

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

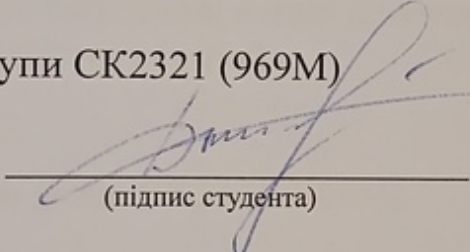
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

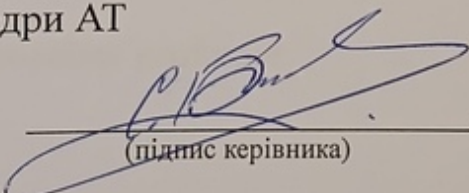
на тему: Автоматизація визначення технічного стану стрілочних переводів з електроприводами змінного струму

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

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

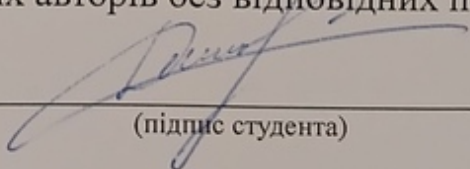

/ Євгеній ДЕХТЯРЕНКО /
(підпис студента)

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: Automation of determining the technical condition of turnouts
with AC 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) / Evhenii Dekhtiarenko /

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 05 жовтня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

_____ магістра

(ступінь вищої освіти)

студенту Дехтяренко Євгеній Олегович

(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Автоматизація визначення технічного стану стрілочних переводів з електроприводами змінного струму

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

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

затверджені наказом від «05» жовтня 2023 р. № 991ст

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

3. Вихідні дані до роботи: Стрілочний електропривод з асинхронним двигуном, стрілочні переводи, пошкодження та недоліки в роботі стрілочних переводів

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

4.1 Аналітична частина: Розглянути особливості будови стрілочних переводів з електроприводами змінного струму та вказати причини виникнення пошкоджень його складових частин окремо та у складі стрілочних переводів

4.2 Основна частина: Виконати дослідження та провести аналіз складу кривої струму в робочому колі стрілочного електроприводу при переведенні стрілки у справному стані і при переведенні стрілки з навмисно створеними чи виявленими дефектами, пошкодженнями, недоліками, несправностями чи будь-якими іншими відмовами в роботі. Зробити висновки з 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)

Євгеній ДЕХТЯРЕНКО

_____ (Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Сергій БУРЯК

_____ (Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

65 сторінки, 28 рисунків, 3 таблиці, 25 джерел літератури.

Об'єкт розробки – стрілочні переводи з електроприводами змінного струму.

Мета роботи – автоматизація визначення технічного стану за графіком потужності переводу.

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

У першому розділі приведені загальні відомості про контроль параметрів стрілочних електроприводів. У другому розділі проведено імітаційне моделювання управління електродвигуном стрілочного електроприводу у вигляді комп'ютерної моделі та моделі електропривода в аналітичному вигляді. У третьому розділі розглянуто електроприводи стрілочних переводів високошвидкісного електричного транспорту як колісного, так і магнітолевітуючого. У четвертому розділі показано спосіб виявлення несправностей стрілочних переводних пристроїв з електродвигунами змінного струму на графіку потужності переводу. Проведено вибір та аналіз діагностичних параметрів.

Висновок. Аналіз отриманих графіків потужності переведення стрілки показав можливість виявлення несправностей електричного двигуна, елементів стрілочного переведення (забруднення башмаків), що раніше не виявлялося в дійсних методиках перевірки діючими діагностичними моделями.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЦЕНТРАЛІЗОВАНА СТРІЛКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СТРІЛОЧНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СТРІЛОЧНИЙ ПЕРЕВІД, ГРАФІК ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕВОДУ, АНАЛІЗ ВІДМОВ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СТРІЛОЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	9
2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ СТРІЛОЧНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	15
2.1 Комп'ютерне моделювання.....	15
2.2 Побудова математичної моделі електропривода в просторі станів в аналітичному вигляді.....	21
3 ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	29
3.1 Загальні відомості.....	29
3.2 Стрілочні переводи високошвидкісного колісного транспорту.....	30
3.3 Стрілочні переводи високошвидкісного магнітолевітуючого транспорту.....	38
3.4 Висновок.....	43
4 ВИЯВЛЕННЯ НЕПРАВНОСТЕЙ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДНИХ ПРИСТРОЙСТВ З ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ГРАФІКУ ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕВОДУ.....	45
4.1. Вибір діагностичних параметрів.....	45
4.2. Аналіз діагностичних параметрів.....	47
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	62

ВСТУП

Стрілочний перевідний пристрій (СПП) належить до одних із найважливіших елементів систем електричної централізації, що містить у собі стрілку, електропривод (СЕП) і схему керування. Від справної роботи СПП залежить безпека і безперебійність руху поїздів. Для підтримання справного стану СПП необхідно виконувати їх своєчасне належне технічне обслуговування, оскільки вузли СПП мають територіальну розосередженість, а СЕП належить до напільних пристроїв залізничної автоматики і телемеханіки і схильний до впливу як кліматичних, так і механічних факторів в умовах експлуатації.

В теперішній час основним видом технічного обслуговування є регламентний, який займає 80 % робочого часу обслуговуючого персоналу. При регламентному обслуговуванні, як правило, половина відмов – це так звані післяпрофілактичні. Згідно зі статистикою, стрілочні електроприводи і гарнітура перебувають на п'ятому місці (8,5 %) за кількістю відмов пристроїв у господарстві автоматики і телемеханіки. П'ятдесят відсотків відмов технічних засобів ЗАТ припадає на експлуатаційні відмови, з них 93 % – відмови внаслідок ненавмисних помилкових дій обслуговуючого персоналу, а також його низької кваліфікації та трудової дисципліни. Такі відмови спричиняють затримки поїздів на тисячі годин і великі фінансові збитки. Ці витрати можливо скоротити, впроваджуючи інтелектуальні системи діагностування.

Сучасні системи технічної діагностики дають змогу тільки здійснювати контроль діагностичних параметрів (струм, час і потужність переведення, контроль крайнього положення стрілки, опір ізоляції кабелю, напруга живлення контрольного кола СУ), а методи їхнього аналізу виявляють винятково прояв несправності. Тому актуальним є розроблення методів та алгоритмів, які виявлятимуть не тільки прояв несправності, а й вказуватимуть на можливий несправний елемент.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СТРІЛОЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Найбільш ненадійним елементом у конструкції СЕП є автоперемикач, на який припадає 42,49 % відмов. При цьому основною причиною відмов автоперемикача є розрегулювання контактів (ослаблення контактних пружин). Таким чином, можна зробити висновок про те, що функціонування контактів автоперемикача (як робочих, так і контрольних) слід контролювати мінімальним періодом знімання діагностичної інформації. Для цього є технічні можливості. Контроль контактів контрольного кола може бути організовано безперервно, а контакти робочого кола можна контролювати під час переведення стрілки.

Електродвигун відмовляє в 26,67 % випадків. Основними причинами відмов електродвигунів змінного струму (МСТ, МСА) є пошкодження внутрішнього монтажу та обриви монтажного проводу на колодці електродвигуна.

Наступний у списку найбільш ненадійних елементів СЕП – курбельний контакт, на який припадає 9,26 % відмов (порушення з'єднань контактів і обриви монтажу). Тому і для курбельного контакту необхідно передбачити можливість контролю контактів і монтажу.

Однією з головних причин порушень нормальної роботи СЕП є низькоякісне виконання робіт із технічного обслуговування (60-70 % відмов елементів СЕП виникає саме з цієї причини). Впровадження автоматизованого контролю колійного обладнання дасть змогу підвищити ефективність функціонування СЕП за рахунок можливості безперервного технічного діагностування робочих параметрів і забезпечити своєчасну реакцію технічного персоналу дистанцій СЦБ.

Конструкція одного з найбільш поширених стрілочних електроприводів на залізницях України СП-6 показано на рисунку 1.1.

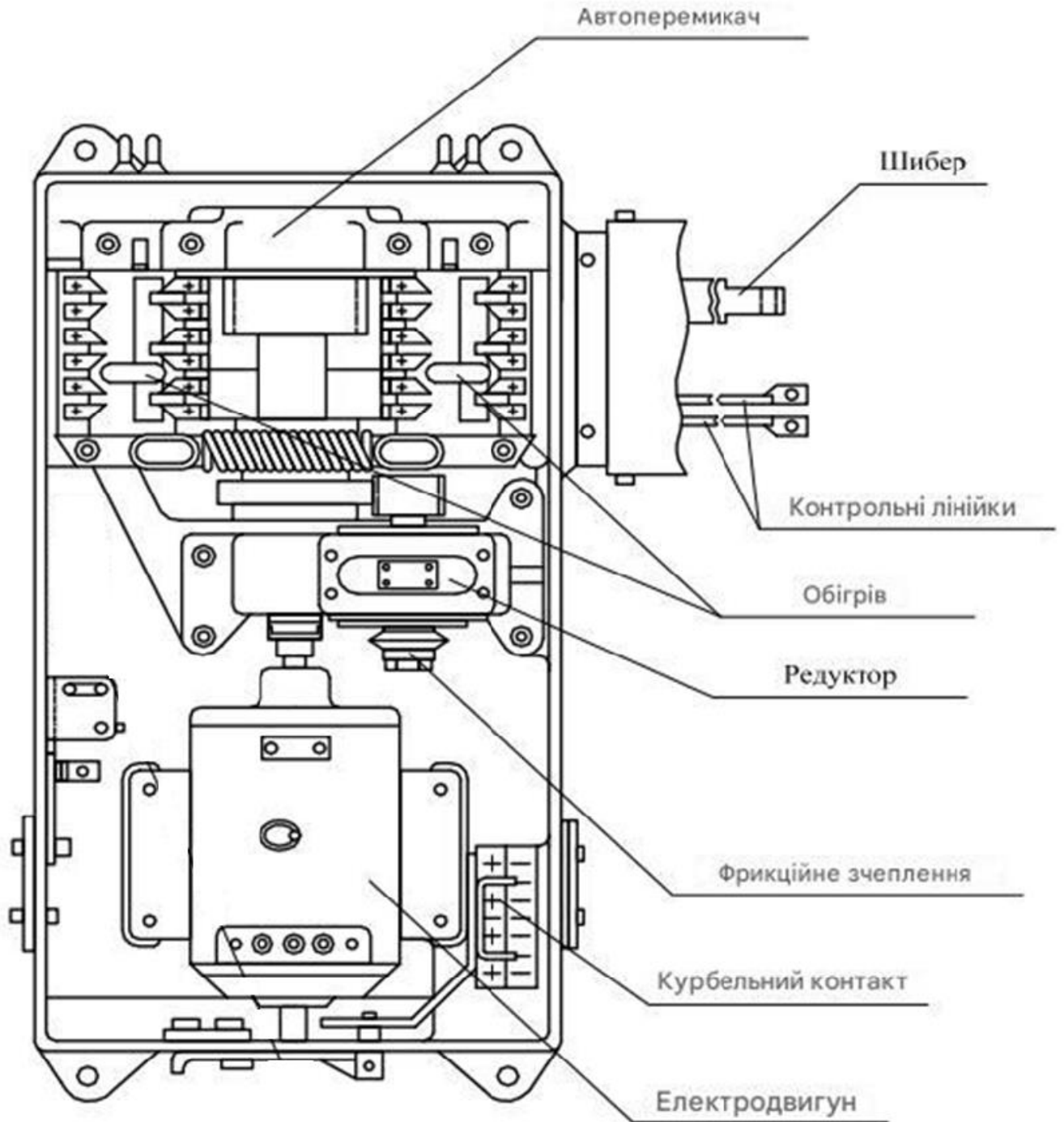


Рисунок 1.1 – Конструкція стрілочного електроприводу марки СП-6

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, що забезпечують, що особливо важливо, постійний контроль зазору між гостряком і рамною рейкою (2...4 мм).

Дефекти другого виду пов'язані з відмовими 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. За добової пропускної спроможності 90-100 пар поїздів середня частота переведення стрілки електрична централізація склала 120, 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. 1.1, а другого – у табл. 1.2.

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 електричної централізації та гіркової автоматичної централізації відбувається через забруднення та напресування снігу;

накату на рамній рейці, причому на гіркових переводах ця відмова проявляється втричі інтенсивніше.

Таблиця 1.1 – Відмови стрілочних переводів через механічні дефекти

Причина відмови	Відносна кількість відмов у системах, %	
	електрична централізація	гіркова автоматична централізація
Упорні болти впираються в гостряк	1	1
Відбій рамної рейки	1	3
Викривлення гостряка	1	3
Угон гостряка	3	1
Накат металу головки рамної рейки	16	12
Розширення та звуження колії у гостряків стрілки	8	15
Понаднормове затягнення корневих болтів	4	6
Забруднення (відсутність) змащення башмаків стрілки	8	6
Забруднення стрілки	22	28
Напресування снігу або бруду між гостряком і рамною рейкою або в кореновому кріпленні	36	25

Таблиця 1.2 – Відмови стрілочних переводів через електричні дефекти

Причина відмови	Відносна кількість відмов у системах, %	
	електрична централізація	гіркова автоматична централізація
Слабке або (надто сильне) ненормоване натискання щіток колектора	3	5
Повільне перекидання ножів (наявність втоми пружин автоперемикача)	7	10
Заклинювання шибера	8	5
Нестабільна робота фрикції	9	30
Злам колодок автоперемикача	18	2
Обрив секцій якірної обмотки або обмотки збудження	35	26
Втрата контролю положення стрілки під поїздом (погане регулювання контрольних тяг)	20	22

Число електричних дефектів гіркових стрілок в 3-4 рази вище магістральних. У системах електричної централізації у середньому протягом року виходить із ладу приблизно кожен восьмий електропривод, у гіркової автоматичної централізації – 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

шарикопадшипників 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.

Алгоритм обчислення швидкого перетворення Фур'є 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 шарикопадшипників 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 [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 спектрі гармоніки швидкісної частоти, а кількість дефектних щіток визначається числом цих гармонік. Ушкодження в обмотках (коротке

замкнення) якоря супроводжуються появою спектрі гармоніки кратної швидкісної частоти. Обриви в обмотці якоря викликають стрибкоподібну зміну амплітуд гармонік.

2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ СТРІЛОЧНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Комп'ютерне моделювання

Для забезпечення надійної роботи систем регулювання рухом поїздів нормативними документами передбачено проведення періодичного технічного обслуговування, що включає контроль основних параметрів апаратури та її регулювання як безпосередньо під час експлуатації, так і в ремонтно-технологічній дільниці дистанції сигналізації та зв'язку. Недоліками існуючої технології обслуговування стрілочних переводів є: значні затрати часу та ручної праці; неможливість проведення безперервного контролю і своєчасного виявлення можливих дефектів та пошкоджень; відсутність можливості виявлення деяких прихованих дефектів електромеханічної системи стрілочних електроприводів, оскільки контроль базується, головним чином, на вимірюванні робочого струму і струму роботи стрілки на фрикцію; необхідність проведення додаткового обстеження в ремонтно-технологічній дільниці для визначення характеру і локалізації дефекту; суб'єктивність отриманих результатів та їх недостатня точність, пов'язана з візуальною реєстрацією [7].

Розробка систем автоматичного контролю та діагностування стрілочних переводів по кривій часової залежності струму ведеться, але поки що широкого впровадження такі системи діагностування на залізничному транспорті не набули. Щоб описати роботу привода і мати змогу прогнозувати відмови, потрібно створити математичну модель.

Важливу роль у забезпеченні безпеки руху залізничного транспорту відіграють стрілочні електроприводи (ЕП). В даний час зі збільшенням пропускної спроможності та підвищенням швидкості руху поїздів до ЕП пред'являються такі вимоги: підвищення їх керованості, надійності та можливість контролю

передвідмовного стану. Однією з функцій автоматизованого електроприводу є регулювання величин, що характеризують рух.

Стрілочні приводи, що застосовуються в даний час, містять електродвигун з блоком управління та датчиком положення ротора, редуктор, фрикційну муфту, шибер, автоперемикач та пристрій діагностики робочого стану електроприводу. Недоліком існуючого електроприводу і те, що з управління виконавчим пристроєм застосовується розімкнена система управління. У такій системі фактичне значення регульованої координати значно залежить від збурень, що діють на вузли системи та робочий орган, оскільки сигнал системи не залежить від відхилення регульованої координати заданого значення.

Однією з функцій автоматизованого електроприводу є регулювання величин, що характеризують його рух. Для регулювання роботи виконавчого пристрою електроприводу доцільно застосовувати замкнуту систему управління ЕП. Така система є більш складною, але в той же час і більш досконалою, ніж розімкнута. Замкнуті структури ЕП будуються за принципами компенсації обурення та відхилення, званим також принципом зворотного зв'язку. В результаті зворотного зв'язку помилка регулювання зменшується до допустимого значення. Сигнал управління системи електроприводу із зворотним зв'язком є відхиленням регулювання щодо сигналу завдання. При цьому жодне з обурень не вимірюється, а їх вплив на регулюємий параметр сприймається системою по каналу зворотного зв'язку.

Регулювання швидкості виконавчого органу ЕП можна досягти впливом безпосередньо на двигун. Даний спосіб регулювання знайшов широке застосування завдяки його широким регульовальним можливостям, простоті та зручності його використання у загальній схемі автоматизації технологічних процесів та зручності. Регулювання швидкості в безконтактному керованому двигуні може здійснюватися за рахунок зміни напруги та струму збудження.

Замкнена система управління виконавчим пристроєм ЕП містить безконтактний керований електродвигун (ЕД), блок управління, з'єднаний з редуктором, який пов'язаний з фрикційною муфтою та шибером, датчик положення ротора (ДПР), блок синхронізації, генератор керування і автоперемикач. У блок управління введено пристрій обмеження струму, вузол обмеження часу роботи на рівні, що забезпечує переведення стрілки, датчик рівня напруги живлення, датчик струму та пристрій діагностики робочого стану електроприводу. На один вхід блоку синхронізації подається сигнал із датчика положення ротора, до другого входу – сигнал з генератора, що управляє. Вихід блоку синхронізації підключено до блоку керування.

