51
4.5 Висновки	57
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	60

ВСТУП

Залізничний транспорт є складною системою, що складається з різних служб, від точності взаємодії яких забезпечується безперервність і безпека перевізного процесу. Залізниця є небезпечним місцем як для пасажирів, але й самих працівників залізничного транспорту. Оптимізація експлуатаційного процесу та реконструкція транспортних підприємств багато в чому призводить до зменшення кількості людей зайнятих поточним обслуговуванням та плановим ремонтом.

Керівництвом залізничного транспорту взято курс на досягнення якісного рівня перевезень, який не поступається європейським країнам, вже найближчим часом. Головним завданням на шляху вдосконалення перевізного процесу, що включає збільшення плечей обігу, швидкостей руху та ваги вантажу, що перевозиться поїздами, залишається забезпечення безпеки руху.

Стрілочний електропривод призначений для автоматичного переведення стрілок у крайні положення, замикання рухомих елементів стрілочного переводу та передавання інформації про досягнення заданого крайнього положення. З огляду на те, що вони розташовані в безпосередній близькості до залізничного полотна, схильного до впливів погодних умов, вібрацій і тисків від рухомих одиниць, електромагнітних полів, він є одним із найбільш ненадійних елементів залізничної автоматики і телемеханіки. За даними статистики, близько 10 % усіх відмов у залізничної автоматики припадає на напільні елементи централізованих стрілок.

Перевірка стрілочних переводів здійснюється в даний час за допомогою ручних методів вимірювання та контролю параметрів співробітниками служби сигналізації та зв'язку. Цей спосіб не може забезпечити необхідної точності і не може дати гарантій, що в проміжок часу між черговими перевірками не буде пошкоджень. Крім цього є людський фактор, на який впливають як погодні умови, так і досвід роботи співробітника, його фізіологічний, морально-психологічний

стан і т.д. Однією з головних причин порушень нормальної роботи СЕП є низькоякісне виконання робіт із технічного обслуговування (60-70 % відмов елементів стрілочного електроприводу виникає саме з цієї причини). Впровадження автоматизованого контролю колійного обладнання дасть змогу підвищити ефективність функціонування стрілочних електроприводів за рахунок можливості безперервного технічного діагностування робочих параметрів і забезпечити своєчасну реакцію технічного персоналу дистанцій сигналізації, централізації та блокування.

Потрібно розробити таку систему контролю та діагностики стрілочних переводів, яка б повною мірою задовольняла вимогам сучасних умов швидкісного руху та руху великовагових поїздів і проводила діагностування, збір та систематизацію даних в автоматизованому режимі. Є велика необхідність впроваджувати подібні системи на станціях з централізованим управлінням стрілок. Живлення двигунів стрілочних електроприводів при цьому здійснюється або постійним або змінним струмом з однієї панелі живлення.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРИВОДІВ СТІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ

Одним із основних завдань залізничного транспорту є забезпечення безпеки руху поїздів. Для цього на станціях служать пристрої автоматики та телемеханіки. Для переводу централізованих стрілок та забезпечення їх замикання та контролю їх положення в системах електричної централізації застосовуються стрілочні електроприводи.

Відповідно до вимог Правил технічної експлуатації залізниць стрілочні переводи повинні забезпечувати: щільне прилягання притисненого гостряка до рамної рейки при крайніх положеннях стрілки; незамикання стрілки при зазорі 4 мм і більше між притиснутим гостряком і рамною рейкою; відведення гостряка від рамної рейки на відстань 125 мм; механічне замикання гостряків стрілки для запобігання їх відходу при проході поїзда; захист від перевантажень двигуна та віджиму рамної рейки при попаданні стороннього предмета між гостряком і рамною рейкою; можливість переводу стрілки вручну.

Класифікація стрілочних електроприводів наведена на рисунку 1. Стрілочні приводи на залізницях, залежно від галузі застосування, умовно поділяються на такі групи: для звичайних стрілочних переводів з марками хрестовин 1/11 і крутіше, поширених на станціях без високошвидкісного руху; для стрілочних переводів з пологими гостряками та рухомим сердечником хрестовини високошвидкісних ділянок залізниць; для крутих стрілок сортувальних гірок.

На вигляд споживаної енергії приводи бувають електромеханічні, електромагнітні, електропневматичні, електрогідравлічні. Електромеханічні приводи для переводу стрілок мають електродвигун постійного чи змінного струму та механічний редуктор, а електромагнітні – тягові електромагніти (соленоїди).

Дія електропневматичних та електрогідравлічних стрілочних переводів заснована на застосуванні пневматичних та гідравлічних двигунів.

По виду замикання розрізняють стрілочні приводи із зовнішнім і внутрішнім замиканням стрілочних гостряків. Механізм внутрішнього замикання конструктивно розташовується в корпусі приводу, а зовнішнього - поза приводом безпосередньо у стрілочних гостряків у вигляді окремого замикача, керованого приводом.

За способом сприйняття розрізу стрілки, тобто її примусового переводу ребордами коліс рухомого складу при пошерстному русі, приводи поділяються на взрізні та невзрізні. Взрізні приводи мають пристрій, що запобігає руйнуванню механізму приводу при розрізі, яке виконується у вигляді механізму зрізання з гнучким або жорстким зв'язком між провідними і веденими елементами приводу, що забезпечують заздалегідь заданий опір переміщенню робочого шибера приводу під дією коліс рухомого складу. Невзрізні приводи такого механізму не мають, завдяки чому вони простіші та надійніші, але при взрізі ушкоджуються.

За часом переводу стрілочні приводи можна розділити на швидкодіючі (час переводу стрілки до 1 с), з нормальним часом переводу (до 5 с) і повільно діючі (більше 5 с). Швидкодіючі приводи застосовують на сортувальних гірках і в маневрових районах станції, а інші – на станціях, обладнаних електричною централізацією стрілок і сигналів, причому повільно діючі мають поширення, головним чином, на високошвидкісних магістралях, де укладаються стрілки з гнучкими гостряками великої довжини.

На залізницях найбільшого поширення набули електромеханічні стрілочні приводи. Це зумовлено надійністю механізму, зручністю подачі енергії територією станції, простотою її перетворення на механічну роботу.

Конструкція стрілочного приводу містить електродвигун; фрикційний механізм (муфта), редуктор, зрізний пристрій, замикаючий механізм, контрольний пристрій (автоперемикач), робочі шибери та контрольні лінійки.

У робочому режимі крутний момент від електродвигуна передається через фрикційну муфту до шестерень редуктора, який обертає головний вал з меншою

швидкістю і збільшеним моментом. У зрізних приводів на головному валу може знаходитися зрізний пристрій, що здійснює роз'єднання валу при зрізі стрілки, коли посилення зрізу досягає певного значення. Головний вал забезпечує переміщення двох робочих шиберів у взрізних приводів і одного – у невзрізних через замикаючий механізм. Після закінчення переводу стрілки, контакти автоперемикача під дією контрольних лінійок і механізму, що замикає, змінюють свій стан, і електродвигун відключається, а контрольне коло електроприводу замикається. Переміщенню гостряків у бік рамної рейки замикаючі механізми будь-яких конструкцій не перешкоджають, тому що в динамічному режимі вони не здатні утримувати колію. Це завдання вирішують колійні скріплення рамної рейки. Рівень безпеки руху поїздів залежить і від надійної роботи одного з найважливіших його вузлів – стрілочного електродвигуна. На залізницях застосовуються асинхронні та колекторні стрілочні електродвигуни. Недоліком колекторного електродвигуна постійного струму є трудомісткість технічного обслуговування колекторно-щіткового вузла. Вони повинні бути притерті до колектора, а той, у свою чергу, продороженим, максимальне зношування щіток не повинно перевищувати 50% початкової довжини. Між щітками і колектором, при тривалій експлуатації, можлива поява паразитних зазорів, що призводять до випрямлення контрольної напруги, що подається під час незакінченого переводу стрілки і вироблення сигналу помилкового контролю про положення гостряків. В результаті потрібно періодичне очищення та заміни щіток колектора. Все це підвищує експлуатаційні витрати. Асинхронні стрілочні електродвигуни також мають низку недоліків. Для забезпечення їхнього функціонування необхідне підведення напруги живлення змінного струму по трифазному колу. Значний пусковий струм призводить до обгорання контактів автоперемикача стрілочного електроприводу, зменшуючи його робочого ресурсу. Застосування нового електродвигуна може вирішити завдання підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат.

Безконтактний керований електродвигун призначений для роботи у складі стрілочних електроприводів постійного струму. У ньому повністю збережені настановно-приєднувальні розміри, що забезпечують повну взаємозамінність з двигунами МСП, які використовуються в даний час. Він може також встановлюватись у електроприводах серії ВСП. Перевагою такого електродвигуна є можливість виключення одного з ненадійних вузлів електроприводу – фрикційної муфти. Стабільність впливу на шибер і захист двигуна від перевантажень вирішується електронікою двигуна. У ДБУ пускові струми значно менші, ніж у двигунів, які застосовуються зараз, тому не обгорають контакти автоперемикача. Конструктивне виконання ДБУ практично виключає можливість пробою обмоток при кліматичних та механічних впливах, його застосування дозволить відмовитися від профілактичних та регулювальних робіт, що скоротить витрати на обслуговування. Крім того, можна виготовити двигуни з живленням від змінного струму та акумуляторних батарей. Конструкція дозволяє контролювати процес переміщення гостряків, використовуючи інформацію з датчиків положення ротора електродвигуна.

Для заміни колекторного двигуна постійного струму з послідовним з'єднанням обмоток, що застосовується в стрілочному електроприводі типу СП, було розроблено електродвигун ДБУ-120-300-1,2-160-Д25. Але після проходження випробувань було виявлено несумісність напівпровідникових елементів блоку керування ДБУ із типовою двопровідною схемою керування стрілкою. Дана схема є надійною, стійкою до перешкод, але разом з тим вона має ряд недоліків. Існує можливість появи помилкового контролю через утворення дуги між щіткою та колектором двигуна або через переплутування лінійних дротів. Також з цією схемою неможливе застосування гвинтових стрілочних електроприводів марки ВСП.

Для мінімізації цих недоліків було розроблено модернізована апаратура управління та контролю для стрілочного електроприводу (АУК) за двопровідною

схемою. Дана апаратура призначена для керування електроприводом як із реверсивним двигуном постійного струму МСП, так і з ДБУ. АУК комутує робоче коло та контрольне коло, виключаючи помилковий контроль положення стрілки, захищаючи електродвигун від розвороту у разі замикання жил кабелю з іншими колами або під дією ЕРС змінного струму при подвійних заземленнях у кабелі. Також вона виключає помилковий контроль через вентильний ефект на електродвигуні при випадковому переплутуванні лінійних проводів.

У складі апаратури є релейно-теристорний блок, який забезпечує гальванічний поділ контрольних та робочих кіл, захист від перешкод та небезпечних відмов кіл контролю при несанкціонованій трансформації напівпровідникових елементів внаслідок збоїв та виходу з ладу. Також він запобігає помилковому включенню двигуна від дії сторонніх ЕРС змінного струму та від попадання контрольної напруги на обмотки. В АУК входять основний та додатковий блоки комутації БКО та БКД, датчик положення ДП, реле ДБК типу ОМШ2-46 іл ОЛ2-88 та реле НОК типу НМШМ1-1000.

З усіх аварій, що сталися з вини пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки, 10% відмов припадає на частку віджимання гостряка. Ведуться роботи зі створення пристроїв контролю положення гостряка при проходженні за стрілкою рухомого складу за допомогою апаратури безконтактного автоматичного контролю стрілки (АБАКС), в основі яких – датчики фактичного положення гостряків до рамних рейок. Проте, АБАКС лише інформує про подію, що робить ймовірність небезпечної відмови досить високою. Для отримання повної інформації про стан електроприводу слід застосовувати в комплекті з кожним електроприводом індивідуального контрольно-діагностичного пристрою.

Діагностика передвідмовних станів на основі інформації про динаміку роботи стрілочного переводу також становить практичний інтерес. Використовуючи вбудований імпульсний датчик положення ротора, є можливість отримувати точну інформацію про переміщення, швидкість та прискорення переводу шибера. У

поєднанні з мікропроцесором, таким чином, додатково діагностуються режими функціонування електроприводу.

У Німеччині розроблена автоматизована система діагностики та контролю стану стрілочних переводів, хрестовин та кривих ділянок колії. У цій системі запропоновано спосіб діагностики та контролю стану стрілок, хрестовин та кривих ділянок колії під час руху поїзда з автоматичним фіксуванням отриманої інформації та її обробкою на ЕОМ. Усі контрольовані переводи обладнуються спеціальними датчиками.

Здійснювати автоматичний контроль справності та діагностику пошкоджень електродвигуна дозволяє використання комп'ютерних технологій для виявлення несправностей у стрілочних електроприводах постійного струму. Для цієї мети використовується спеціальний інтерфейс, що дозволяє короткочасно перевести в період переводу стрілки електродвигун у режим генератора та зняти за допомогою аналого-цифрового перетворювача генераторну характеристику. Така характеристика дозволяє визначати несправності двигуна з використанням розпізнавання образів.

2 АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ І МОЖЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

Надійність станційних та гіркових систем залізничної автоматики багато в чому залежить від надійності стрілочних переводів. У той же час стрілочні переводи експлуатуються в складних умовах, що спричиняє появу різних дефектів. Такі дефекти умовно можна поділити на два види: механічні та електричні. До першого виду відносять дефекти, пов'язані з фарбуванням металу головки гостряка або шийки рамної рейки [1]. Крім того, виявляються дефекти складових елементів стрілочних гарнітур. Це деформації контрольних та робочих тяг, зменшення через знос товщини прокладок між сережкою робочої тяги та гостряком, люфтові вироблення отворів сережки у місцях з'єднань контрольних тяг та інші. У зв'язку з підвищенням швидкостей поїздів актуального значення набуває розробка засобів технічної діагностики переводів, які забезпечують, що особливо важливо, постійний контроль зазору між гостряком і рамною рейкою (2...4 мм). Дефекти другого виду пов'язані з відмовами стрілочних електроприводів внаслідок втрати контакту в автоперемикачах, несправності щітково-колекторних вузлів електродвигуна та виходу з ладу блоку випрямного стрілочного (БВС) та ін. Усі дефекти ведуть до порушення нормальної роботи стрілочних переводів та, як наслідок, зриву графіка руху поїздів.

Існуючі профілактичні методи діагностики дефектних станів стрілочних переводів не повністю забезпечують вимоги експлуатації систем централізації. Проведений статистичний аналіз дефектів магістральних стрілочних переводів відбиває стан проблеми деяких великих станцій та сортувальних гірок Придніпровської ж. д. Виявилось, що за добової пропускнуої спроможності 90-100 пар поїздів середня частота переведення стрілки ЕЦ склала 120 разів, а на сортувальних гірках – 350 перемикань при переробній здатності 4 500 вагонів.

Характер та кількість відмов першого виду за один рік експлуатації стрілочних переводів наведено у табл. 1.2, а другого – у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Відмови стрілочних переводів через механічні дефекти

Причина відмови	Кількість відмов в системах, шт	
	ЕЦ	ГАЦ
Упорні болти упираються в гостряк	1	-
Відбій рамної рейки	-	1
Викривлення гостряка	1	1
Угон гостряка	4	-
Накат металу головки рамної рейки	19	4
Розширення та звуження колії у гостряків стрілки	11	5
Надмірна затяжка башмаків стрілки	5	2
Забруднення стрілки	10	2
Забруднення (відсутність) мастила черевиків стрілки	28	9
Напресування снігу або бруду між гостряком і рамною рейкою або в кореневому кріпленні	46	8

Аналіз також показав, що за механічними дефектами протягом року виходить з ладу кожна шоста станційна стрілка, а на гірці – практично кожна друга; найбільша кількість відмов у системах ЕЦ та ГАЦ відбувається через забруднення та напресування снігу; накату на рамній рейці, причому на гіркових переводах ця відмова проявляється втричі інтенсивніше. Число електричних дефектів гіркових стрілок в 3-4 рази вище магістральних. У системах ЕЦ у середньому протягом року виходить із ладу приблизно кожен восьмий електропривод, у ГАЦ – кожен третій. Враховуючи результати аналізу, були розроблені та запропоновані способи та технічні засоби дистанційної безперервної діагностики стрілочних переводів,

зокрема спосіб діагностики переводів, що дозволяє практично з високою достовірністю виявляти такі дефекти:

- люфт якірних підшипників та шарикопідшипників у підшипниковому вузлі;
- забруднення або відсутність мастила башмаків стрілки [2].

Це досягається тим, що при використанні згаданого способу засобами технічної діагностики отримують в аналоговій формі струм, що споживається електродвигуном, потім за допомогою комп'ютера проводять дискретний спектральний аналіз струму із застосуванням швидкого алгоритму перетворення Фур'є (БПФ).

