

**Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій**

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

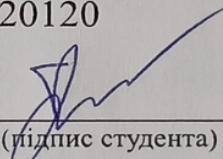
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка

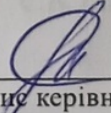
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

на тему: Діагностування двигунів змінного струму стрілочних приводів
за освітньою програмою «Система керування рухом поїздів»
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»

Виконав: студентка групи СК20120

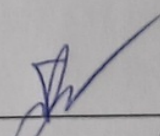

_____/ Артур ГАЛКІН /
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ


_____/ Тетяна СЕРДЮК /
(підпис керівника)

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

Студент



(підпис студента)

Дніпро – 2023 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: Diagnostics of AC motors of switchgear drives

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

Done by the student of the group CK20120 / Artur Halkin /

Scientific Supervisor: associate professor / Tetiana Serdiuk /

Dnipro – 2023

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: Перший (бакалаврський)
Освітня програма: Системи керування рухом поїздів
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____

(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____ бакалавра
(ступінь вищої освіти)
студенту Галкін, Артур
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Діагностування двигунів змінного струму стрілочних приводів

Керівник роботи: Сердюк, Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "25 "жовтень 2022 р. № 1093
-ст

2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Характеристики двигуна змінного струму типу МСТ-0,25

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

4.1 Аналітична частина: аналіз методів двигунів діагностування

Змінного струму стрілочних приводів

4.2 Основна частина: розробити метод діагностування двигуна змінного струму стрілочного електроприводу за кривою споживаного струму, виконати експериментальні дослідження

1. 5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Аналітична частина	Сердюк Т.М., доцент		
Основна частина	Сердюк Т.М., доцент		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	28.02.2023	
2	Аналіз методів діагностики двигунів змінного струму	28.02.2023	
3	Метод визначення робочих та механічної характеристики асинхронного двигуна. Математичне моделювання	28.03.2023	
4	Експериментальне дослідження несправностей в стрілочних електродвигунах за кривою статора	25.04.2023	
5	Висновки	23.05.2023	
6	Перелік посилань	23.05.2023	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	25.05.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

_____ (підпис)

Артур ГАЛКІН

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Тетяна СЕРДЮК

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки:

- 53 сторінки,
- 15 рисунків,
- 3 таблиць
- 20 джерел використаної літератури.

Завдання дипломної роботи: розробити методику діагностування трифазних двигунів стрілочних приводів, записати криві струму статора і проаналізувати, розрахувати робочі і механічну характеристику.

Мета роботи – є автоматизації діагностування стрілочних електроприводів за допомогою спектрального аналізу кривої робочого струму статора.

В першому розділі виконано аналіз відмов в двигунах змінного струму стрілочних приводів, видів несправностей і методік діагностування.

В другому розділі розроблено методику розрахунку робочих і механічної характеристики за вихідними даними двигуна МСТ-0,25.

В третьому розділі здійснено експериментальні дослідження кривої струму статора з метою ідентифікації несправностей в двигуні і їх прогнозування.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та дослідженні систем залізничної автоматики.

Матеріали роботи застосовуються в учбовому процесі університету в дисциплінах «Електроживлення систем автоматики», «Електричні кола і лінії залізничної автоматики», «Системи автоматики на перегонах» та «Станційні системи автоматики».

Ключові слова: ДВИГУН ЗМІННОГО СТРУМУ ТРИФАЗНИЙ, СТРІЛОЧНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ДІАГНОСТИКА, КРИВА СТРУМУ.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Аналіз методів діагностики двигунів змінного струму	9
1.1. Конструкція, типи і характеристики двигунів стрілочних електроприводів змінного струму	9
1.2. Несправності і статистика відмов трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	13
1.3. Методи контролю стану стрілочних електроприводів змінного струму	17
1.4. Перспективні методи діагностики асинхронних двигунів	22
1.5. Висновки за розділом	25
2. Метод визначення робочих та механічної характеристики асинхронного двигуна. Математичне моделювання	27
2.1. Математична модель трифазного асинхронного двигуна	27
2.2. Результати розрахунку робочих та механічних характеристик асинхронного двигуна типу МСТ	36
2.3. Висновки за розділом	42
3. Експериментальне дослідження несправностей в стрілочних електродвигунах за кривою статора	43
3.1. Розробка методики виміру робочого струму стрілочного електродвигуна змінного струму з метою визначення несправностей	43
3.2. Результати експериментальних досліджень	44
3.3. Висновки за розділом	48
Висновки	49
Перелік посилань	51

ВСТУП

Актуальність роботи. Залізничний транспорт відіграє важливу роль у пасажирських та вантажних перевезеннях України. Важливим фактором забезпечення високої ефективності експлуатаційної роботи залізничного транспорту є скорочення часу діагностики та усунення відмов елементів системи електричної централізації. Своєчасне і якісне технічне обслуговування пристроїв управління рухом поїздів, значно підвищує надійність і безпеку роботи залізничного транспорту. В системах електричної централізації (ЕЦ) 21% відмов припадає на стрілочні електроприводи та переводи (СП), що викликає затримки у русі поїздів і призводить до додаткових економічних витрат [1-3]. Отже, тема дипломної роботи, яка пов'язана із діагностуванням і ремонтом двигунів стрілочних електроприводів залізничної автоматики є актуальною і своєчасною, оскільки стрілочні привода відповідають за безпеку руху на залізничному транспорті.

Мета роботи. Метою роботи є автоматизації діагностування стрілочних електроприводів за допомогою спектрального аналізу кривої робочого струму статора.

Методи дослідження. Під час виконання дипломної роботи використовувалися закони електротехніки, електричних машин, прикладної механіки, автоматизації діагностування стрілочних електроприводів за допомогою спектрального аналізу, теорії ймовірностей і статистичний аналіз.

Практична значимість. Виконаний аналіз відмов і запропонований метод діагностування двигунів змінного струму стрілочних приводів залізничної автоматики. Результати досліджень були апробовані на міжнародній конференції [13]. Однією з переваг запропонованого методу полягає у збільшенні переліку несправностей які виявляються за допомогою аналізу зміни струму електродвигуна який вийшов з роботи за певний проміжок часу коли він працював справно, що дозволить в майбутньому

попередити цю несправність на інших стрілочних приводах. Запропонований метод діагностування двигунів використовується під час викладання учбового процесу.

Отже, тема дипломної роботи, яка пов'язана із діагностуванням трифазних асинхронних двигунів стрілочних електроприводів є актуальною і своєчасною.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1. Конструкція, типи і характеристики двигунів стрілочних електроприводів змінного струму

Розвиток залізничного транспорту, збільшення маси поїздів і зростання швидкостей їх руху привели до необхідності подовження станційних колій і укладанні важких типів рейок, в тому числі і на стрілках. Зросли тягові зусилля з переводу стрілок що призвело до застосування більш потужних електродвигунів стрілочних приводів, що пов'язано зі збільшенням робочого струму і необхідністю мати в кожному дроті лінійного ланцюга по дві, три і більше жив кабелю [1-3].

Поліпшення умов енергопостачання, недоліки п'ятипровідної схеми управління стрілкою з двигунами змінного струму, сучасні методи та технології обслуговування, позитивний досвід експлуатації приводів з двигунами змінного струму, особливо суворих кліматичних умовах, дозволили рекомендувати їх до широкого впровадження на всій мережі українських залізниць. Асинхронні електродвигуни трифазного змінного струму мають ряд переваг в порівнянні електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, які застосовуються в стрілочних приводах. Перш за все, це відсутність в асинхронних електродвигунах такого складного і малонадійний вузла, як колектор, що значно скорочує експлуатаційні витрати на поточне обслуговування та ремонт, а також виключає отримання помилкового контролю положення стрілки за рахунок випрямного ефекту дуги при іскрінні колектору.

Міжремонтний термін служби електродвигунів змінного струму в 3-4 рази більше в порівнянні з двигунами постійного струму. В даний час на залізниці застосовуються електродвигуни змінного струму типу МСТ. До них відносяться такі електродвигуни, як МСТ-0,3; МСТ-0,3А; МСТ-0,3Б; МСТ-0,

ЗВ і МСТ-0,6; МСТ-0.6А. Асинхронні трифазні електродвигуни типів МСТ-0,3, МСТ-0,3А, МСТ-0,3Б, МСТ-0,3В встановлюються в електроприводах типу СП для переводу гостряків важких і звичайних стрілок електричної централізації; типів МСТ-0,6, МСТ-0,6А встановлюються в електроприводах типу СП для переводу гостряків стрілок в маневрових районах.

Основні параметри електродвигунів МСТ вказані в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Характеристики стрілочних електродвигунів змінного струму

Характеристика	МСТ-0,25	МСТ-0,3	МСТ-0.3А	МСТ-0.3Б	МСТ-0.3В	МСТ-0,6
Напруга, В	220/127	190/110	330/190	380/220	220/127	190/110
Потужність, Вт	200	300	500	500	500	600
Споживаний струм А, не більше	1,4/2,4	2,1/3,3	1,2/2,1	1,7/2,35	2,3/1,7	2,8/4,85
Швидкість обертання, об/хв	1250 ±10%	850+5%	850+5%	1370±5%	1370±5%	2850±10%
Обертаючий момент, Нм(кгс-м)	1,57	3,43 (0,35)	3,43 (0,35)	3,47 (0,35)	3,47 (0,35)	2,37
Частота, Гц	50	50	50	50	50	50
ККД, %, не менш	59	66	69	69	69	69
cos φ	0,78	0,72	0,72	0,74	0,74	0,84
Кратність пускового моменту, не менш	1,7	1,7	1,7	3,5	3,5	

Електродвигуни змінного струму діляться на синхронні і асинхронні. Різниця між ними в тому, що в перших ротор і магнітне поле статора обертаються з однією швидкістю, а по-друге ротор обертається повільніше, ніж магнітне поле. Відрізняються вони і по влаштуванню, і за принципом роботи.

Асинхронний електродвигун (рис. 1.1) складається з : 1-вал; 2, 6 - підшипники; 3, 8 - підшипникові щити; 4 – лапи; 5 - кожух вентилятора; 7 - крильчатка вентилятора; 9 - короткозамкнений ротор; 10 - статор; 11 - коробка виводів. Основними частинами асинхронного двигуна є статор (10) і ротор (9).

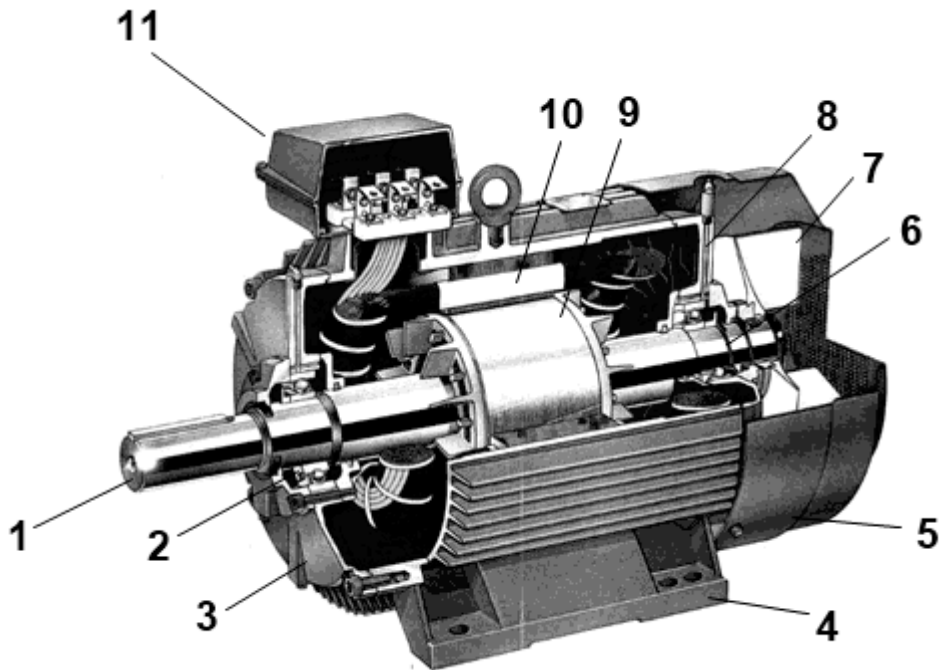


Рисунок 1.1 – Будова асинхронного електродвигуна

Статор (рис. 1.2) має циліндричну форму, і збирається з листів сталі. У пазах сердечника статора укладені обмотки статора, які виконані з обмотувального дроту. Осі обмоток зрушені в просторі відносно один одного на кут 120° . Залежно від напруги, що подається кінці обмоток з'єднуються трикутником або зіркою.