У схемі управління двигуном ЕП застосовується два контури управління: внутрішній цикл синхронізує імпульси комутатора з електрорушійною силою, зовнішній цикл регулює швидкість двигуна, змінюючи напругу на керованому джерелі напруги [8].

Для дослідження тимчасових характеристик двигуна із замкнутою системою керування розроблено імітаційну модель (рис. 2.1), для моделювання використовувалося середовище Simulink Matlab R2012a.

Для керування двигуном використовується замкнута широтно-імпульсна система. Пульсації струму двигуна та інерційні електромеханічні процеси, у порівнянні з електромагнітними, не викликають пульсацій швидкості обертання та кута повороту ротора.

Як джерело живлення застосовується кероване джерело постійної напруги, що задає на затискачах зовнішнього кола напруги, яка залежить від початкової напруги та керуючого сигналу. Сигнал із джерела напруги надходить на комутатор (Kommutator), в якому постійна напруга перетворюється на трифазну, і подається на безконтактний керований двигун.

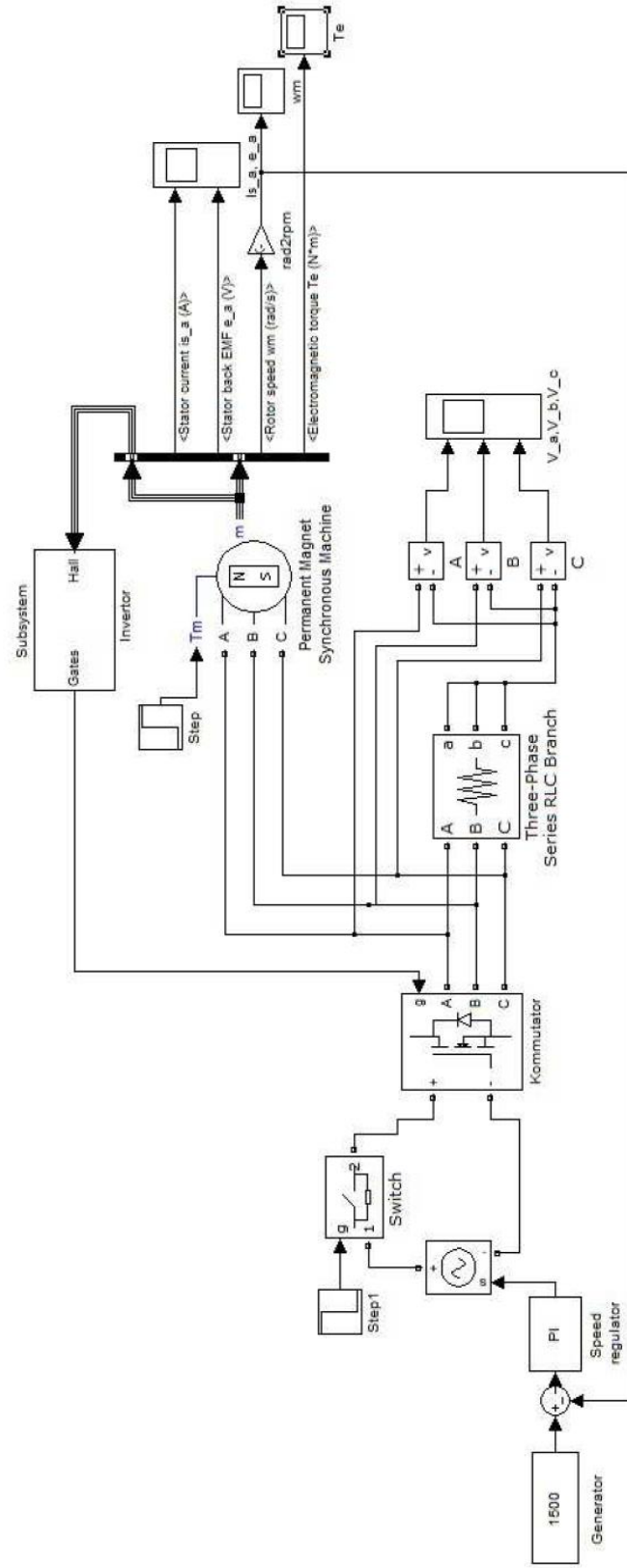
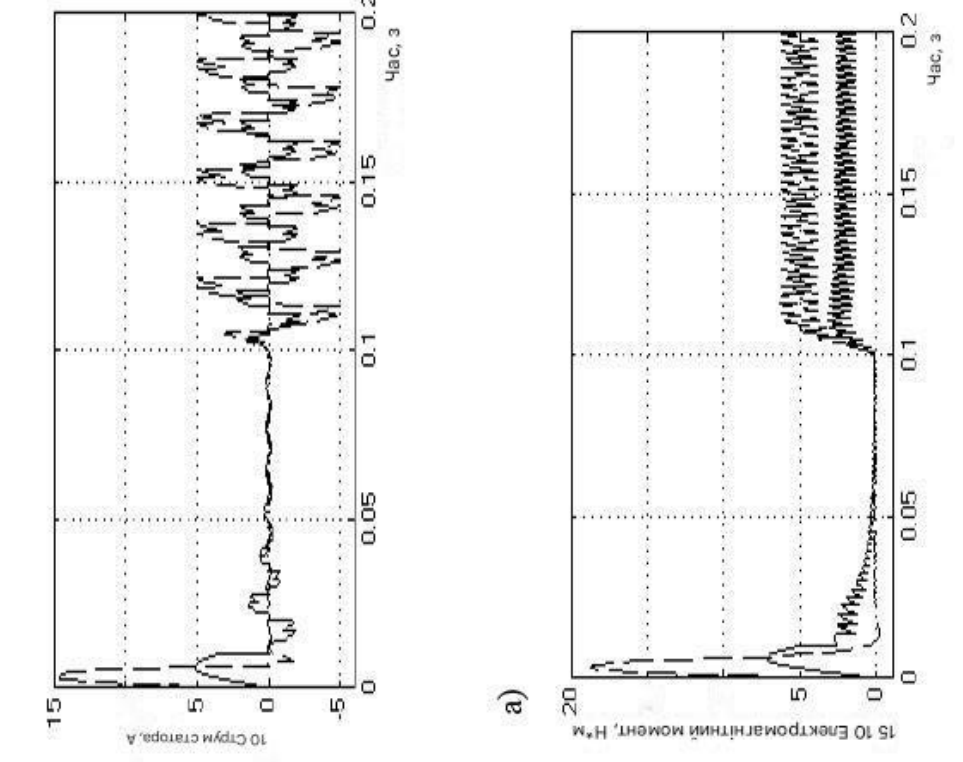
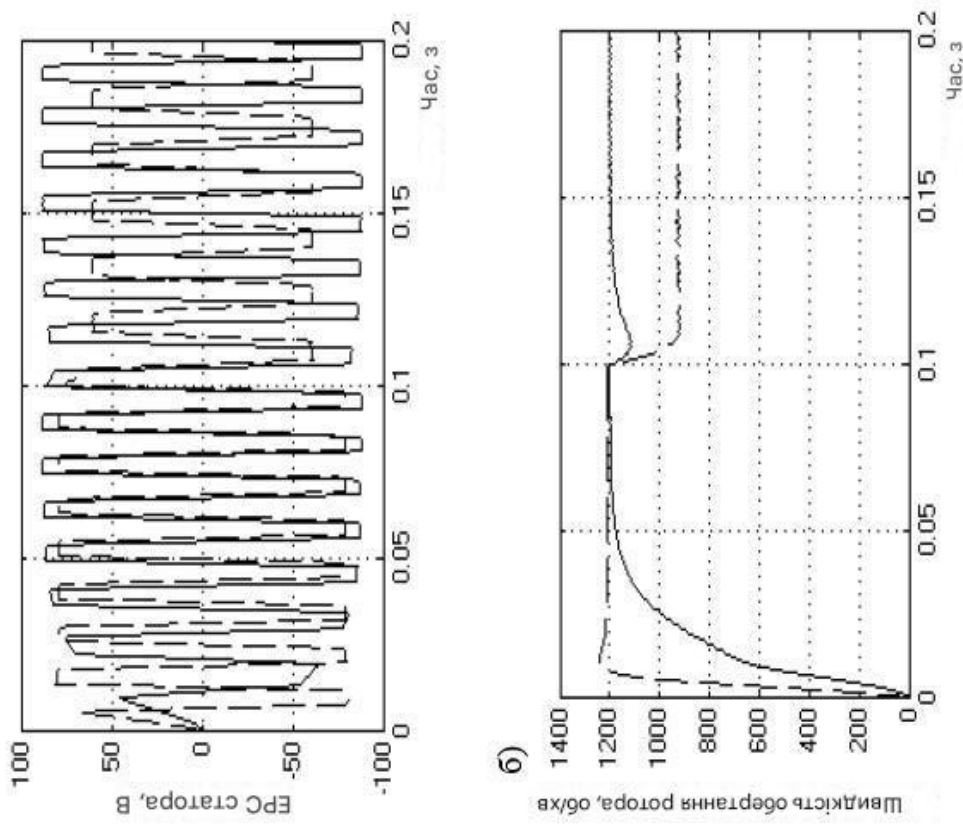


Рисунок 2.1 – Імітаційна модель управління електродвигуном стрілочного електроприводу

Керуючий сигнал на джерело живлення надходить з датчика швидкості руху ротора каналом зворотного зв'язку через регулятор швидкості (speed regulator). Регулятор швидкості застосовується як пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор), який реалізується включенням у зворотний зв'язок резистора та конденсатора. На вхід такого регулятора надходить різниця сигналу, що задає, з генератора сигналів (Generator), і сигналу зворотного зв'язку. Сигнал керування змінюється доти, доки не буде досягнуто рівність сигналу і сигналу зворотного зв'язку, що задає, тобто поки не буде усунена помилка регулювання.

Комутатор виконаний на шести транзисторних ключах, шунтованих зворотними діодами, з'єднаними в мостову схему. Керуючий сигнал на комутатор приходить по каналу зворотного зв'язку внутрішнього контуру через модулятор (Modulator), який перетворює три сигнали, що знімаються з обмоток статора в шість управляючих. Аналізуючи часові залежності струму статора, ЕРС в обмотках статора, електромагнітний момент і швидкість обертання ротора (рис. 2.2) можна дійти висновку, що з введенням зворотний зв'язок у систему управління робота двигуна стала стійкішою.

Переважаючі мікропроцесорних систем управління у сучасних та перспективних приводах дозволило збільшити алгоритмічні можливості управління завдяки гнучкості програмного забезпечення. Перевагою ІНС є можливість роботи в умовах невизначеності, швидкодія за рахунок паралелізму, адаптивні властивості, надійність, що досягається завдяки надмірності. Нейромережні регулятори (НМР) дозволяють демпфувати автоколивання у всьому заданому діапазоні роботи електроприводу і тим самим забезпечити стійку роботу системи [9, 10].



а) — струм статора; б) — ЕРС статора; в) — електромагнітний момент зі зворотним зв'язком і без; г) — швидкість обертання ротора зі зворотним зв'язком і без

в) — із зворотним зв'язком, — без зворотного зв'язку

Рисунк 2.2 — Часові залежності

2.2 Побудова математичної моделі електропривода в просторі станів в аналітичному вигляді

В сучасних умовах постійного підвищення швидкості руху поїздів на залізничному транспорті, все гостріше постає питання надійності експлуатування існуючих засобів забезпечення руху поїздів. В зв'язку з тим, що існуючі системи інтервального регулювання на перегоні та системи станційної автоматики експлуатуються вже досить давно, спостерігається збільшення кількості відмов та пов'язаних з цим затримок потягів за рахунок старіння елементної бази систем залізничної автоматики. Також необхідно враховувати, що системи станційної автоматики, які зараз експлуатуються, розроблялись досить давно, і функції додаткового контролю стану апаратури системи та контролю стану колійних пристроїв в системах електричної централізації реалізовані в незначній мірі. Тому розробка систем діагностування та контролю пристроїв залізничної автоматики є важливою та актуальною задачею.

Але при створенні системи контролю стрілочних переводів, для перевірки правильності її функціонування, необхідно спочатку відтворити майбутню систему в математичній моделі та перевірити її роботу в різних режимах. З урахуванням цього, створення математичних моделей тих пристроїв залізничної автоматики, які потребують додаткового контролю є невирішеною задачею. Особливе значення вона набуває при створенні систем контролю та діагностування колійних пристроїв станційної автоматики, на які припадає більшість відмов електричної централізації.

Одним з колійних пристроїв електричної централізації, який потребує додаткового контролю є стрілочний привід. При розробці системи контролю та діагностування стрілок, з використанням в якості параметру контролю часової залежності струму, який протікає через стрілочний двигун під час переводу стрілки, потрібно діагностичні ознаки, що суб'єктивно визначені з експериментальних даних, обґрунтувати теоретично.

Для дослідження статичних і динамічних режимів роботи стрілочних переводів, необхідно скласти математичну модель у формі системи диференційних рівнянь. Опис об'єкта у вигляді системи диференційних рівнянь є загальним в розумінні можливості одержання рівнянь для статичних режимів, шляхом прирівнювання похідних функцій до нуля. При розробці математичної моделі для стрілочного двигуна необхідно враховувати специфіку його роботи та необхідність отримувати залежності всіх складових моделі відносно струму переводу стрілки [11].

Якщо користуватись відомими залежностями між електричними та механічними характеристиками для стрілочних двигунів, то двигун можна описати наступною системою диференційних і алгебраїчних рівнянь в абсолютних одиницях:

$$\begin{cases} U = E + R_{\Sigma} \cdot i + L_{\Sigma} \frac{di}{dt}; \\ J \frac{dW}{dt} = M - M_{op}; \\ M = c_M \cdot \Phi \cdot i; \\ E = c_e \cdot \Phi \cdot n. \end{cases} \quad (2.1)$$

де U – напруга на обмотках двигуна;

E – противо-ЕРС в якорі;

R_{Σ} – активний опір усіх обмоток двигуна, а також перехідного опору щіток;

i – струм в обмотках двигуна;

L_{Σ} – індуктивність усіх обмоток двигуна;

$\frac{di}{dt}$ – швидкість зміни струму в електричному колі;

J – сумарний момент інерції якоря і навантаження;

$\frac{dW}{dt}$ – швидкість зміни кутової швидкості обертання вала;

M – електромагнітний момент двигуна;

M_{op} – момент опору руху;

c_M – машинна стала для моменту;

Φ – магнітний потік;

c_e – машинна стала для ЕРС;

n – частота обертання вала двигуна.

Машинна стала для моменту. Її значення можна знайти з наступного виразу [4]:

$$c_M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (2.2)$$

де p – число пар полюсів;

N – число активних провідників якоря;

a – число пар паралельних гілок простої петльової обмотки.

Для створення математичної моделі стрілочного двигуна, найбільш зручною формою запису є модель в системі простору станів. Модель в змінних стану має вид диференціальних рівнянь, але записується в спеціальній формі – як система рівнянь першого порядку. Суть моделі в змінних стану полягає в тому, що вона зберігає відношення між входом і виходом системи, але в той же час дозволяє

перейти від одного диференціального рівняння n -го порядку до системи n диференціальних рівнянь першого порядку. Переваги такого представлення в тому, що окрім двох зовнішніх змінних (вхідної і вихідної), в моделі відображаються і всі внутрішні змінні системи, що дуже важливо для даної задачі, так як електричний струм переводу стрілки є внутрішньою змінною системи. Крім цього модель в змінних стану для стрілочного двигуна постійного струму дозволяє легко вирішувати завдання аналізу й синтезу за допомогою комп'ютера, тоді як використання для тих же цілей передатної функції може виявитися безуспішним через труднощі обчислювального характеру. Також маючи модель у змінних стану, одержується більше інформації про об'єкт керування (про його внутрішні змінні); отже, процедура проектування системи контролю стану стрілочного двигуна може бути виконана більш ефективно, ніж при використанні передатної функції.

З точки зору майбутньої моделі, вхідними впливами є напруга на обмотках двигуна U та момент опору руху $M_{\text{ор}}$, який складається з приведенного моменту опору руху до вала двигуна T_L , моментів в'язкого $B_m \cdot W$ та сухого T_f тертя. Вихідні змінні: електромагнітний момент двигуна M , та швидкість обертання вала двигуна W . Змінні стану – змінні, що стоять під знаком похідної: струм в обмотках двигуна i та швидкість обертання вала двигуна W .

Тому, вираз для моменту опору руху можна записати у вигляді:

$$M_{\text{ор}} = T_L + B_m \cdot W + T_f \quad (2.3)$$

Механічні втрати врахувати можна наступним чином. Загальні механічні втрати для машин звичайного виконання обраховують наступним чином [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$P_{\text{мех}} = (0,5 \div 2\%) \cdot P_{\text{н}} \quad (2.4)$$

Зважаючи на невеликі розміри машини, що проектується, використовується найменше значення механічних втрат, тобто для 0,5% від номінальної потужності P_H .

З іншого боку дані втрати розраховуються наступним чином [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$P_{\text{мех}} = T_f \cdot W_H + B_m \cdot W_H^2 \quad (2.5)$$

де T_f – момент сухого тертя;

B_m – коефіцієнт в'язкого тертя;

W_H – номінальна кутова швидкість обертання вала.