Таблиця 2.2 – Відмови стрілочних переводів через електричні дефекти

Причина відмови	Кількість відмов в системах, шт	
	ЕЦ	ГАЦ
Слабке або (занадто сильне) ненормоване натискання щіток колектора	3	1
Повільне перекидання ножів (наявність в томи пружин автоперемикача)	7	2
Заклинювання шибера	8	1
Нестабільна робота фрикції	9	6
Злам колодок автоперемикача	18	-
Обрив секцій якірної обмотки або обмотки збудження	38	5
Втрата контролю положення стрілки під поїздом (погане регулювання контрольних тяг)	20	4

Алгоритм обчислення БПФ реалізований у відомих прикладних математичних пакетах (наприклад, Maple або MathCAD). Поява в спектрі гармоніки в діапазоні

10 ... 150 Гц з амплітудою, що змінюється, свідчить про наявність люфтів якірних шарикопідшипників і підшипників вузла. Забруднення (відсутність) мастила башмаків стрілки, пружинність гостряків виявляються при стрибкоподібній зміні швидкісної частоти. Швидкісна частота виникає в результаті неодночасного закорочення пластин колектора щіткою в процесі обертання якоря, що викликає зміну електричних параметрів у паралельних гілках обмотки якоря, а також є причиною виникнення частоти пропорційної швидкості обертання останнього. Запропоновано також спосіб діагностики електричних дефектів стрілочних електроприводів із двигунами постійного струму [3]. Спосіб дозволяє виявляти такі дефекти:

- обриви та коротке замикання секції якоря;
- розпаювання (обрив) та коротке замикання пластин колектора;
- люфт та кількість дефектних щіток електродвигуна;
- дефекти пускової апаратури;
- зниження рівня ізоляції та опору жил живильного кабелю.

При виявленні перерахованих вище дефектів проводять аналіз спектра кривої струму. З появою в спектрі певних гармонік за їх характеристиками роблять висновки про несправності електричних параметрів двигуна. Так, люфт щітки фіксується за появою в спектрі гармоніки швидкісної частоти, а кількість дефектних щіток визначається числом цих гармонік. Ушкодження в обмотках (КЗ) якоря супроводжуються появою спектра гармоніки кратної швидкісної частоти. Обриви в обмотці якоря викликають стрибкоподібну зміну амплітуд гармонік.

Розроблено пристрій контролю положення гостряків стрілочного переводу, що дозволяє виявляти згадані вище дефекти гарнітур як в стаціонарному, так і в динамічному режимах роботи стрілки [4, 5]. Це досягається тим, що пристрій своїм контрольним штоком через отвір у рамній рейці постійно підпирає гостряк стрілочного переводу за допомогою пружинного демпфера, який поглинає дефекти стрілочної гарнітури. Крім того, пристрій технічної діагностики в

постійному режимі здійснює передачу інформації про контрольовані параметри електроприводу по існуючій лінії контролю та управління автономно або по окремій лінії шляхом перетворення сигналу від датчика лінійних переміщень гостряка в цифровий код з подальшим його декодуванням і видачею оператору кількісної та якісної інформації [6]. Запропоновані способи та технічні засоби дистанційного безперервного контролю стрілочних переводів дозволять підвищити надійність станційних та гіркових систем залізничної автоматики, а також підвищити безпеку руху поїздів за рахунок своєчасного виявлення несправностей.

3 КРИТИЧНІ ВІДМОВИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

3.1 Основи поділу відмов з точки зору їх критичності

Аналіз останніх робіт з діагностики та прогнозування технічного стану елементів стрілочних машин дозволяє виділити два основних підходи: безпосереднє вимірювання параметрів роботи контрольованих критичних елементів, або непрямий контроль, в основному за рахунок аналізу кривих струму або потужності, споживаної електродвигуном під час передачі Існують також роботи з аналізу звукових коливань в стрілочних машинах з метою виявлення ознак та попередження пошкоджень його елементів, але такі дослідження ще не набули популярності [7].

Серед найбільш ілюстративних робіт першого підходу є робота, де для визначення найбільш інформативних та економічно обґрунтованих індикаторів деградації було використано п'ять різних типів датчиків (сили, струму, напруги, лінійної швидкості та відстані). Також було враховано економічну складову використання датчиків. Зокрема, існує думка, що датчик сили є найбільш інформативним, але його ціна в 5-10 разів вища, ніж у датчика струму або напруги.

До другого напрямку належать роботи, у яких розглядаються різні аспекти деградації точок та елементів приводу з використанням різного математичного апарату для аналізу кривої струму або потужності. Цей підхід наразі є найбільш популярним, але спеціалізовані системи, які вже використовують такі підходи до діагностики пошкоджень стрілочних переводів, не викликають ентузіазму в експлуатаційного персоналу.

Однак, попередження певних стрілочних відмов є важливим для певних умов експлуатації та завдань конкретного виду транспорту. Обґрунтування необхідності покращення прогнозування окремих видів відмов зазвичай зводиться до аналізу даних звітів про стан безпеки руху. Враховуючи національні особливості та

значний вплив людського фактору на процес обліку, визначення критичних компонентів пункту потребує іншого підходу, а саме - аналізу режимів та наслідків відмов.

Передбачено три можливі завдання, на вирішення яких спрямоване впровадження особливих підходів до технічного обслуговування. У кожному випадку, залежно від завдання, розробникам необхідно визначити, що є головною метою: надійність обслуговування (безпека транспортного потоку), доступність активів чи зменшення витрат на утримання.

Визначення критичних компонентів системи, а також вибір датчиків, методів оцінки ресурсу та методів прогнозування і планування технічного обслуговування залежать від вибору основної мети.

3.2 Математичні основи

Розрізняють технічні засоби: земляне полотно, верхня будова колії; штучні споруди; рухомий склад; пристрої зв'язку та сигналізації, а також пристрої електропостачання. Аналіз роботи підрозділів безпеки залізничного транспорту показує, що на частку цих складових припадає близько 75% дорожньо-транспортних пригод при роботі на ділянках залізниць України. Якщо розділити стрілочні відмови компонентів на відмови механічних складових та відмови компонентів електроприводу, то останні суттєво не впливають на загальну статистику [8, 9]. На всі елементи систем сигналізації та зв'язку припадає лише 1,25 % дорожньо-транспортних пригод, пов'язаних з апаратними відмовами, від їх загальної кількості. Але в механічній частині другим ключовим елементом є стрілочні переводи, які зношуються в 2-3 рази швидше, ніж рейки (див. рис. 3.1) і є основним місцем сходу рухомого складу з рейок.

Незважаючи на те, що існує облік відмов елементів залізничних пунктів, визначити фактичну частоту або ймовірність відмови того чи іншого елемента досить складно. Перш за все, обслуговування різних елементів стрілочної системи

залізниці закріплено за різними службами. Електродвигун стрілочного переводу обслуговує служба СЦБ, а інші компоненти - служба колії. По-друге, якість обліку відмов суттєво залежить від людського фактору. Тому для проведення аналізу була сформована група експертів, які займаються експлуатацією стрілочних переводів [10].

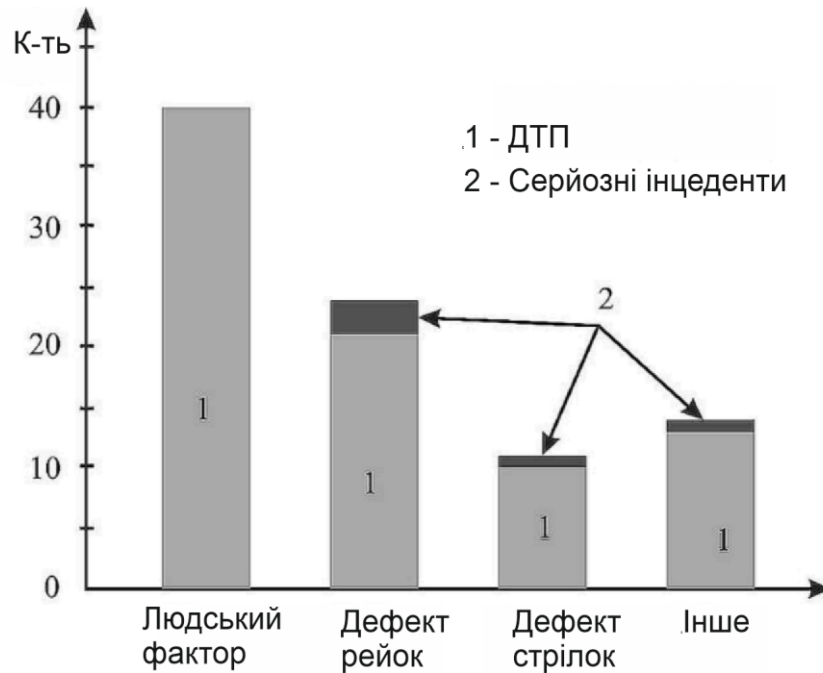


Рисунок 3.1 – Аналіз причин ДТП, допущених у колійному господарстві

Перелік можливих відмов згруповано у таблиці 1 на основі аналізу роботи підрозділів безпеки залізничного транспорту.

Коефіцієнт К1 оцінює частоту відмов, або оцінює ймовірність відмов певного типу. Коефіцієнт був запропонований експертами на основі таких понять: дуже низька ймовірність виникнення (1-2); низька (3-4); середня (5); висока (6-7); дуже висока (9-10). Коефіцієнт К2 використовується для оцінки ймовірності виникнення відмови або виявлення дефекту. При цьому використовуються такі поняття: дуже високий, причину відмови легко виявити (1-2); високий, причину відмови легко виявити (3-4); середній, причину відмови важко виявити (5); низький (6-7); дуже низький (8-9), причину відмови вкрай важко виявити (10) [11].

Одним з ключових факторів є коефіцієнт КЗ (тяжкість пошкодження або дефекту). Враховуючи необхідність оцінки впливу для трьох стратегій, коефіцієнт КЗ був встановлений окремо для оцінки безпеки (К31), для оцінки надійності транспортного процесу (К32) та для оцінки витрат на технічне обслуговування (К33). У всіх трьох випадках використовуються такі поняття: майже непомітний (1-2); малий (3-4); середній (5-6); значний (7-8); дуже значний (9-10).

Таблиця 3.1 – Оцінка частоти та критичності відмови

Відмова стрілочних систем	Оцінка експертів				
	K_1	K_2	K_{31}	K_{32}	K_{33}
1 Болти прилягають до язичкової рейки	2.48	2.76	3.04	5.74	4.27
2 Відскок (перекіс) рейки	5.52	5.28	7.42	6.48	5.34
3 Кривизна язичка рейки	2.57	6.23	5.21	6.90	8.12
4 Вік повзучості в точці перемикання	3.73	1.98	5.29	4.53	5.04
5 Перевірка на наявність раковини або головки на головці рейки підрейкової рейки	3.90	2.83	3.72	4.90	5.29
6 Розширення або звуження колії в районі язичкових рейок	5.89	3.91	6.41	7.16	4.38
7 Надмірне затягування болтів у п'ятковому блоці	4.89	5.95	3.18	4.79	2.04
8 Забруднені (відсутність мастила) крісла гірки	8.25	3.34	2.81	4.65	2.58
9 Забруднена стрілочна система	8.21	4.08	2.62	6.07	3.67
10 Скупчення спресованого снігу або бруду між язичковими рейками тарейками або в стрілочному куті	7.48	4.83	3.51	7.35	2.39
11 Слабке (або занадто сильне) ненормальне притискання щіток до комутатора	5.54	5.39	3.92	6.04	4.50
12 Повільне перемикання контактів виявлення (втомка металу пружин)	6.77	6.81	3.35	2.77	3.33
13 Заклинювання штанги метання	2.73	6.99	3.18	8.08	5.50
14 Нестабільна робота фрикційної муфти	3.72	6.24	2.80	4.53	4.57
15 Поломка елементів контактів виявлення	4.01	4.22	5.59	6.61	4.64
16 Обрив провідників якоря або обмотки збудження	4.62	5.00	2.43	5.35	5.15

Розрахунок критичності відмов проводився за формулою:

$$A_{ij} = \prod_{n=1}^3 K_{ij} \quad (3.1)$$

де A_{ij} – критичність виникнення i -ої відмови для j -ої стратегії; K_{ij} - значення експертної оцінки.

Критичність k -ї відмови з урахуванням її значущості в загальному списку відмов визначали за формулою:

$$A'_{ij} = \sum_{n=1}^3 K_{ij} \cdot k_j \quad (3.2)$$

де A_{ij} – критичність виникнення i -ї відмови для j -ї стратегії з урахуванням її значимості в загальному списку відмов; k_j – коефіцієнт значущості в загальному списку відмов.

$$k_j^p = \frac{K_{3j}^p}{\sum_{n=1}^p K_{3j}^p} \quad (3.3)$$

де p – порядковий номер відмови в загальному списку.

3.3 Аналіз та візуалізація результатів

В результаті розрахунків отримано дані у вигляді графіка (див. рис. 3.2) [12, 13]. Як видно з рисунку, з точки зору поєднання таких факторів, як частота відмов та складність їх ідентифікації, найбільш критичними будуть:

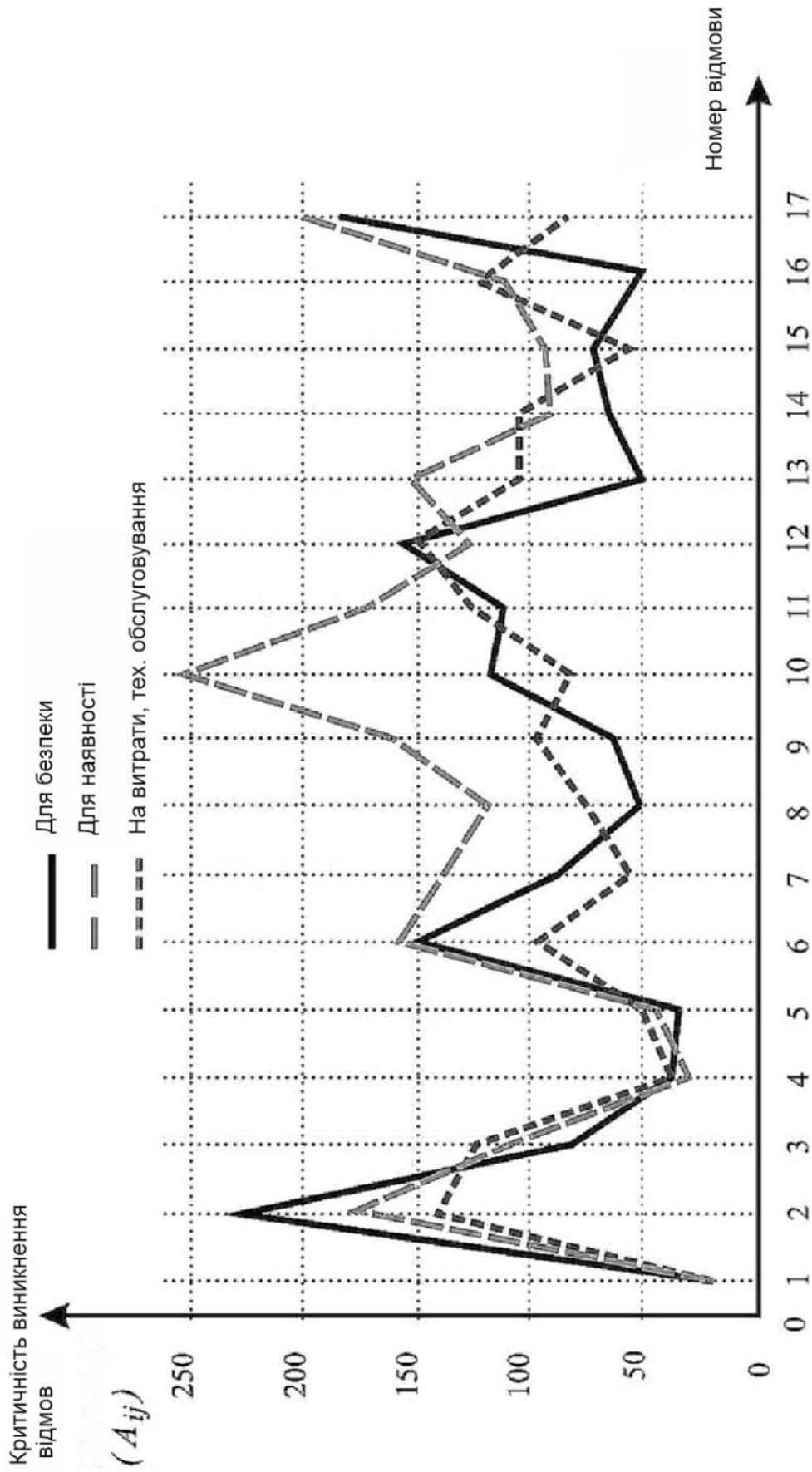


Рисунок 3.2 – Серйозність появи несправності.