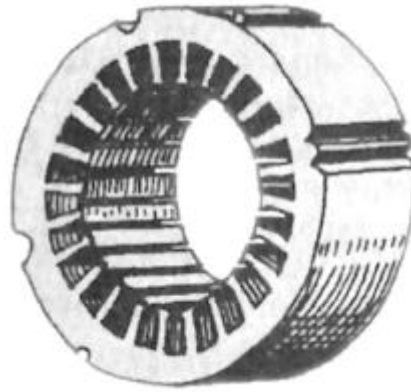


Рисунок 1.2 – Будова статора

Ротори асинхронного двигуна бувають двох видів: короткозамкнений і фазний ротор. Короткозамкнений ротор являє собою сердечник, набраний з листів сталі. У пази цього сердечника заливається розплавлений алюміній, в результаті чого утворюються стрижні, які замикаються накоротко торцевими кільцями. Ця конструкція називається "білячою кліткою". У двигунах великої потужності замість алюмінію може застосовуватися мідь. Білячі клітина являє собою короткозамкнений обмотку ротора, звідки власне назва.

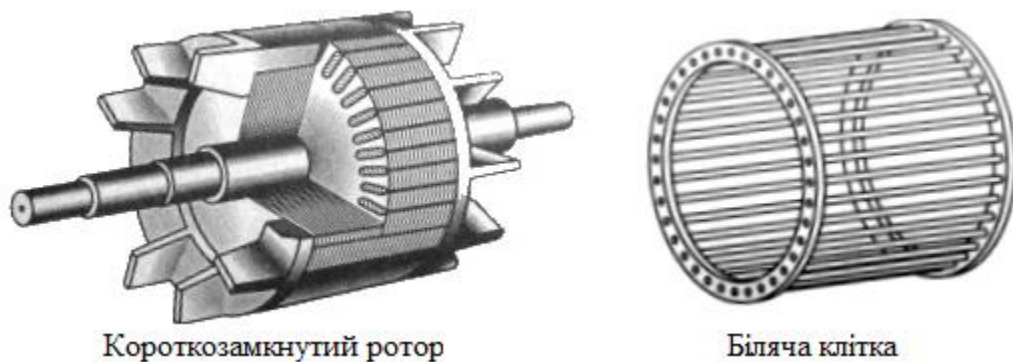


Рисунок 1.3 – Будова ротора

Принцип роботи асинхронного електродвигуна - при подачі до обмотки статора напруги, в кожній фазі створюється магнітний потік, який змінюється з частотою напруги, що подається. Ці магнітні потоки зрушені відносно один

одного на 120° , як в часі, так і в просторі. Результируючий магнітний потік виявляється при цьому обертається.

Результируючий магнітний потік статора обертається і тим самим створює в провідниках ротора ЕРС. Так як обмотка ротора, має замкнутий електричний ланцюг, в ній виникає струм, який в свою чергу взаємодіючи з магнітним потоком статора, створює пусковий момент двигуна, що прагне повернути ротор у напрямку обертання магнітного поля статора. Коли він досягає значення, гальмівного моменту ротора, а потім перевищує його, ротор починає обертатися [13-15].

1.2. Несправності і статистика відмов трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

Несправності які виникають в електродвигунах можуть мати електричний чи механічний характер.

До електричних несправностей електродвигунів відносяться: обриви які виникають в обмотках ротора чи статора, короткі замикання між витками однієї котушки, між котушками чи котушковими групами одної фази, між котушками різних фаз, пробій ізоляції корпусу, розпаювання з'єднань обмотки з колектором.

Механічні несправності проявлять себе у деформації ротора або виходу його зі строю, порушенні в роботі підшипників, тріщини які виникають в підшипникових щитах чи у станині, ослаблення у кріпленні полюсів сердечнику статора до станини, обрив та сповзання дріт'яних кріплень ротора, тощо.

Численні дослідження характеру ушкоджень двигуна змінного струму дозволили отримати наступні статичні дані:

- пошкодження елементів статора – 38%
- пошкодження елементів ротора – 10%
- пошкодження елементів підшипників – 40%

- інші пошкодження – 12%

Якщо сердечник статора рівномірно нагрітий то причиною може бути підвищена напруга мережі. Для нормалізації роботи необхідно понизити напругу до номінальної.

Причинами перегріву обмотки статора може бути перевантаження електродвигуна, занижена напруга мережі, з'єднання витків в обмотці статора, неправильне з'єднання виводів кінців обмоток, коротке замикання між фазами.

Частота обертання двигуна при номінальному навантаженні менше номінальної. Причини можуть бути у заниженій напрузі живлячої мережі, недостатній контакт в колі ротора чи включення обмотки зіркою на напругу 127 В. Для усунення необхідно збільшити напругу, відремонтувати ротор, увімкнути обмотку статора при напрузі мережі 127 В трикутником.

При обриві обмотки статора, у ньому не буде наводитись обертове магнітне поле, а якщо обрив виник відразу в двох фазах ротора тоді в його обмотці зникне струм, який взаємодіє з обертовим полем статора і двигун вийде з ладу. Якщо обрив обмотки виник в двигуні у момент його роботи тоді він зможе продовжити працювати з номінальним обертовим моментом, але значно знизиться швидкість обертання, а струм може підвищитись до ступеня коли виникає перегорання обмотки статора чи ротора.

Якщо обмотки двигуна з'єднані трикутником та при обриві однієї з фаз двигун почне обертатись, в цьому випадку його обмотки будуть з'єднані у відкритий трикутник через який сила струму в фазах буде не рівномірна, а швидкість обертання – нижче номінальної. Для виявлення обриву в фазах електродвигуна необхідно роз'єднати та визначити опір кожної фази.

Замикання обмотки фази на корпус можливо виявити за допомогою мегомметра після роз'єднання фаз. Виявлення місце замикання полегшується за допомогою «пропалювання». Один кінець фази прикріплюється до полюсу мережі, інший до корпусу через запобіжник величиною 30...40 А.

Протікання струму через місце замикання на корпус викличе дим. Напругу необхідно підвищувати ступенево до повного пробою. Місце замикання обмотки на корпус можливо виявити за допомогою методу ділення на частини який включає в себе що мегомметром виявлена фаза яка має замикання, ділять її навпіл розпайкою між котушкові з'єднань, далі мегомметром знов виявляють несправну частину. Ділення продовжується до тих пір поки не буде виявлена дефектна котушкова група чи котушка.

Схема методу постійного струму (рис.1.4) полягає у тому, що обидва кінця фази, які мають замикання на корпус, з'єднуються між собою і до них прикріплюють один з затискачів від мережі постійного струму чи батареї акумулятору. Інший затискач джерела струму приєднують до корпусу машини. Щоб можна було обмежувати і регулювати силу струму, в ланцюг включають реостат. Джерело постійного струму не повинен бути заземлено, а якщо один полюс його все ж заземлений, то його слід приєднати до корпусу машини [13, 15-17].

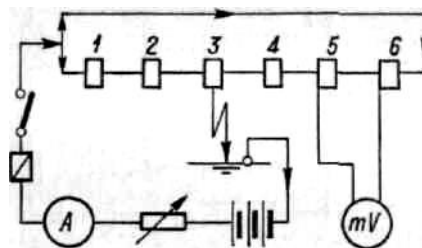


Рисунок 1.4 – Схема для знаходження з'єднання обмотки змінного струму з корпусом

При замиканні обмотки на корпус напрямки струмів в двох частинах обмотки, розмежованих точкою замикання, будуть протилежні. Якщо по черзі дотикатись двома проводами, приєднаними до мілівольтметра, до кінців кожної котушечної групи, то стрілка приладу буде весь час відхилятися в одному напрямку до тих пір, поки кінці від приладу не минуть

решту котушечної групи, замкнутої на корпус. В останньому випадку відхилення стрілки зміниться на протилежне. На кінцях дефектної котушечної групи напрямок відхилення стрілки приладу буде залежати від того, до якого кінця ближче знаходиться місце замикання на корпус. Крім того, величина падіння напруги на кінцях котушечної групи, замкнутої на корпус, буде менше, ніж у інших котушок, якщо замикання на корпус не знаходиться поблизу кінців цієї котушки. Для знаходження дефектної котушки надходять аналогічно попередньому.

На рис. 1.5 показані випадки замикання на корпус з однієї з котушок групи. Залишивши незмінною схему живлення постійним струмом, вимірюють послідовно падіння напруги попарно між точками а - б, б - в, в - г, г - д і спостерігають за напрямом відхилення стрілки приладу. Відхилення стрілки приладу в точках а і б буде протилежно відхилень в точках в - г і г - д, в точках же б - в напрямок відхилення буде залежати від місця знаходження корпусного замикання, а величина падіння напруги буде менше, ніж на затискачах інших котушок. Щоб виміряти падіння напруги, можна або зачистити з'єднувальні провідники, або скористатися гострими щупами, проколюють ізоляцію.

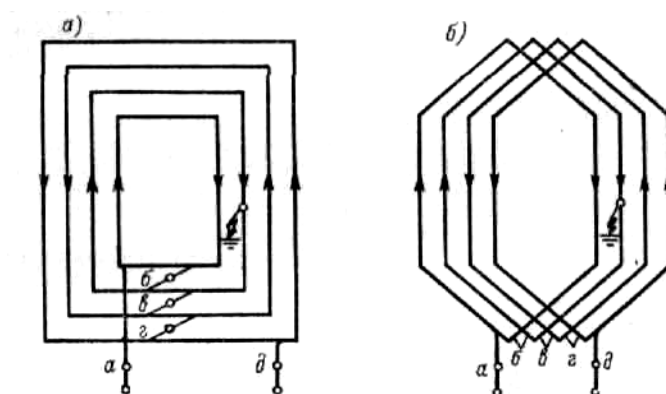


Рисунок 1.5 – Замикання на корпус одної з котушок групи при звичайній котушечній обмотці (а) та при двошаровій обмотці (б)

Місце замикання на корпус можна визначити і за допомогою магнітної стрілки, якщо переміщати її вздовж кожною паза; як тільки стрілка пройде повз місця замикання на корпус, вона змінить напрямок відхилення на зворотне. Цей спосіб вимагає розбирання машини. Крім того, щоб отримати хороший результат, необхідний металевий контакт в місці замикання на корпус. Цього досягають «пропалювання».

1.3.Методи контролю стану стрілочних електроприводів змінного струму

Стрілочний привід – це один з найбільш відповідальних вузлів на залізницях в усьому світі. Тому його справність та діагностика ушкоджень має великий вплив на якість роботи залізниці, адже він служить для переведення рухомого складу з однієї колії на іншу в межах однієї станції або роздільного пункту. В залежності від місця експлуатації а так само від додаткових факторів, таких як рухомі частини які він включає в себе, механічні навантаження які діють під час проходження складу, більше або менше впливають на працездатність та на пошкодження які виникають в електроприводах [1-3].