Якщо вважати втрати на тертя і вентиляційні втрати приблизно рівними, то, маючи визначене з формули (5) значення механічних витрат $P_{\text{мех}}$, обчислюються за наступними формулами [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$T_f = \frac{P_{\text{мех}}}{2 \cdot W_H} ; \quad (2.6)$$

$$B_m = \frac{P_{\text{мех}}}{2 \cdot W_H^2} . \quad (2.7)$$

Перепишемо четверте рівняння системи (1) для явно вираженої кутової швидкості обертання вала, оскільки вона є водночас і змінною стану і вихідним параметром:

$$E = \frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi} \cdot W \quad (2.8)$$

Перетворимо перше та друге диференціальні рівняння системи (1) до явної форми Коши і виконаємо підстановку. Система рівнянь прийме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} \cdot (-R_\Sigma \cdot i - \frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi} \cdot W + U); \\ \frac{dW}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (c_M \cdot \Phi \cdot i - T_L - B_m \cdot W - T_f); \\ M = c_M \cdot \Phi \cdot i; \\ W = W. \end{cases} \quad (2.9)$$

Останнє рівняння є відображенням того факту, що змінна стану є одночасно і вихідним параметром.

Введемо наступні позначення:

- вхідні змінні: $u_0 = U$, $u_1 = T_L$;
- вихідні змінні: $y_0 = M$, $y_1 = W$;
- змінні стану: $x_0 = i$, $x_1 = W$.

Отже, матриця вхідних змінних, матриця вихідних змінних, та матриця змінних стану приймуть вид відповідно:

$$u = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ T_L \end{bmatrix},$$

$$y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ W \end{bmatrix},$$

$$x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ W \end{bmatrix}.$$

А система рівнянь (9) запишеться у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dx_0}{dt} = -\frac{R_\Sigma}{L_\Sigma} \cdot x_0 - \frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi \cdot L} \cdot x_1 + \\ + \frac{1}{L_\Sigma} \cdot u_0 + 0 \cdot u_1; \\ \frac{dx_1}{dt} = \frac{c_M \cdot \Phi}{J} \cdot x_0 - \frac{B_m}{J} \cdot x_1 + 0 \cdot u_0 - \\ - \frac{1}{J} \cdot u_1 - \frac{T_f}{J}; \\ y_0 = c_M \cdot \Phi \cdot x_0 + 0 \cdot x_1 + 0 \cdot u_0 + 0 \cdot u_1; \\ y_1 = 0 \cdot x_0 + x_1 + 0 \cdot u_0 + 0 \cdot u_1. \end{cases} \quad (2.10)$$

Перепишемо систему (10) рівнянь в матричній формі:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u; \\ y = C \cdot x + D \cdot u. \end{cases} \quad (2.11)$$

Де матриці коефіцієнтів мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} & -\frac{c_e \cdot \Phi \cdot 30}{\pi \cdot L_{\Sigma}} \\ \frac{c_M \cdot \Phi}{J} & -\frac{B_m}{J} \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\Sigma}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}, \\
 C &= \begin{bmatrix} c_M \cdot \Phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Необхідно відмітити, що оскільки усі елементи матриці обходу D дорівнюють 0, то в стрілочному двигуні, як у всіх фізичних системах, в усіх каналах між входами і виходами присутні динамічні ланки і вхід не має прямого впливу на вихід через звичайні коефіцієнти передач.

3 ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

3.1 Загальні відомості

Високошвидкісний транспорт — це наземний транспорт, який більшу частину протяжності колії проходить зі швидкістю понад 200 км/год. За способом створення та реалізації зусиль підвісу, напрямку та тяги він підрозділяється на високошвидкісний колісний та магнітний (так званий магнітолевітуючий). Кожен із цих видів є нерозривною сукупністю рухомого складу, шляху, а також систем електропостачання і управління. Наявність у колійній структурі високошвидкісного транспорту постійно діючих на рухомий склад напрямних властивостей робить його з усіх видів транспорту, що експлуатуються сьогодні, найбільш безпечним. Водночас необхідність зміни траєкторії руху рухомого складу, що існує при перевезенні пасажирів і вантажів, вимагає пристроїв, що забезпечують розгалуження шляхів при їх з'єднанні та перетині — стрілочних переводів. Якість роботи стрілочних переводів багато в чому визначається електроприводом їхнього переводного механізму.

Сучасні електроприводи стрілочних переводів формуються на базі двигунів постійного струму та асинхронних. Водночас у загальнопромислових електроприводах у зв'язку із застосуванням нових електротехнічних матеріалів, використанням прогресивних технологій та розвитком перетворювальної техніки в даний час набувають широкого розповсюдження системи з ротативними вентиляційноіндукторними та лінійними електродвигунами. Вони, завдяки унікальним властивостям конструкції та можливостям систем управління, забезпечують високу точність позиціонування робочого органу та необхідний рівень регульованості тягового зусилля. Проте, робота цих електроприводів у системі стрілочних переводів високошвидкісних магістралей, де на різних

ділянках довжини гостряків ця регульованість тягового зусилля особливо необхідна, ще недостатньо вивчена [12].

Розглянемо особливості стрілочних переводів для високошвидкісних магістралей колісного транспорту, які використовують електроприводи на базі ротативних вентильноіндукторних двигунів, а також лінійних двигунів електромагнітного та індукторного типу. Також ознайомимося з результатами порівняння їх роботи, що дозволяють зробити висновок про раціональні сфери їх застосування. Надамо інформацію про стрілочні переводи колійних структур магнітолевітуючого транспорту, на підставі якої формулюється тенденція розвитку стрілочних переводів на перспективу.

3.2 Стрілочні переводи високошвидкісного колісного транспорту

Одним з найважливіших показників, що визначають задовільну динаміку роботи високошвидкісного колісного транспорту, є безперервність поверхні катання колеса рейкою. На високошвидкісних магістралях (ВШМ) це забезпечується спеціальними конструкціями зрівнювальних стиків та стрілочних переводів. Стрілочні переводи ВШМ повинні забезпечувати рух прямого напрямку з максимальною встановленою для магістралі швидкістю (200–350 км/год). А під час руху на бічне — до 220 км/год. Довжина переводів, необхідна для забезпечення безпеки на високій швидкості, може становити до 170 м при довжині гостряка до 70 м. Крім того, такі переводи, як правило, мають хрестовини з рухомим осердям.

Стрілочні переводи для ВШМ повинні:

— забезпечувати можливість контрольованого та керованого за заданим законом переміщення гостряків щодо рамної рейки та сердечників щодо усовиків хрестовин;

— гарантувати безумовне замикання у певних точках прилеглому гостряку з рамною рейкою та рухомого серця з усовиком хрестовини, а також надійне фіксування відведеного гостряка по всій його довжині;

— витримувати в заданих межах геометричні параметри рейкової колії в частині відстаней між робочими гранями осердя хрестовини та головки контррейки, контррейки та усовика, а також понижень гостряка проти рамної рейки та рухомого сердечника проти усовика.

Для задоволення цих вимог на ВШМ механічні зусилля для пересування довгих гостряків і сердечників хрестовин додаються в кількох точках по всій їх довжині і забезпечуються групою електроприводів, як показано на рис. 3.1.

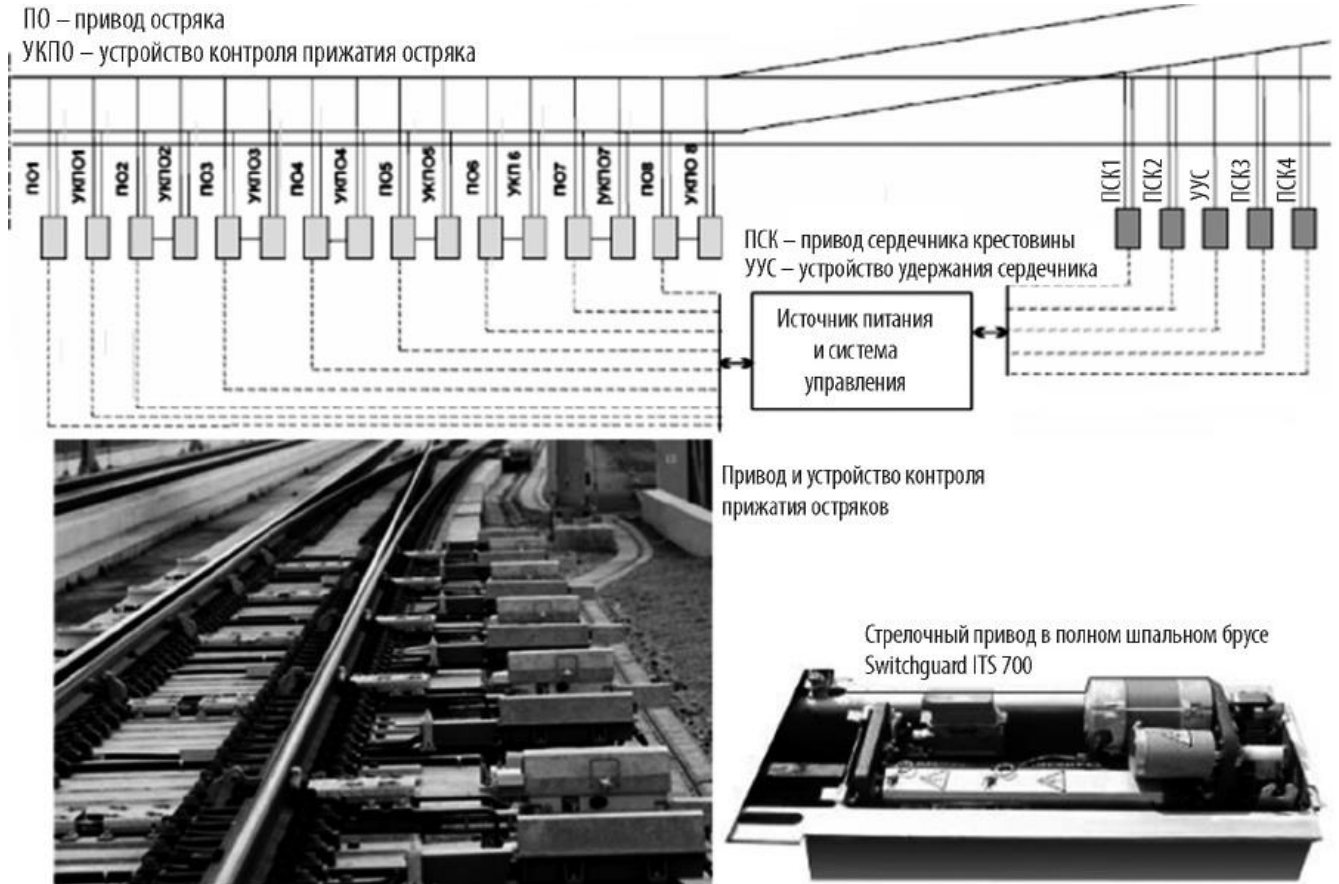


Рисунок 3.1 – Стрілочний перевід ВСМ

Так, на ВШМ Париж-Ліон для стрілочного переводу з маркою хрестовини 1/65 при повній довжині 151,78 м і довжині гостряка 57,65 м використовуються 11 електроприводів, 8 з яких рухають гостряки і 3 – рухомі осердя хрестовини. Очевидно, що кожен з цих електроприводів повинен переміщати гостряки та рухливі осердя певного стрілочного переводу на різні відстані, тобто електроприводи одного стрілочного переводу повинні мати різний хід шибера. При цьому час переводу для всіх приводів має бути однаковим. Тому однією з найважливіших вимог до електроприводу стрілочного переводу слід вважати його можливість забезпечувати контрольовану та керовану силу, як функцію переміщення гостряків і осердь хрестовин, за безумовної рівності швидкостей переміщення цих рухомих елементів. Високі динамічні навантаження на стрілку під час руху на високій швидкості вимагають механічного замикання рухомих елементів переведення з силою їх утримання не менше 50 кН.

Крім того, проблема, пов'язана зі складністю забезпечення машинного підбиття баласту у зоні тих шпал, де розташовані стрілочні переводи, спонукала до створення пристрою стрілочного переводу «в порожній шпалі». Це технічне рішення накладає на пристрій електроприводу додаткові обмеження – габаритні.

Сучасні електроприводи стрілочних переводів EBI Switch 2000 (Bombardier), Switchguard ITS 700V (Siemens), СП-6МГ, СП-12Н, СП-10 (ЕЛТЕЗА) формуються на базі: двигунів постійного струму потужністю 0,18–0,4 кВт, напругою 24, 110, 220 В та частотою обертання 700–1350 об/хв; 3-х фазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором потужністю 0,48–0,8 кВт, напругою 220 та 380 В, що розвивають 1440 та 2550 об/хв при частоті живлення 50 Гц; однофазних асинхронних конденсаторних двигунів, що живляться напругою 110 і 220 В, 50 Гц і мають частоту обертання 1300 і 1800 об/хв. Електромагнітний момент, який розвивають ці електродвигуни, через механічну передачу надходить на сполучні тяги гостряків стрілки або рухомих сердечників хрестовин і здійснює їх функціонування відповідно до заданого алгоритму управління. Механічна

передача включає редуктор із фрикційною муфтою, головний вал із шиберною шестернею та робочий шибер. Таким чином, вона містить, як правило, 4 зубчасті зачеплення. Багатомасовість такої передачі та наявність у ній пружних зв'язків із зазорами створює проблеми з роботою систем управління, а, отже, і із забезпеченням процесу переведення стрілок і гостряків за необхідним алгоритмом. Усунення цієї проблеми вбачається у максимальному скороченні ланок механічної передачі за рахунок використання як електромеханічних перетворювачів енергії для приводу переведення ротативного вентильного індукторного двигуна (ВІД), а також лінійних електродвигунів електромагнітного (ЛДЕМ) та індукторного (ЛІД) типу.

Схема пристрою тягового приводу стрілочного переводу «в порожній шпалі» з використанням ВІД наведена на рис. 3.2 [13, 14].

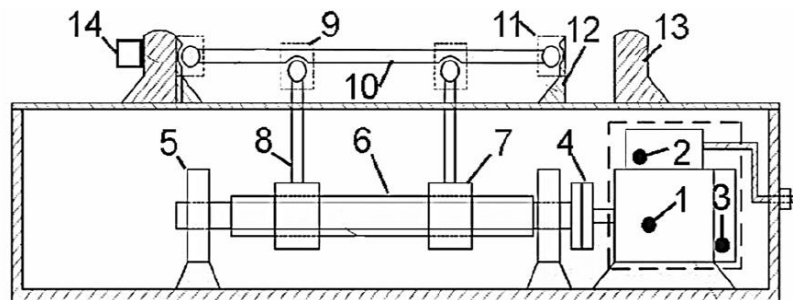


Рисунок 3.2 – Привід на базі ВІД

Електродвигун 1 забезпечений блоком управління 2 з регулятором частоти обертання на базі фазілогіки та блоком додаткового обладнання 3. Вал двигуна за допомогою муфти 4 з'єднується за допомогою встановленого в підшипниках 5 гвинта 6 з гайкою кочення 7. Ці гайки за допомогою вертикальних тяг 8 через шарнірні сполуки 9, поперечні тяги 10 і шарнірні з'єднання 11 об'єднують привід з гостряками стрілок 12. Електричний двигун перетворює електричну енергію на механічне обертання валу. Пара «гвинт — гайка кочення» перетворює обертальний рух гвинта на поступальний рух гайки. Гайки через вертикальні тяги, шарніри та поперечні тяги передають зусилля гострякам, які здійснюють своє

поступальне переміщення між рамними рейками 13. Виконання механізму передачі сил за схемою з використанням пари «гвинт — гайка кочення» та відсутністю редуктора дозволило зменшити в електроприводі кількість мас, зазорів і пружних зв'язків. Забезпечення електроприводу блоком керування електронним комутатором регулятора частоти обертання та блоком додаткового обладнання з датчиком контролю температури електродвигуна, а також встановлення на зовнішній стороні рамних рейок безконтактних датчиків положення гостряків 14 дають можливість ефективно керувати процесом переведення стрілок. Перераховані особливості електроприводів на базі ВІД спрощують конструкцію, підвищують швидкодію, знижують втрати на тертя, зменшують витрати на обслуговування та підвищують надійність роботи стрілочних переказів.

Наступним кроком на шляху спрощення конструкції, підвищення ККД, зниження витрат на обслуговування та підвищення надійності роботи стрілочних переказів є заміна ротативних електродвигунів на лінійні. Відмінною особливістю таких двигунів є їхня здатність до перетворення електричної енергії на механічні поступальні рухи виконавчих механізмів стрілочних переводів — гостряків і рухливих сердечників хрестовин, безпосередньо, без проміжних механічних перетворювачів [15].

Електропривід на базі лінійних електродвигунів електромагнітного типу (ЛДЕМ) представлений на рис. 3.3.

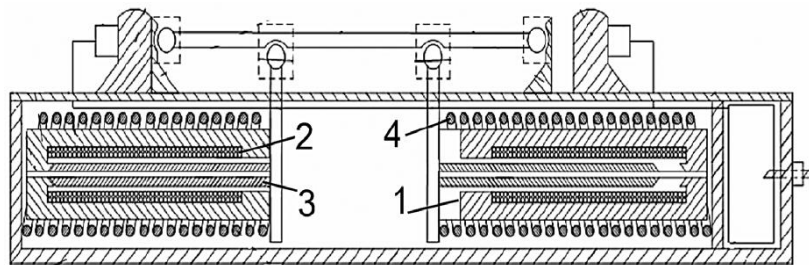


Рисунок 3.3 – Привід на базі ЛДЕМ

Він складається із двох ЛДЕМ. Кожен ЛДЕМ включає статор 1 з обмоткою 2 і переміщується по направляючій вздовж осі статора осердя 3. Статор і осердя пов'язані між собою пружинним акумулятором енергії 4. Оскільки ЛДЕМ створює електромагнітну силу одного напрямку, для забезпечення реверсивності в роботі переводу в порожній шпалі розміщуються дзеркально та симетрично щодо осі рамних рейок два таких двигуни. Необхідність у пружинному акумуляторі енергії для двигуна цього типу обумовлена наявністю в ньому істотної залежності зусиль, що розвиваються двигуном, від робочого зазору між статором і сердечником, що переміщується: при великому зазорі (початок переводу) — вона мала, а при малому (закінчення процесу переводу) – неприпустимо велика. Очевидною є раціональність технічного рішення закласти надлишок енергії, що має місце наприкінці циклу роботи електроприводу стрілочного переведення для того, щоб надалі використовувати її на початку переміщення стрілок.

