

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки та технологій
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

ДОВІДКА

про відсутність плагіату у випускній кваліфікаційній роботі

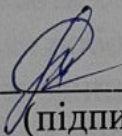
За результатами перевірки випускної кваліфікаційної роботи (ВКР) здобувача вищої освіти освітнього ступеня (ОС) «магістр»

Шозда Ігор Вадимович
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему: Діагностування двигунів змінного струму

в роботі не виявлено порушень академічної доброчесності.

Керівник ВКР

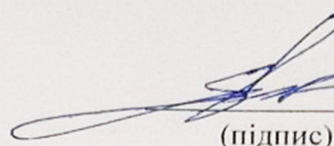

(підпис)

Сердюк І.М.
(прізвище, ім'я, по батькові)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Українській державний університет науки і технологій

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

«ДО ЗАХИСТУ»
Завідувач кафедри


(підпис) Гаврилюк В.І.
20 21 р. 12 « 16 » (ПІБ)

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

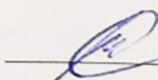
Освітня програма «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Тема: Діагностування двигунів змінного струму

Theme: Diagnostics of motors of alternating current

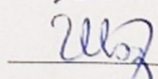
Керівник дипломної роботи

доцент



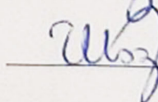
Сердюк Т. М.

Студент групи АТ1922



Шозда І. В.

Student АТ1922



Shozda Ihor

Дніпро
2021

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Комп'ютерні технології і системи»
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
«Автоматика та автоматизація на транспорті»

Спеціальність
Освітня програ-
ма

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри АТ

Гаврилюк В.І.
«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

Шозда Ігор Вадимович
(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи Діагностування двигунів змінного струму

Затверджена наказом по університету № 630 ст від « 19 » 10 2020 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 01.12.2021

3. Вихідні дані до роботи двигун типу МСТ-0,25: $U_{ном} = 220/127$ В, номінальний струм $I_{ном} = 1,4 / 2,4$ А, схема з'єднання обмоток – зірка/трикутник, швидкість обертання ротору $n = 1250 \pm 10$ % об/хв.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
1. Аналіз методів та засобів технічної діагностики слабо-потужних трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	30	
2. Методика експлуатаційного діагностування асинхронних трифазних двигунів стрілочних електроприводів	60	
3. Експериментальні дослідження та контроль параметрів двигунів змінного струму	100	
4. Охорона праці при догляді за централізованими стрілочними переводами		

Студент

Науковий керівник

РЕФЕРАТ

Відомості про обсяг пояснювальної записки: 66 сторінок, 6 таблиць, 14 рисунків, 20 джерел літератури.

Ключеві слова: діагностування, двигун змінного струму, математична модель, робочий струм двигуна, спектральний аналіз .

Об'єкт проектування: система діагностування трифазних асинхронних стрілочних приводів

Мета магістерської роботи: розробка методу діагностування двигунів змінного струму стрілочних приводів за спектральним аналізом струму статора, дати йому математичне обґрунтування.

В першому розділі виконано аналіз існуючих методів і засобів діагностування двигунів змінного струму.

В другому розділі удосконалено методику діагностування двигунів стрілочних приводів змінного струму.

В третьому розділі виконано експериментальні дослідження з контролю параметрів двигунів змінного струму і визначення несправностей.

В четвертому розділі описані питання охорони праці при догляді за стрілочним електроприводом.

Галузь застосування: системи керування рухом поїздів на залізничному транспорті.

Висновок. Впровадження удосконаленого методу діагностування двигунів стрілочних приводів дозволить знизити експлуатаційні витрати, підвищити надійність їх роботи та безпеку руху поїздів.

ЗМІСТ

Вступ	5
1. Аналіз методів та засобів технічної діагностики слабопотужних трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	9
1.1. Статистика відмов вузлів стрілочних електроприводів	9
1.2. Асинхронні двигуни стрілочних електроприводів та їх характеристики	10
1.3. Аналіз методів та засобів технічної діагностики трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	16
1.4. Несправності асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором	22
1.5. Висновки за розділом	34
2. Методика експлуатаційного діагностування асинхронних трифазних двигунів стрілочних електроприводів	36
2.1. Ідентифікація параметрів стрілочних електродвигунів в умовах ремонтно-технологічної ділянки	36
2.2. Математична модель слабопотужного стрілочного трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором	41
2.3. Висновки за розділом	51
3. Експериментальні дослідження та контроль параметрів двигунів змінного струму	52
3.1. Осцилографування робочого струму стрілочного двигуна	52
3.2. Ідентифікація несправностей спектральним методом	53
3.2.1. Несправність виду «биття підшипників»	53
3.2.2. Ідентифікація несправності «коротке замикання в обмотці в обмотці ротора» й пробій ізоляції в осередді ротору	54
3.2.3. Обрив в обмотках	56
4. Охорона праці при догляді за централізованими стрілочними переводами	59
Висновки	63
Література	65