Електропривід (рис. 1.6) складається з: корпусу 1, електродвигуна 10, редуктора 8, блоку головного валу з автопереключателя 6, зрівняльної муфти 12, шибера 3, контрольних лінійок з приварними вушками 4, обігрівального елемента 14, в якості якого використані дротові емальовані резистори типу ПЕВ-25-56 ± 10 , панелі освітлення 13, зубчастого колеса з упором 7, направляє плити 2, кожуха 5.

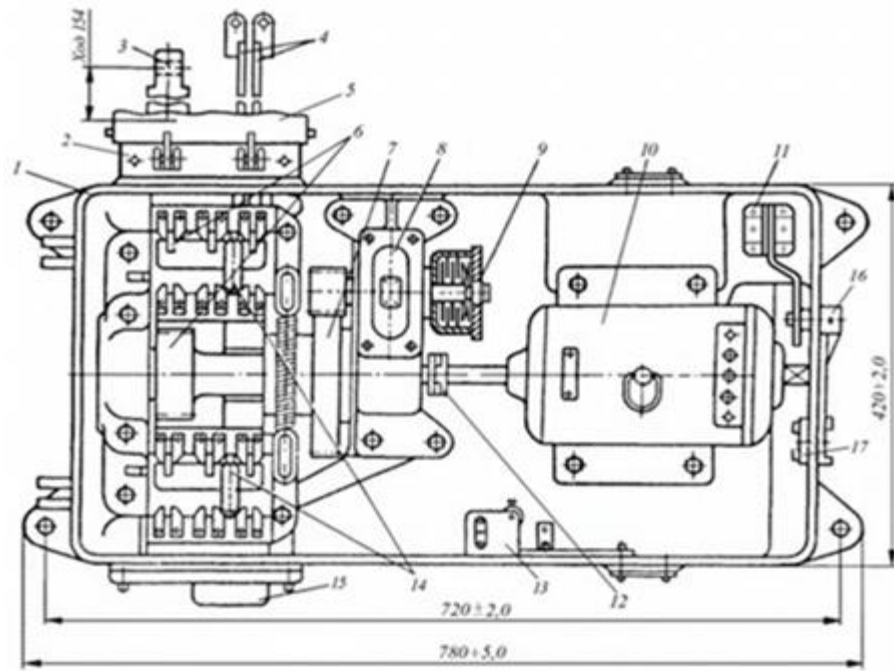


Рисунок 1.6 – Стрілочний електропривід типу СП-6

Вал електродвигуна 10 має на одному кінці квадратний хвостик для приєднання рукоятки ручного перекладу приводу вручну, а на іншому кінці вала на шпонке укріплена спеціальна муфта 12, яка одночасно з'єднується з валом-шестернею редуктора 8. Вал-шестерня і зубчасте колесо знаходяться в зачепленні через проміжну пару (вал-шестерня і зубчасте колесо - на одній осі). Вал-шестерня, розташовуючись на одному валу з зубчастим колесом, знаходиться в зачепленні з упором зубчастого колеса на головному валу. Упор зубчастого колеса заходить в виріз диска головного валу. Шиберна шестерня виконана як одне ціле з головним валом. Вона має два запірних і п'ять робочих зубів. зуби шестерні входять в зачеплення з зубами шибера, на якому є чотири робочих і два спеціальних запірних зуба.

Найбільш характерними причинами відмов в роботі електропривода є:

- пошкодження редуктора;
- порушення роботи фрикційного зчеплення;
- заклинювання шибера з робочою шестернею;
- порушення стану контрольних тяг;

- підгоряння або порушення регулювання контактів автоперемикача;
- обмерзання контактів автоперемикача ;
- злам контактів автоперемикача;
- злам шліфта і випадання валика;
- інші відмови.

Для підвищення надійності функціонування стрілочного електроприводу (СЕП) робітники СЦБ здійснюють заходи з технічного обслуговування та ремонту, вимірювання параметрів згідно з інструкцією з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування. В дистанціях СЦБ використовуються системи технічної діагностики , завдяки яким можливо за непрямыми вимірюваннями контролювати ряд електричних параметрів роботи СЕП, наприклад: струм при переводі стрілки в СЕП с електродвигуном постійного струму, зусилля переводу в СЕП з електродвигуном змінного струму, опір ізоляції робочого ланцюга стрілки та час переводу.

Перевірка стану та кріплень внутрішніх частин електроприводу починається з візуальної перевірки цілісності деталей та вузлів, відсутність зламів, сколів, інших дефектів. Перевірка кріплення електродвигуна, редуктору, блоку автоперемикачів, кріплення стопорного гвинта гайки фрикційного зчеплення, ножі та контактні колодки автоперемикача. Електродвигун повинен бути закріплений так, щоб у муфті, з'єднання редуктора з електродвигуном, забезпечувався проміжок 0.5-1.2 мм та співвісність їх осей. Перевірити відсутність протікання мастила з корпусу редуктора.

Перевіряючи стан електропривода необхідно звернути увагу на цілісність монтажних проводів, наявність гайок та контргайок на контактах за допомогою ключів, надійність кріплення монтажних проводів. Надійність кріплення монтажних проводів перевіряють за відсутністю зміщення

наконечника під гайкою при спробі повернути провід. Монтажний джгут повинен бути закріплений в держаках з укладанням в них додаткової ізоляції.

Перевірка правильності регулювання контрольних тяг. При переводі стрілки перевірити запирання шибєру електропривода по западанню головок перемикаючих важелів у виріз головного валу, контроль положення стрілки по западанню важелів у вирізи контрольних лінійок. Між нанесеними рисками на контрольні лінійки та Т-подібною планкою повинен бути проміжок 1-3 мм. Цей проміжок відповідає зазору між скосом контрольних лінійок та зубом ножового важеля автоперемикача.

При перевірці та регулюванні автоперемикача оглянути ножі і контактні пружини автоперемикача, перевірити відсутність видимих тріщин і вибоїн в контактних колодках, відсутність нагару на контактних колодках та ножах, бруду та металевої пилі. За необхідністю почистити контактні ножі і пружини тканиною, змоченою в бензині. Шаблоном перевірити проміжок між контактними пружинами. Лінійкою заміряти глибину врубів ножів автоперемикача. Перевірити в плюсовому та мінусовому положенні. Глибина врубів ножів повинна бути не менше 7 мм. Кожна пара контактних пружин повинна віджиматися на однакову відстань відносно ножа, а ресорна пружина – на 0.7- 1,0 мм, при врубіванні контактні ножі не повинні врубатись в ізолюючі колодки [3].

Для регулювання зусилля стиснення фрикційного зчеплення в електроприводах з трифазним електродвигуном змінного струму використовують спеціальний пристрій ПКЗСП, відрегулювати фрикційне зчеплення по струму що споживається неможливо через незначну зміну струму при значних змінах зусилля. Якщо спеціальний прилад відсутній в дистанції сигналізації та зв'язку фрикційне зчеплення регулюють в такій послідовності. Електромеханік, зробивши запис в Журналі огляду форми ДУ-46 і погодивши час початку роботи з черговим по станції повинен відкрити СЕП. Далі регулювальну гайку фрикційного зчеплення необхідно відпустити

до положення , при якому електропривід працює на фрикцію, а стрілка не переводиться через недостатнє зусилля. Після цього регулювальну гайку фрикційного зчеплення ступенево підтягують до положення, при якому стрілка переводиться нормально без спрацьовування фрикційного пристрою, при цьому вимірюють струм який споживає електродвигун та час переводу. Значення струму переводу фіксують амперметром який знаходить на пульті у чергового. Час переводу стрілки заміряють ручним секундоміром з моменту початку переводу до виключення електродвигуна. Час переводу стрілок з електродвигунами МСТ-0,3-110/190 повинно бути не більше ніж 4,5 с, з двигунами МСТ-0,6-110/190 – не більше ніж 2 с. Напруга на двигунах повинна бути не менше 190 В, струм двигуна МСТ-0,3-110/190 повинен бути не більше 2,1А, двигуна МСТ-0,6-110/190 – не більше 2,8 А (при з'єднанні обмоток зіркою).

Оскільки фрикційне зчеплення під час приробітку може ослабнути, то в кінці регулювання гайку зчеплення слід підтягнути на 1-2 ступеня. Після закінчення регулювання слід перевірити, що при закладеному між гостряком та рамною рейкою шаблону електродвигун працює на фрикцію.

Заміна мастила фрикційної муфти електроприводів, як правило виконують у вільний від руху поїздів час або в технологічні вікна зі згоди чергового по станції і записом у журнал.

Стрілку у випадку необхідності переводять в інше положення згідно з правилами Інструкції з забезпечення безпеки руху поїздів при виконанні технічного обслуговування та ремонту пристроїв СЦБ. Після прибуття на стрілку електромеханік відкриває кришку електропривода та при виключеному курбельному контакті відключає та знімає електродвигун, розбирає фрикційну муфту. Розбірку та промивку фрикції електроприводів СП-2, СП-3 виконують без зняття редуктора з електроприводу. Деталі фрикційного зчеплення розкладають згідно з чергою зняття. З дисків та внутрішніх частин корпусу фрикції технічним лоскутом спочатку видаляють

старий мастильний матеріал, а після цього промивають керосином чи солярою, перевіряють їх цілісність відсутність зламів, «раковин», а також чистоту мастильних канавок.. Після цього диски опускають в рідке мінеральне масло, дають деякий час щоб мастило стекло. Внутрішні частини корпусу фрикційного зчеплення також змащуються мінеральним мастилом.

Далі фрикційну муфту збирають та регульовальну гайку закріплюють у положенні, у якому вона знаходилась до розбирання. Після закінчення збірки фрикційного зчеплення, установки електродвигуна в електропривід та підключенні монтажних проводів перевіряють роботу електропривода, а такж струм при нормальному переводі і при роботі електропривода на фрикцію. Струм при цьому слідує встановити на 0,2 – 0,3 А більше, враховуючи, що після приробітку фрикційний струм знизиться на це значення. Фрикційне зчеплення електроприводів СПВ-5 промивають і замінюють мастильний матеріал в умовах майстерні, а на стрілках фрикційне зчеплення замінюють.

1.4.Перспективні методи діагностики асинхронних двигунів

Оскільки на залізницях України велика кількість централізованих СП, технологія обслуговування, яка була вказана раніше, крім основних недоліків також тягне за собою значні експлуатаційні витрати. Для ефективного обслуговування СП а також зменшення витрат, виникає необхідність автоматичного контролю параметрів СП, безперервного контролю їх технічного стану, виявлення і визначення елемента в якому сталася несправність [3-10].

Однією з технологій діагностики яка дозволяє заздалегідь спрогнозувати яка з деталей може вийти зі строю в електродвигуні, або вчасно зафіксувати несправність – це технологія діагностики електродвигунів на основі моніторингу споживаючого струму з послідовним виконанням спектрального аналізу. Принцип який використовується при діагностиці

полягає у тому, що при виникненні будь яких змін в роботі електричної чи механічної частини електродвигуна призводять до зміни магнітного потоку в зазорі електричної машини що призводить до слабкої модуляції споживаючого струму електродвигуна.

Таким чином, якщо у спектральному аналізі струму електродвигуна є частоти які непрапананні його нормальній роботі то можна зробити висновок про наявність несправностей зв'язаних з механічною або електричною частиною електродвигуна, або зв'язанного з ним механічного пристрою [11-13], [18-20].