Електропривод на базі лінійного індукторного типу представлений на рис. 3.4.

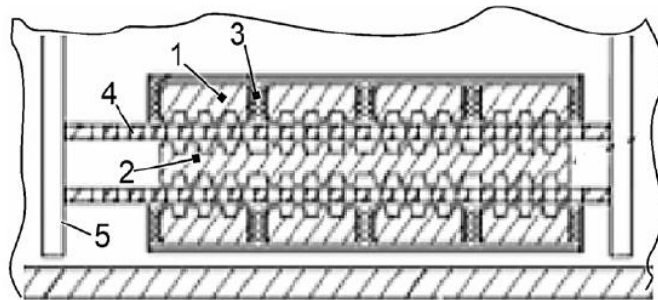


Рисунок 3.4 – Привід на базі ЛІД

Двигун складається зі статора, до складу якого входить зубчастий магнітопровід розділений повітряним зазором на зовнішню 1 і внутрішню частину 2, а також зміщені вздовж поздовжньої осі двигуна секції обмоток збудження 3. У зазорі між зовнішньою і внутрішньою частинами магнітопроводу статора розташовується подвижний сердечник 4, з'єднаний з поперечними тягами стрілочних переводів 5.

У цьому двигуні робочими є дотичні по відношенню до зазору сили. Вони виникають як наслідок наявності постійно діючого градієнта зміни магнітної енергії в зазорі, обумовленого як спеціальною конструкцією магнітопроводу статора і рухомого сердечника, так і регульованістю МРС обмоток збудження, а також послідовністю їх підключення до джерела живлення. Ці сили суттєво менші, ніж у ЛДЕМ. Проте, їх сталість, тобто незалежність від переміщення рухомого осердя, а також здатність до реверсування робить цей двигун конкурентоспроможним [16].

Зрозуміло, що всі розглянуті електроприводи повинні забезпечуватись замикаючими механізмами.

Для оцінки роботи електроприводу стрілочного переведення введено універсальний векторний критерій [1]:

$$K = [t_s, F_{12}, M_i, \Sigma P]^T \quad (3.1)$$

де t_s – час переведення стрілки;

F_{12} – пружня сила в робочій тязі;

M_i – імпульс удару гостряка об рамну рейку;

ΣP – загальні втрати в стрілочному переведенні.

Всі ці показники відносні.

Залишкову порівняльну оцінку запропоновано проводити за модулем цього критерію:

$$|K| = \sqrt{t_s^2 + M_i^2 + F_{12}^2 + \Sigma P^2} \quad (3.2)$$

За результатами розрахунку для електроприводу на базі ВІД величина критерію склала 0,21, для електроприводу на базі ЛДЕМ — 0,0818, а на базі ЛІД –

0,04. У той час як для електроприводів, що експлуатуються зараз, на базі двигунів постійного струму і асинхронних цей критерій склав 0,65 і 0,59, відповідно.

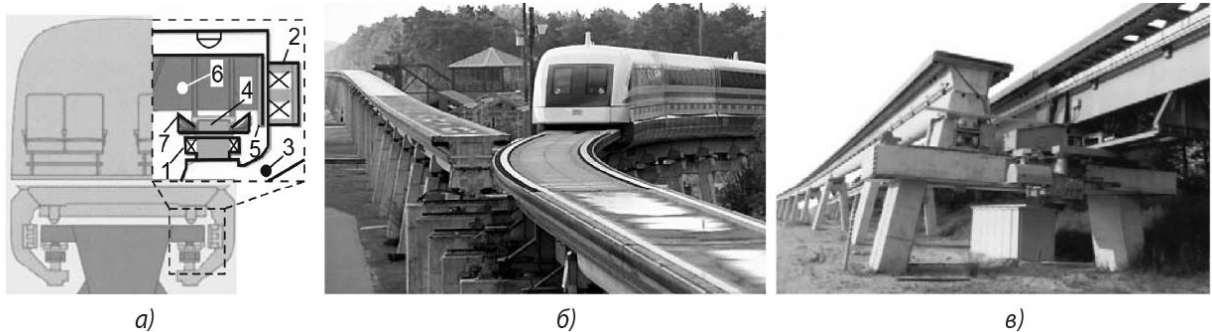
Таким чином, стрілочні переведення з електроприводами на базі ВІД, ЛДЕМ і ЛІД цілком можуть бути ефективно використані для верхньої будови колії швидкісних та високошвидкісних магістралей. При цьому електропривід на базі ЛІД, який на більшій довжині переміщення виконавчого механізму може забезпечити сталість сили, доцільно використовувати для переводу гостряків. У той час як ЛДЕМ, який має підвищену швидкодію і значне зусилля в кінці ходу, більш підходить для приводу осердя хрестовин. Крім того, всі ці приводи можуть бути ефективно застосовані також і на коліях гіркової централізації.

Дослідження, спрямовані на підвищення ефективності роботи електроприводів стрілочних переводів для високошвидкісного електричного колісного транспорту, показали дієвість заходів, спрямованих на максимальне скорочення ланок механічної передачі. У електроприводі з урахуванням ротативного ВІД це забезпечується перетворенням з допомогою пари «гвинт — гайка кочення» обертального руху валу двигуна поступальний рух робочих тяг. Ця схема, яка виключила із ланцюга передачі потужності зубчасті зачеплення редуктора та шибера, стала можливою завдяки наявності у ВІД високого пускового моменту. В електроприводах на базі лінійних електродвигунів електромагнітного типу та індукторного типу ефект досягається повним виключенням із ланцюга передачі сил будь-яких механічних перетворювачів. Тут електромагнітна сила, що виникає в електродвигуні, безпосередньо передається на тяги гостряків або сердечників хрестовин [17].

3.3 Стрілочні переводи високошвидкісного магнітолевітуючого транспорту

Транспорт на магнітному підвісі (магнітолевітувальний транспорт) науково-технічне співтовариство найрозвиненіших країн розробляє вже понад 50 років. З безлічі різновидів систем підвісу та бічного напрямку такого транспорту на сьогодні застосування знайшли системи електромагнітного підвісу та електродинамічного підвісу.

Електромагнітна система працює на принципі тяжіння електромагніту до феромагнетика (рис. 3.5а). Електромагніти підвісу 1 і бічного напрямку 2 розміщуються на шасі вагона 3, а феромагнітні смуги підвісу 4 і бічного напрямку 5 закріплюються навпроти цих електромагнітів на естакаді 6 вздовж колійного полотна. Електромагніти охоплюють знизу та збоку колійну структуру. При живленні струмом обмоток електромагнітів між ними та феромагнітними смугами колійного полотна виникає сила тяжіння. Якщо при певному зазорі ця сила врівноважує силу ваги вагона і силу бічного збудження, виникає безконтактний електромагнітний підвіс і бічний напрям – так звана електромагнітна левітація.



а) – принцип притягнення електромагніту до феромагнетика; б), в) – механізм захвату та фіксації сталеві балки

Рисунок 3.5 – Стрілочний перевід магнітного транспорту з електродинамічним підвісом

Сила тяги, що приводить вагон в рух, створюється взаємодією магнітного поля електромагнітів підвісу з магнітним полем, що біжить, трифазної обмотки якоря лінійного синхронного двигуна, розміщеної на колійному полотні в феромагнітних смугах підвісу [18].

Електромагнітна система принципово нестійка, працює при повітряному зазорі між вагоном і колійним полотном 8–10 мм (через електромагнітні, теплофізичні та вагові обмеження параметри електромагнітів) і тому при русі поїзда з такими високими швидкостями вона потребує надзвичайно швидкодіючого та точного регулювання струмів в обмотках електромагнітів.

Очевидно, що ці транспортні системи потребують стрілочних переводів. Стрілочні переводи можуть бути використані для плавного переходу між коліями при русі як по прямому напрямку на магістралі (високошвидкісні), так і при русі на бічне відгалуження на станцій та диспетчерських з'їздах (низькошвидкісні). Вони повинні задовольняти вимоги умови взаємодії між транспортним засобом та колійною структурою за наявності у поперечного перерізу балки необхідного запасу міцності та терміну служби.

Вперше такі переводи було реалізовано на випробувальному полігоні в Емсланді (Transrapid Versuchsanlage Emsland). Високошвидкісний стрілочний перевод є багатокутною структурою, що складається з 8 модулів, розміщених на опорах, які встановлені з інтервалом 18,5 м по колу з радіусом 2300 м. Кожен модуль включає зварений з листової сталі U-подібний короб, що несе, і містить всі елементи колійної структури — феромагнітні елементи бокового напрямку і підвісу, а також секції обмотки лінійного синхронного двигуна.

На кожній другій опорі стрілочного переводу для переміщення модулів розміщується електромеханічний привід із зубчастою передачею та кривошипно-колінним механізмом (колінчастий важіль), а також механізм захоплення та фіксації сталеві балки (рис. 3.5в). Момент, створюваний електродвигуном, через черв'ячну передачу редуктора, що має зовнішній діаметр 1,7 м і висоту 0,85 м,

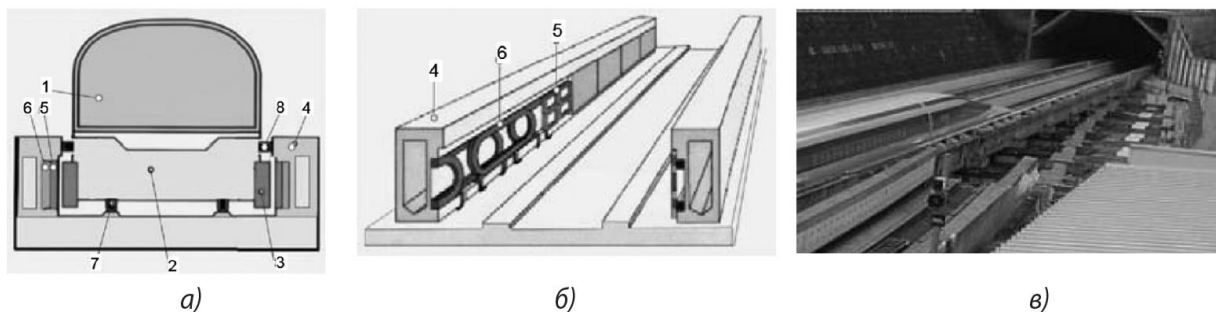
через вихідний вал діаметром 0,5 м і висотою 0,9 м, передається на коромисло, виконане у вигляді сталевого зварного короба розмірами 2,2x0,4x0,26 м. Інший кінець коромисла через повзун пов'язаний із пазом направляючої рами. Рама жорстко зафіксована вздовж несучого короба у двох місцях: з одного боку – безпосередньо, а з іншого – через двовісний візок. Цей візок, виконаний у вигляді зварного короба з габаритами – 4,7×0,5×1,2 м має можливість переміщатися на колесах по поперечних опорних балках, довжина яких доходить до 11 м, за рахунок повороту коромисла в межах 180° [19]. Довжина шляху переміщення візків залежить від того, на якому з модулів по відношенню до початку стрілочного переводу вони розташовані. Закріплення кінцевих положень стрілочного переводу забезпечується висуванням із боку опор з допомогою гідроприводу спеціальних фіксаторів. Стрілочні переводи виконуються у двох варіантах: двоколіїному – для перемикачів між двома коліями, і триколіїному – між трьома коліями.

Загальна вага низькошвидкісної стрілки становить 300 тонн, а довжина – 78 м. У відгалуженні швидкість обмежена 100 км/год, тоді як у прямому напрямку дозволена повна робоча швидкість. У високошвидкісного стрілочного переводу вага складає 600 тонн і загальна довжина – 148 м. Це дозволяє мати швидкість у відгалуженні 200 км/год та максимальну швидкість у прямому напрямку. Стрілочні переводи розраховані для терміну служби приблизно мільйон циклів або двадцять — тридцять років експлуатації.

Очевидно, що стрілочні переводи для високошвидкісного транспорту з електромагнітним підвісом є складними, громіздкими і дорогими спорудами.

Пристрій транспорту з електродинамічним підвісом ілюструє рис. 3.6а [4]. Тут кузов вагона 1 зчленовується з рамами візків 2, де розміщені дипольні надпровідні магніти 3. Короткозамкнуті колійні контури підвісу 5, виконані з струмопровідного немагнітного матеріалу (алюмінію), складаються з двох вертикальних, з'єднаних зустрічно, котушок, розташованих двома рядами вздовж

вертикальних стінок 4 залізобетонною напрямною. Кожна вертикальна пара цих котушок утворює так звану нуль-потокову систему підвісу. Крім того, пари котушок обох сторін колії, які також зустрічно з'єднані, утворюють нуль-потокову систему бічного напрямку (рис. 3.6б). При переміщенні джерела магнітного поля (надпровідних магнітів) щодо колійних контурів в них наводяться струми, що прагнуть «виштовхнути» джерело магнітного поля з області розташування колійних контурів, і таким чином забезпечують безконтактний підвіс і бічне спрямування поїзда — електродинамічну левітацію. На вертикальних стінках шляху встановлюються також котушки 6, що живляться трифазним струмом, які у взаємодії з надпровідними магнітами вагона утворюють синхронний лінійний двигун. Використання надпровідних магнітів дає можливість підняти поїзд вагою кілька десятків тонн на висоту 100–150 мм щодо дороги.



а) – пристрій магнітного транспорту з електродинамічним підвісом; б) – нуль-потокова система бокового напрямку; в) – приклад стрілочних переходів на полігоні

Рисунок 3.6 – Стрілочний перевід магнітного транспорту з електродинамічним підвісом

Оскільки рівень струмів, що наводяться в котушках колійного полотна, досягає значень, достатніх для забезпечення електродинамічної левітації при швидкостях більше 70 км/год, підвіс і бічне напрямок вагонів до цієї швидкості забезпечується 7, що підтримують і направляють 8 колесами. Електродинамічна система є принципово стійкою і не потребує системи управління положенням вагонів у

просторі. Основна проблема – створення легких, компактних та потужних надпровідних магнітів.

Система з електродинамічним підвісом також потребує спеціального пристрою стрілочних переводів. Як видно із рис. 3.6в, що існують на полігоні Яманаші переводи принципово не відрізняються від переводів в Емсланді – і ті, й інші переміщують відносно компактні та легкі елементи активної колійної структури тяги, підвісу та спрямування разом важкими та громіздкими складовими інфраструктури. Відмінність полягає лише в тому, що для системи з електромагнітним підвісом цією інфраструктурою є Т-подібні сталеві балки, а для системи з електродинамічним підвісом – U-подібні залізобетонні жолоби.

Оригінальний спосіб зниження масогабаритних параметрів стрілочних переводів для магнітолевітуючого транспорту з електродинамічним підвісом запропонований у проекті MAGLEV 2000 [5]. Пристрій та принцип дії такого проекту ілюструє рис. 3.7.

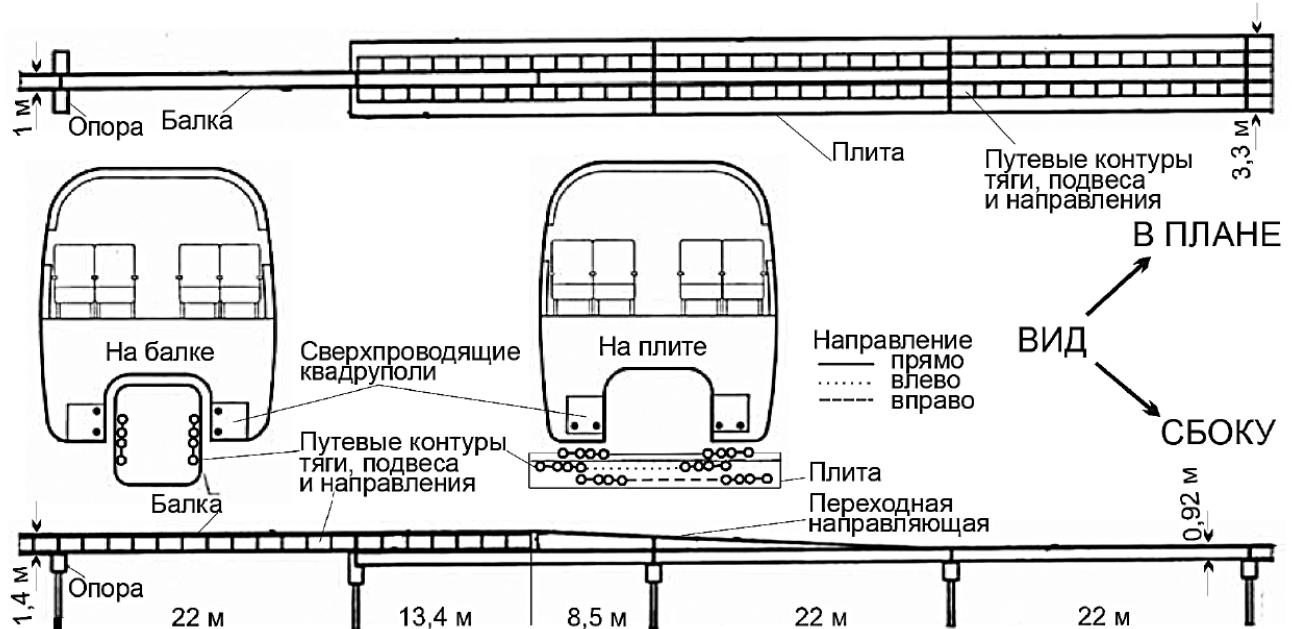


Рисунок 3.6 – Магнітолевітуюча транспортна система MAGLEV 2000

На магістралі колійна структура є балкою, а в зоні стрілочних переводів – плоскою плитою. Дорожні електричні контури, що виконують одночасно функції

тяги, підвісу та напрямку (так звана система PLG [6]), закріплюються вертикально на обох бічних поверхнях балки, а в зоні плоскої плити – горизонтально в два ряди і симетрично щодо траєкторії руху рухомого складу. Надпровідні магніти, розміщені на рухомому складі та виконані у вигляді квадруполів, однаково ефективно в плані створення електродинамічних сил тяги, підвісу та бокового напрямку можуть взаємодіяти з колійними контурами, розміщеними як на балці, так і на плиті [20].