- Для безпеки руху поїздів – відскок підкладочної рейки (2) та порушення ширини рейки в зоні гостряка (6), поступове погіршення роботи автоблокування через втому матеріалу пружин (12) та поганий контроль стрижнів детектора (17).

- За безперервність перевізного процесу – відскок інвентарної рейки (2) і порушення ширини рейки в зоні гостряка (6), неправильне регулювання корінних болтів (7), порушення роботи комутатора (11), вихід з ладу автоперемикача (12), блокування кидкової планки (14) і вихід з ладу тяг детектора (15).

- На матеріальні витрати на ремонт – відскок планки (2) та викривлення гостряка (3), порушення роботи комутатора (11) та несправність автоперемикача (12)

Показовою є оцінка критичності появи пошкодження відносно інших відмов (див. рис. 3.3). З графіка видно, що з точки зору стратегії забезпечення максимальної безпеки основна увага повинна бути зосереджена на контролі та запобіганні відскоку рейки (2), порушенню ширини рейки в зоні язичка (6), а також на запобіганні порушенню роботи стрижнів детектора (17). З точки зору забезпечення надійності перевізного процесу – до вищезазначених відмов слід додати накопичення спресованого снігу (10), комутатор (11) та перекидна планка (13). З точки зору матеріальних витрат на ремонт, має значення відскок рейки (2) і кривизна гостряка (3) [14-17].

3.4 Оцінка похибки

Невід'ємним питанням використання експертних методів є оцінка узгодженості їх думок [18]. У цьому випадку розбіжність думок експертів доцільно оцінити шляхом розрахунку середньоквадратичного відхилення результатів:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^n (A_j - A)^2 \quad (3.4)$$

де σ_j^2 – середнє квадратичне відхилення результатів відмов за причиною j ; m – кількість опитаних експертів; n – кількість причин відмов; A – експертна оцінка.

У результаті розрахунків встановлено, що середня різниця між результатами експертних оцінок у розрізі наслідків відмов склала 27%. На рис. 3.4 наведено діаграму розподілу реакції відхилення на відмови.

З рисунку видно, що найбільша узгодженість думок спостерігається для невдач 3, 4, 12, 13, 14. Найбільш суперечливі оцінки отримані для причин 1, 9, 15, 17. Найменший розкид оцінок 21% отримано при оцінці впливу відмов на стабільність транспортного процесу, що відображається швидкістю усунення пошкоджень. Найбільш неоднозначні оцінки 31,7% пов'язані з оцінкою матеріальних втрат на ліквідацію пошкодження [19].

Якщо оцінити визначені вище, найбільш критичних відмови (2, 3, 6, 10, 11, 13, 17), то середнє значення становитиме 20% при оцінці наслідків для безпеки та стабільності транспортного процесу, а 28% пов'язані з матеріальними витратами.

3.5 Діагностика та прогнозування відмов

Існує два основні підходи до діагностування елементів стрілочної машини. Бюджетним варіантом діагностики є аналіз кривої струму різними методами, але, більш інформативним визнають вимірювання зусилля, що передається від стрілочної машини до гостряків.

На такі висновки наштовхують результати роботи, аналіз робіт за темою та математичне моделювання роботи стрілочної машини на основі моделі. Аналіз результатів, представлених вище, показує, що найбільш критичними відмовами стрілочного переводу є відмови його механічних складових. Плавність руху гостряків на фланцях є індикатором працездатності пристрою.

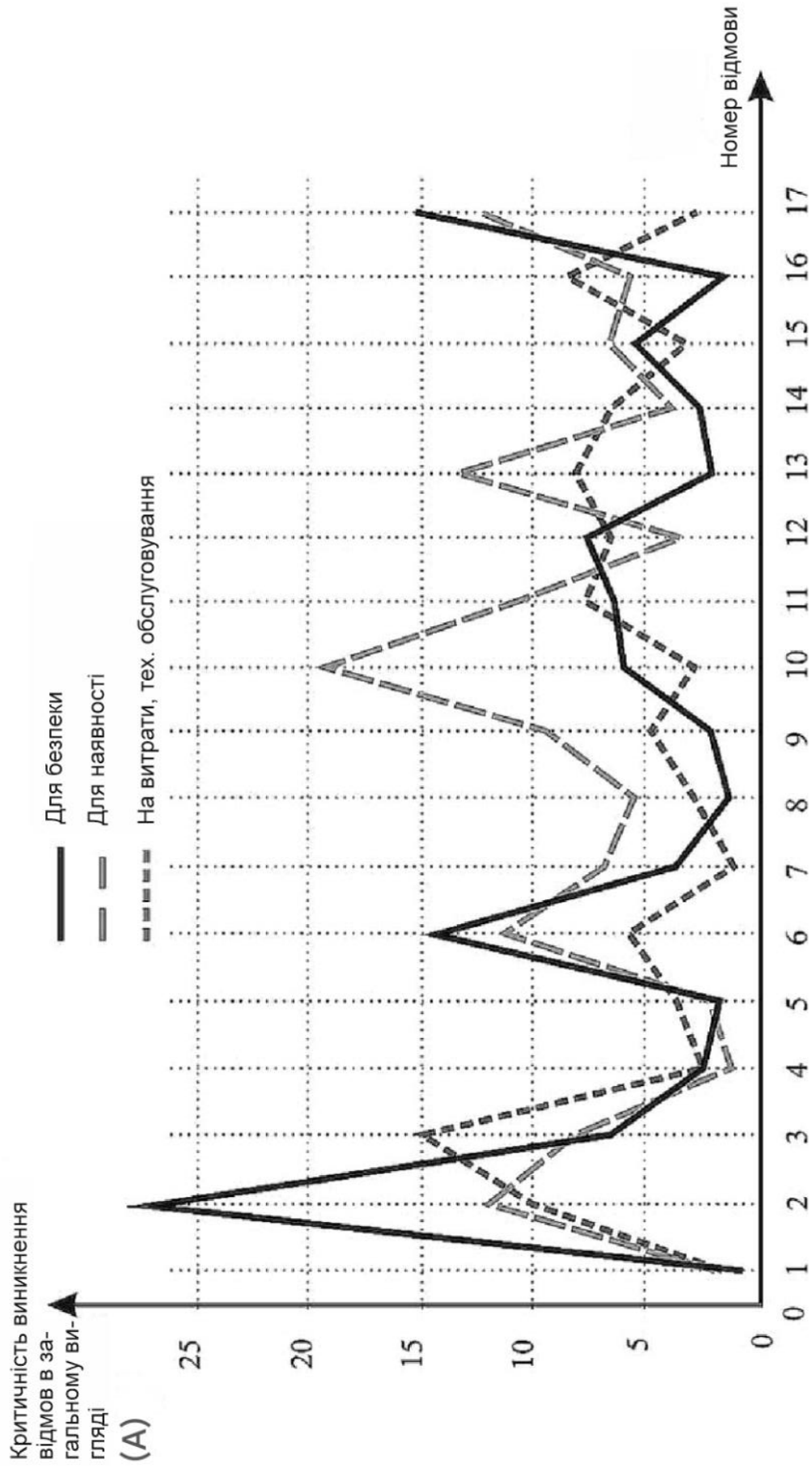


Рисунок 3.3 – Критичність виникнення відмови за значущістю.

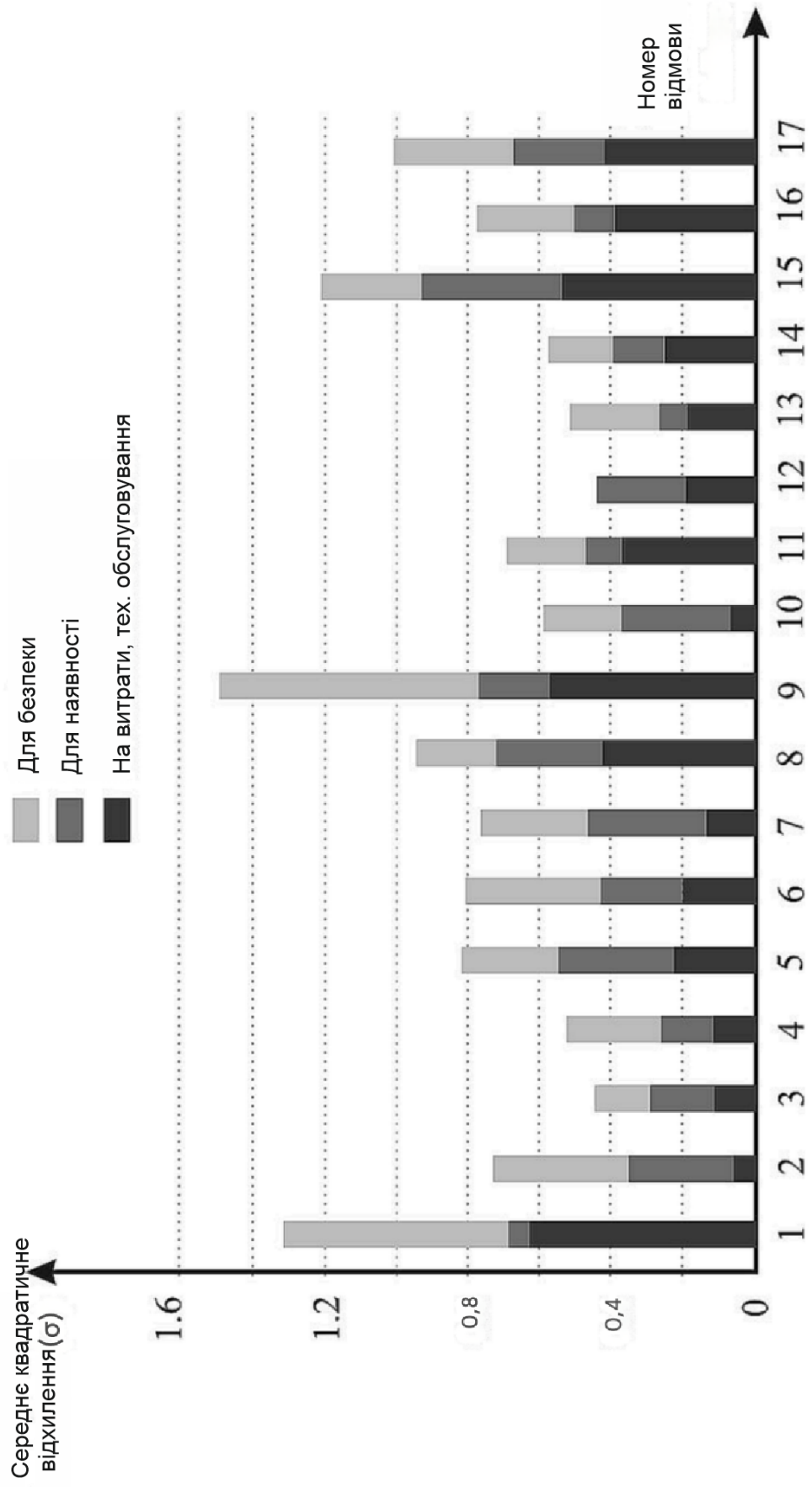


Рисунок 3.4 – Розподіл розбіжностей у відповідях експертів за невдачі

Протягом останніх 10 років основна увага дослідників зосереджена на визначенні ознак відхилення від нормальних, для конкретної точки, значень часових та амплітудних параметрів кривих струму або потужності. Поєднання та аналіз таких робіт надихнуло на моделювання різних режимів перемикачів, що дозволило змоделювати криві струму приводу стрілочної машини, яка є найбільш поширеною на ділянці колії 1520.

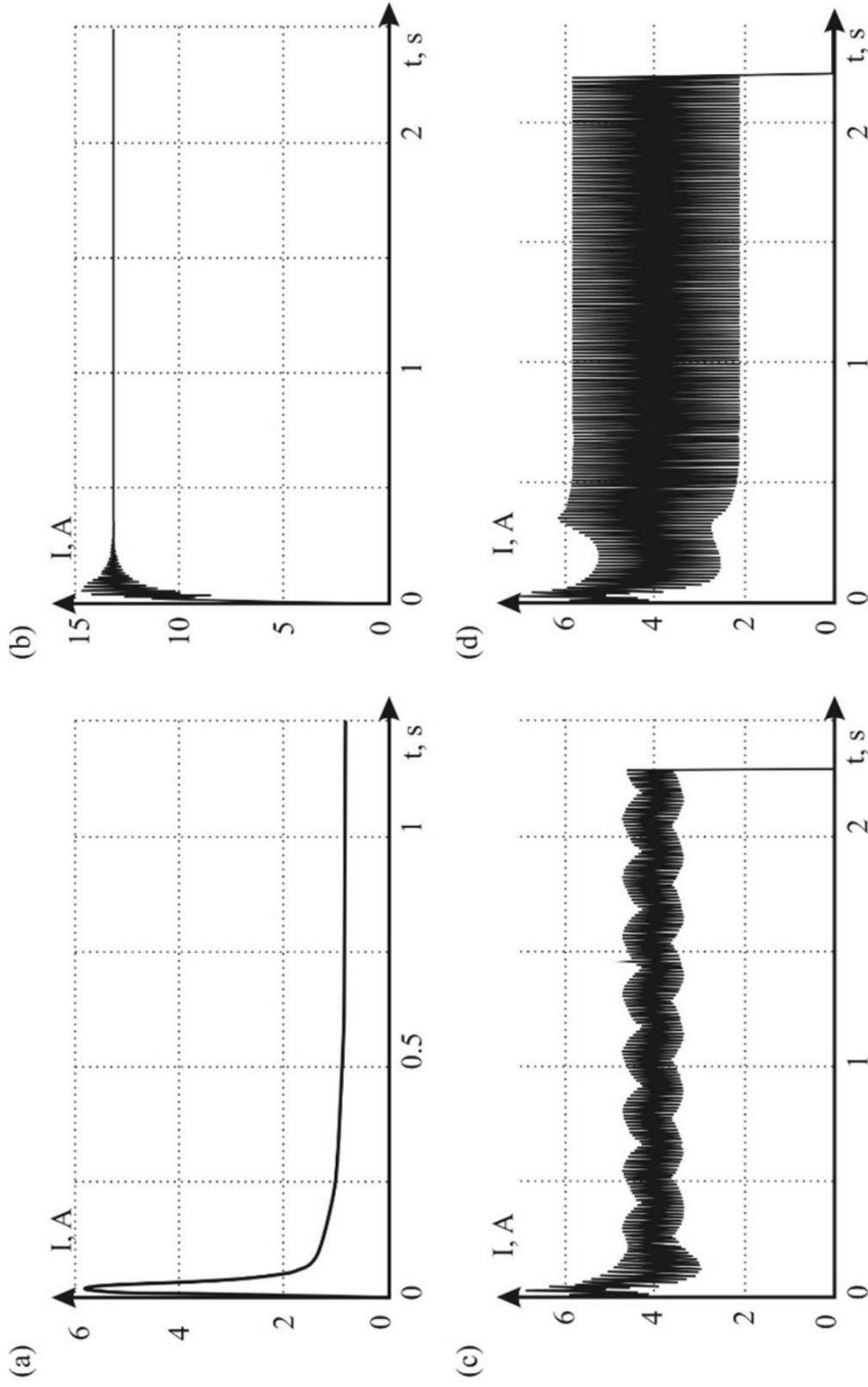
Отримані криві добре відображають такі пошкодження, як забруднення поверхні перемикача, заклинювання перекидної планки, фрикційні вібрації механічних компонентів, які часто спричиняють поломку рейок, тощо (див. рис. 3.5).

Модель описує тримасову електромеханічну систему, що дозволяє розглядати рух стрілочних гостряків окремо і враховувати їх взаємний вплив.

На рис. 3.5а показано характер зміни струму при нормальному русі стрілки. Рисунок 3.5b відповідає наявності фрикційних флуктуацій однакової природи для обох гостряків. Якщо опір руху для гостряків неоднаковий, то флуктуації суттєво зростають (див. рис. 3.5c). Інтерпретація кривих на рисунку 3.5b і 3.5c може бути досить широкою, така крива характерна для забрудненої поверхні перемикачів, або погано змащених фланців, неправильного регулювання елементів і т.д. Більш точно інтерпретується крива на рисунку 3.5d, яка відповідає прихопленню шибера. Після стрибка струму протягом перших 200 мс система переходить на новий режим роботи на фрикційному пристрої [20].

У всіх цих випадках аналіз кривої струму виходить за межі лише часового або амплітудного аналізу, але достатньою мірою відображає розвиток найбільш критичних відмов вимикача.