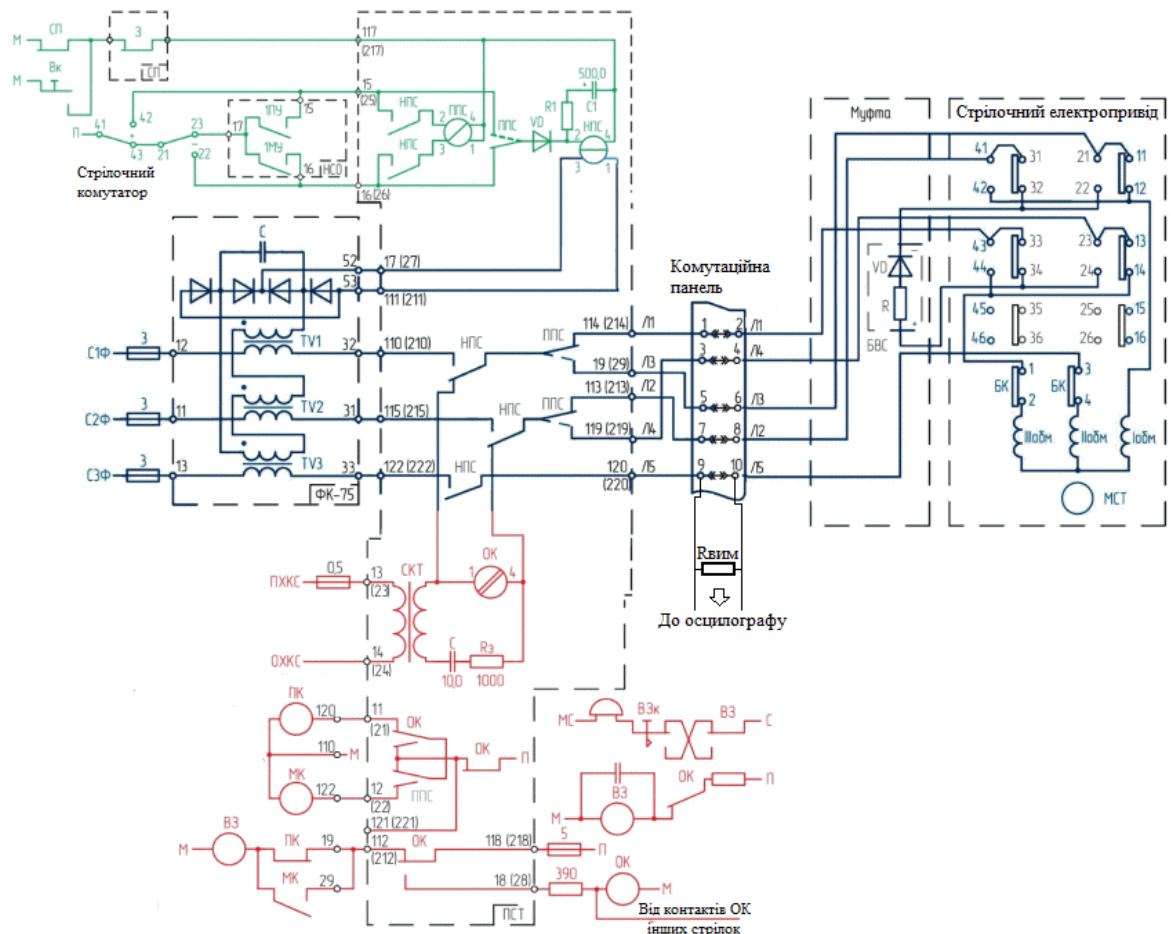


Рисунок 1.7– Схема підключення вимірювального пристрою до п'ятипровідної схеми управління стрілкою

За допомогою цього методу можлива діагностики таких несправностей:

Пошкодження ротора двигуна (дефекти при виробництві, ослаблення кріплення стержнів до контактних кілець). Це пошкодження можливо виявити за допомогою двох симетричних відносно частот живлячої мережі піків у спектрі струму (рис 1.8.) [8]

Виткові замикання в обмотках статора визначають за частотою живильної мережі.

Ослаблення кріплення електродвигуна, зачеплення ротора за статор двигуна можливо визначити за допомогою частоти кратної $\frac{1}{2}$ частоти обертання. Аналогічно можливо виявити наявність інших дефектів.

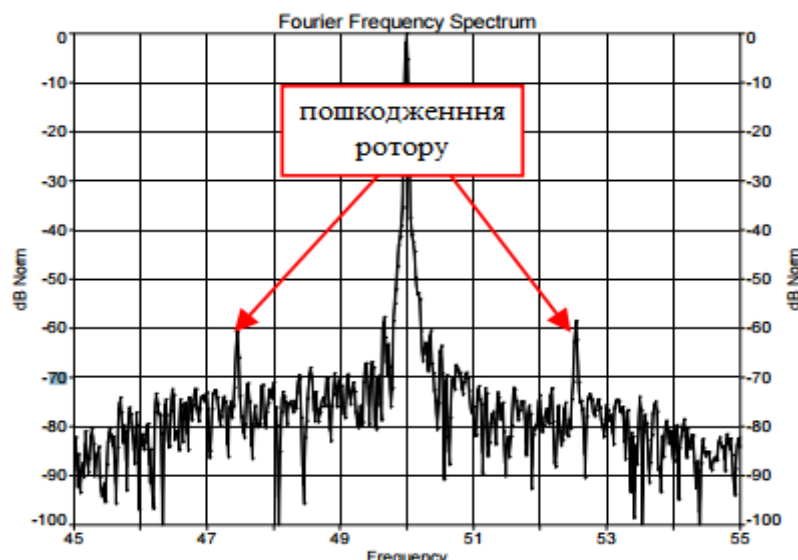


Рисунок 1.8 – Пошкодження ротору двигуна

Неспівосність валів двигуна та механічного навантаження - можливо визначити за допомогою частот кратним частоті обертання ротора (рис.1.9.).

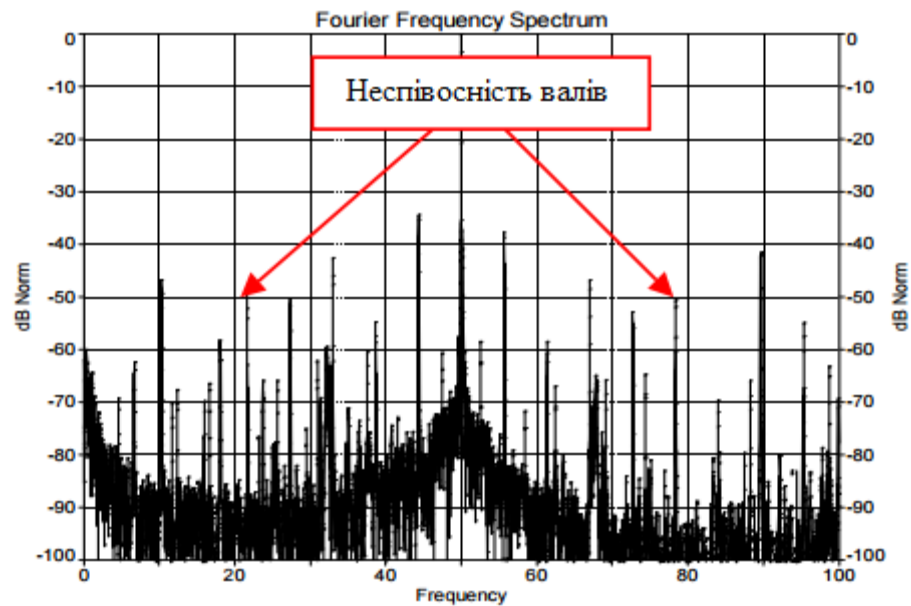


Рисунок 1.9 – Неспівосність валів

Для швидшого виявлення несправностей можливе формування бази даних, яка може дозволити відслідкувати динаміку розвитку пошкоджень електродвигуна при експлуатації [9-15].

Оскільки асинхронні двигуни чутливі до якості електроенергії яку вони споживають, то для повного аналізу умов роботи машини необхідно проводити аналіз напруги прикладеної до електродвигуна. Це дозволяє визначити несиметрію, наявність вищих гармонічних складових та імпульсів перенапруги у живлячій мережі, які можуть негативно впливати на безперебійну роботу електродвигуна.

1.5 Висновок за розділом

Основні недоліки існуючих технологій обслуговування стрілочних переводів представлені значними витратами часу, пов'язаними з переходами і великим числом ручних операцій, виконуваних обслуговуючим персоналом, неможливість в реальному часі контролювати і виявляти явні і приховані дефекти і пошкодження. Контроль працездатності стрілочних електроприводів здійснюється за допомогою вимірювання робочого струму, струму роботи двигуна на фрикцію, опору обмоток та ізоляції і зовнішнього

огляду. Таким чином, технологія автоматизації контролю параметрів СП і розробка системи дистанційного діагностування їх технічного стану, передбачення виникнення несправностей, є актуальною науково-технічною задачею.

Запропонований метод діагностики двигунів стрілочних електроприводів змінного струму і стрілочних переводів, заснований на спектральному аналізі кривої робочого струму статора – є технічним рішенням контролю стану електроприводів змінного струму. За допомогою цього методу можливо не тільки виявити несправність, а й прослідкувати за зміною параметрів в електроприводі які сприяли для виникнення цієї несправності, що дозволить завчасно звернути увагу на елемент який потрібно буде замінити, ще до того як він вийде зі строю та потягне за собою виникнення відмови. За допомогою цього методу можливе зменшення не тільки часу на пошук та ремонт електроприводу але й зменшення виникнення небезпечних відмов.

2 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ТА МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Математична модель трифазного асинхронного двигуна

Знання точних значень багатьох параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів, наприклад, активних і реактивних опорів статора, ротора і кола, що намагнічує є необхідними для визначення робочих і механічної характеристик асинхронного двигуна.

Ці параметри в більшості довідників не приводяться, чи приводяться не повністю або є недостатньо точними. Крім того, через порушення технологічного процесу, різних технологій на різних заводах-виробниках, паспортні параметри машини можуть відрізнятися від довідкових даних на 10...20%. Отже, виникає необхідність знання точних параметрів двигуна для аналізу працездатності даного приводу. Ця ж задача стоїть і у виробників двигунів, оскільки комерційна цінність двигуна забезпеченого індивідуальним паспортом набагато вище.

Відомий ряд методів експериментального визначення параметрів асинхронних машин [17-20]. Розглянемо схему заміщення асинхронного двигуна наведену на рис.2.2.

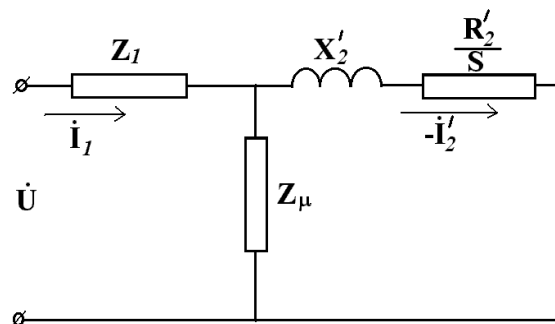


Рисунок 2.1 – Схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Таки чином, існує можливість ідентифікації всіх параметрів асинхронного двигуна, якщо відомі повний опір кола обмотки при загальмованому роторі Z_{II} , і величина:

$$S_{k.o.} = \frac{r_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (2.6)$$

де r_2' - приведений активний опір обмотки ротору;
 X_{μ} - індуктивний опір кола намагнічення;
 X_2' - приведений індуктивний опір обмотки ротору
 При нерухомому роторі ($s=0$) повний опір обмотки визначається виразом:

$$Z_{II} = r_{II} + jX_{II} = r_1 + jX_1 + \frac{jX_{\mu}(r_2' + jX_2')}{r_2' + j(X_{\mu} + X_2')} \quad (2.2)$$

звідки

$$r_{II} = r_1 + \frac{r_2' \left(\frac{X_{\mu}}{X_{\mu} + X_2'} \right)^2}{S_{k.o.}^2 + 1} \quad (2.3)$$

$$X_{II} = X_1 + \frac{X_{\mu} \left(S_{k.o.}^2 + \frac{X_2'}{X_{\mu} + X_2'} \right)}{S_{k.o.}^2 + 1} \quad (2.3)$$

Якщо ротор машини є короткозамкненим (тобто використовується обмотка біляча клітка), зневажа величиною індуктивного опору неприпустима. Враховуючи, що роздільне визначення індуктивних опорів статора і ротора пов'язано з великими труднощами, на практиці звичайно приймають їх рівними. Професор Ю.С.Чечет [19, 20] показав, що подібне

допущення вносить в обчислення помилку біля 1%. Вважаючи $x_1 = x_2' = x$ і на підставі виразу для $S_{k.o.}$:

Для асинхронних машин є характерним таке явище. Якщо одна з обмоток машини підключена до джерела напруги, а коло іншої обмотки розімкнено, то заздалегідь розкручений ротор не зупиняється, а продовжує обертатися з деякою швидкістю $\Omega_{x.o.}$.