На плоскій плиті розміщено кілька комплектів колійних обмоток, кожна з яких електрично пов'язана з обмоткою на балці однієї магістралі. Приєднання цих обмоток в заданій послідовності до системи енергопостачання, а також введення/виведення в/з стану короткого замикання ряду колійних контурів, дозволить приймати рухомий склад з будь-якої магістралі, так і відправляти його на необхідну магістраль. Причому зміни електродинамічних сил підвісу і бокового напрямку, що виникають при цих комутаціях, можуть ефективно компенсуватися за рахунок регулювання параметрів лінійного синхронного двигуна.

Таким чином, в описаному пристрої переведення стрілок здійснюється вже не механічним переміщенням активних колійних елементів з їхньою громіздкою та важкою інфраструктурою, а процесами комутації в схемах електричних кіл колійних обмоток тяги, підвісу та бокового напрямку.

3.4 Висновок

Технічне рішення щодо влаштування зміни траєкторії руху магнітолевітуючого транспорту не шляхом переміщення масивних елементів колійної структури, а за допомогою комутації конфігурації електричних контурів тяги, підвісу та бокового напрямку, ілюструє тенденцію розвитку стрілочних переводів для високошвидкісного електричного транспорту. Така тенденція свідчить про таке. По-перше, про важливість проблеми стрілочних переводів для цього виду транспорту, вирішення якої зажадало зміни не лише колійної структури, а й

конструкції рухомого складу. По-друге, це технічне рішення ще раз підтверджує справедливості тези про те, що високошвидкісний електричний транспорт є нерозривною сукупністю 4-х складових — рухомого складу, колії, а також систем електропостачання та управління.

Запропоновані для стрілок високошвидкісного колісного транспорту електроприводи на базі ротативних вентильних індукторних двигунів з передачею «гвинт гвинта кочення», лінійних електромагнітних та індукторних двигунів забезпечують переміщення гостряків і сердечників хрестовин при мінімальній кількості приєднаних мас. Це у руслі світової тенденції розвитку високошвидкісного електричного транспорту.

4 ВИЯВЛЕННЯ НЕПРАВНОСТЕЙ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДНИХ ПРИБОРІВ З ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ГРАФІКУ ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕВОДУ

4.1. Вибір діагностичних параметрів

Серед наявних вимірювань у системі технічного діагностування та моніторингу, які дають змогу виявляти можливі несправності стрілочного електроприводу з електродвигуном змінного струму, – потужність переведення стрілки [21].

Приклад проведення імітацію несправностей, характерних для стрілок з електродвигуном змінного струму:

1. Наявність перехідного опору на фазах живлення ЕД. Несправність може проявлятися в разі забруднення й окислення сполучних клем на фазах ЕД, у разі порушення монтажу в робочих колах або поганого контакту з'єднань у стрілочних муфтах кабельної мережі. Для імітації несправності в розрив кола однієї з фаз підключався резистор. Дослідним шляхом встановлено, що для імітації цієї несправності слід вибирати опір $R_{\text{п}}$ не більше 150 Ом. За опору $R_{\text{п}}$ понад 150 Ом енергії для запуску переведення стрілки не вистачає.

2. Наявність короткого замикання (струму витоку) між фазами ЕД. Причиною цієї несправності найчастіше є порушення ізоляції кабелю живлення ЕД. Для імітації несправності дві фази були замкнуті деякий час через резистор. Дослідним шляхом встановлено, що для імітації цієї несправності слід вибирати опір $R_{\text{п}}$ не менше 120 Ом. За опору $R_{\text{п}}$ менше 120 Ом підвищується ймовірність згоряння запобіжників живильних кіл.

3. Розрегулювання зчеплення фрикційного механізму стрілочного електроприводу. Розрегулювання фрикційного зчеплення в бік ослаблення зусилля роботи на фрикцію може призвести до ситуації, коли під впливом зовнішніх

чинників (ожеледь, набивання снігу, засміченість стрілочних башмаків) стрілка не переведеться, оскільки їй не вистачить зусилля для подолання впливу цих чинників. У разі розрегулювання фрикційного механізму в бік збільшення зусилля, під час роботи на фрикцію може виникнути надмірне навантаження на механізми, що знижує загальний ресурс роботи.

4. Забруднення стрілочних башмаків стрілочного переводу. Ця несправність проявляється за відсутності мастила або наявності сильного забруднення (пісок, сніг) на стрілочних башмаках. Для імітації несправності за допомогою брухту створювалися перешкоди для переведення гостряків з одного крайнього положення в інше.

5. Наявність мимовільного руху гостряків. Основні причини цієї несправності:

- затягнутість болта в корені остряка;
- несправність кореневого кріплення;
- несправність розпірних втулок;
- порушення геометрії гостряка;
- зміщення положення гостряка відносно башмаків;
- наявність зазору в кореновому стику гостряка (не менше 4 мм).

6. Збільшене зусилля під час замикаання шибера. Основні причини цієї несправності:

- затиснення кореня гостряка (не стосується гнучких гостряків); вкладишно-накладкове скріплення має на увазі проміжок не менше 4 мм у корені поворотного гостряка;
- порушення геометрії (епюра) стрілочного приводу, тобто непаралельне прилягання гостряка до рамної рейки.

4.2. Аналіз діагностичних параметрів

Швидкість обробки інформації дозволяє з високою точністю відстежити зміну потужності переведення під час роботи двигуна. Форма графіка потужності переводу визначається станом елементів електричного двигуна та механічних частин стрілочного електроприводу (рис. 4.1-4.12).

Для виявлення та аналізу характерних ознак несправностей проведено порівняння графіків несправного переведення з графіком справного переведення однієї і тієї ж стрілки [22]. Наприклад, наявність перехідного опору у фазах електричного двигуна проявляється на графіку потужності зменшенням значення пускового піку та збільшенням його тривалості, а також збільшується середнє значення потужності переведення стрілки (рис. 4.13); коротке замикання між фазами живлення електричного двигуна проявляється у вигляді збільшеної потужності під час пуску двигуна та в робочій зоні (рис. 4.14); забруднення стрілочних башмаків – у вигляді сильної нерівномірності графіка в робочій зоні та підвищеної потужності переведення (рис. 4.15); наявність мимовільного руху гостряків – у вигляді осідання потужності до рівня холостого ходу після відмикання (рис. 4.16); збільшене зусилля під час замикання шибера – у вигляді різкого зростання споживаної потужності наприкінці переведення (рис. 4.17). Неправильне регулювання фрикційного зчеплення проявляється у збільшенні рівня потужності під час роботи на фрикцію відносно рівня потужності справного переведення менш ніж на 20 % або більш ніж на 30 % (рис. 4.18).

У результаті аналізу змін потужності переведення за різних несправностей було виділено діагностичні критерії (ДКП) для створення діагностичної моделі за потужністю переведення стрілки [23]:

- d1 – середнє значення потужності в робочій зоні, Вт;
- d2 – дисперсія потужності в робочій зоні, Вт;
- d3 – середня зміна потужності в робочій зоні, Вт;

- d4 – медіана потужності в робочій зоні, Вт;
- d5 – площа робочої зони, Дж;
- d6 – тривалість запуску двигуна, с;
- d7 – максимальне відхилення від медіани, Вт;
- d8 – кількість максимумів на графіку потужності робочої зони;
- d9 – потужності замикаання стрілки, Вт;
- d10 – тривалість переведення, с.

Таблиця 4.1 – Середні значення діагностичних критеріїв

Стан	Діагностичні критерії				
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Справне	257±36	12,9±9	2,27±0,7	258,5±18,5	722±90
Коротке замикання між фазами живлення ЕД	513±20	17,3±12,7	2,5±1,2	516±17	1482±145
Перехідний опір у фазах ЕД	310±19	13,6±10,3	1,82±0,64	311±19	887±223
Забруднення стрілочних черевиків	359±120	56,2±36	5,44±2,11	370±90	2093±713
Стан	Діагностичні критерії				
	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
Справне	0,143±0,013	76,3±60	32±5	304±90	4±0,1
Коротке замикання між фазами живлення ЕД	0,157±0,027	137,5±115	31±2	570±50	4±0,1
Перехідний опір у фазах ЕД	0,284±0,046	87,1±69	25±13	355±53	4,1±0,15
Забруднення стрілочних черевиків	0,134±0,1	190±33	62±30	390±62	6,75±1,6

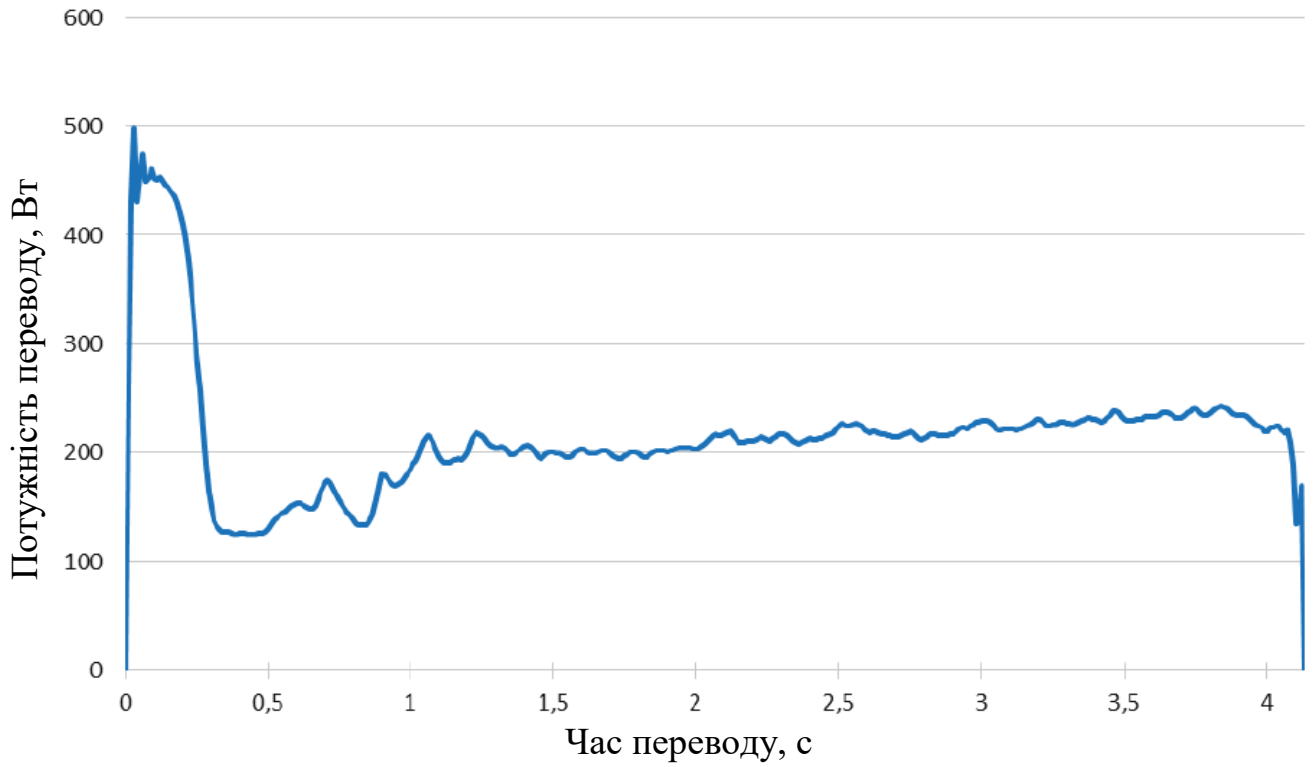


Рисунок 4.1 – Прояв перехідного опору у фазах електричного двигуна на графіку потужності переводу

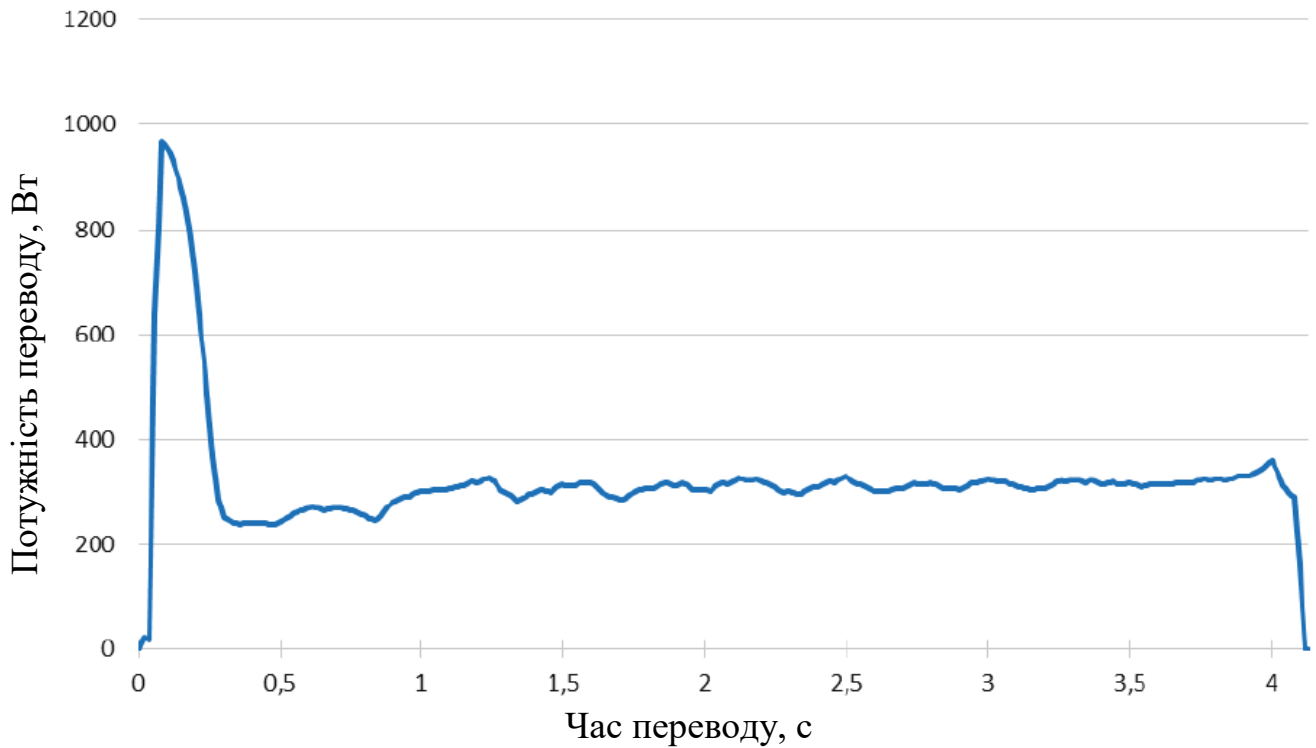


Рисунок 4.2 – Прояв короткого замикання між фазами живлення електричного двигуна на графіку потужності переводу

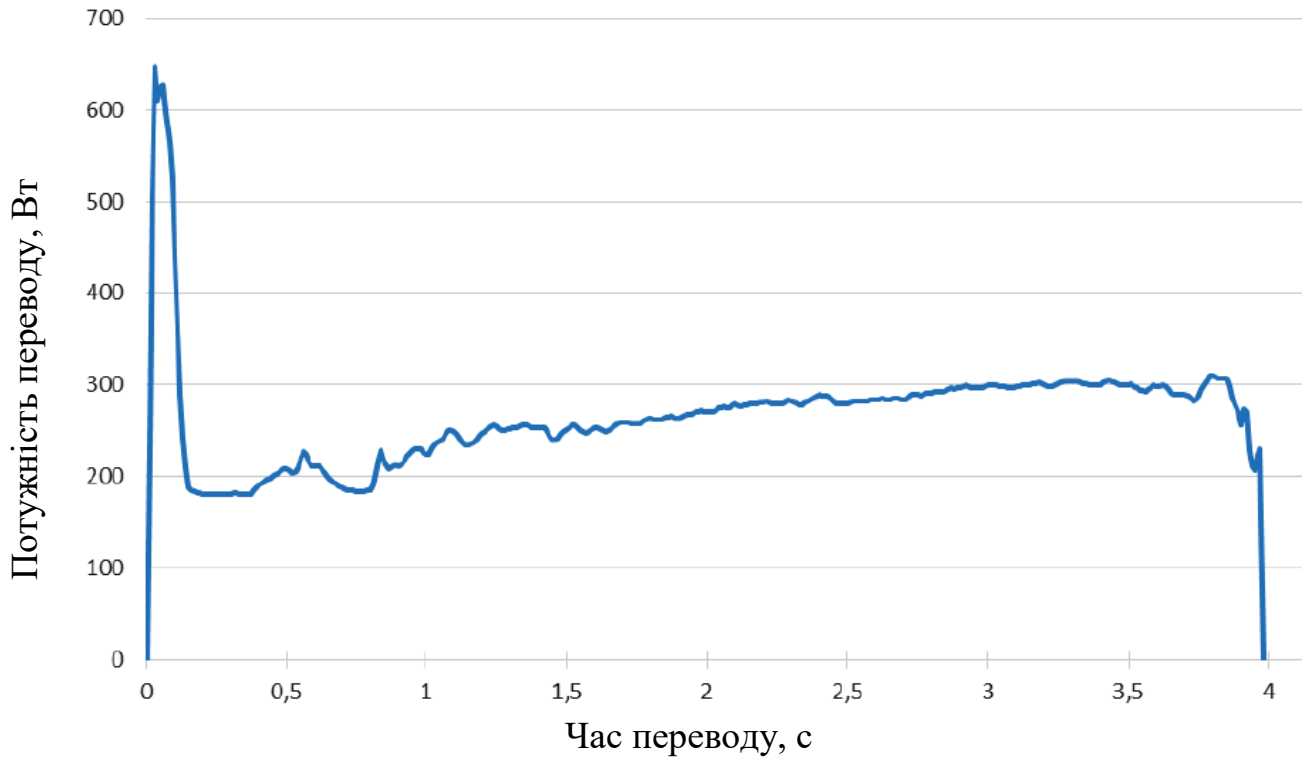


Рисунок 4.3 – Прояв розрегулювання зчеплення фрикційного механізму стрілочного електроприводу на графіку потужності переводу