ВСТУП

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором зараз є найбільш поширеними і, часто, найбільш потужними споживачами електричної енергії. Відповідно до останніх досліджень, вони споживають понад 80% всієї виробленої в країні електроенергії. Однак у процесі експлуатації по різних причинах можуть виникати ушкодження елементів двигуна, що у свою чергу приводить до передчасного виходу його з ладу. Вчасно виявити виникаючі несправності допомагає періодична діагностика стану устаткування.

Значну частину відмов стрілочних електроприводів складають несправності електродвигунів. Із статистичних даних, відомо, що 37 % ушкоджень виникає через зниження ізоляції обмотки статора і якоря, 47 % – через неполадки щітково-кільаторного механізму, 5 % – через обрив обмотки статора, 1 % – через міжламельні замикання у колекторі. Тобто надійність електродвигунів постійного струму в основному визначається технічним станом колекторно-щіткового вузла. Знос колектора і щіток є наслідком іскріння під щіткою, що виникає в результаті незадовільної комутації. Явище комутації в електричному двигуні постійного струму полягає в зміні напрямку струму в секціях електричної обмотки якоря при замиканні їх щіткою.

Отже, застосування системи моніторингу й експлуатаційної діагностики дозволить своєчасно визначити несправності на ранній стадії їх виникнення, мінімізувати витрати на ліквідацію пошкоджень, а також у подальшому здійснити перехід від планово-попереджувального ремонту до ремонту за станом об'єкта. Вирішення цієї задачі є актуальним на сьогоднішній день.

Розробка математичної моделі двигуна стрілочного електроприводу є необхідною для наукового обґрунтування методу автоматизованого виміру його параметрів й визначення основних діагностичних параметрів, які визначають експлуатаційні характеристики і надійність.

Використання методів і засобів контролю й аналізу поточного технічного стану дозволяє впровадити технологію обслуговування електродвигунів "за станом". Суть технології полягає в тім, що обслуговування й ремонт здійснюються залежно від реального поточного технічного стану механізму. Стан контролюється в процесі експлуатації без яких-небудь розбирань і ревізій на базі вимірів відповідних параметрів. При цьому витрати на технічне обслуговування електродвигунів знижуються на 50-75 % у порівнянні з обслуговуванням "за регламентом" (система планово-попереджувальних ремонтів).

Численні дослідження характеру ушкоджень двигунів змінного струму дозволили одержати наступні статистичні дані [1, 2]: ушкодження елементів статора складають 38%; ушкодження елементів ротора - 10%; ушкодження елементів підшипників - 40%; інші ушкодження - 12%.

Удосконалення різних електротехнічних й електромеханічних систем приводить до розширення спектра задач, які розв'язуються за допомогою результатів ідентифікації параметрів машин змінного струму. Значення електромагнітних параметрів використовуються для рішення питань, пов'язаних з вибором і розрахунком пристроїв захисту й автоматики машин змінного струму, у задачах випробувань електричних машин й управління споживання електричної енергії, при вирішенні питань дослідницького характеру й навчального процесу, при налаштуванні систем керування координатами асинхронних електроприводів з векторним керуванням.

Таким чином, якість реалізації й налаштування систем безперервного моніторингу, частотного й векторного регулювання швидкості обертання, компенсації реактивної потужності й т.д., залежать від наявності адекватної інформації про параметри електричної машини.

Більшість методів визначення електромагнітних параметрів [1], незалежно від способу створення режиму випробувань й способу обробки дослідницьких даних, базуються, по суті, на аналізі перехідних процесів, які виникають у результаті зміни електромагнітного стану електричної машини. Як окремий клас можна виділити методи, які реалізуються при періодичних гармонійних

або негармонійних впливах джерела з боку обмоток машини й аналізі частотних характеристик (залежностей параметрів від частоти впливу). Розвиток частотних методів оцінювання параметрів двигунів змінного струму здійснюється при використанні полігармонійного живлення.

На сьогодні широко використовується метод вібродіагностування стану елементів електродвигунів. Даний метод є досить дорогим і трудомістким, потребуючим застосування спеціальної вимірювальної техніки й програмного забезпечення. При застосуванні вібродіагностування необхідний доступ до елементів двигуна й механічного пристрою (що не завжди можливо).