Величина швидкості $\Omega_{x.o.}$ залежить від $s_{k.o.}$ і синхронної швидкості Ω_o .

$$V_{x.o.} = \frac{\Omega_{x.o.}}{\Omega} = \sqrt{1 - s_{k.o.}^2} \quad (2.4)$$

$$s_{k.o.} = \sqrt{1 - V_{x.o.}^2} \quad (2.5)$$

Таким чином, для визначення $s_{k.o.}$ достатньо зміряти швидкість обертання ротора в однофазному режимі роботи при розімкненому ланцюзі обмотки машини. Можна в режимі самоходу виміряти не швидкість обертання ротора, а величину ЕРС $E_{тг.о.}$, що наводиться в розімкненій обмотці машини [15].

Значно зручніше виходять співвідношення, якщо для визначення $E_{тг.о.}$ користуватися наступним виразом [20-23]:

$$\frac{E_{тг.о.}}{I_{s.o.}(r_{II} - r_I)} = \frac{(s_{k.o.}^2 + 1)\sqrt{1 - s_{k.o.}^2}}{2s_{k.o.}} \quad (2.6)$$

де $E_{тг.о.}$ -це ЕРС, яка наводиться в розімкненій обмотці машини в режимі самоходу; $I_{с.о.}$ - це струм в замкнутій обмотці збудження в режимі самоходу.

На основі вище висловленого розроблена методика визначення параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів стрілочних електроприводів.

Алгоритм автоматизованого визначення параметрів машини:

1. На “холодному двигуні” вимірюється омичний опір статора.

2. Потім вал затискається (фіксується) і проводиться опит короткого замикання, в якому визначається повний опір машини. Після зняття напруги з клем машини ротор звільняється.

3. Двигун запускається без навантаження і вимірюються параметри контура, що намагнічує [16,17].

4. Нарешті, двигун пускають в трифазному режимі і відключають дві з них. Змірявши швидкість обертання валу в режимі з обривом фаз обчислюється допоміжний параметр $s_{k.o.}$, через який знаходяться інші.

В процесі експерименту були проведені наступні вимірювання:

Вимірювання омичного опору обмотки фази статора випробовуваного асинхронного електродвигуна за допомогою омметра при відключеному живленні. Таким чином одержуємо активний опір статора .

Проводиться опит короткого замикання при загальмованому роторі і номінальній напрузі живлення. При цьому вимірюються напруга U_k , струм I_k і споживана машиною потужність P_k . За даними опиту короткого замикання визначають активний, індуктивний і повний опір робочого контура спрощеної схеми заміщення:

$$r_{II} = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{3I_k^2} \quad (2.7)$$

$$X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{(Z_k^2 - r_k^2)} \quad (2.8)$$

Проводився нормальний пуск асинхронного електродвигуна без навантаження при $U_\phi = U_{ном}$ і опит холостого ходу. Для цього був виміряний струм холостого ходу I_0 , напруга U_0 і потужність P_0 , споживана машиною. Тоді параметри контура схеми заміщення, що намагнічує:

$$r_\mu = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (2.9)$$

$$X_\mu = \sqrt{Z_\mu^2 - r_\mu^2} \quad (2.10)$$

4. Враховуючи, що роздільне визначення індуктивних опорів статора і ротора пов'язано з великими труднощами, на практиці звичайно приймають їх рівними.

В процесі перетворення електричної енергії в механічну існує баланс потужностей енергії.

$$P_{\text{эм}} = F \cdot n = E \cdot I \quad (2.11)$$

де $E \cdot I$ - електромагнітна потужність, $F \cdot n$ - механічна потужність; n - швидкість обертання ротора. В асинхронних двигунах напруга в мережі $U \cong E$ і струм статора I зсунуті по фазі на кут ϕ , тому

$$P_{\text{ем}} = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi, \quad (2.12)$$

де m - число фаз роторної обмотки.

Механічну потужність зручно виразити через обертаючий момент M і кутову швидкість Ω . Тоді слідує рівність

$$P_{\text{ем}} = mUI \cos \phi = 9,8M\Omega, \quad (2.13)$$

де $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, n - число обертів ротору, M - момент виражений в кГм

(1кГм=9,81 Дж=9,81 Н.м.). Роторні обмотки двигуна підрозділяють на два типи: короткозамкнені і з контактними кільцями. В двигунах типу МСТ використовуються короткозамкнені обмотки, виконані у вигляді білячої клітки. Електромагнітні процеси в асинхронному двигуні багато в чому аналогічні процесам в трансформаторі. В режимі холостого ходу - статор знаходиться під дією номінальної напруги, а струм в обмотці ротора відсутній. Це може бути лише у разі обертання ротора по напрямку обертання поля статора з синхронною швидкістю, тобто коли плин $S = 0$.

На рис.2.1. дана еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна.

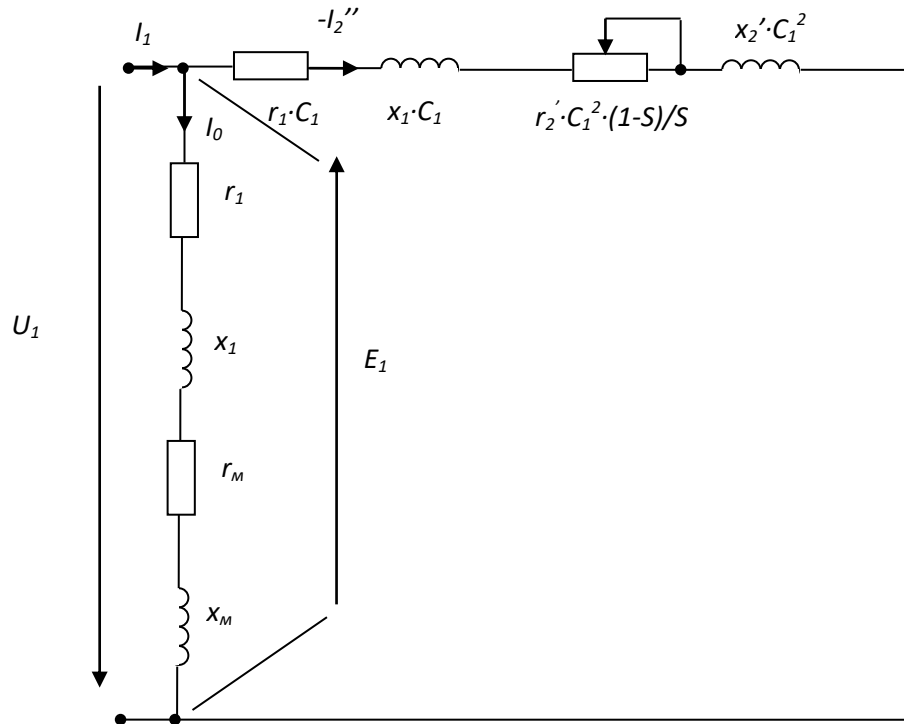


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Коло приведенного струму ротора I_2' містить активні опори обмоток r_1, r_2' - активні опори обмоток статора і ротору, x_1, x_2' - індуктивні опори обмоток статора і ротора; коло, що намагнічує, представлена опорами r_m, x_m, r_1 , та x_1 . З схеми заміщення виходить, що струм [15-17]

$$I_2^1 = \frac{U_1}{(r_1 + r_2' + \frac{1-S}{S} r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (2.14)$$

Видно, що у момент пуску $t = t_{\text{пуск}}, S=1$, а струми в обмотці ротора і в обмотці статора мають максимальне значення (в трансформаторі це відповідає режиму КЗ), оскільки опір R_d^1 який імітує навантаження, дорівнює нулю.

Електромагнітний момент обертання двигуна, що виникає в результаті силової взаємодії полів статора і ротора

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{9,81\Omega_1} = \frac{P_{2\text{э}}}{S\Omega_1 9,81} = C_m \Phi I_2^1 \cos \varphi \quad (2.15)$$

I – струм, пропорційний робочому потоку і активній складовій струму ротора

$I_{2S} = I_2^1 \cos \varphi_2$, де $S = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}$, $P_{2\gamma} = m_1 I_2^1 r_2^1$ – потужність втрат в обмотці ротора, Ω_1, Ω_2 – частоти обертання поля статора і ротора. Механічний момент $P_{\text{мех}} = \Omega_2 \cdot M_T$, де M_T – гальмівний момент. Формулу (3.7) можна записати у такому вигляді:

$$M = \frac{m_1 r_2 U_1^2}{9,81 S \Omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2^1}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2^1)^2 \right]} \quad (2.16)$$

Таким чином залежність (3.8) називається механічною характеристикою асинхронного двигуна. Видно, що M залежить від квадрата напруги U_1^2 прикладеної до обмотки статора, що характеризує чутливість моменту до змін напруги живлячої мережі. З другого боку, з рівняння (6) можна показати, що момент M при незмінних U_1 і f_1 є величина постійна, не залежна від активного опору ротора.

Критичний плин це такий, при якому двигун розвиває максимальний момент. Він може бути визначений за формулою [15-17]

$$S_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (2.17)$$

Механічна характеристика може бути розрахована за практичною формулою Клосса, яка дозволяє визначити залежність відносного моменту від плину

$$\frac{M}{M_{\text{max}}} = \frac{2}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}}} \quad (2.18)$$

В перший момент часу $n=0$, $S=(n_1-n)/n_1 = n_1/n_1=1$. Таким чином пусковий момент не максимальний і дорівнює

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{\Omega_1 \cdot ((r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2)} \quad (2.20)$$

Плин $S=0$, якщо $n_1 = n$, тобто не буде перетину магнітного поля статора і ротора. В цей час ЄРС E_2 і струм ротора I_2 , а значить і момент на валу ротора M будуть дорівнювати 0.

Коли $S < S_{кр}$ у формулі (2.18) чисельник переважає знаменник ш крива йде догори, а при $S > S_{кр}$ навпаки знаменник переважає чисельник, то крива механічної характеристики йде додолу.

Максимальний момент може бути визначений як

$$M_{\max} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \Omega_1 \cdot (x_1 + x_2')}, \quad (2.21)$$

Для оцінки робочих властивостей асинхронного двигуна і ступеня його придатності для роботи треба знати його робочі характеристики, які являють собою залежність моменту M , струму статора I_1 , коефіцієнта корисної дії η , плин S і коефіцієнта потужності $\cos \phi$ від корисної потужності P_2 при номінальній напрузі і частоті живлячої мережі. Залежності можуть бути побудовані шляхом прямих вимірювань величин, що цікавлять, при різних навантаженнях двигуна або розраховані [1].