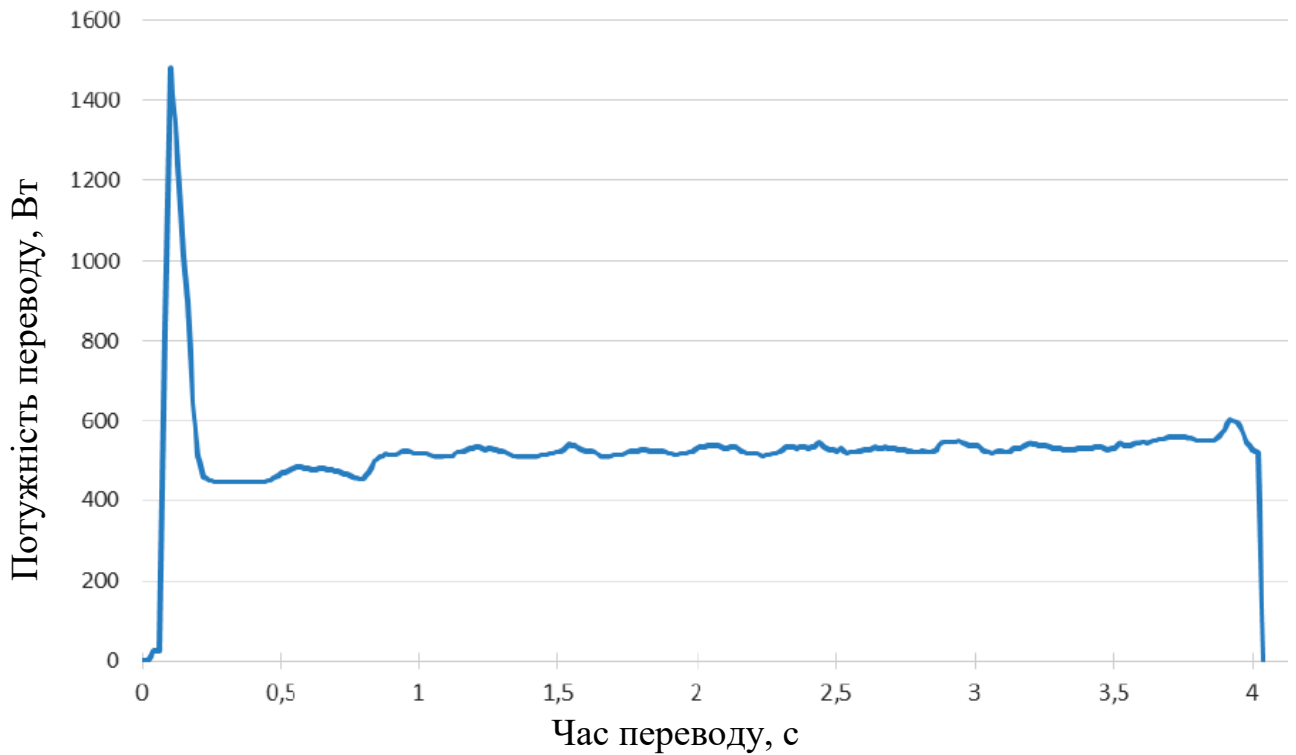


Рисунок 4.4 – Прояв забруднення стрілочних башмаків на графіку потужності переводу

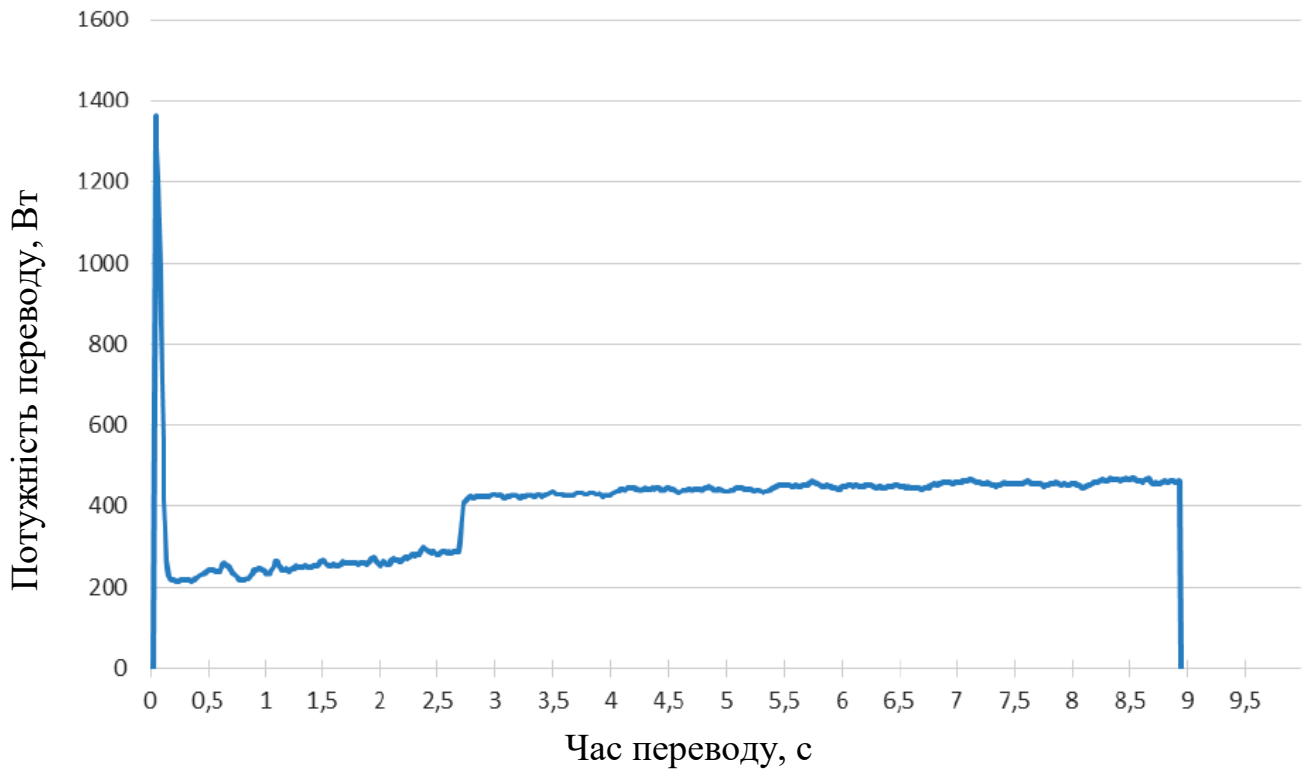


Рисунок 4.5 – Прояв мимовільного руху гостряків на графіку потужності переводу

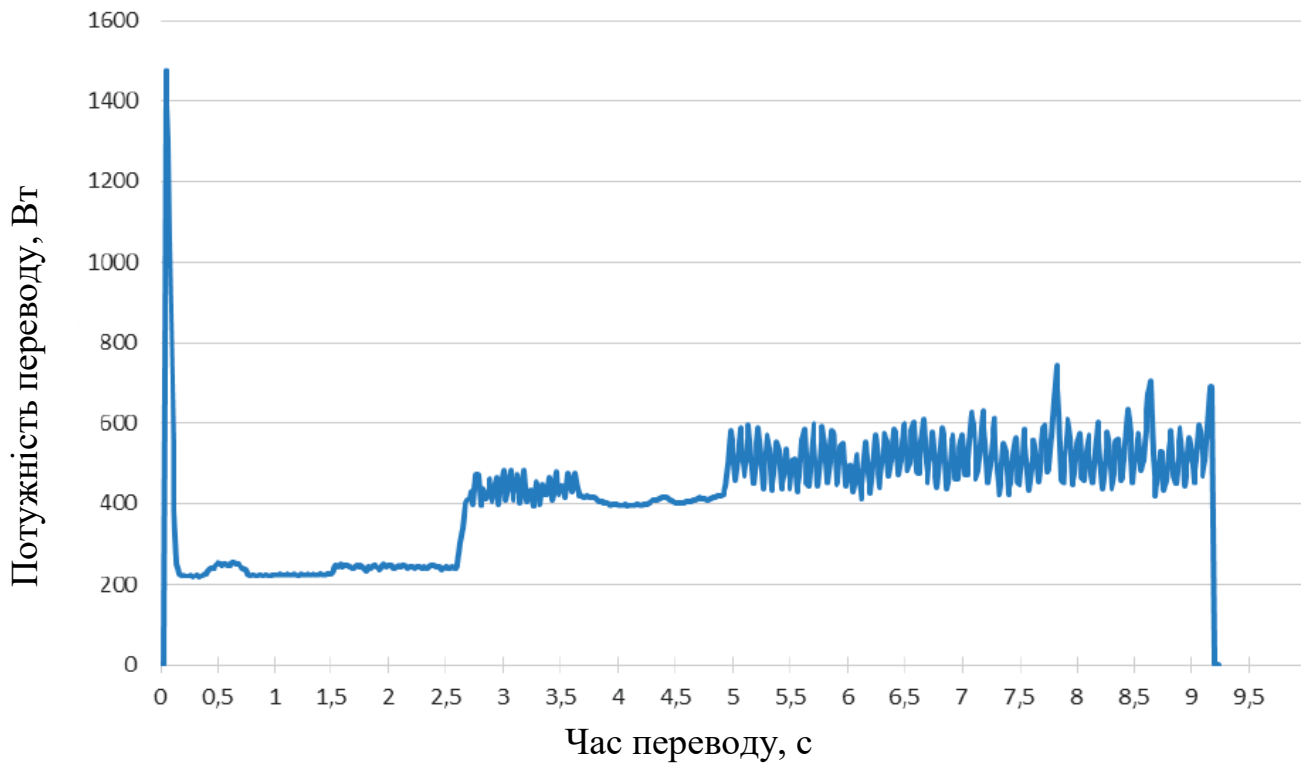


Рисунок 4.6 – Прояв збільшеного зусилля при замиканні шибера на графіку потужності переводу

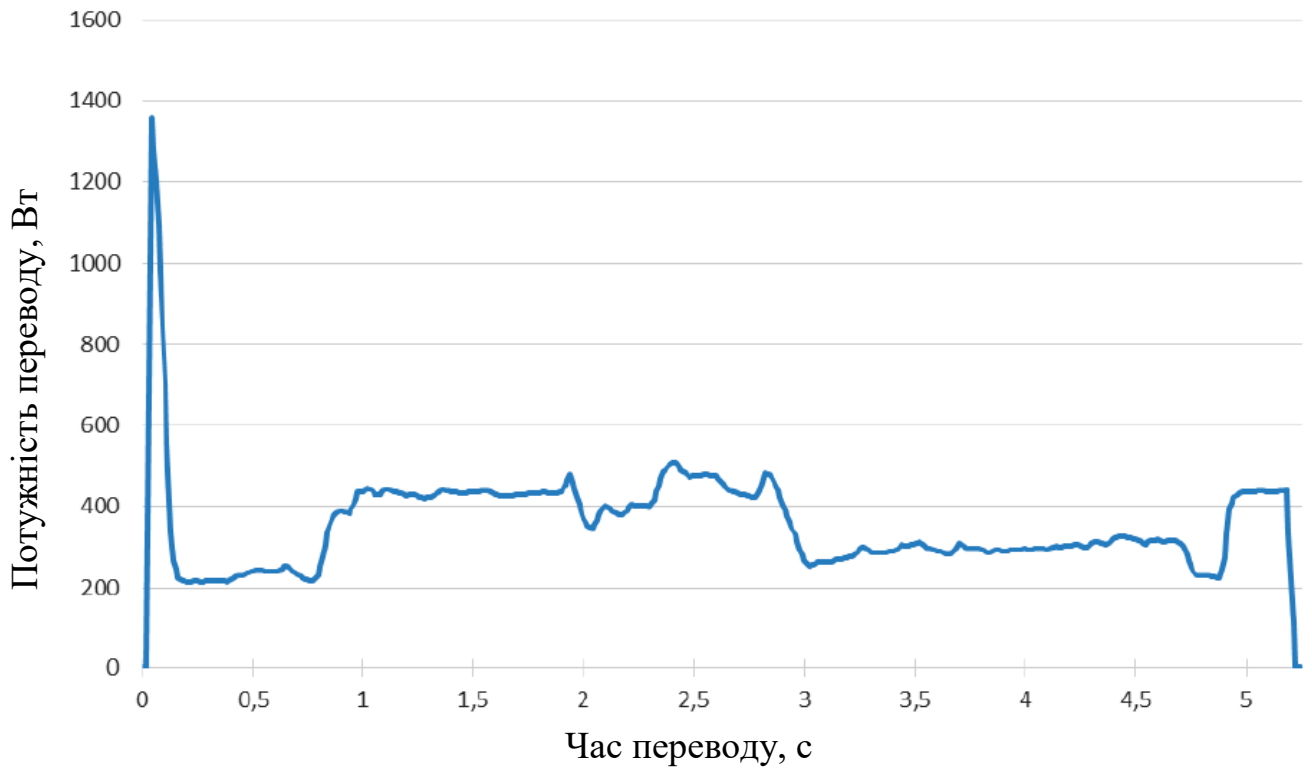


Рисунок 4.7 – Порівняння графіків потужності переведення справної стрілки та стрілки, що знаходиться в несправному стані



Рисунок 4.8 – Прояв забруднень стрілочних башмаків на графіку потужності перевodu