Поєднання математичного моделювання та накопиченої статистики кривих струму реальних стрілочних двигунів дозволяє значно підвищити ймовірність прогнозування розвитку пошкоджень.



а – у нормальному випадку; б – у випадку фрикційних коливань однакової природи для обох гостряків; с – у випадку неоднакової природи; д – у випадку заклинювання шибера

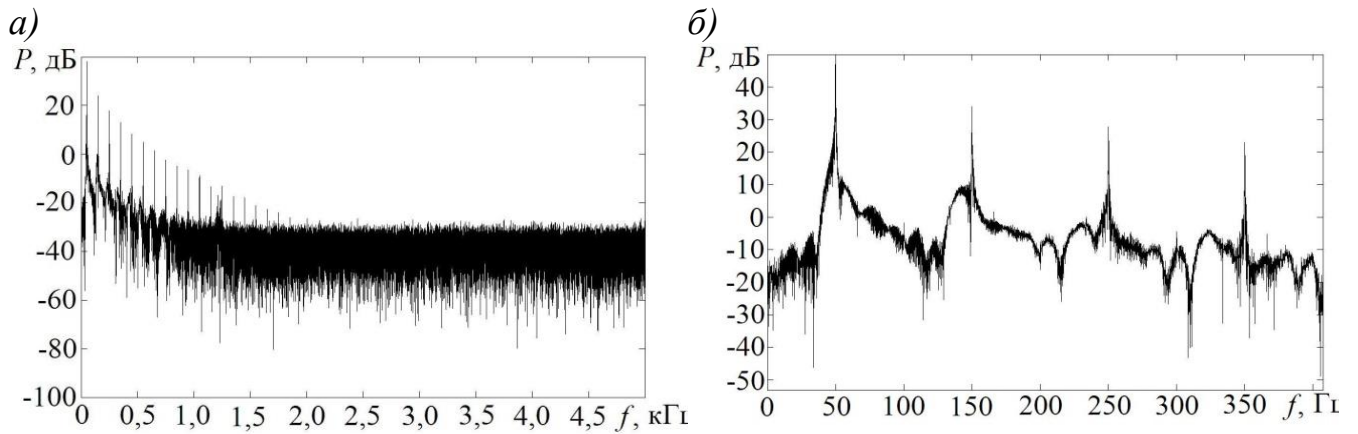
Рисунок 3.5 – Діаграми струму двигуна

З часової характеристики, можна встановити три найважливіших параметра: характер зміни кривої струму, величину струму переводу і його тривалість. Часову залежність кривої струму переведення стрілки стрілочним електроприводом змінного струму можна розбити на дві ділянки: пуск двигуна в хід з подоланням інерційності системи і розмиканням стрілки, власне перевід гостряків стрілки і доведення гостряків до протилежної рамної рейки з замиканням гостряків [21].

На першій ділянці спостерігається невеликий сплеск струму, відповідний перекиданню контактів ППС (пускового поляризованого стрілочного) і значне короткочасне збільшення струму, що є ознакою рушання вала двигуна з місця зі зрушенням з місця всіх передавальних ланок. Струм при цьому досягає значень 3,5 А. Наступну ділянку характеризує рух механізмів приводу з приведенням у рух гостряків і їх переміщенням з незмінним значенням струму 1,9 А. На завершальному етапі переведення стрілки, коли відбувається підведення гостряка до рамної рейки, після замикання стрілки спостерігається залишкове обертаюче магнітне поле в статорі двигуна [22].

З зображення спектра струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі справної одиночної стрілки (рис. 3.6, *а*) видно, що вагомими в спектрі сигналу є низькі частоти в діапазоні від 0 до 2 кГц. Оскільки вони є періодичними, то візьмемо для зручності і наочності лише перші з них. При розгляді спектра струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі справної одиночної стрілки на низьких частотах (рис. 3.6, *б*) легко визначити, що найбільше значення має частота живильної мережі, а в сигналі присутні гармоніки кратні в непарне число раз частоті живильного струму.

Для визначення правильності регулювання натискання тарілчастих пружин можливо скористуватися характеристикою струму при роботі приводу на фрикцію (рис. 3.7). Дослідження показали, що в даному режимі роботи струм підвищується зі значення 1,9 А до 2,25 А, що відповідає нормальному регулюванню струму роботи на фрикцію.



а) в широкому діапазоні частот; б) на низьких частотах

Рисунок 3.6 – Спектр струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі справної одиночної стрілки

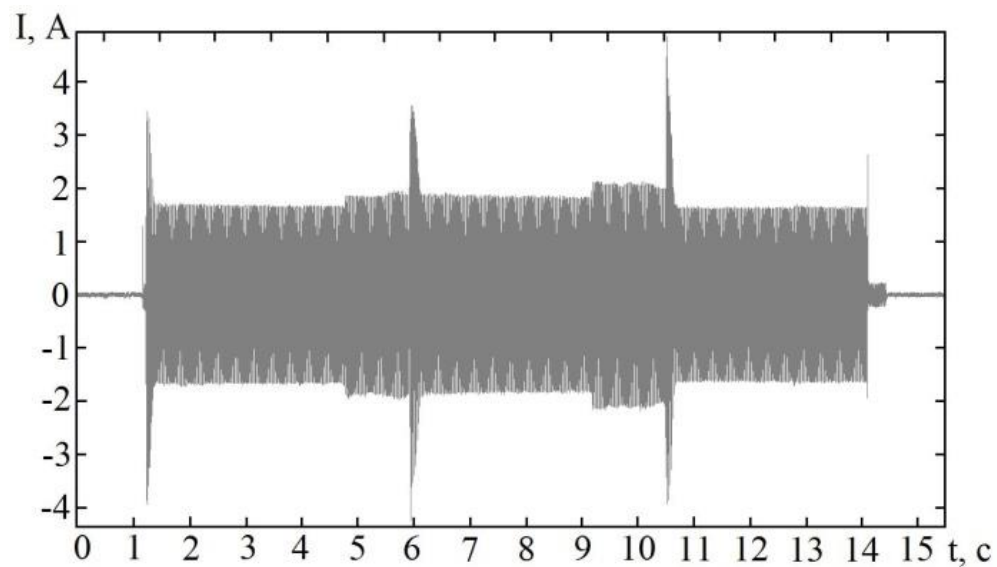
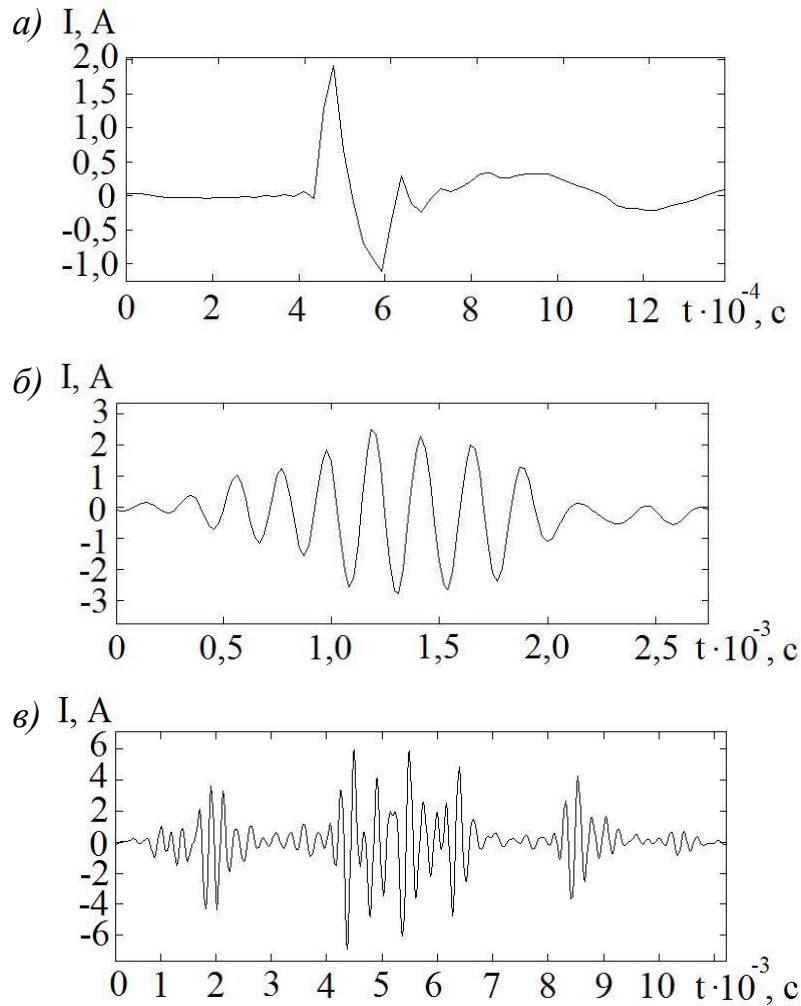


Рисунок 3.7 – Струм в колі живлення електропривода при роботі двигуна на фракцію

Особливу увагу заслуговують криві струму, за якими можна визначати на початкових стадіях відхилення від нормальної роботи одного з самих ненадійних вузлів стрілочного переводу – автоперемикача (рис. 3.8).



а) справний; б) послаблення пружин; в) послаблення контактних пластин і пружин

Рисунок 3.8 – Струм замикання автоперемикача

Автоперемикач, який має найбільш правильне регулювання встановлених колодочок, контактних пластин і пружин перемикаючих важелів має найменший час перемикання, який дорівнює 0,2 мс, з найменшою амплітудою перехідного значення струму зі величиною до 1,8 А (рис. 3.8, а). Внаслідок розрегулювання і виходу з ладу цих складових частин час і абсолютне значення струму в зоні контакту будуть збільшуватися (рис. 3.8, б, в). Для автоперемикача з поганим закріпленням контактної колодки і присутності люфту характерним є збільшення тривалості перехідного процесу перемикання контактів до 2,5 мс і більше та

амплітудного значення перехідного струму до 2,5 А (рис. 3.8, б). При розбитті контактної колодки і не забезпеченні надійного притискання контактних поверхонь робочих пластин час протікання перехідного процесу перемикавання триває 10 мс зі сплесками струму амплітудою 5 А (рис. 3.8, в).

Були проведені також вимірювання на стрілочному переводі, відновленому після розрізу стрілки з подальшим сходом з рейок локомотива і перших двох вагонів. Серед властивих несправностей, викликаних розрізом стрілки, додався ще вигнутий гостряк, який спирався на другий гостряк через з'єднувальну тягу і переводився в підвішеному стані, що зменшувало опір руху стрілки при переводі і при вимірах відображено зменшенням величини струму в середині переводу (рис. 3.9).

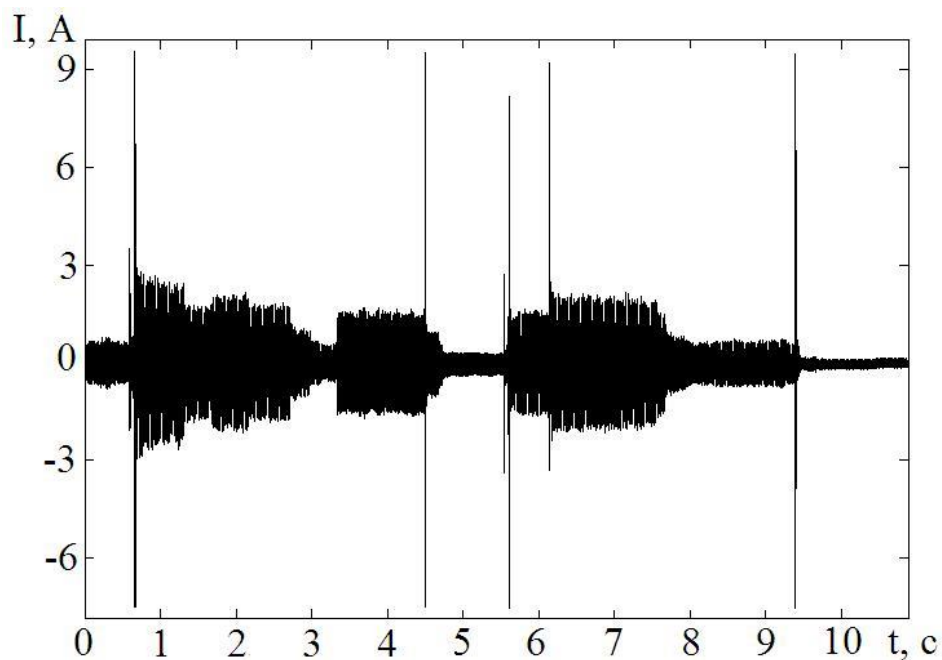


Рисунок 3.9 – Струмові криві переводу стрілки з вигином гарнітури

Досліди проводилися під час виконання відновлюваних робіт на стрілочному переводі. Запис сигналу здійснювався при декількох переведеннях стрілки на різних етапах її відновлення, що дозволило отримати, зберегти та проаналізувати форми струмових кривих для різних видів механічних пошкоджень, викликаних

деформацією вузлів стрілки. Кожен з вимірів має власну діагностичну ознаку того чи іншого дефекту, який може виникнути не лише під час аварійних ситуацій, а й при щоденній експлуатації в умовах, які відповідають нормам утримання та обслуговування об'єктів залізничного господарства, внаслідок підмиву залізничного полотна, псування шпал, зношеності верхньої будови колії, прикладенні понаднормового навантаження рухомим складом, через збільшену швидкість руху потягів, вироблень, втомних тріщин і деформації тощо [23].

Розглянемо вид несправності стрілочного переводу, якому відповідає вигин його гарнітури таким чином, що не дозволяє йому нормально виконувати переміщення гостряків відповідно до вимог правил технічної експлуатації, а змушує здійснювати їх переміщення з упором на башмаки лише одним гостряком. При цьому інший гостряк не має точки опору на власні подушки, а через жорстке кріплення з протилежним гостряком піднімається на певну висоту над ними. На даному стрілочному переводі гостряк, що опирався на башмаки прилягав до рамної рейки по відхиленню, а гостряк, що не опирався на башмаки знаходився зі сторони рамної рейки по прямому ходу. Привід встановлено зі сторони гострого кута стрілки. Такий вигин спричиняє неоднорідність навантаження двигуна стрілочного електропривода при переведенні з одного положення в інше. Дана різниця добре була помітна при переведенні стрілки в «мінус», значення струму в колі електродвигуна якої перевищує значення струму при переведенні в «плюс», оскільки стрілка по різному опирається зусиллю, прикладеному з боку електропривода (рис. 3.9). При виконанні вимірювань спочатку було виконано переведення стрілки в «мінусове» положення, а потім в «плюсове». При переведенні в «мінусове» положення електродвигуну необхідно було розвинути більшу потужність для дотиснення всякого гостряка до рамної рейки, що супроводжувалося значним збільшенням струму у колі електродвигуна наприкінці переводу з 1,4 А до 2,3 А. На противагу цьому, при переведенні стрілки в плюсове

положення збільшення струму наприкінці переводу не спостерігалось і залишалось на рівні 1,6 А.

Перша ділянка кривої струму характеризується пуском двигуна в хід і подоланням люфтів і зазорів в кріпильних елементах. На другій ділянці спостерігається підвищене значення струму в колі електродвигуна внаслідок збільшеного опору руху вирівняних деталей, що втратили міцність через вигини. Третя ділянка кривої струму свідчить про припинення лінійного пересування гостряків і ілюструє процес протікання замикання стрілки з притисканням підігнутого гостряка.

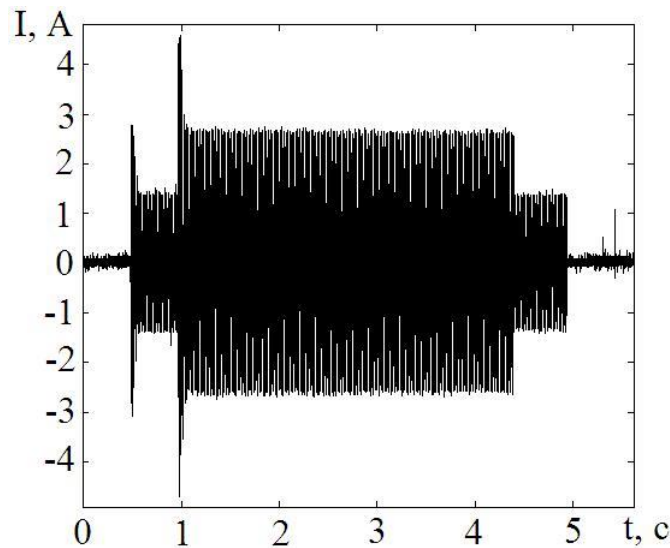


Рисунок 3.10 – Струм переведення стрілки засипаної сипучими матеріалами

При засипанні стрілочного переводу сипучими матеріалами струм у колі стрілочного електродвигуна змінюється протягом переводу в залежності від з опору руху гострякам стрілки, який вони зустрічають при переведенні з одного положення в інше (рис. 3.10). На початку руху, коли стрілочний перевід починає відмикатися, часова залежність не має істотних відмінностей від переводу стрілки у справному стані. Потім починають свій рух гостряки, які пересуваються по засипаній ділянці і викликають збільшення навантаження на валу, що призведе до збільшення струму з 1,8 А до 2,6 А.