Залежність $n(P_2)$ зветься жорсткою характеристикою. При роботі двигуна в режимі холостого ходу $P_2=0$, а ротор буде обертатися зі швидкістю $n \approx n_1$. По мірі збільшення навантаження швидкість буде падати, а плин S зростати. Для звичайних асинхронних двигунів $S_{\text{ном}}=0,015 \dots 0,06$, а для двигунів стрілочних електроприводів типу МСТ $S_{\text{ном}}=0,18$. Це зроблено для збільшення пускового моменту.

Залежність $M(P_2)$ зростає із зростанням P_2 . Оскільки швидкість обертання ротору практично міняється мало, то момент на валу ротору буде пропорційний потужності P_2 .

Хід кривої $I_1(P_2)$ відповідає рівнянню (2.6), якщо рахувати $I_1 \approx I_2^1$. При роботі вхолосту ($M_r=0$) ротор обертається приблизно з синхронною швидкістю n_1 , а двигун споживає великий струм I_1 , який складає 25...75%

від номінального. Із зростанням навантаження збільшується струм в роторі I_2^1 і струм I_1 в обмотці статора.

Характеристика коефіцієнта потужності $\cos \phi$ (P_2) показує, що у міру зростання навантаження на валу двигуна відношення активної потужності P_1 , яка споживається з мережі, до повної потужності S зростає

$$\cos \phi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}, \quad (2.22)$$

де Q_1 - реактивна потужність в обмотці статора. Ця потужність при роботі машини в режимі xx - максимальна, а $\cos \phi = \min = 0,08 \dots 0,2$.

При навантаженні швидкість обертання ротора падає, потужність P_1 росте, $\cos \phi$ зростає до $0,75 \dots 0,95$, а реактивна потужність Q_1 росте у меншій мірі, ніж P_1). Із зростанням плин зростання $\cos \phi$ сповільнюється, оскільки зростає потужність Q_1 за рахунок посилення полів розсіяння, які пропорційні струмам. $\cos \phi$ двигуна, що працює з недовантаженням, можна збільшити зниженням в $\sqrt{3}$ раз напруги фазних обмоток статора шляхом перемикавання обмоток статора, якщо це допустимо, з трикутника на зірку.

Залежність $\eta(P_2)$. Коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ показує відношення корисної потужності до витраченої. При xx $P_2=0$, тому і $\eta=0$. Форма кривої ККР буде залежати від величини втрат. Зі збільшенням P_2 струм I_2 і плин S будуть зростати. Але на початку I_2 і S будуть малими. При значних навантаженнях величина плин буде збільшуватись, тому втрати теж будуть зростати, а крива почне схилятися донизу.

Пуск в хід двигуна, як вже відзначено вище, супроводиться значним споживанням з мережі електроенергії, що в малопотужних мережах може викликати небажане для роботи інших приймачів тимчасове пониження напруги (наприклад перекриття сигналів світлофорів на забороняючи). Тому вживаються різні технічні заходів, які знижують наслідки такого явища.

Наприклад, збільшення активного опору ротора, застосування спеціальної конструкції короткозамкненого ротора та таке інше.

2.2. Результати розрахунку робочих та механічної характеристик асинхронного двигуна типу МСТ

За допомогою метода описаного (формули (2.1 – 2.22), [5 , 15-17, 25,26]) вище визначили:

$$I_o=1,36 \text{ A} \quad U_o=127 \text{ В} \quad \cos \phi_o=0.18$$

$$I_k=3,84 \text{ A} \quad U_k=127 \text{ В} \quad \cos \phi_k=0.4$$

$$r_1=11 \text{ Ом}$$

$$\Omega_o=1500 \text{ об/хв} \quad \Omega_{х.о.} = 1460 \text{ об/хв}$$

Визначимо опори асинхронної машини в режимі короткого замкнення при загальмованому роторі

$$r_{II} = \frac{3,84 \cdot 127 \cdot 0,4}{3,84^2} = 13,3 \text{ Ом}$$

$$Z_{II} = 127/3,84 = 33 \text{ Ом}$$

$$X_{II} = \sqrt{Z_{II}^2 - r_{II}^2} = \sqrt{33^2 - 13,3^2} = 30,3 \text{ Ом}$$

Визначимо опори намагнічування асинхронної машини

$$Z_M = \frac{U_o}{I_o} = \frac{127}{1,36} = 93,3 \text{ Ом}$$

$$r_M = \frac{1,36 \cdot 127 \cdot 0,2}{1,36^2} = 16,8 \text{ Ом}$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - r_M^2} = \sqrt{93,3^2 - 16,8^2} = 91,7 \text{ Ом}$$

Визначимо коефіцієнт $s_{k.o.}$

$$V_{ko} := \frac{1460}{1500} \quad V_{ko} = 0.973$$

$$S_{ko} := \sqrt{1 - V_{ko}^2}$$

$$S_{ko} = 0.229$$

Знайдемо індуктивний опір обмоток статора і ротора $X=X_1=X_2'$ і активний опір ротору r_2'

$$(r_k=r_{\pi} = 13,3 \text{ Ом}, X_k=X_{\pi}=30,3 \text{ Ом})$$

$$X := \frac{(r_k - r_l)}{S_{ko}} \cdot \left(\frac{X_k \cdot S_{ko}}{r_k - r_l} + 1 \right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{S_{ko}^2 + 1}{\frac{X_k}{r_k - r_l} \cdot S_{ko} + 1}} \right) \quad X = 19.794 \quad \text{Ом}$$

$$r_2 := (r_k - r_l) \cdot \left(X_k \cdot \frac{S_{ko}}{r_k - r_l} + 1 \right)$$

$$r_2 = 9.183 \quad \text{Ом}$$

Розрахуємо робочі та механічні характеристики асинхронного двигуна типу МСТ-0,25. Для розрахунку робочих та механічних характеристик будемо використовувати Г-подібну схему заміщення (рис.2.2).

Визначим коефіцієнт

$$C1 := 1 + \frac{x1}{xm} \quad C1 = 1.216$$

Визначим опір в колі холостого струму

$$R0 := r1 + rm \quad R0 = 27.8 \quad \text{Ом}$$

$$X0 := x1 + xm \quad X0 = 111.5 \quad \text{Ом}$$

$$Z0 := \sqrt{R0^2 + X0^2} \quad Z0 = 114.913 \quad \text{Ом}$$

Визначимо коефіцієнт потужності у колі холостого струму

$$\cos\phi10 := \frac{R0}{Z0} \quad \cos\phi10 = 0.242 \quad \sin\phi10 := \frac{X0}{Z0} \quad \sin\phi10 = 0.97$$

Визначимо активну та реактивну складові струму I_{10} , а також його дійсне значення

$$I10 := \frac{U1n}{Z0} \quad I10 = 1.105 \quad \text{А}$$

$$I10a := I10 \cdot \cos\phi10 \quad I10a = 0.267 \quad \text{А}$$

$$I10r := I10 \cdot \sin\phi10 \quad I10r = 1.072 \quad \text{А}$$

Визначимо приведений опір в торинної обмотки з урахуванням навантаження на валу
Розрахунок показан для плину

$$s := 0.0025$$

$$X2 := C1 \cdot x1 + C1^2 \cdot x2 \quad X2 = 53.349 \quad \text{Ом}$$

$$R2 := C1 \cdot r1 + C1^2 \cdot \frac{r2}{s} \quad R2 = 5.336 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

$$Z2 := \sqrt{R2^2 + X2^2} \quad Z2 = 5.336 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

Розрахуємо активну, реактивну та дійсне значення струму ротора

$$I2 := \frac{U1n}{Z2} \quad I2 = 0.024 \quad \text{А}$$

Коефіцієнт потужності в колі струму ротора

$$\cos\phi2 := \frac{R2}{Z2} \quad \cos\phi2 = 1$$

$$I2a := I2 \cdot \cos\phi2 \quad I2a = 0.024 \quad \text{А} \quad I2r := \sqrt{I2^2 - I2a^2} \quad I2r = 2.379 \times 10^{-4} \quad \text{А}$$

10. Вычислим активную, реактивную составляющие и полный ток статора

$$I1a := I10a + I2a \quad I1a = 0.291 \quad \text{А}$$

$$I1r := I10r + I2r \quad I1r = 1.073 \quad \text{А}$$

$$I1 := \sqrt{I1a^2 + I1r^2} \quad I1 = 1.111 \quad \text{А}$$

Коефіцієнт потужності $\cos\phi_1 := \frac{I_{1a}}{I_1}$ $\cos\phi_1 = 0.262$

Визначимо величину перетвореного опору

$$R_{pr} := C_1^2 \cdot r_2 \cdot \frac{(1-s)}{s} \quad R_{pr} = 5.309 \times 10^3 \text{ Ом}$$

Визначим величину перетвореної потужності

$$P_{pr} := 3 \cdot R_{pr} \cdot I_2^2$$

$$P_{pr} = 9.022 \text{ Вт}$$

Визначимо додаткові втрати

коефіцієнт додаткових втрат $adob := 0.005 \cdot \frac{P_{1n}}{I_{1n}^2}$ $adob := 0.005 \cdot \frac{P_{2n}}{\eta \cdot I_{1n}^2}$

$$adob = 11.662 \text{ Ом}$$

$$P_{dob} := adob \cdot I_1^2 \quad P_{dob} = 14.406 \text{ Вт}$$

Корисна потужність двигуна

$$P_2 := P_{pr} - P_{mex} + P_{dob} \quad P_{mex} = 1 \text{ Вт}$$

Потужність статора

$$P_1 := 3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1a} \quad P_1 = 110.934 \text{ Вт}$$

Углова швидкість обертання ротора

$$n := n_1 \cdot (1-s) \quad n = 1.247 \times 10^3 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

ККР двигуна

$$\eta := \frac{P_2}{P_1} \quad \eta = 0.202$$

Углова частота обертання магнітного поля статора

$$\Omega_1 := \pi \cdot \frac{n_1}{30} \quad \Omega_1 = 130.9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Углова частота обертання ротора

$$\Omega := \Omega_1 \cdot (1-s)$$

$$\Omega = 130.572 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Обертаючий момент на валу ротора

$$M_2 := \frac{P_2}{\Omega} \quad M_2 = 0.172 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Інші результати приведені в табл.3.5. для плинну $s=0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$

Визначимо величину критичного плинну

$$S_{kr} := \frac{r_2}{\frac{x_1}{C_1} + x_2} \quad S_{kr} = 0.249$$

Максимальний пусковий момент

$$M_{\max} := 3 \cdot \frac{U1n^2}{2 \cdot \Omega1 \cdot (x1 + x2)} \quad M_{\max} = 4.667 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент

$$M_{\text{пуск}} := 3 \cdot r2 \cdot \frac{U1n^2}{\Omega1 \cdot [(r1 + r2)^2 + (x1 + x2)^2]} \quad M_{\text{пуск}} = 1.69 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

Розрахуємо відносний момент для побудови механічної характеристики по формуле Клос

$$Motn := \frac{M}{M_{\max}} \quad s := 0.1, 0.2..1$$

$$Motr(s) := \frac{2}{\frac{Skr}{s} + \frac{s}{Skr}}$$

Інші результати вимірів в табл.3.6

Таблица 3.6

s =	Motr(s) =
0.1	0.691
0.2	0.976
0.3	0.983
0.4	0.898
0.5	0.799
0.6	0.709
0.7	0.632
0.8	0.568
0.9	0.515
1	0.47

Результати розрахунку даних для побудови робочих й механічних характеристик наведено на рис. 2.3, 2.4.