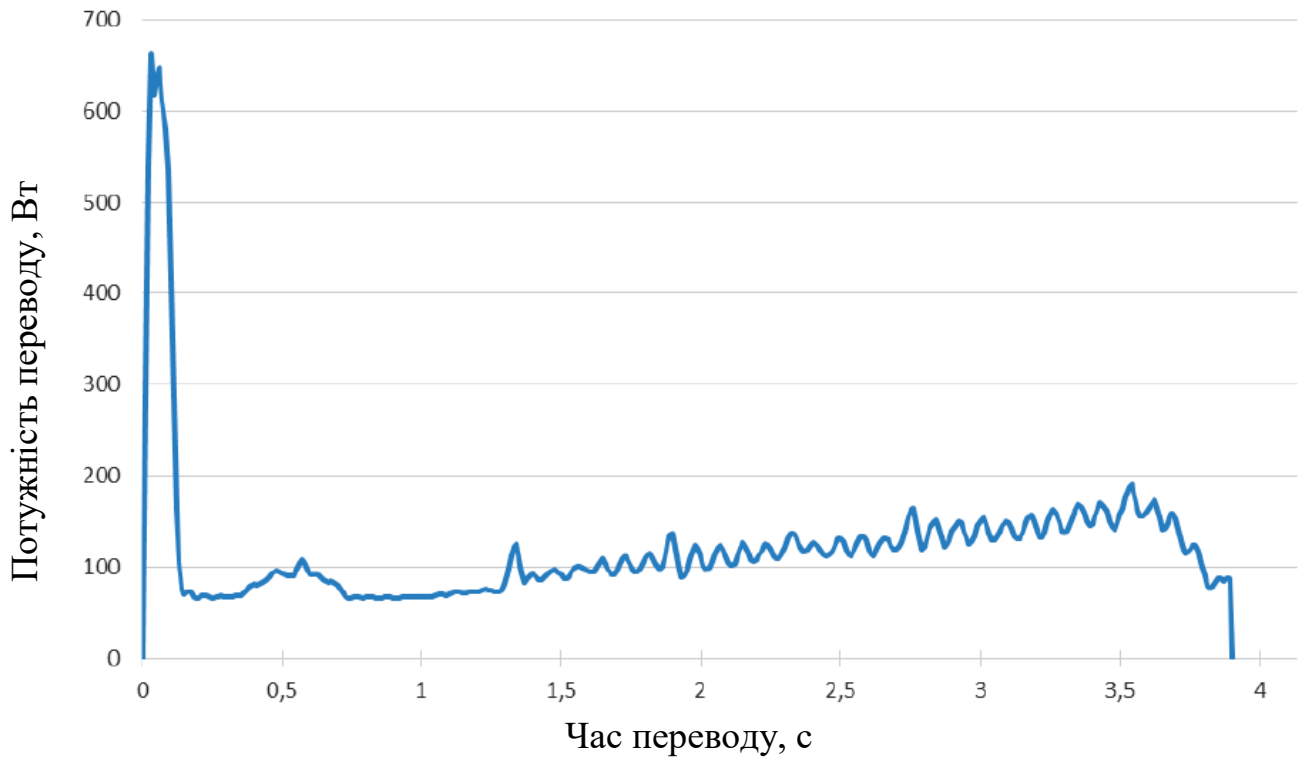


Рисунок 4.9 – Прояв самовільного руху гостряків на графіку потужності переводу

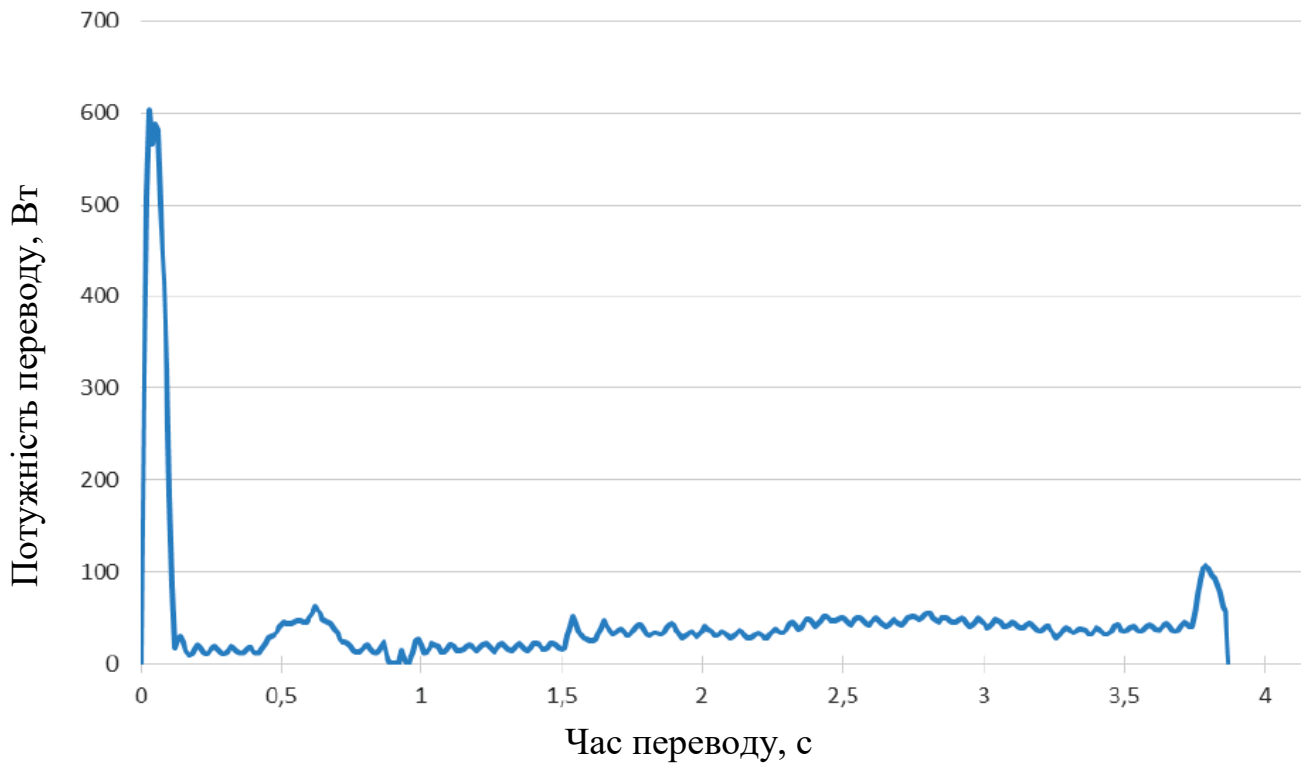


Рисунок 4.10 – Прояв мимовільного руху гостряків на графіку потужності переводу

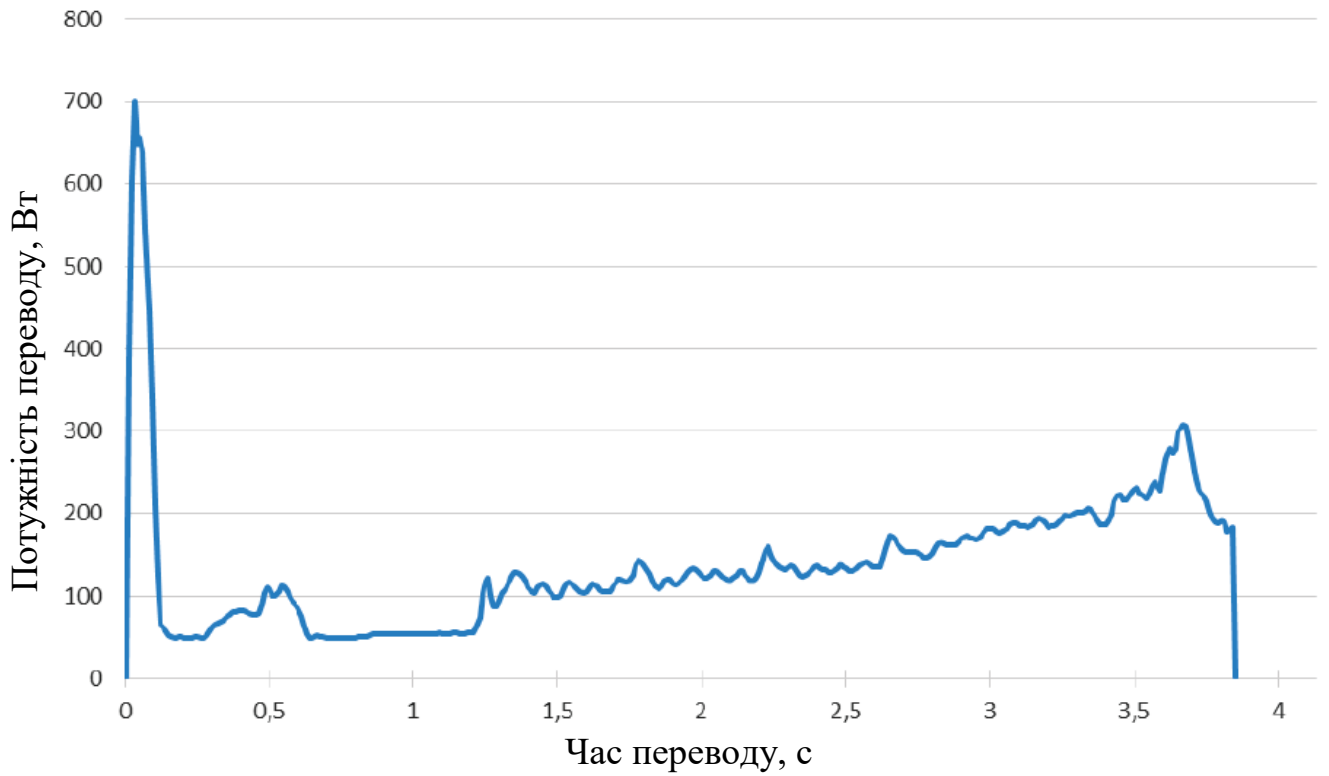


Рисунок 4.11 – Прояв збільшеного зусилля при замиканні шибера на графіку потужності переводу

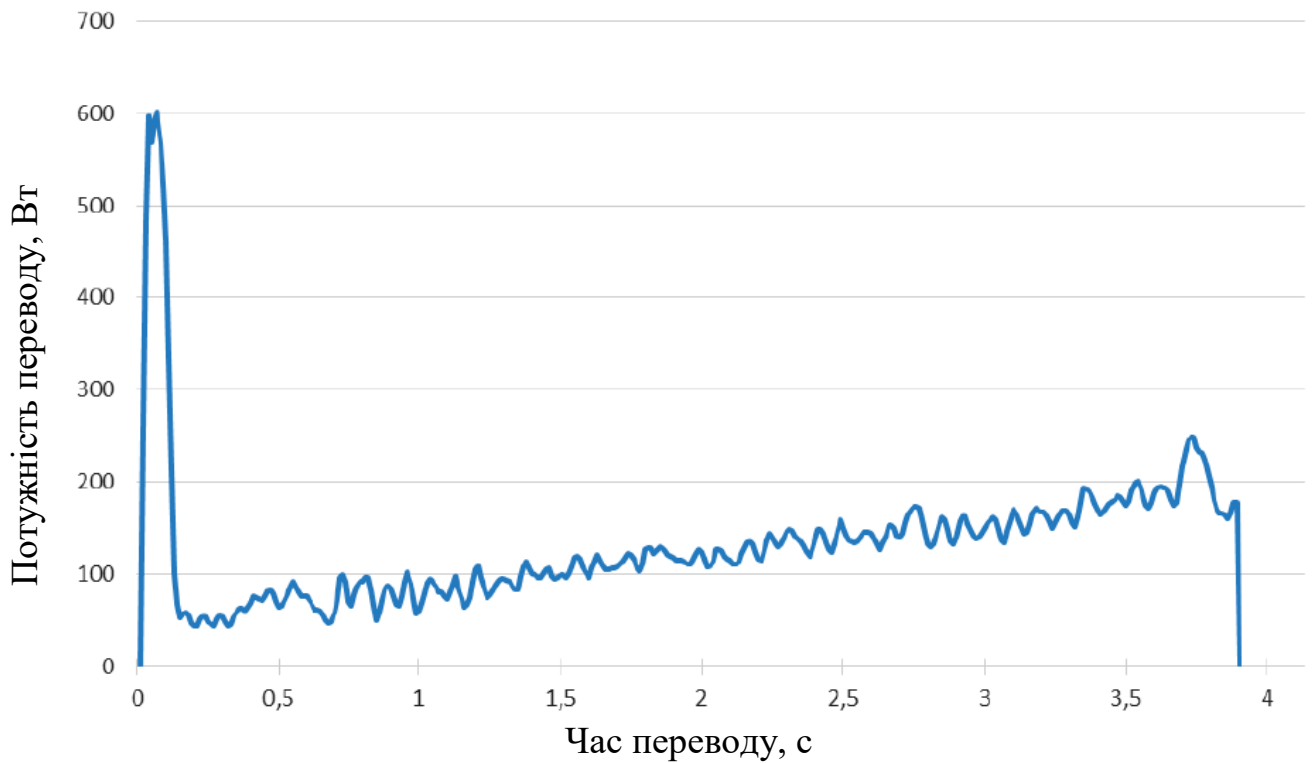


Рисунок 4.12 – Прояв збільшеного зусилля при замиканні шибера на графіку потужності переводу

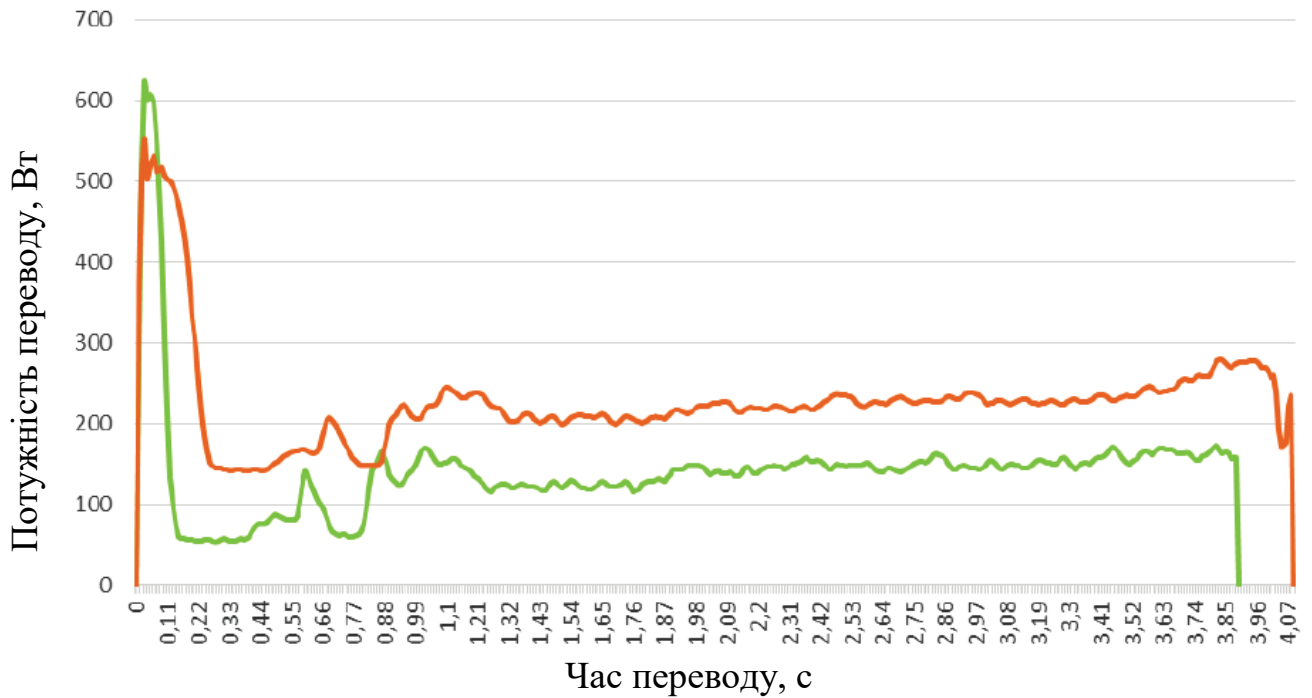


Рисунок 4.13 – Порівняння графіків потужності переведення справної стрілки та стрілки, що знаходиться в несправному стані (наявність перехідного опору у фазах електричного двигуна)

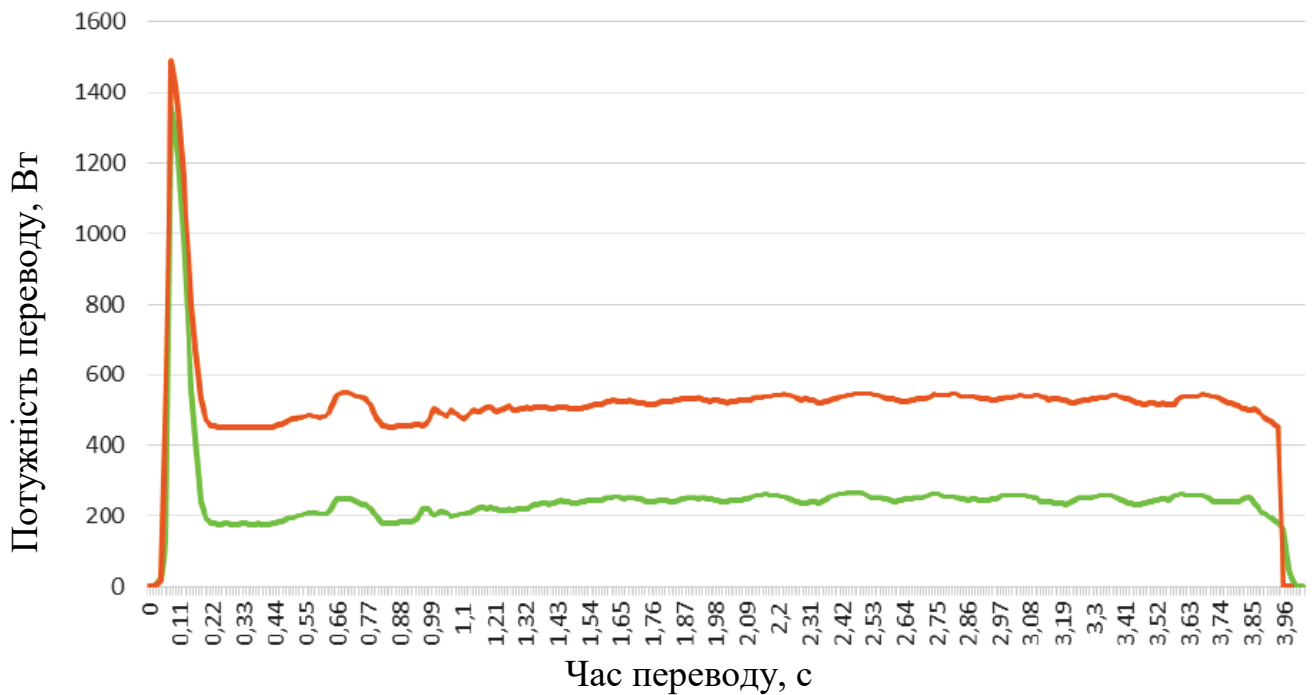


Рисунок 4.14 – Порівняння графіків потужності переведення справної стрілки та стрілки, що знаходиться в несправному стані (наявність короткого замикання між фазами живлення електричного двигуна)

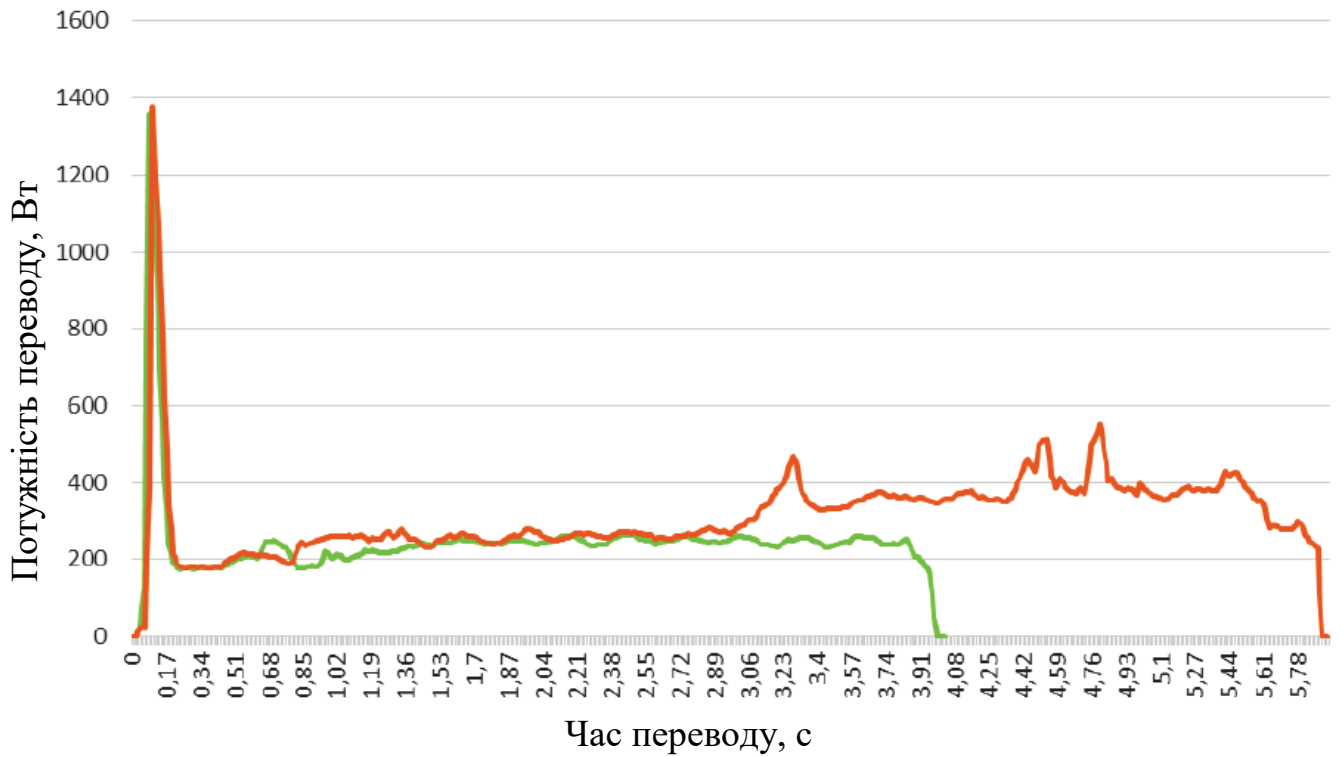


Рисунок 4.15 – Порівняння графіків потужності переведення справної стрілки та стрілки із забрудненими стрілочними башмаками