Струм в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з упором кореня гостряка і/або відбоєм рамної рейки (рис. 3.11) аналогічний розглянутому раніше випадку для справної стрілки лише на першій ділянці часової залежності. В кінці другої ділянки струмової кривої спостерігається збільшення струму в колі електродвигуна з 2,1 А до 2,5 А, яке є наслідком збільшення опору руху гостряків стрілки через упор кореня дальнього гостряка в рейку, що лежить за ним, і/або відбій рамної рейки. На подолання додаткової сили, що виникла, електродвигун розвиває більшу потужність, що викликає збільшення струму в робочому колі.

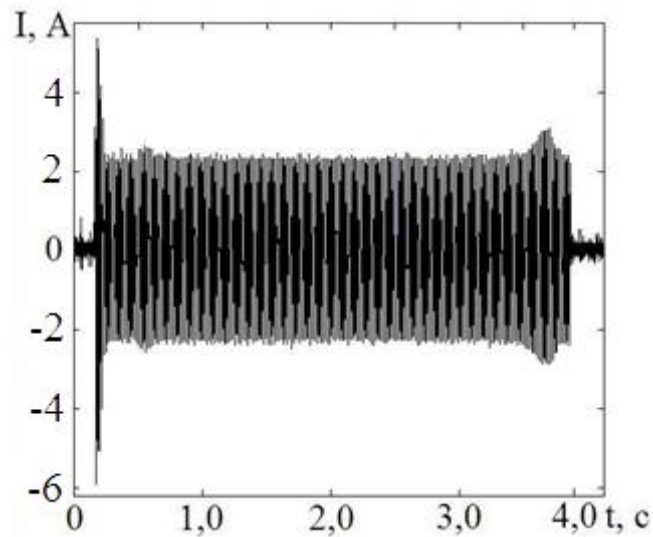
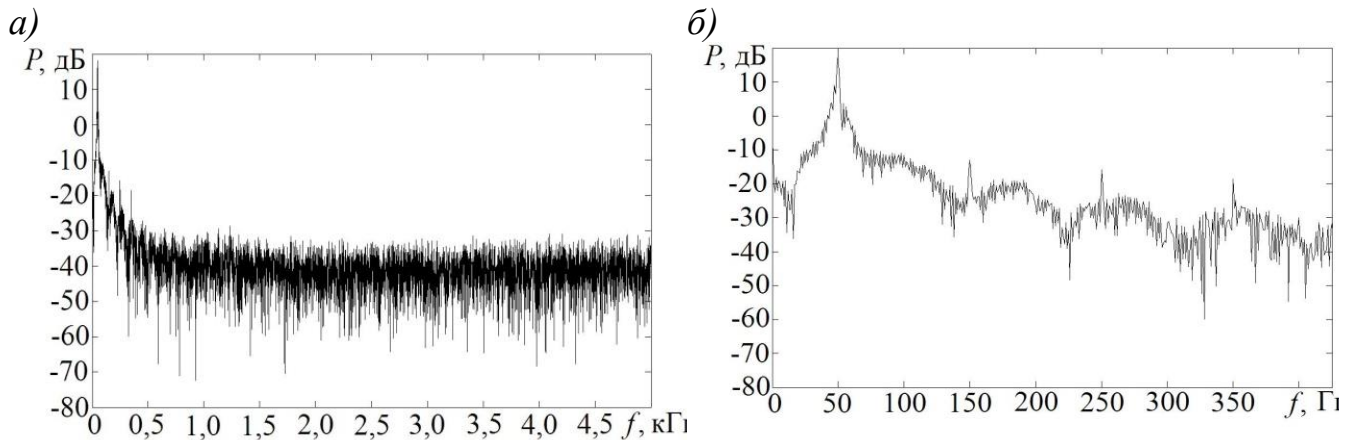


Рисунок 3.11 – Струм в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з упором кореня гостряка і/або віджимом рамної рейки

Оскільки упор кореня гостряка впливає тільки на амплітудне значення струму в робочому колі електродвигуна, то його можна зафіксувати тільки в часовій області. Спектр же струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з упором кореня гостряка (рис. 3.12, а) практично не відрізняється від спектру сигналу справної стрілки, оскільки містить

весь частотний спектр на тому ж рівні, який характерний для спектра сигналу справної стрілки.

У спектрі струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з упором кореня гостряка і/або відбоєм рамної рейки на низьких частотах (рис. 3.12, б) також спостерігається подібність характеру спектру струму справної стрілки.



а) в широкому діапазоні частот; б) на низьких частотах.

Рисунок 3.12 – Спектр струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з упором кореня гостряка

Отже, виявити упор кореня гостряка стрілки і/або відбій рамної рейки можна за допомогою аналізу часової залежності струму переводу, а за допомогою спектрального аналізу неможливо.

На стрілочних переводах після проведення вимірювань кривих струму нормального переводу штучно створювалось порушення вимог до технічного утримання стрілочних переводів і вносився надмірний люфт в шарнірних з'єднаннях шибера з робочою тягою. Люфт у вузлі Гука досягав значень понад 1,5 мм, хоч за нормативним значенням не має перевищувати 0,5 мм. У зв'язку з появою люфтів у вузлах кріплення збільшився час переведення стрілки на 0,5 с з нормативних 4,5 с та форма перевідної кривої, значення якої в середині переводу зменшувалося з 1,9 А до 1,4 А (рис. 3.13).

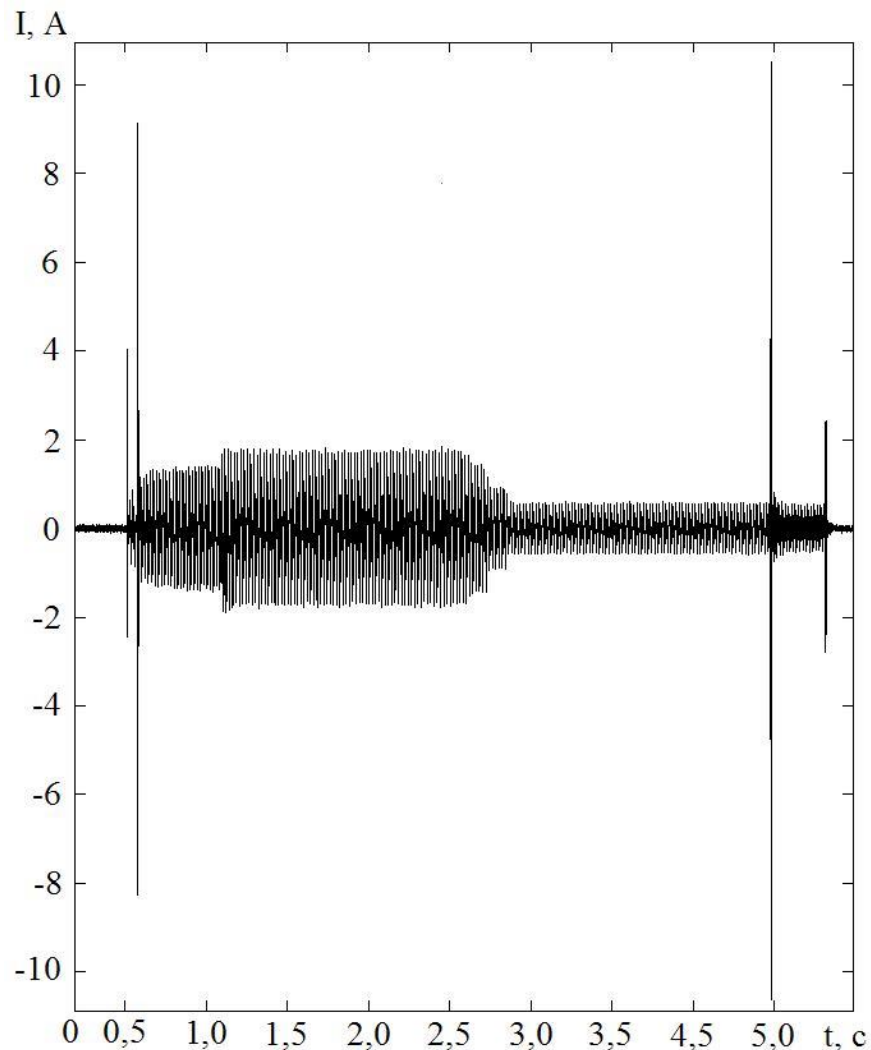
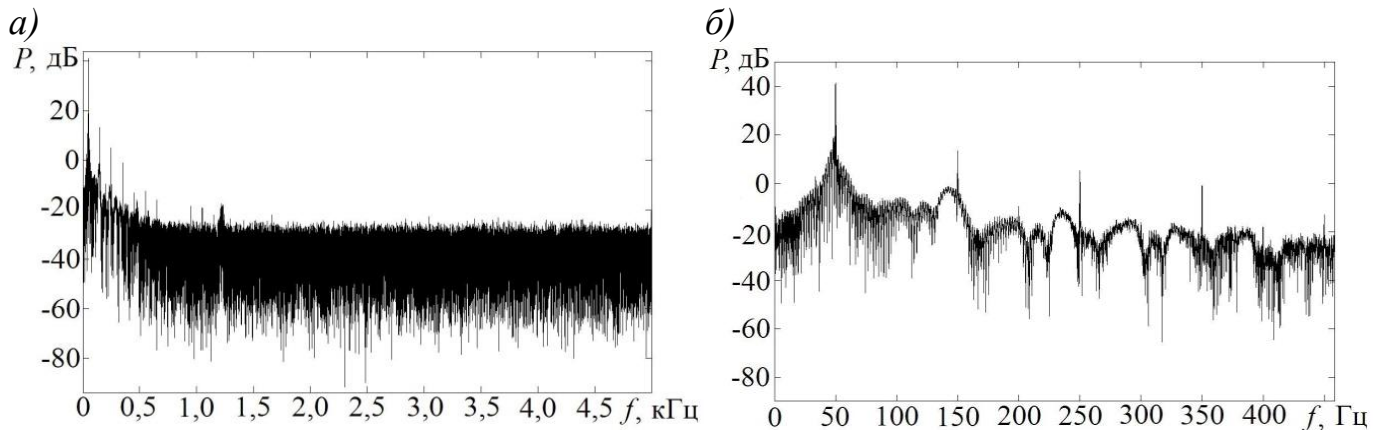


Рисунок 3.13 – Струм в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з люфтом в шарнірних з'єднаннях

За часом протікання струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки (рис. 3.13) можна ідентифікувати люфт в шарнірних з'єднаннях робочої тяги за збільшеною тривалістю переведення стрілки, яка значно перевищує аналогічний показник справної стрілки.

Перша ділянка кривої струму характеризується пуском двигуна в хід і подоланням люфтів і зазорів в кріпильних елементах. На другій ділянці спостерігається підвищене значення струму в колі електродвигуна внаслідок збільшеного опору руху через неправильне регулювання кріпильних вузлів. Третя

ділянка кривої струму свідчить про припинення лінійного пересування гостряків і ілюструє процес замикання стрілки з притисканням гостряка.



a) в широкому діапазоні частот; *б)* на низьких частотах.

Рисунок 3.14 – Спектр струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з люфтом в шарнірних з'єднаннях

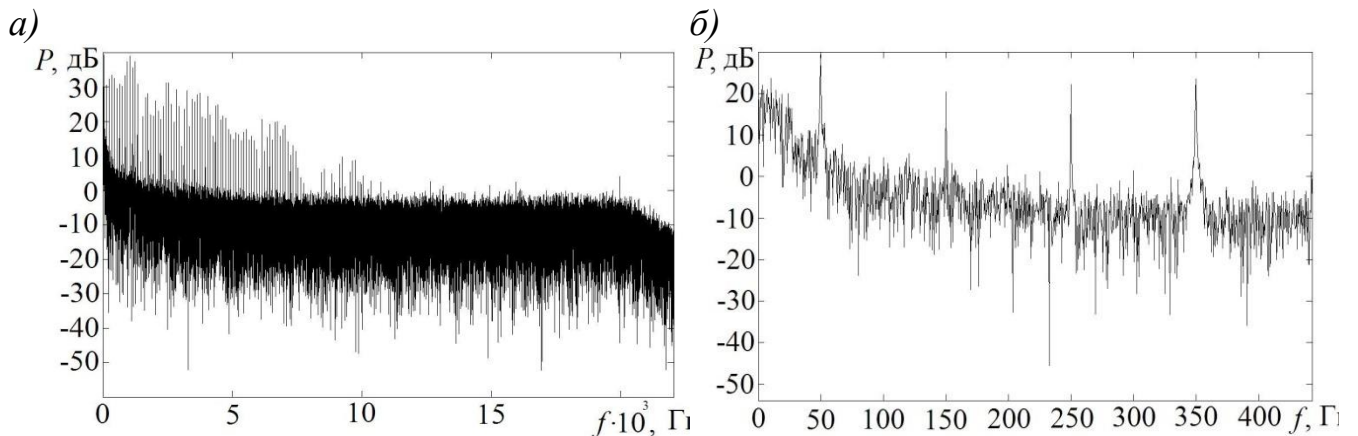
Примітним є той факт, що спектр струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з люфтом в шарнірних з'єднаннях (рис. 3.14, *a*) немає ніяких відмінностей від спектру струму переводу справної стрілки.

При більш детальному розгляді спектру струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з люфтом в шарнірних з'єднаннях на низьких частотах (рис. 3.14, *б*) також ніяких принципових відмінностей від спектру струму переводу справної стрілки встановлено не було.

Отже, за підсумками розгляду попередніх двох випадків можна зробити висновок, що несправності, які стосуються механічної частини стрілочного переводу, можна встановити за часовою характеристикою кривої струму переведення стрілки, а на підставі спектрального аналізу неможливо.

У свою чергу струм в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з несправним ротором (рис. 3.15) нічим не відрізняється від струму переводу справної стрілки, хоча переведення стрілки

супроводжується вібрацією і характерним високочастотним стуком всередині двигуна. При огляді двигуна було встановлено пошкодження стрижня ротора типу «біляча клітка» з присутністю намагніченого металевго пилю.



а) в широкому діапазоні частот; б) на низьких частотах.

Рисунок 3.15 – Спектр струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з несправним ротором

При вивченні ж спектра струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з несправним ротором (рис. 3.15) було встановлено, що якщо для спектра струму переведення стрілки в справному стані характерна наявність значущих частот в діапазоні від 0 до 2 кГц, то в даному випадку спостерігався спектр сигналу з присутністю частот в області значень від 0 до 8 кГц. Крім цього, спектр струму в робочому колі стрілочного електропривода змінного струму при переводі одиночної стрілки з несправним ротором (рис. 3.15, б) містив високу постійну складову, якої немає в спектрі струмової кривої переводу справної стрілки.

Таким чином, використовуючи метод комп'ютерного діагностування стрілочних переводів можна визначати такі несправності, які пов'язані як з механічною частиною стрілочного переводу, так і з електричною його частиною, контролюючи при цьому такі параметри як величину струму нормального

переводу і при роботі електродвигуна на фрикцію, тривалість переводу, правильність регулювання гарнітури і вузлів кріплення, стан електродвигуна.

Результати моделювання показують, що профілактику найбільш критичних відмов стрілочних машин типу СП з двигуном постійного струму доцільніше здійснювати бюджетними методами діагностики, а саме, аналізом кривої струму стрілочної машини. Можна зробити припущення про необхідність попередження не всіх, а найбільш критичних відмов стрілочних машин, що дозволить оптимізувати зусилля і фінансування робіт в цьому напрямку.

3.6 Висновок

Враховуючи необхідність уніфікації результатів дослідження, проведено аналіз критичних відмов для розгляду трьох основних стратегій: забезпечення максимальної безпеки; максимальної пропускну здатності та мінімального впливу на рух поїздів; мінімізації витрат на ліквідацію наслідків відмов.

В результаті, серед найбільш критичних відмов стрілочних переводів було відзначено розширення рейок, в тому числі через вихід з ладу рамних рейок, та коректну роботу контрольних лінійок. Крім того, відзначено перекіс гостряка, надійність механізму передачі передавального зусилля на гостряки (шибер), а також надійність роботи двигуна.