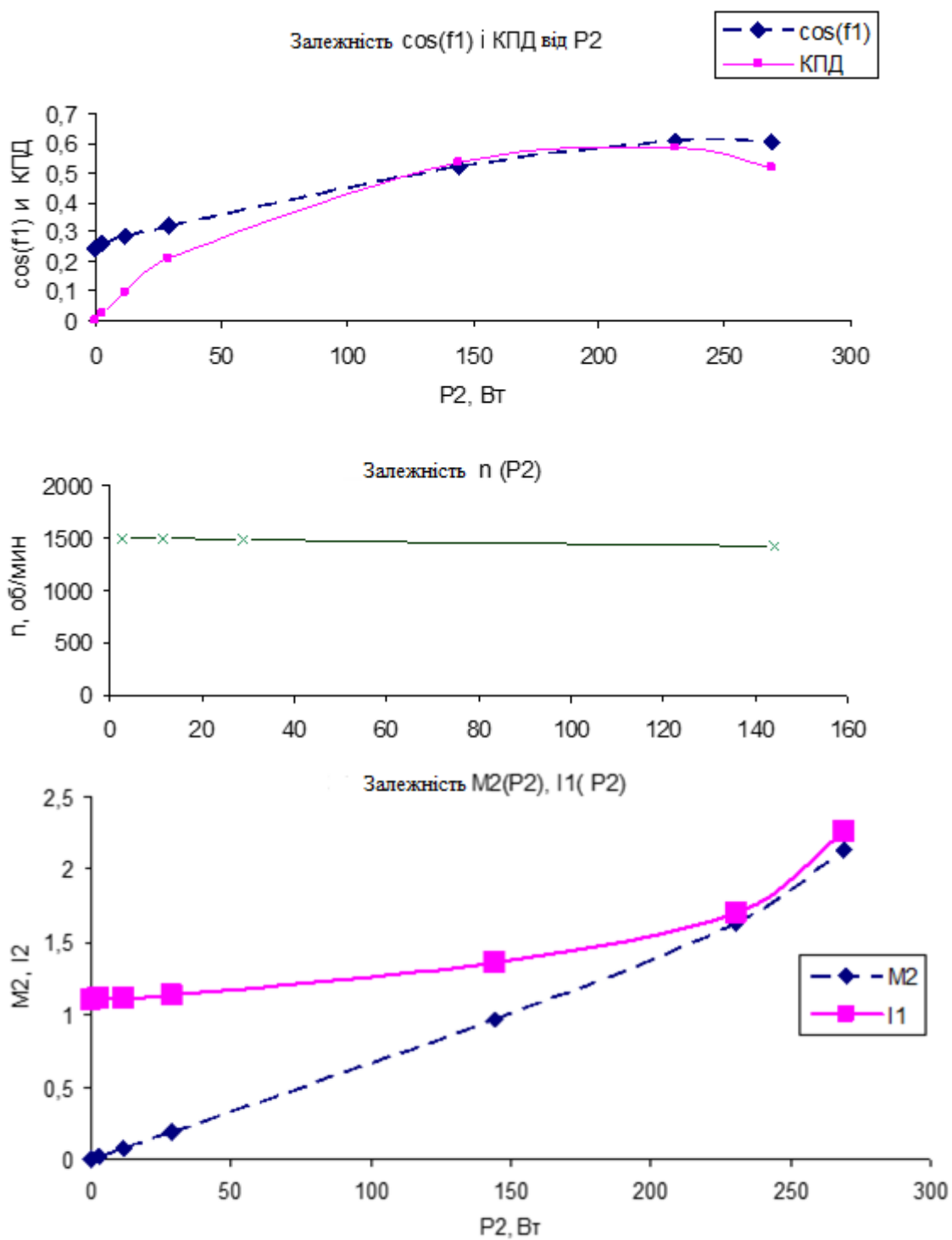


Рисунок 2.3 – Робочі характеристики асинхронного двигуна типу МСТ – 0.25



Рисунок 2.4 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

2.3 Висновки за розділом

Таким чином, даний метод ідентифікації параметрів трифазних асинхронних двигунів необхідний при визначенні працездатності приводів. Розглянута теорія і запропонована методика визначення параметрів схеми заміщення трифазних асинхронних двигунів. Розроблена методика була опробована на трифазному асинхронному короткозамкнутому електродвигуні серії МСТ-0,25 з номінальною потужністю 0,25 кВт. Отримані результати були порівняні з достовірними довідковими даними на цю машину і відхилення результатів не перевищували 5%.

3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В СТІЛОЧНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ ЗА КРИВОЮ СТАТОРА

3.1. Розробка методики виміру робочого струму стрілочного електродвигуна змінного струму з метою визначення несправностей

Дослідження кривих робочого і пускового струму стрілочних електроприводів змінного струму з двигунами типу МСТ-0,3, які встановлені в локомотивному депо Дніпровського метрополітену, ст. Комунар. Тип рейок на станції Р50, марка хрестовини стрілки 1/6. Вимірювання кривих робочого струму переводу стрілки здійснювались у кросовому приміщенні.

Інструменти для виміру: осцилограф фірми Oscill, комп'ютер з програмним забезпеченням XP/W7/8/9/10, вимірювальний шунт, який дозволяє вимірювати струм 0...5 А, комп'ютерна програма (<http://oscill.com>) для спектрального аналізу і запису сигналу, вимірювальні кліщі або амперметр для контролю робочого струму стрілки.

Послідовність виконання вимірювань.

1. Увімкнути комп'ютер чи ноутбук та запустити програму Oscill.
2. Під'єднати USB кабель осцилографу до комп'ютера, після чого натиснути кнопку Connect для початку запису сигналу. Пристрій працює в режимі осцилографу. Впевнитись, що програма почала приймати сигнал.
3. Вибрати частоту дискретизації сигналу і відповідно ціну поділки по осі часу (мкс/div), величину однієї поділки по осі напруги (mV/div). Налаштувати необхідні для виміру фільтри.
4. В кросовому приміщенні одну з перемичок стрілки, як показано на рис. 1.7. Необхідно витягнути дужку та вставити замість неї вимірювальний шунт, паралельно до якого підключений цифровий осцилограф і комп'ютер.
5. За умовою узгодження дій з черговою по станції (ДСП) перевести обрану стрілку в крайнє положення. При цьому за допомогою вимірювальних

кліщів або амперметру визначити робочий струм переводу стрілки. Одночасно записати сигнал, відповідний робочому струму переводу стрілки.

6. Зберегти файл для подальшого аналізу сигналу робочого струму.

7. Здійснити спектральний аналіз сигналу з метою визначення несправностей в стрілочному електроприводі чи стрілочному переводі.

8. За встановленим спектральним складом робочого струму електродвигуна визначити ймовірні несправності. Встановити причини завад.

3.2. Результати експериментальних досліджень

Всього експериментальні дослідження були здійснені для стрілочних електроприводів 14 стрілок з переведенням у положення «+» та «-». Приклад вимірів із спектральним аналізом кривої струму та величина перешкод стрілочних двигунів локомотивного депо метрополітену приведено в табл. 3.1, 3.2 і в додатку А. У таблиці 3.1. наведені значення пускового струму, та струму переводу стрілки.

Таблиця 3.1 – Результати вимірів робочого та пускового струмів електродвигунів стрілочних переводів локомотивного депо дніпропетровського метрополітену

№ стр	5	17	18	19	21	23	26	28	32	44	60	62	66	78
Пусковий струм, А	3	2,7	3,4	3,7	6,3	3	5,58	3,6	2,9	4,1	2,6	3,1	3	3,2
Робочий струм переводу (А)	1,53	1,78	1,74	1,92	1,67	1,75	1,86	1,88	1,88	2,2	1,5	1,9	1,9	1,76

Також було досліджено криву робочого струму електроприводу, який знаходиться на кафедрі АТЗ, без сполучення з гостряками (див. табл. 3.2) .

Таблиця 3.2 – Результати спектрального аналізу робочого струму
переводу стрілочних електроприводів

№ стрілочного переводу	Частота перешкоди до переводу, Гц.	Середня величина перешкоди до переводу, В.	Середня величина перешкоди під час переводу
Стр. 26	250	350 мкВ	1.4 мВ
	375	550 мкВ	800 мкВ
	500	450 мкВ	300 мкВ
	625	425 мкВ	300 мкВ
	750	430 мкВ	450 мкВ
	1000	215 мкВ	700 мкВ
	1125	250 мкВ	270 мкВ
	1250	185 мкВ	520 мкВ
	1350	340 мкВ	370 мкВ
Стр. 21 (МСТ – 0.3)	250	550 мкВ	8 мВ
	375	600 мкВ	11.5 мВ
	500	900 мкВ	13.5 мВ
	625	475 мкВ	15 мВ
	750	480 мкВ	12.5 мВ
	1000	100 мкВ	370 мкВ
	1125	160 мкВ	12.2 мВ
	1250	36 мкВ	13 мВ
	1350	305 мкВ	13.5 мВ
Кафедральний привід (МСТ – 0.25)	50	850 мкВ	250 мкВ
	75	1 мВ	6,2 мВ
	100	407 мкВ	14.5 мВ
	125	540 мкВ	6,5 мВ
	150	750 мкВ	500 мкВ
	175	540 мкВ	660 мкВ
	200	370 мкВ	2 мВ
	225	500 мкВ	840 мкВ
	250	662 мкВ	42 мкВ
	275	325 мкВ	287 мкВ
	300	465 мкВ	420 мкВ

За допомогою комп'ютерної програми було встановлені заважаючі гармоніки, які були встановлені у кабелі до переводу стрілки, та гармоніки, які виникають або підсилюються під час самого переводу стрілочного

електроприводу. Заважаючи гармоніки мали частоти 250, 375, 500, 625, 750, 1000, 1125, 1250 та 1350 Гц.. В ряді випадків рівень електромагнітних завад вказаних частот був близьким до рівня гармоніки несучої частоти 50 Гц. Інші гармоніки мали або незначний вплив або були занадто малі.

За допомогою програми Microsoft Excel побудовані криві струму переводу стрілки.

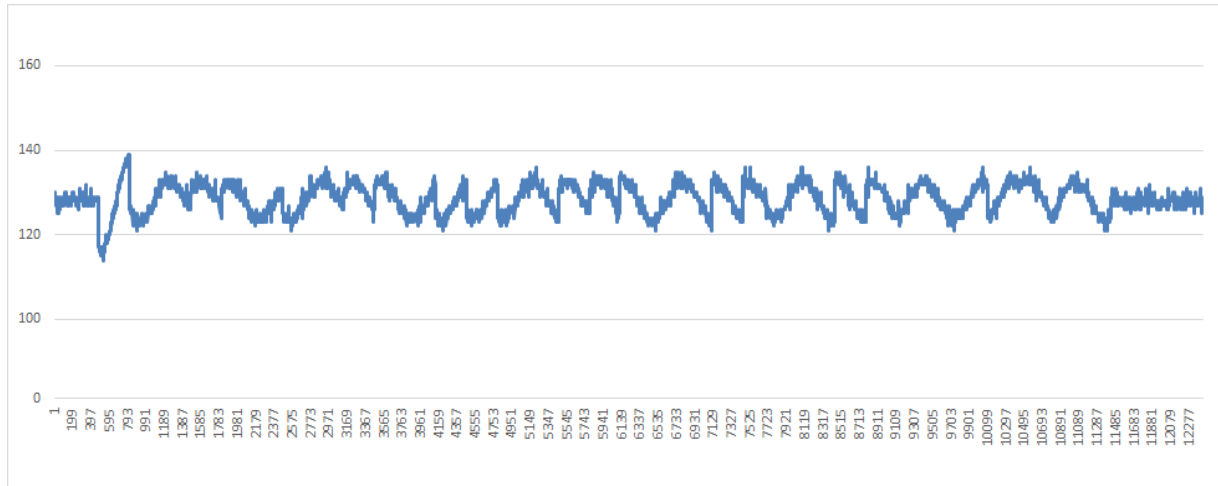


Рисунок 3.1 – Еталонний сигнал переводу стрілки №5

За еталонний сигнал було взято сигнал стрілки №5 оскільки він мав найменше перешкод та не було виявлено дефектів пов'язаних з роботою цього стрілочного електроприводу, тривалість переводу даної стрілки становила 3.4с.