Важливим є і дослідження електромеханічних процесів, що мають місце в асинхронних двигунах (АД) для нормальних й аварійних режимів їх роботи. Одним з найбільш прогресивних шляхів є використання для досліджень їхніх математичних моделей, що адекватно поясняє реальні фізичні процеси. Використання методів і засобів контролю й аналізу поточного технічного стану, наприклад методом осцилографування робочого струму двигуна, дозволяє впровадити технологію обслуговування електродвигунів "за станом". При цьому суть технології полягає в тім, що обслуговування й ремонт виконується залежно від реального поточного технічного стану механізму.

Отже, тема дипломної роботи на здобуття ОКР «магістр»: «Удосконалення методу діагностування двигунів змінного струму», яка передбачає розробку методу діагностування асинхронного трифазного двигуна стрілочного електроприводу методом осцилографування струму і визначенню його спектрального аналізу, який відповідає певному ряду відмов, й визначення за виміряними й паспортними даними робочих і механічних характеристик є досить актуальною.

Мета – розробити методику діагностування двигунів змінного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати існуючі методи діагностування малопотужних асинхронних трифазних двигунів з короткозамкненим ротором;
- удосконалити математичну модель трифазного асинхронного двигуна стрілочного електроприводу;

- удосконалити методику непрямого діагностування трифазного асинхронного двигуна стрілочного електроприводу;
- розробити автоматизоване робоче місце електромеханіка для діагностування двигунів.

Об'єкт дослідження – малопотужний трифазний асинхронний привід.

Предмет дослідження – методика діагностування асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Наукова новизна полягає в удосконаленні методики діагностування трифазних асинхронних двигунів стрілочних електроприводів за рахунок використання в непрямій методиці виміру характеристик стрілочних приводів більш точних формул для визначення його первинних параметрів обмотки ротору.

Практичне значення застосування удосконаленої методики діагностування стрілочних двигунів типу МСТ дозволить своєчасно визначити несправності на ранній стадії їх виникнення, мінімізувати витрати на ліквідацію пошкоджень, а також у подальшому здійснити перехід від планово-попереджувального ремонту до ремонту за станом об'єкта.

Особистий внесок здобувача. Всі результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведені в роботі, отримані автором особисто або безпосередньо з його участю. Особистий внесок здобувача полягає в самостійному плануванні та проведенні досліджень, обробці отриманого матеріалу, формулюванні наукових положень і висновків.

Публікації. Результати магістерської роботи були апробовані на 81-й Міжнародній науково-практичній конференції. – Львів, 2019. XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (2021, м. Дніпро). За результатами роботи опубліковано тези [27].

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ СЛАБОПОТУЖНИХ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

1.1. Статистика відмов вузлів стрілочних електроприводів

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

Наступний в списку самих ненадійних елементів стрілочних приводів – курбельний контакт, на який припадає 9,26% відмов (з під'єднанням контактів і обриви монтажу). Тому і для курбельного контакту необхідно передбачити можливість контролю контактів і монтажу.

Всі пошкодження монтажу в розглянутих елементах стрілочних електроприводів в основному відбуваються в місцях кріплення проводів. Монтаж і підключення асинхронних двигунів не повинні порушувати цілісності електричних кіл, а також має бути виключений будь-який заважаючий вплив на роботу приводів. Виходячи з цього входні кола стрілочних двигунів повинні бути захищені від коротких замикань і підключатися паралельно контрольованим елементам.

Однією з головних причин порушень нормальної роботи стрілочних електроприводів є низькоякісне виконання робіт з технічного обслуговування (60-70% відмов у вузлах стрілочних переводів виникає саме з цієї причини [1]).

Впровадження автоматизованого контролю колійного обладнання дозволить підвищити ефективність функціонування стрілочних приводів за рахунок можливості безперервного технічного діагностування робочих параметрів і, значить, забезпечить своєчасну реакцію технічного персоналу дистанцій Ш.