Найбільш прогресивні підходи до діагностики роботи стрілки передбачають використання додаткових датчиків (зокрема, датчика сили), або методів аналізу кривої струмопередачі. Математичне моделювання найбільш критичних відмов машини дозволило обґрунтувати доцільність використання методів аналізу кривої струму як більш раціональних. На основі математичного моделювання отримано специфічні ознаки пошкоджень, які можуть бути використані в методах, що передбачають навчання діагностичної моделі.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНОЗЕМНОГО ДОСВІДУ У ПИТАННІ ОЦІНКИ РІВНЯ ДЕГРАДАЦІЇ ТА ОНЛАЙН-ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВИ

4.1 Аналіз формування відмов з точки зору структурування утворення пошкоджень

Оцінка рівня деградації машини є одним із важливих питань, яке аналізує поширення несправності машини, щоб отримати відомості про приховані переходи стану працездатності або з необроблених даних (наприклад, батареї), або зі сконструйованих індикаторів працездатності, перш ніж запускати інструменти прогнозування. Таким чином, інформація може бути використана в розробці надійних прогностичних моделей у початковому виявленні відмов, щоб ініціювати прогнозування залишкового корисного ресурсу для складних систем (наприклад, залізничні стрілочні машини, візки високошвидкісних поїздів, вітряні турбіни, атомна енергетика заводи та літаки).

Для управління стрілочними переводами поїздів шляхом переміщення рейкових лопатей на відстань використовуються залізничні стрілочні системи, які складаються з розсувних плит, стрілочної машини, рейкових рейок, систем замикання тощо. Отже, точкова оцінка стану машини є дуже важливою для підвищення експлуатаційної надійності та безпеки пасажирів у залізничному транспорті. Загалом існують різні типи точкових машин, такі як гідравлічні, електромеханічні та пневматичні. Науковці запропонували інтегровану методологію виділення ознак, засновану на методах розкладу сингулярного значення і емпіричної декомпозиції моди, а також метрики відстані для виявлення несправностей електромеханічних точкових машин за допомогою сигналів потужності [24].

Наразі запропонована методологія систематичної оцінки працездатності для діагностики точкових несправностей машин, використовуючи дані моделювання

режимів відмов. Сигнал потужності був розділений на 7 сегментів з використанням параметрів швидкості двигуна, і з кожного сегмента були витягнуті статистичні характеристики для подальшого аналізу. За допомогою методів самоорганізації карт і аналізу головних компонентів можна успішно оцінити методологію оцінки рівня деградації точкової машини та початкового виявлення несправностей. Іншим підходом запропоновано методологію діагностики несправностей, використовуючи дискретну вейвлетну декомпозицію і класифікатор опорних векторних машин для електромеханічних точкових машин. Цей метод використовувався на етапах виділення та зменшення функцій до класифікації несправностей на основі класифікатора опорних векторних машин. Кластеризація середніх була використана для вибору найкращого типу і рівня декомпозиції під час вибору ознак і кроку зменшення. Після цього різні режими відмов були ефективно класифіковані за допомогою класифікатора на основі ядра з використанням функцій на основі. Існує методологія, заснована на тривалості стану, для прогнозування відмов точкових машин.

Точкову деградацію машини було змодельовано штучно за допомогою експоненціальної функції поширення відмови. Запропонована методологія дала кращі результати прогнозування порівняно з різними інструментами прогнозування. Модель прогнозування відмов на основі даних була запропонована для оцінки працездатності точкової машини за допомогою сигналів живлення отримані з випробувального стенду. Модель деградації точкової машини, яка є комбінацією лінійних і експоненціальних функцій, була побудована на основі часової області для прогнозування системи. Загальну методологію виявлення несправностей було представлено на основі підходу оцінки сегмента та статистики висновків. Автори витягли різні статистичні ознаки із сигналу постійного струму точкової машини та застосували об'єднання даних для побудови унікальної системи. Отримані дані далі використовувалися для виявлення несправностей шляхом оцінки сегмента.

Як підсумовано в попередньому абзаці, точкова оцінка працездатності машини є важливим і дуже складним завданням для підвищення надійності та безпеки залізничного транспорту. Це може бути пов'язано з недостатньою кількістю даних, недоступними режимами відмови, які розвиваються протягом тривалого періоду часу та нелінійною поведінкою деградації системи, що робить побудову тенденційних системних аналізаторів важким, якщо не неможливим. Пластини точкової машини можуть зазнавати різних станів деградації (тобто справного, середнього та важкого станів) протягом усього терміну служби до повної відмови. Щоб спрогнозувати майбутню деградацію пластин розсувних стільців, важливо виявити точку(и) зміни, коли машина переходить із справного в несправний стан. На практиці важливо відзначити, що може бути більше однієї точки зміни (див. рис. 4.1) через деякі фізичні явища. У цьому випадку кожен рівень деградації (Д1,2,3,4 на рис. 4.1) слід оцінювати (тобто тестувати критерії серйозності відмови) по-іншому, і прогнозування має запускатися, коли машина переходить у важкий стан працездатності.

Таким чином, необхідно належним чином оцінити рівні деградації машини, щоб виявити початкову помилку перед запуском алгоритму прогнозування.

4.2. Вилучення та вибір індикатора справності та оцінка рівня деградації на основі кластеризації

Вилучення НІ можна визначити як витяг корисної та важливої прихованої інформації з необроблених даних, яка вказує на зміни стану працездатності під час деградації системи. НІ на основі часової області, наприклад середньоквадратичне, ексцес-асиметрія, крест-фактор (crfactor), стандартне відхилення (stdev) і пік-пік (p2p) витягуються. Вибір НІ здійснюється в два етапи. НІ, які мають вище значення монотонності, ніж розраховане середнє значення вибірки, вибираються першими на кроці 1 (внутрішньокласовий аналіз). На кроці 2 (міжкласовий аналіз) матриця подібності будується з вибраних НІ з використанням евклідової відстані.

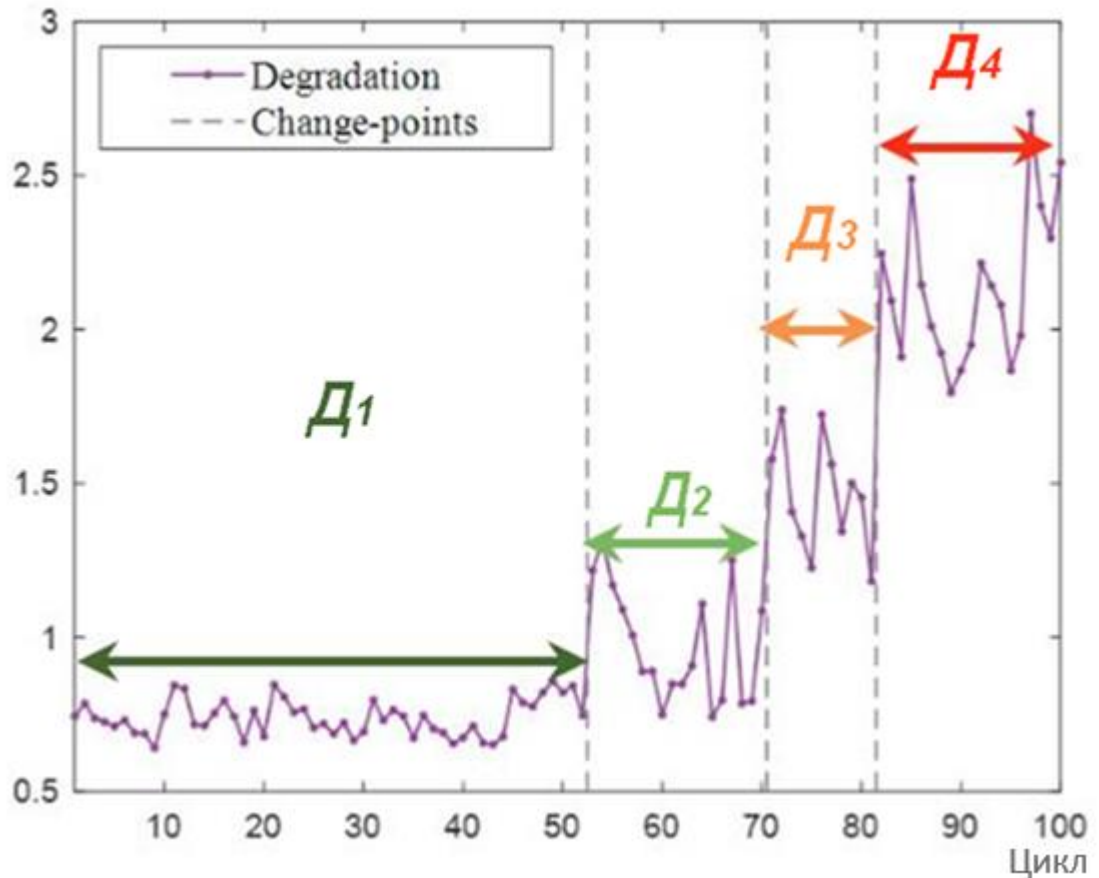


Рисунок 4.1 – Зміни працездатності машини

Потім із середнього значення матриці подібності вибирається найкращий НІ, який має мінімальне значення відстані. У внутрішньокласовому відборі вибираються найбільш модні НІ, а в міжкласовому відборі вибирається найбільш репрезентативний НІ серед модних НІ. Монотонність обчислюється за допомогою рівняння (4.1), а евклідова відстань обчислюється за допомогою рівняння (4.2). Матриця подібності ($simM$) будується, як зазначено в рівнянні (4.3). Найбільш типовий НІ вибирається за допомогою рівняння (4.4).

$$M_i = \left(\left| \frac{\#\frac{d}{dNI_i} > 0}{n-1} - \frac{\#\frac{d}{dNI_i} < 0}{n-1} \right| \right) \quad (4.1)$$

де M_i – значення монотонності для усіх НІ. Абсолютне значення різниці між числом додатних і від’ємних похідних. НІ з вищою монотонністю вказує на кращу деградацію зі збільшенням/зменшенням тенденції.

$$\text{dist}(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - q_i)^2} \quad (4.2)$$

де N є довжиною даних НІ p і q

$$\text{sim}M = \begin{bmatrix} \text{dist}(h_1 h_1) & \cdots & \text{dist}(h_1 h_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{dist}(h_M h_1) & \cdots & \text{dist}(h_M h_M) \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (4.3)$$

$$\text{bestHI} = \min(\mu(\text{sim}M)) \quad (4.4)$$

де $\text{dist}(h_1 h_M)$ – величина відстані між показниками справності h_1 і h_M з пулу даних із розміром μ і це середнє значення подібності.

Метод k -середніх неконтрольованого машинного навчання використовується MDA для виявлення точок зміни.

Мета – мінімізувати цільову функцію, виражену через:

$$J(\mu, u) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^C u_{k,j} \|x_j - \mu_k\|^2 \quad (4.5)$$

де $u_{k,j} \in \{0,1\}$ це значення членства точки даних до кластера

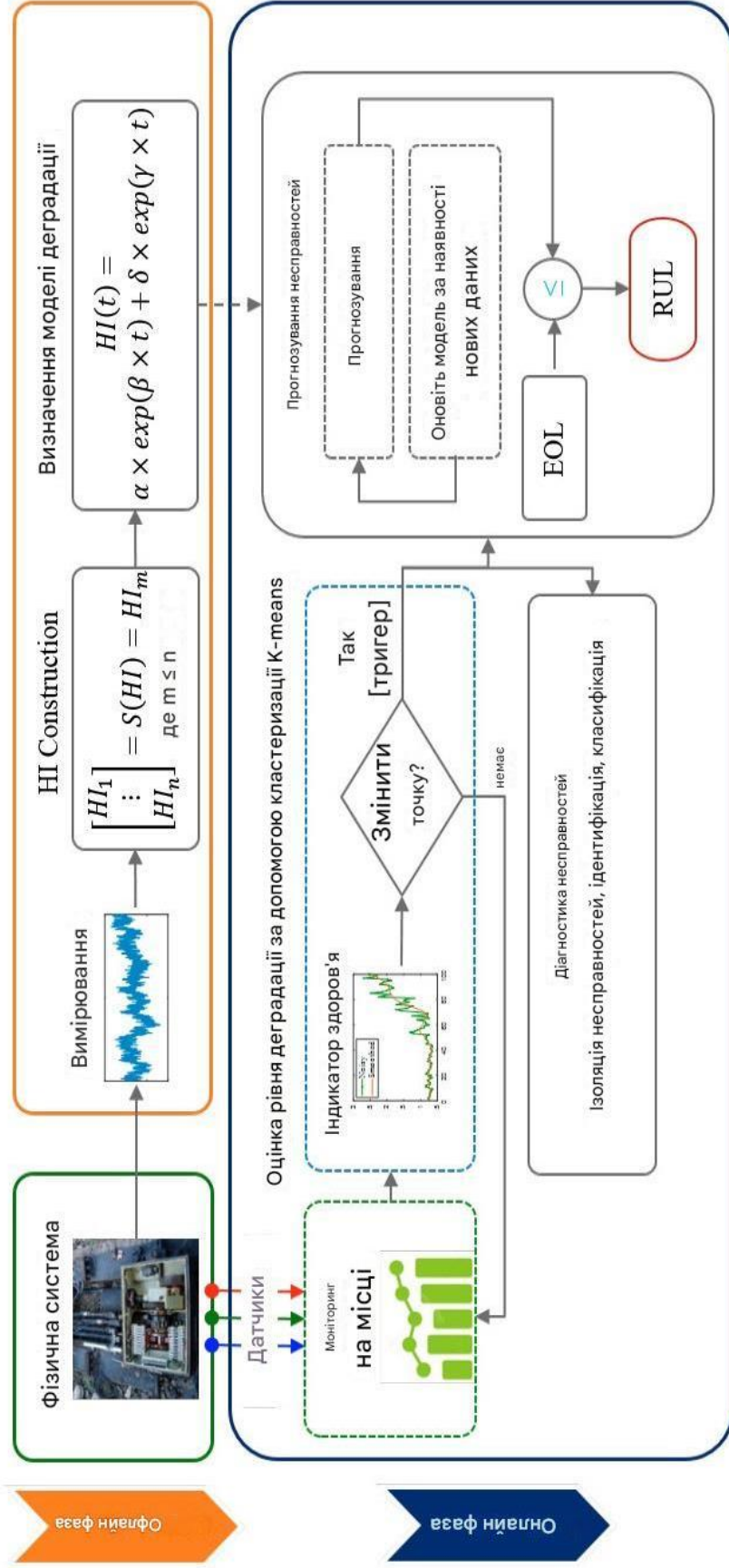
4.3 Експериментальна установка та збір даних

Запропонована методологія складається з офлайн та онлайн фаз. На етапі офлайн представлено побудову індикатора працездатності та визначення моделі деградації. Фаза онлайн включає виявлення точки зміни на основі кластеризації та етапи прогнозування RUL. Загальна схема запропонованої методики зображена на рисунку 2.2.

Оскільки стрілочні машини є високонадійними системами, деградація їхніх компонентів може зайняти тривалий період часу, що ускладнює прогнозування відмов. Щоб подолати цю проблему, деградація моделюється за допомогою процедури прискореного старіння на реальній системі [25].

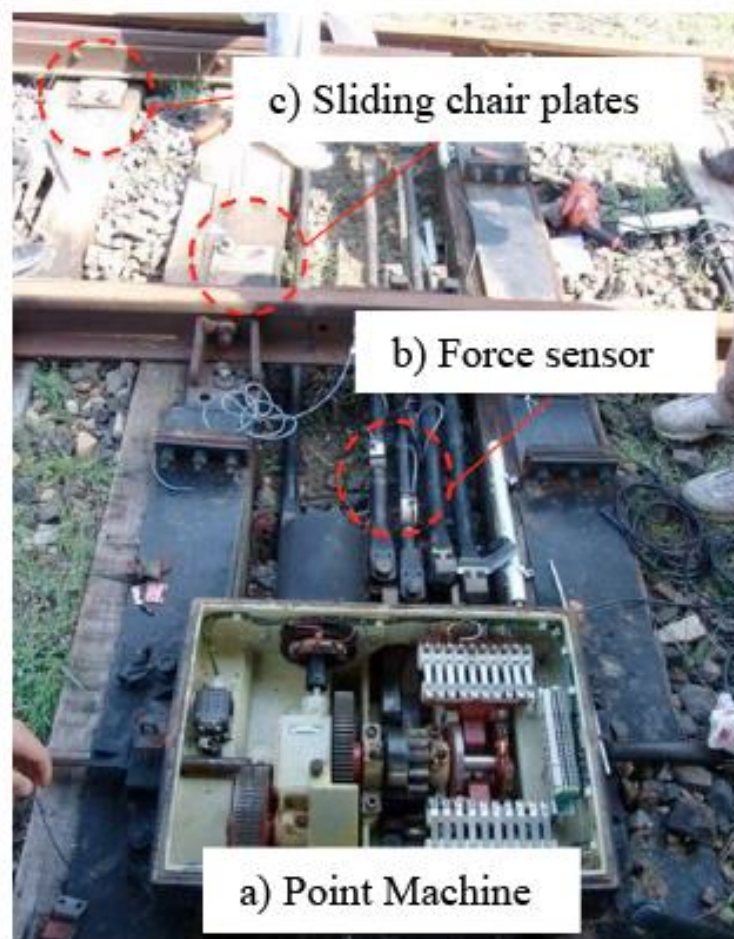
Пластини башмаків підтримують стрілочні машини для переміщення рейкових гостряків із нормального положення до зворотного та зі зворотного до нормального положень. Всього на системі стрілочного переводу було 12 змашених (тобто справних) башмаків. Перший несправний стан башмаків був створений шляхом забруднення найдальших 10ї, 11ї 12ї пластин. Другий несправний стан був отриманий через забруднення 9ї найдальшої пластини. Додавши нову забруднену пластину до несправної групи, було спричинено повну поломку стрілочної машини.