Проаналізувавши інші криві струму переводу стрілочних електроприводів було знайдено ряд дефектів пов'язаних з нормальною роботою стрілки, наприклад за допомогою аналізу струму переводу стрілки №21 (рис 3.2.) було знайдено пошкодження.

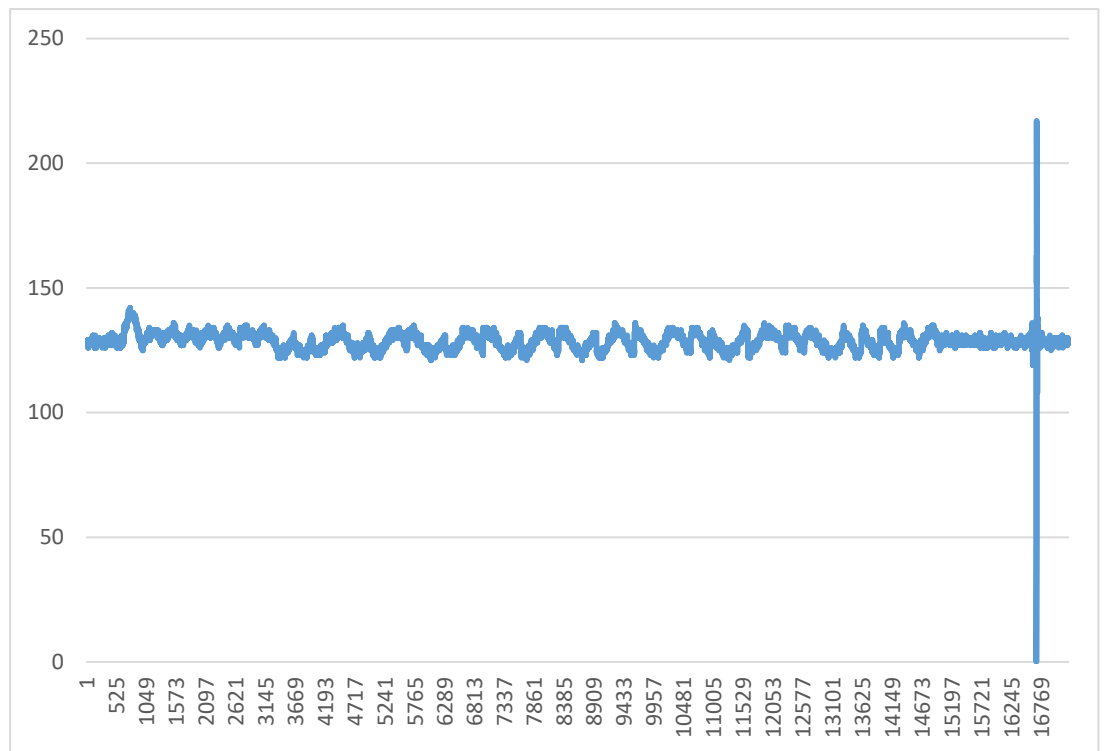


Рисунок 3.2 – Крива струму переходу стрілочного електропривода №21

Детальніше можна проаналізувати кінець переходу стрілки в окні програми Oscill на рис 3.3. Результати спектрального аналізу струму кінця переходу стрілочного електроприводу. Причинами завад в кінці переходу можуть бути: іскріння (дуга), яке виникає при розмиканні робочих контактів автоперемикача; відбиття гостряків (розрегулювання гарнітури стрілочного переходу); робота двигуна на фрікцію в кінці переходу. Тривалість і амплітуда і частота завади в такому разі складає 0,01 с.

За результатами проведених експериментів були визначені первинні параметри Г-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна типу МСТ-0,25 й побудовані робочі й механічні характеристики.

Так, при виникненні несправності виду «коротке замикання» чи пробій ізоляції в роторі в спектрі струму з'являються гармоніки кратні за частотою $41,7 \pm 10\% = 37,5 \dots 45,9$ Гц у двигуна типу МСТ-0,25, $42,5 \pm 5\% = 40,3 \dots 44,6$ Гц у двигуна типу МСТ-0,3 й $47,5 \pm 10\% = 42,3 \dots 52,3$ Гц - у двигуна типу МСТ-

0,6. При цьому несправності виду кз й пробій ізоляції листів можна буде розрізнити за величиною струму . При короткому замиканні величина струму буде більшою в декілька разів.

При виникненні несправності виду «биття підшипників» в спектрі робочого струму з'являються частоти від 10 до 150 Гц кратних 10 Гц амплітудою 0,5...0,8 А.

При виникненні несправності виду «пружинність гостряків» в кінці переводу стрілки фіксується деяке збільшення струму за умови його відсутності.

3.3. Висновки за розділом

Розроблено методику визначення несправностей трифазних асинхронних двигунів стрілочних електроприводів за спектральним аналізом кривої струму статора.

Розроблена методика діагностування використається в процесі експлуатації.

Перспективним є те, що вона дозволить у подальшому перейти від планово-попереджувальної технології технічного обслуговування до обслуговування за станом об'єкту.

ВИСНОВКИ

Основні недоліки існуючих технологій обслуговування стрілочних переводів представлені значними витратами часу, пов'язаними з переходами і великим числом ручних операцій, виконуваних обслуговуючим персоналом, неможливість в реальному часі контролювати і виявляти явні і приховані дефекти і пошкодження. Контроль працездатності стрілочних електроприводів здійснюється за допомогою вимірювання робочого струму, струму роботи двигуна на фрикцію, опору обмоток та ізоляції і зовнішнього огляду. Таким чином, технологія автоматизації контролю параметрів СП і розробка системи дистанційного діагностування їх технічного стану, передбачення виникнення несправностей, є актуальною науково-технічною задачею.

Запропонований метод діагностики двигунів стрілочних електроприводів змінного струму і стрілочних переводів, заснований на спектральному аналізі кривої робочого струму статора – є технічним рішенням контролю стану електроприводів змінного струму. За допомогою цього методу можливо не тільки виявити несправність, а й прослідкувати за зміною параметрів в електроприводі які сприяли для виникнення цієї несправності, що дозволить завчасно звернути увагу на елемент який потрібно буде замінити, ще до того як він вийде зі строю та потягне за собою виникнення відмови. За допомогою цього методу можливе зменшення не тільки часу на пошук та ремонт електроприводу але й зменшення виникнення небезпечних відмов.

Розроблена методика діагностування використається в процесі експлуатації. Перспективним є те, що вона дозволить у подальшому перейти від планово-попереджувальної технології технічного обслуговування до обслуговування за станом об'єкту.

За результатами проведених експериментів були визначені первинні параметри Г-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна типу МСТ-0,25 й побудовані робочі й механічні характеристики.

Так, при виникненні несправності виду «коротке замикання» чи пробій ізоляції в роторі в спектрі струму з'являються гармоніки кратні за частотою $41,7 \pm 10\% = 37,5 \dots 45,9$ Гц у двигуна типу МСТ-0,25, $42,5 \pm 5\% = 40,3 \dots 44,6$ Гц у двигуна типу МСТ-0,3 й $47,5 \pm 10\% = 42,3 \dots 52,3$ Гц - у двигуна типу МСТ-0,6. При цьому несправності виду кз й пробій ізоляції листів можна буде розрізнити за величиною струму. При короткому замиканні величина струму буде більшою в декілька разів.

При виникненні несправності виду «биття підшипників» в спектрі робочого струму з'являються частоти від 10 до 150 Гц кратних 10 Гц амплітудою 0,5...0,8 А.

При виникненні несправності виду «пружинність гостряків» в кінці переводу стрілки фіксується деяке збільшення струму за умови його відсутності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стрілочні електроприводи. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://vozom.org.ua/elementna-baza-a-i-t/strilochni-elektropryvody>
2. Масленников, Є. В. Стрілочні привода швидкісних залізничних магістралей [Текст] / Є. В. Масленников, П. Е. Горб, Т. Н. Сердюк, О. В. Іванов // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – Ном. 5. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2013. – С. 63-82 .
3. Сердюк, Т. М. Діагностування трифазних асинхронних двигунів / Т. М. Сердюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2018. – Ном. 16. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2018. – С. 32–42.
4. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines [Text] / P. Tavner, J. Penman, H. Sedding // The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. – 2008. – 306 p.
5. Thomson, W. T. Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors [Text] / W. T. Thomson, I. Culbert // IEEE. –2017. – 427 p.
6. Toliyat, H. A. Electric machines. Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis [Text] / H. A. Toliyat, S. Handi, S. Choi, H. Meshgin-Kelk // CRC Press: Taylor & Francis Group, LLC. – 2013. – 266 p.
7. Imeryuz, M. A Method to Analyze Asynchronous Machines With Broken Rotor Bars [Text] / M. Imeryuz, A. F. Mergen, O. Ustun // Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2010. – IEEE.– 2010. – P. 269 – 272.
8. Tsypkin, M. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – a Practical Implementation [Text] / M. Tsypkin // Proc. of International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). –IEEE. – 2011. P. 406–411.
9. Samaga, R. L. Effect of unbalance in voltage supply on the detection of mixed air gap eccentricity in an induction motor by Motor Current Signature Analysis

- [Text] / R. L. Samaga, K. P. Vittal, Vikas J // Proc. of Innovative Smart Grid Technologies, India.– IEEE PES. – 2011. – 6 p.
- 10.Лагута, В. В. Моделирование эффективной системы диагностирования тягового электродвигателя с учетом выбора вариантов комплектации его элементов [Текст] / В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень». – 2017. – Вип. 13. – С. 52–58.
 - 11.Сердюк, Т. М. Діагностування стрілочних двигунів змінного струму. Всеукраїнська научно-практическа конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Енергетика, енергозбереження на початку ХХІ століття»: Сб. тезисов докладов. Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2014. – 107 с.
 - 12.Сердюк, Т. Н. Усовершенствование метода диагностирования неисправностей стрелочных электроприводов с двигателями переменного тока [Текст] / Т. Н. Сердюк, Д. Я. Покотиллов, В. И. Профатилов // Тези ХІ Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» – Д.:ДИИТ, 2017.–С. 50.
 - 13.Трифазні асинхронні двигуни [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://web.kpi.kharkov.ua/ze/wp-content/uploads/sites/146/2022/04/Tryfazni-asynhronni-dvyguny.pdf>
 - 14.Гаврилюк, В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку [Текст]: монографія / В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк; за заг. ред. В. І. Гаврилюка; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – 193 с.
 - 15.Теоретичні основи електротехніки. У 3-х т. : підручник для вузів. Т.1 / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. - Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. - 336 с.

16. Теоретичні основи електротехніки. У 3-х т. : Підручник для вузів. Т. 2 / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. - Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. - 276 с.
17. Теоретичні основи електротехніки. В 3 томах : підручник для вузів. Т. 3. Ч. 2. Теорія електромагнітного поля / М. О. Костін. - Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. - 352 с.
18. Сердюк Т.М. Автоматизація технологічних процесів та виробництв. [Електрон. ресурс]: Дистанційний курс навчання. – Дніпро: ДНУЗТ, 2018. – Режим доступу: <https://lider.diit.edu.ua/course/view.php?id=311>
19. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування [Текст]. – Київ, 2006. – 433с.
20. Дорохін, Б. П. Впровадження нових типів двигунів стрілочних електроприводів [Текст] / Б. П. Дорохін, Т. М. Сердюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – Ном. 6. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2013. – С. 71–84.