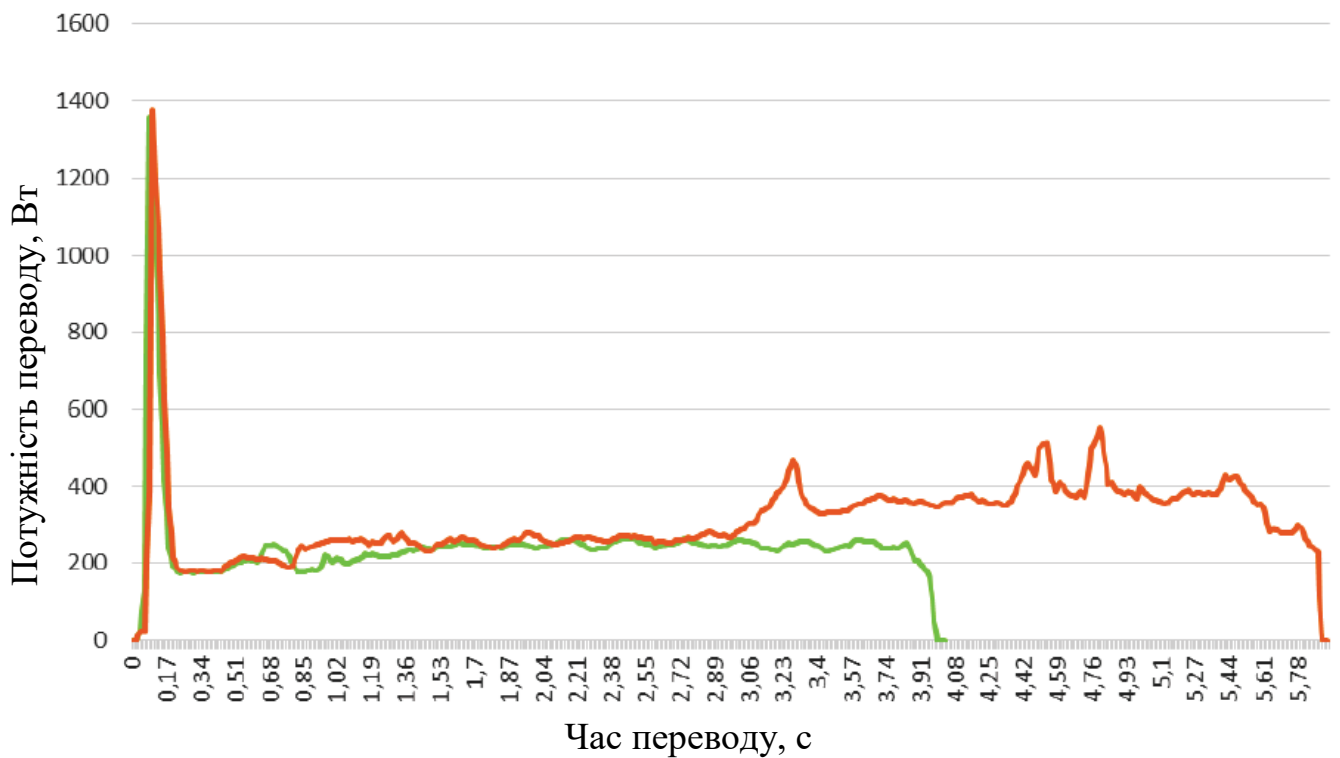


Рисунок 4.16 – Порівняння графіків потужності переведення справної стрілки та стрілки з наявністю мимовільного руху гостряків

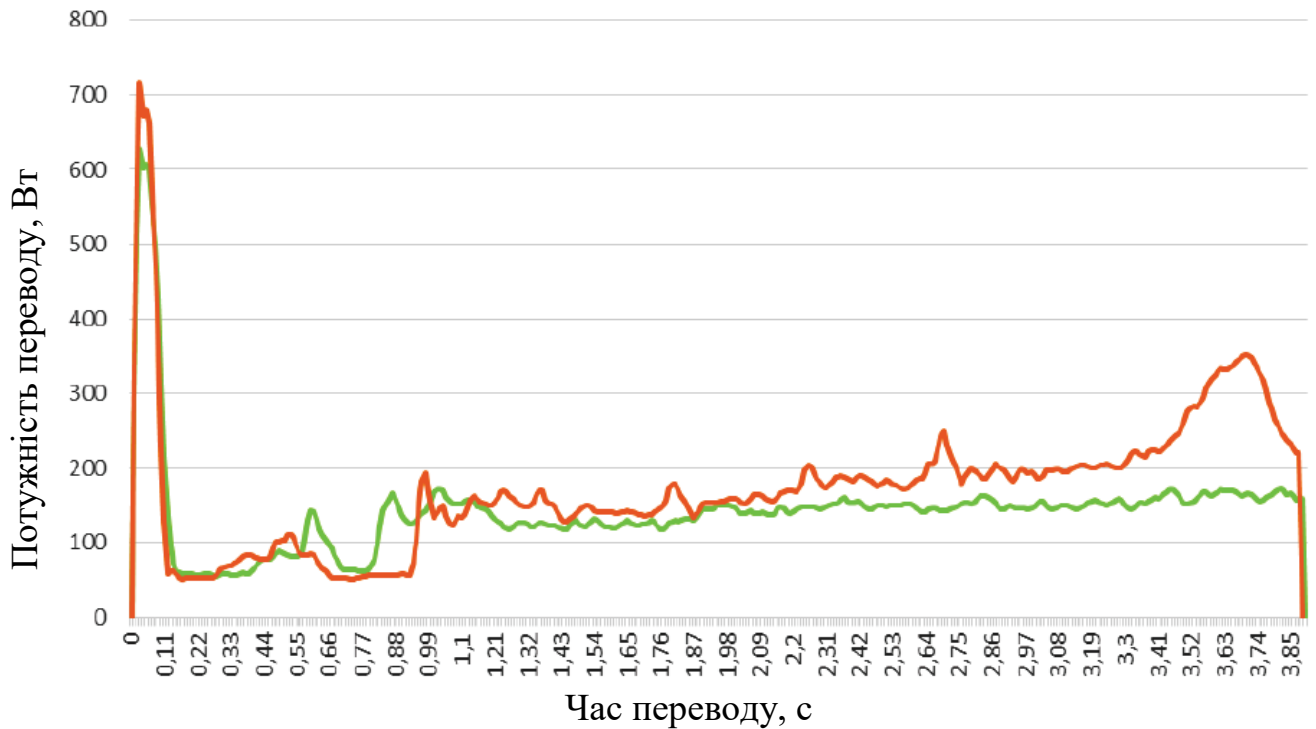


Рисунок 4.17 – Порівняння графіків потужності переведення справної стрілки та стрілки зі збільшеним зусиллям замикання шибера

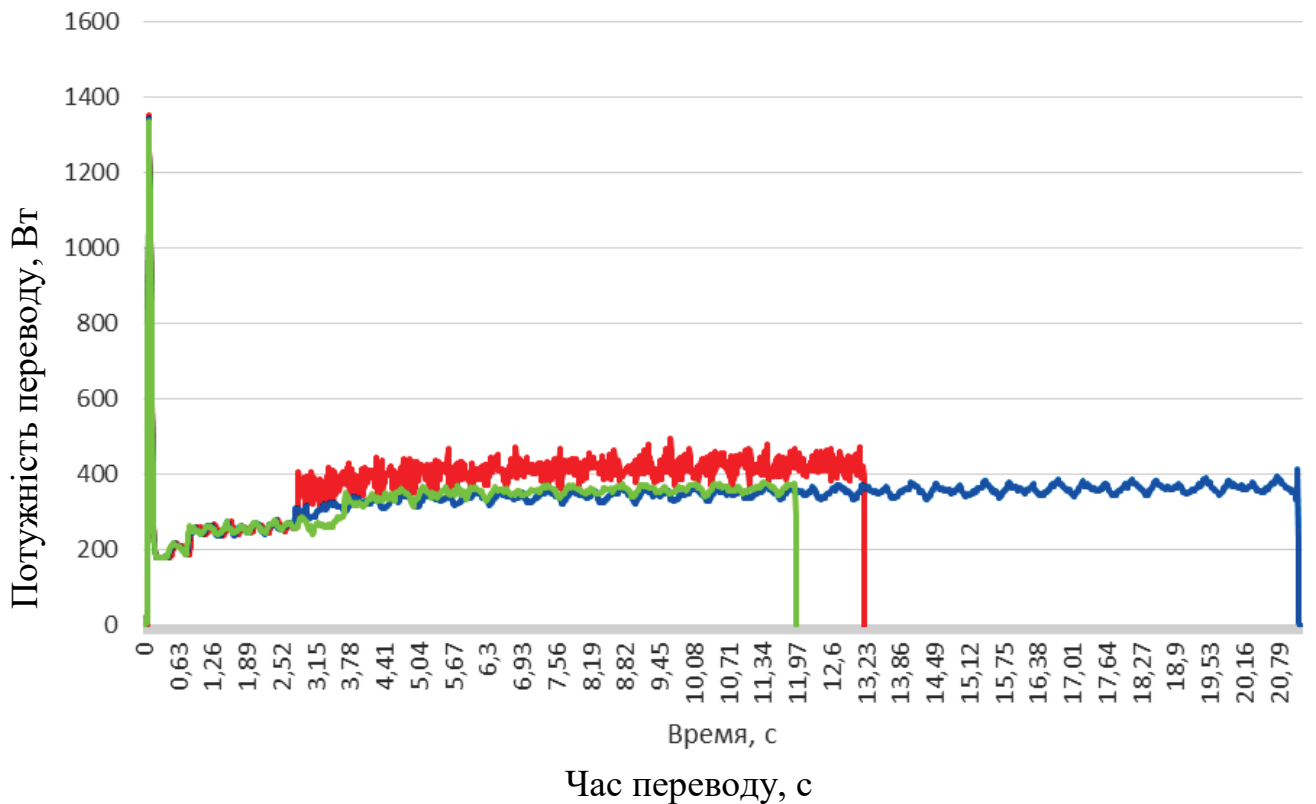


Рисунок 4.18 – Порівняння графіків потужності перевodu при роботі на фрикцію та різних регулюваннях фрикційного зчеплення

Для розрахунку середнього значення потужності в робочій зоні d_1 використовується така формула:

$$d_1 = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, \quad (4.1)$$

де N – число відліків у робочій зоні переводу; i p – потужність i -го відліку.

Для розрахунку дисперсії потужності в робочій зоні d_2 використовується така

$$d_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - d_1)^2}{N}, \quad (4.2)$$

Для розрахунку середньої зміни потужності у робочій зоні d_3 використовується вираз:

$$d_3 = \frac{\sum_{i=2}^N (p_i - p_{i-1})}{N-1}. \quad (4.3)$$

Для розрахунку медіани потужності в робочій зоні d_4 усі точки робочої зони $P_{p.z}$ упорядковано за зростанням, утворюючи вектор $P^{\text{сорт}}$ довжиною N [24].
Діагностичний параметр d_4 знаходиться за формулою:

$$d_4 = \begin{cases} P_i^{\text{сорт}}, i = \frac{N+1}{2}, \text{если } N - \text{нечетное;} \\ \frac{P_i^{\text{сорт}} + P_{i+1}^{\text{сорт}}}{2}, i = \frac{N}{2}, \text{если } N - \text{четное,} \end{cases} \quad (4.4)$$

де $P_i^{\text{сорт}}$ – значення i -го елемента вектора $P^{\text{сорт}}$.

Розрахунок площі робочої зони d_5 здійснюється за формулою:

$$d_5 = \sum_{i=2}^N \frac{(p_i + p_{i-1}) \cdot t}{2}, \quad (4.5)$$

де t – час між двома відліками, с.

Для визначення тривалості запуску двигуна d_6 з вектора значень потужності переведення P виділяється вектор значень пускової зони $P_{п.з.}$ [25]. Потім значення параметра знаходиться за формулою:

$$d_6 = M \cdot t, \quad (4.6)$$

де M – число відліків у пусковій зоні переведення.

Максимальне відхилення від медіани d_7 обчислюється за формулою:

$$d_7 = \max P^\Delta, p_i^\Delta = |p_i - d_4|, i = 1, \dots, N, \quad (4.7)$$

де \max – максимальний елемент послідовності; P^Δ – вектор модулів відхилень відліків робочої зони від медіани; p_i^Δ – значення i -го елемента вектора P^Δ .

Кількість максимумів на графіку потужності робочої зони d_8 визначається як число K елементів множини M_p :

$$M_p = \{p \in P_{п.з.} \mid (p_i > p_{i-1}) \wedge (p_i > p_{i+1}), i = 2, \dots, N - 1\}. \quad (4.8)$$

Для визначення потужності замикання d_9 з вектора значень потужності переведення P виділяється вектор значень зони замикання $P_{з.з.}$. Далі параметр знаходиться за формулою:

$$d_9 = \max P_{3.3}. \quad (4.9)$$

Тривалість всього переводу d_{10} обчислюється за такою формулою:

$$d_6 = Q \cdot t, \quad (4.10)$$

де Q – число відліків у всьому графіку потужності переведення стрілки.

Виділені діагностичні критерії під час синтезу моделі діагностування необхідно використовувати в сукупності, оскільки під час вибору кожного окремо їхні значення з урахуванням допуску ($\pm\Delta$) перетинатимуться зі значеннями в разі інших несправностей.

Таким чином, необхідно розробити діагностичну модель, яка аналізуватиме потужність переведення стрілки, даючи змогу скоротити час на пошук місця несправності.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У ході випробувань встановлено, що за імітації несправностей стрілочного переводу графік потужності переведення змінював свою форму, що дозволяє виявляти ці несправності. Аналіз отриманих графіків потужності переведення стрілки показав можливість виявлення несправностей електричного двигуна, елементів стрілочного переведення (забруднення башмаків), що раніше не виявлялося в дійсних методиках перевірки діючими діагностичними моделями. Такий аналіз став передумовою створення діагностичної моделі за потужністю переводу.

Аналіз зміни потужності переведення при різних несправностях для синтезу діагностичної моделі за потужністю переведення стрілки дозволив виділити 10 відмітних характеристик: середнє значення потужності у робочій зоні (Вт), дисперсію потужності у робочій зоні (Вт), середня зміна потужності у робочій зоні (Вт), медіану потужності у робочій зоні (Вт), медіану потужності у робочій зоні (Вт), площу робочої зони (Дж), тривалість запуску двигуна (с), максимальне відхилення від медіани (Вт), кількість максимумів на графіку потужності робочої зони, потужності замикання стрілки (Вт), тривалість переведення (с). Як показує аналіз статистики графіків потужності переводу, необхідно вибирати не менше 10 характеристик, оскільки використання меншої їх кількості призводить до низької вірогідності діагностування. Розрахунок характеристик (див. табл. 4.1) відобразив доцільність їх вибору як діагностичних критеріїв для синтезу діагностичної моделі. Результати розрахунку виділених діагностичних критеріїв показали, що їх необхідно використовувати в сукупності, оскільки при виборі кожного окремо діагностичного критерію їх значення з урахуванням допуску ($\pm\Delta$) накладатимуться один на одного, що не задовольняє вимоги до діагностичної моделі.

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. Letot, C. et al., 2015. A data driven degradation-based model for the maintenance of turnouts: A case study. *IFAC PapersOnLine*, 28(21), pp.958–963.
15. Yoon, S. et al., 2016. Fault diagnosis of railway point machines using dynamic time warping. *Electronics Letters*, 52(10), pp.818–819.
16. Буряковський С. Г. Наукові основи вибору електроприводів стрілочних переводів для швидкісних та високошвидкісних залізниць : автореф. дис. д. т. н.: 05.22.09 / С. Г. Буряковський ; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». — Х., 2017. — 36 с.

17. Електропривід стрілочного переводу : пат. 95497 Україна : МПК(2014.01) B61L 5/00 / Жарінова А. Г. – заявн. та патентовласник С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, А. С. Маслій. — № u20140767676 ; завл. 08.07.14 ; опубл. 25.12.14, Бюл. № 24. — 4 с. 7. Безредукторний електропривід стрілочного переводу шпального типу : пат. 109159 Україна : МПК : B61L 7/06, B61L 5/00 /
18. С. Г. Буряковський, Б. Г. Любарський, А. С. Маслій, А. С. Маслій. — № u201602492 ; заявл. 14.03.2016, опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15. — 6 с.
19. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / Дзензерский В. А., Омеляненко В. И., Васильев С. В. — К. : Наукова думка. — 2001. — 479 с.
20. Maglev: Transport Mode for the 21st Century / J. Powell, G. Danby. — EIR. — 21 Sept. 2007. — P. 44–55.
21. N. Takahashi, M. Suzuki. Verification of Practical Applicability of Cable Wiring for PLG Ground Coils to Maglev Systems. — QR of RTRI. — Vol. 54 — № 1. — Feb. 2013. — P. 52–58.
22. Маловічко, В. В. Вивчення діагностичних ознак для автоматизованого контролю технічного стану стрілочних електродвигунів [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 16. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007.
23. Маловічко, В. В. Автоматизований контроль технічного стану стрілочних електродвигунів постійного струму по кривим споживання струму [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: Вид-во Української державної академії залізничного транспорту, 2007. – Вип. 5, 6. – С. 18-21.

24. 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.
25. 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.