Існує 10 різних станів справності (10 зразків на стан справності), які були спричинені прискореним старінням. Сенсорні дані сили опору були розглянуті в цьому дослідженні завдяки хорошій властивості представлення деградації Електромеханічна стрілочна машина, встановлений датчик сили та плити башмаків, які досліджувалися в цьому експерименті, зображені на рисунку 4.3. Реальна система стрілочного переводу та моделювання деградації башмаків показано на рисунку 4.4. Час опору сили серії та один зразок із кожного справного та несправного станів деградації башмаків зображено на рисунку 4.5.



HI – індикатор працездатності, RUL – залишковий корисний ресурс, EOL – порогове значення кінця життєвого циклу

Рисунок 4.2 – Схема методики двоетапної оцінки рівня деградації та прогнозування відмов:



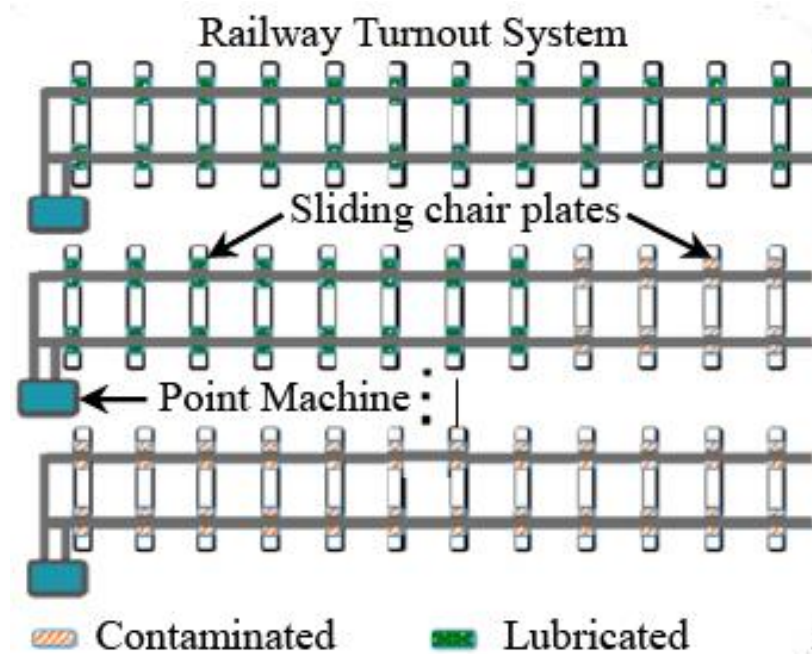
a) Point Machine – стрілочна машина; b) Force sensor – встановлений датчик сили; c) Sliding chair plates – башмаки

Рисунок 4.3 – Експеримент на діючій стрілці

4.4 Модель деградації для прогнозування відмов

Вимірювання сили опору точкової машини проходило через етап екстракції НІ, щоб виявити закономірності деградації башмаків. Перед обчисленням значень монотонності витягнуті НІ слід згладити. Витягнуті та згладжені НІ за допомогою ковзного середнього показані на рис. 6. Як показано на рис. 6, витягнуті описові статистичні дані дали різні шаблони погіршення, де деякі з них не корелюють із погіршенням башмаків.

Витягнуті НІ пройшли два кроки: внутрішньокласовий і міжкласовий вибір НІ для вибору найкращого НІ, що представляє поширення відмови башмаків. Розраховані значення монотонності заданих НІ показані на рис. 7, середньоквадратичне значення, стандартне відхилення і r_{2p} були обрані як найбільш модні індикатори з внутрішньокласового відбору та включені до міжкласового відбору для найкращого вибору НІ. Перед побудовою матриці подібності (рівняння (3)) вибрані НІ були нормалізовані між $[0,1]$. Розраховані значення міжкласової подібності для заданих НІ представлені в таблиці 4.1. На основі запропонованого методу вибору індикатора працездатності фільтра, $stdev$ було обрано як найкращий репрезентативний і найбільш підтримуваний НІ з мінімальною відстанню для деградації башмаків.

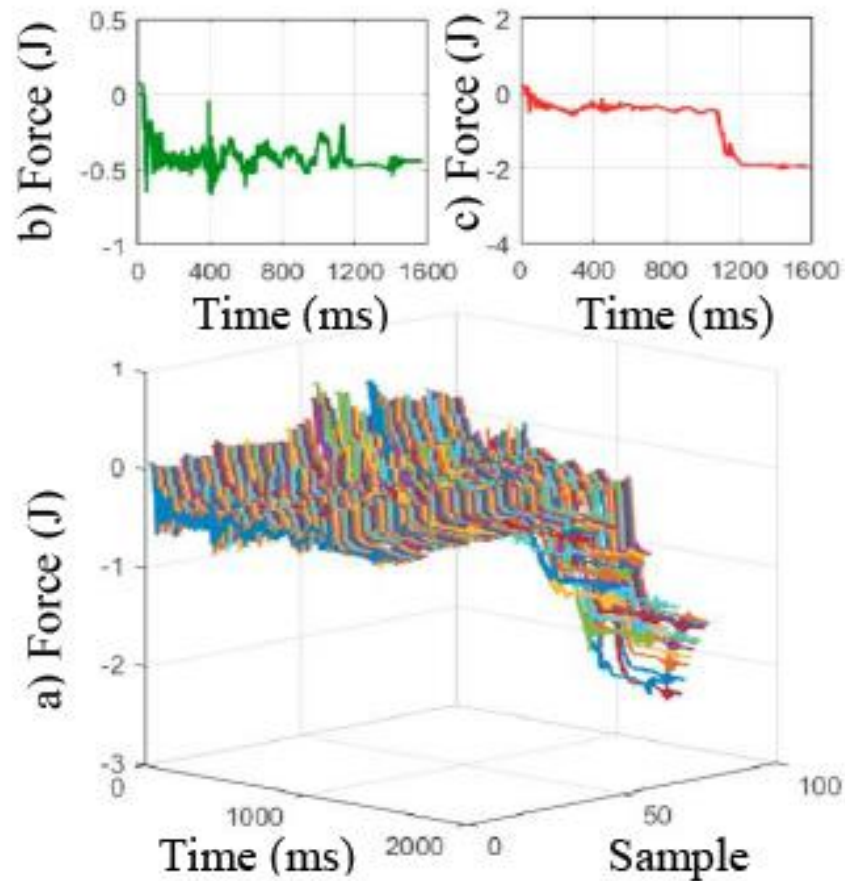


Railway Turnout System – стрілочний перевід, Sliding chair plates – башмаки, Point Machine – стрілочний електропривод;

Contaminated – забруднені, Lubricated – змащені

Рисунок 4.4 – Моделювання деградації стрілочної системи та башмаків

Важливо також відзначити, що вибране *stdev* має найвище значення монотонності (див. рис. 4.7) порівняно з іншими, що доводить ефективність запропонованого методу фільтра для прогнозування відмов. Запропонована експоненціальна модель деградації була підігнана до *stdev* для оцінки параметрів моделі в автономній фазі. Розраховані параметри моделі деградації, отримані за допомогою підгонки кривої, і відповідності (R^2) наведені в таблиці 4.2.



а) часові ряди сили; б) справні, в) помилкові зразки даних для деградації башмаків

Рисунок 4.5 – Час опору сили

Таблиця 4.1 – Матриця подібності для вибраних НІ

	rms	stdev	p2p
rms	0	0.34	0.75
stdev	0.34	0	0.50
p2p	0.75	0.50	0
Average	0.54	0.42	0.62

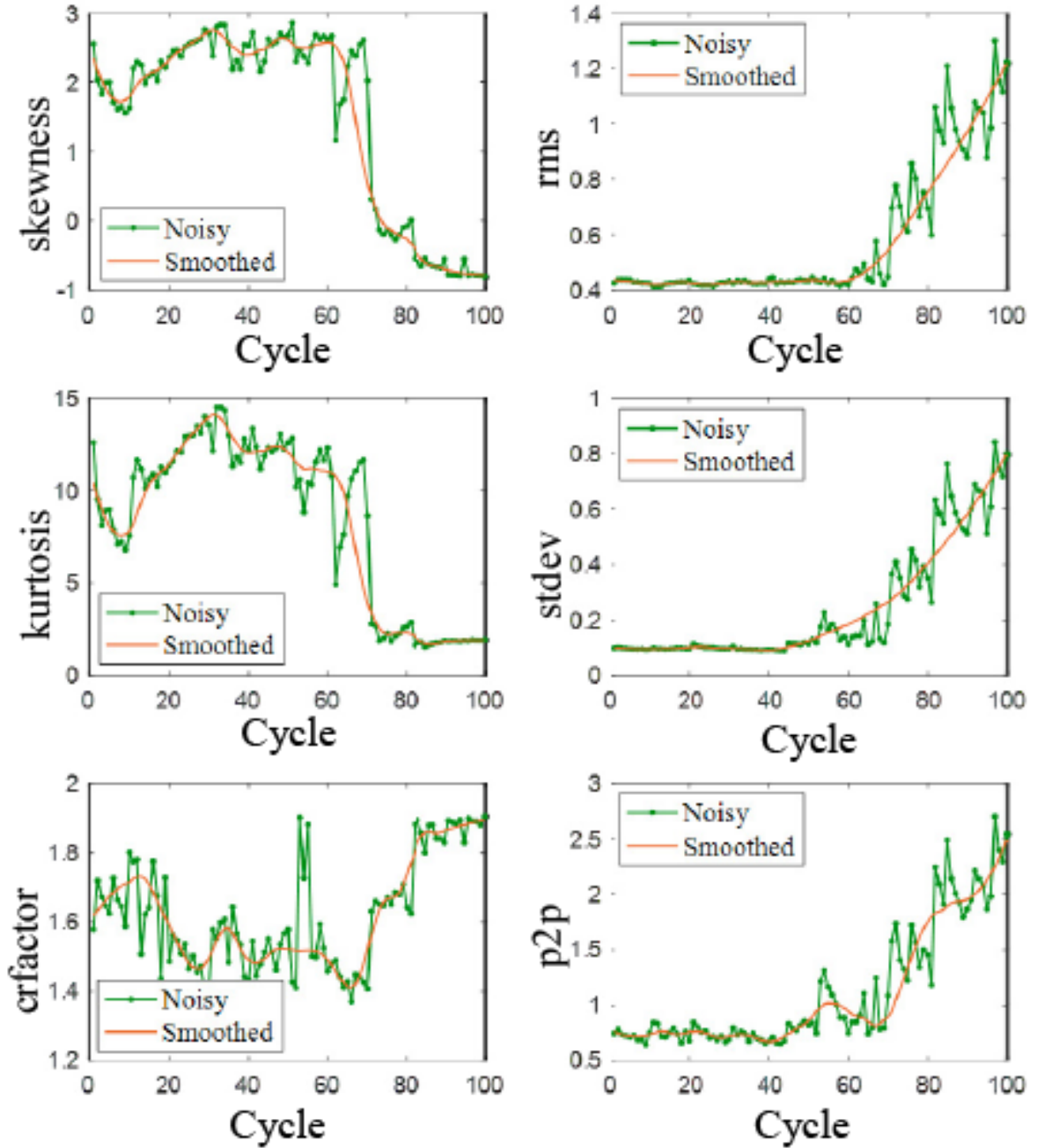


Рисунок 4.6 – Витягнуті НІ з вимірювань сили

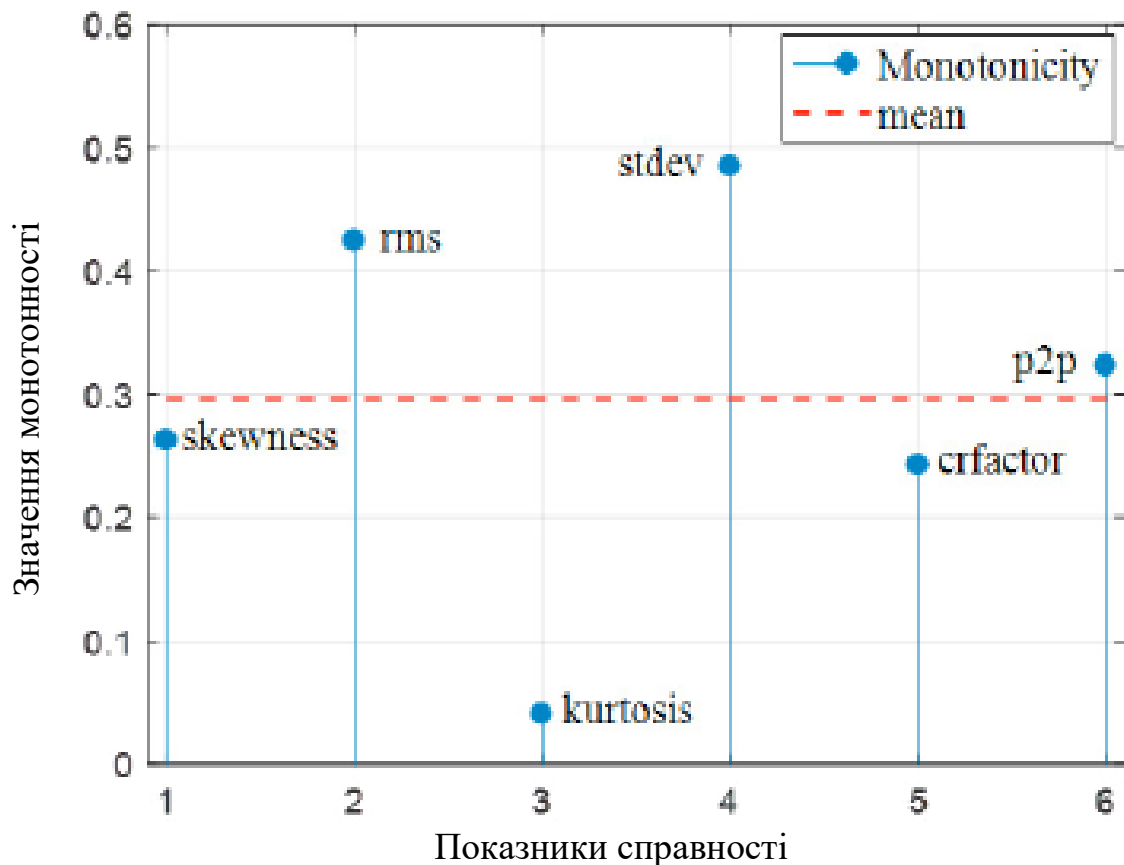


Рисунок 4.7 – Розраховані значення монотонності для заданих НІ.

Після визначення моделі деградації на етапі офлайн вибраний НІ пройшов через визначення точки зміни на основі k -середніх, щоб запустити прогнозування несправностей для прогнозування RUL на фазі онлайн. Номер кластера було оптимізовано за допомогою перевірки Silhouette. Максимальне значення Silhouette відноситься до найкращого номера кластера. K -середнє ефективно кластеризувало даний НІ на два рівні деградації. Результат виявлення точки зміни зображено на рисунку 4.8. Перший рівень відповідає працездатному стану, а другий рівень – несправному. Останній індекс (цикл № 71) 1й рівень деградації – це точка зміни в деградації башмаків, яка вказує на початкову несправність. Точка зміни використовується для запуску передбачення RUL. Результати прогнозування RUL показано на рисунку 4.9.

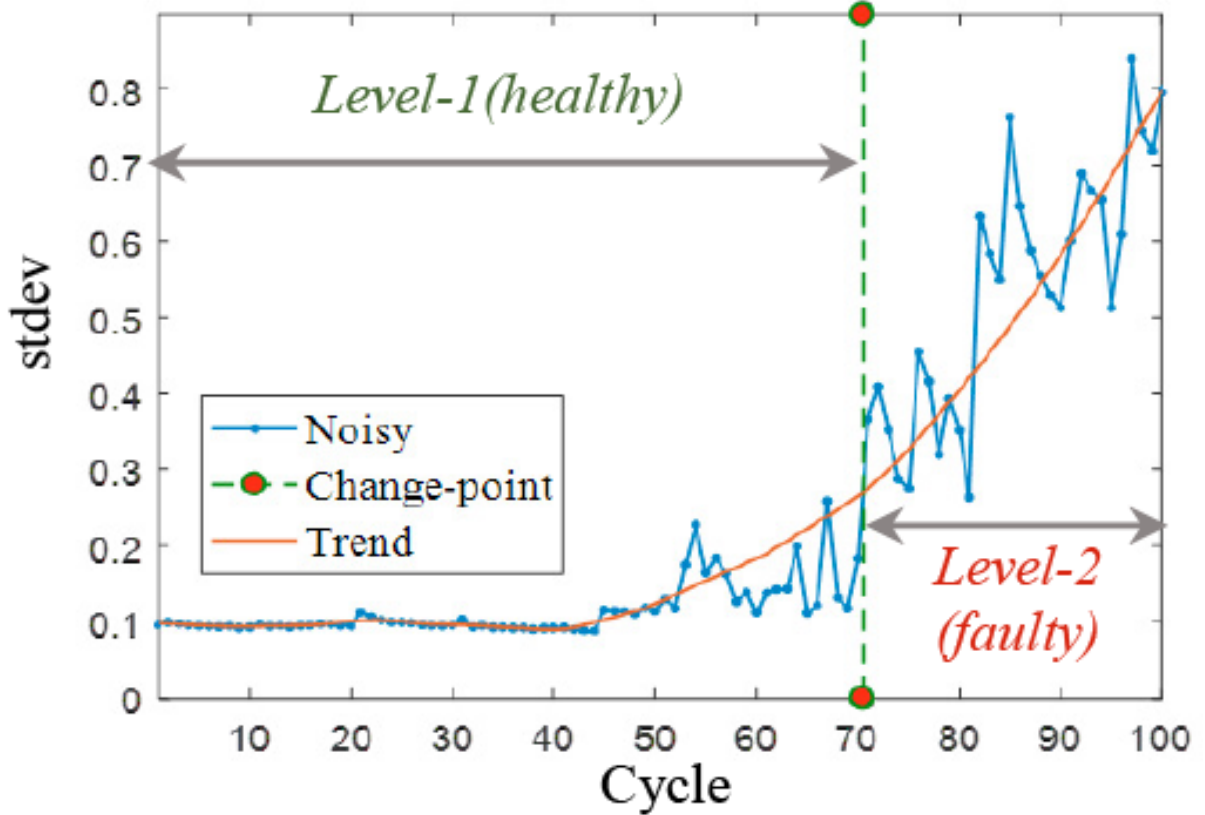
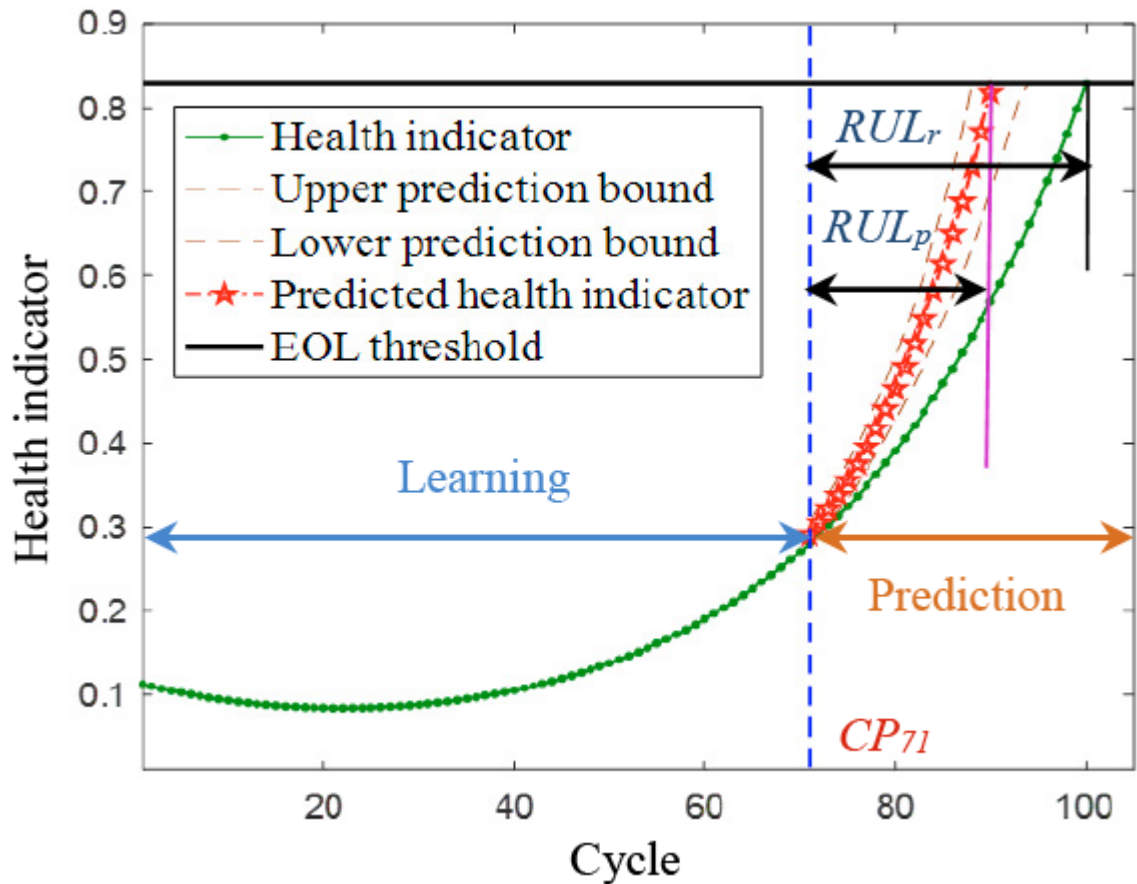


Рисунок 4.8 – Результати визначення точки зміни за допомогою k-середніх

Після першого тригера параметри моделі не оновлюються, доки не будуть доступні нові значення даних. У цьому дослідженні час очікування проводився з використанням вікон двох різних розмірів. Метою було перевірити точність прогностичної моделі за допомогою заданої кількості даних і оптимізувати інтервал прогнозування RUL для кращого планування технічного обслуговування під час моніторингу стану машини. Результати прогнозування RUL з використанням довжини вікна 5 (W-5) і 10 (W-10) для оновлення моделі наведено на рисунку 4.10. Як видно з рис. 10, W-10 сходився до реального RUL швидше, ніж W-5 у процесі першого оновлення. Але використання більшого розміру вікна може бути недоліком і може негативно вплинути на планування технічного обслуговування, особливо для критичних компонентів, таких як башмаки.



(RUL_r – справжній і RUL_p – передбачуваний) після виявлення точки зміни (CP_{71})

Рисунок 4.9 – Прогноз RUL

Незважаючи на обчислювальну складність, оновлення моделі на основі W-5 точніше, ніж W-10. Ефективність передбачення RUL для W-5 і для W-10 було розраховано як 0,90 і 0,81 за допомогою рівняння (7). Таким чином, використання меншого розміру вікна в оновленні моделі може бути більш ефективним для прогнозування RUL критичних систем, які будуть використовуватися під час прийняття рішень після прогнозування.

4.5 Висновки

Запропоновано оцінку рівня деградації та онлайн-прогностичний підхід для моніторингу стану башмаків. Для виділення та селекції НІ запропоновано метод двоступеневого фільтра. Рівень деградації оцінка на основі k-середніх була

виконана для виявлення змін переходів стану працездатності компонента. Значення k-means могло виявити лише більшу зміну в працездатності, але було менш чутливим до менших змін у поширенні відмови, що могло ввести в оману пізні прогнози RUL. Було розроблено прогностичну модель на основі даних, і RUL системи було передбачено з використанням двох різних позначок часу, а результати порівнювалися.

В якості майбутньої роботи ми плануємо використовувати різні алгоритми виявлення точок зміни, які є більш чутливими до менших змін, і розробити підхід до прогнозування на основі критеріїв серйозності відмови для систем, які зазнають різних переходів у працездатному стані (тобто справний, помірний, серйозний тощо).

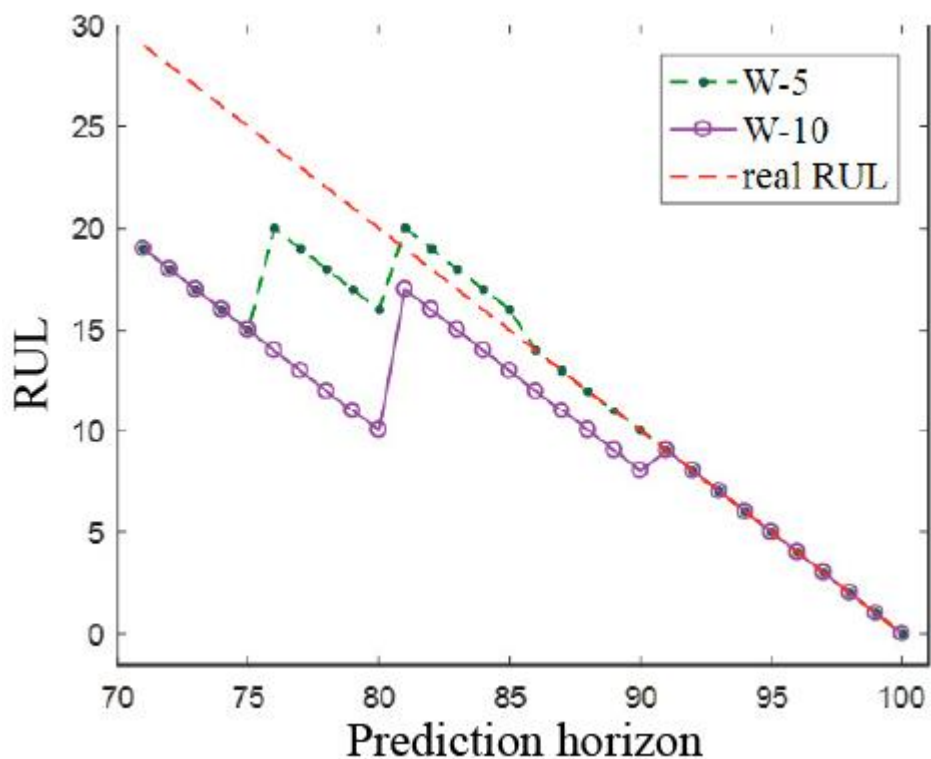


Рисунок 4.10 – Результати прогнозування RUL з використанням розмірів вікна п'ять (W-5) і десять (W-10)

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Сучасні стрілочні електроприводи повинні гарантовано забезпечувати показники безпеки руху поїздів та бути високонадійними. Необхідно знижувати експлуатаційні витрати на їх утримання шляхом створення технологій, які не потребують обслуговування та передбачити використання передових технологій виготовлення та сучасних матеріалів. Тенденції досягнення високих швидкостей руху висувають жорсткіші вимоги до надійності технічних засобів, що забезпечують безпеку руху поїздів по стрілочному переводу.

Тому при організації швидкісного руху необхідний новий підхід до розробки стрілочного переводу та електроприводу. Реалізація цього завдання передбачає створення єдиного технічного комплексу стрілочного переводу з можливістю діагностики його стану та оцінкою показників безпеки руху поїздів за стрілкою. Його створення неможливе без застосування принципово нових технічних рішень побудови стрілочного переводу, електроприводу, гарнітури та систем контролю.

Методика, що розробляється, є основою системи, яка дозволить дистанційно визначати поточний стан стрілочного переводу з усіма можливими несправностями. Ця система зможе визначати як поступові відмови, так і пошкодження, які виникають раптово і в режимі реального часу повідомляти про їхню появу.

Застосування системи дистанційного діагностування стану стрілочних електроприводів в автоматизованому режимі дозволить економити час на пошуки несправностей, засоби та обсяг робіт із заміни та ремонту елементів обладнання, що вийшли з ладу, призведе до скорочення кількості затримок поїздів та значного підвищення безпеки руху.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Классификация и каталог дефектов и повреждений элементов электрических переводов железных дорог Украины. – Д.: Арт-Прес, 2000. – 148 с.
2. Парфенов В. И., Руденко А. Б. Способ дистанционной диагностики состояния механической части стрелочного перевода с электроприводом постоянного тока. Д.П.Украины № 8573, В 61L 7/08, опубл. 15.08.2005, бюл. № 8.
3. Парфенов В. И., Руденко А. Б. Способ дистанционного определения дефектов электрических составляющих электродвигателя постоянного тока стрелочного перевода Д.П. Украины № 8530, В 61L 7/08, опубл. 15.08.2005, бюл. № 8
4. Барденштейн И. И. Устройство для контроля положения остряка стрелочного перевода / И. И. Барденштейн, А. Е. Зиненко, В. И. Парфенов, И. В. Ельперин. Д.П. Украины № 61264А, В61L 5/06, опубл. 17.11.2003, бюл. № 11.
5. Анищенко В. М., Парфенов В. И. Устройство для дистанционной индикации расстояния между остряком и рамным рельсом стрелочного перевода. Д.П. Украины № 69811, 61L 7/08, опубл. 15.09.2004, бюл. № 9.
6. Ammour, R. et al., 2017. Fault prognosis of timed stochastic discrete event systems with bounded estimation error. Automatica, 82, pp.35–41.
7. Ardakani, H.D. et al., 2012. PHM for railway system - A case study on the health assessment of the point machines. 2012 IEEE Int. Conf.on Prognostics and Health Management: Enhancing Safety, Efficiency, Availability, and Effectiveness of Systems Through PHM Technology and Application, Conference Program, pp.1–5.

8. Asada, T., Roberts, C. & Koseki, T., 2013. An algorithm for improved performance of railway condition monitoring equipment: Alternating-current point machine case study. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 30, pp.81–92.
9. Atamuradov, V. et al., 2009. Failure diagnostics for railway point machines using expert systems. 2009 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2009.
10. Atamuradov, V. et al., 2017. Fault Detection By Segment Evaluation Based On Inferential Statistics For Asset Monitoring. In Annual conference of the Prognostics and Health management Society 2017. pp. 1–10.
11. Eker, O.F. et al., 2011. A simple state-based prognostic model for railway turnout systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), pp.1718–1726.
12. García Márquez, F.P., Pedregal Tercero, D.J. & Schmid, F., 2007. Unobserved Component models applied to the assessment of wear in railway points: A case study. *European Journal of Operational Research*, 176(3), pp.1703–1712.
13. García Márquez, F.P., Roberts, C. & Tobias, A.M., 2010. Railway point mechanisms: condition monitoring and fault detection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(1), pp.35–44.
14. Lloyd, S.P., 1982. Least Squares Quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2), pp.129– 137.
15. Maulik, U. & Bandyopadhyay, S., 2002. Performance evaluation of some clustering algorithms and validity indices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(12), pp.1650–1654.
16. Rousseeuw, P.J., 1987. Silhouettes-A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and applied Mathematics*, 20, pp.53– 65.

17. Skima, H. et al., 2016. A hybrid prognostics approach for MEMS: From real measurements to remaining useful life estimation. *Microelectronics Reliability*, 65, pp.79–88.
18. Tobon-Mejia, D.A., Medjaher, K. & Zerhouni, N., 2012. CNC machine tools wear diagnostic and prognostic by using dynamic Bayesian networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, pp.167–182.
19. Wang, X. et al., 2016. Remaining useful life prediction based on the Wiener process for an aviation axial piston pump. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(3), pp.779–788.
20. Wang, Z., Jia, L. & Qin, Y., 2016. An Integrated Feature Extraction Algorithm for Condition Monitoring of Railway Point Machine. 2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), pp.1–5.
21. Yin, X., 2017. Verification of Prognosability for Labeled Petri Nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 9286(c)
22. Yoon, S. et al., 2016. Fault diagnosis of railway point machines using dynamic time warping. *Electronics Letters*, 52(10), pp.818–819.
23. Безрученко В. Н. Электрические машины [Текст] / В. Н. Безрученко, А. С. Хотян. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 215 с.
24. Буряк С. Ю. Удосконалення технології обслуговування централізованих стрілок з електроприводом змінного струму в умовах експлуатації: дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Буряк Сергій Юрійович. – Д., 2015. – 166 с.
25. Маловічко В. В. Підвищення ефективності технічного обслуговування стрілочних переводів шляхом автоматизованого контролю їх параметрів: дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Маловічко Володимир Володимирович. – Д., 2011. – 177 с.