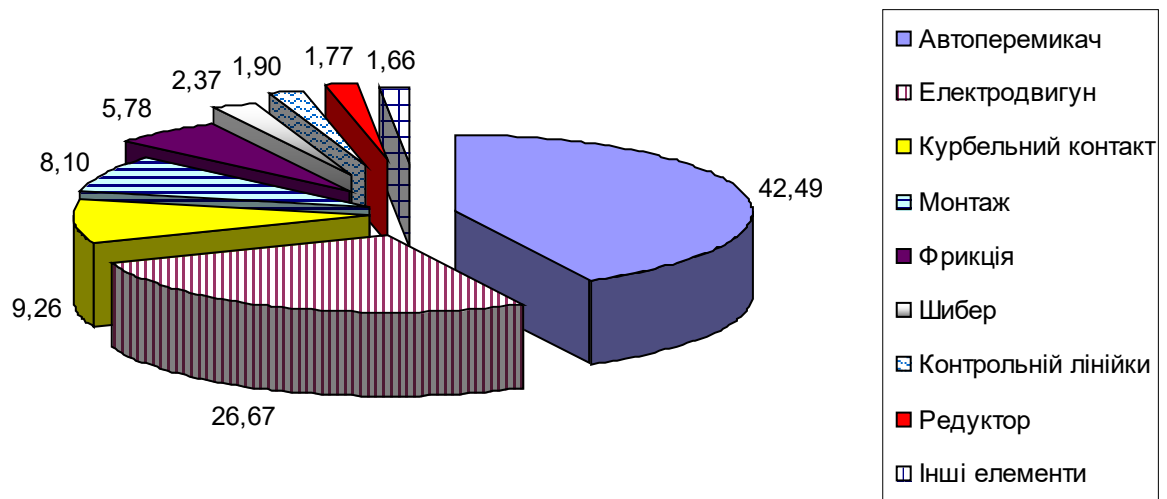


Рис. 1.1. Статистика відмов вузлів стрілочних електроприводів

1.2. Асинхронні двигуни стрілочних електроприводів та їх характеристики

Електродвигун приводу є джерелом механічної енергії стрілочного приводу, що працює в тяжких умовах: широкий діапазон знакозмінних навантажень, режим роботи повторно-короткочасний та таке інше.

Асинхронний трифазний електродвигун має швидкість обертання ротора, що змінюється у міру зростання навантаження і плинну. Основні деталі двигуна: статор, ротор, полюсна система і механічна частина. Принцип роботи асинхронного електродвигуна полягає в електромагнітній взаємодії між магнітними полями статора і ротора. Порушуване трифазною системою струмів магнітне поле статора є тим, що обертається; поле струмів ротора теж обертається синхронно з полем статора, залишаючись щодо останнього нерухомим. Разом з тим швидкість обертання ротора буде меншою за швидкість обертання магнітного поля статора. В робочому режимі ротор двигуна обертається з частотою n , меншої частоти n_1 магнітного поля статора, що обертається в тому ж напрямі що і ротор. Тому магнітне поле, що має велику частоту, обертається відносно ротора з частотою, яка дорівнює $n_s = n_1 - n$.

Характеристикою асинхронності є плин двигуна

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% = \frac{n_s}{n_1} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

Відносне відставання ротора від магнітного поля статора, що обертається, характеризується плином S .

Якщо ротор обертається синхронно з магнітним полем, тобто з однаковою частотою, то плин буде дорівнювати нулю ($S=0$). Таким чином, чим більше частота обертання ротора, тим менше плин. В робочому режимі асинхронного двигуна ковзання мало. У сучасних асинхронних двигунів ковзання при повному навантаженні складає 3-5%, тобто ротор обертається з частотою, яка незначно відрізняється від частоти магнітного поля статора. При холостому ході, тобто за відсутності навантаження на валу, плин дуже малий і може бути прийнятий рівним нулю [1-4].

Для асинхронних трифазних двигунів МСТ $S=18\%$, тобто плин є підвищеним. Це зроблено для того, щоб двигун розвивав максимальний момент під час пуску.

Частоту обертання ротора можна визначити з наступних соотношень:

$$n = n_1 - n_s = n_1(1 - S), \quad (1.2)$$

Двигун працюватиме стійко з постійною частотою обертання ротору при рівновазі моментів, тобто якщо обертаючий момент двигуна M буде рівний гальмівному моменту на його валу M_r , який розвиває приймач механічної енергії. Отже, можна записати $M=M_r$. Будь-якому навантаженню машини відповідає певна частота обертання ротора n і певне плин S . Магнітне поле статора обертається щодо ротора з частотою n_s і індукує в його обмотці ЕРС E_2 , під дією якої по замкнутій обмотці ротора протікає струм I_2 . Якщо навантаження на валу машини збільшилося, тобто зріс гальмівний момент, то рівновага моментів буде порушена, оскільки гальмівний момент буде більше обертаючого. Це приведе до зменшення частоти обертання ротора, а отже, і до збільшення плину. Із збільшенням плину магнітне поле статора буде протікати через провідники обмотки ротора частіше, ЕРС E_2 , індукована в обмотці ротора, зросте, а в результаті

збільшиться як струм в роторі, так і обертаючий момент двигуна. Плин і струм в роторі збільшуватимуться до значень, при яких знов наступить рівновага моментів, тобто обертаючий момент стане рівним гальмівному. Аналогічно протікає процес зміни частоти обертання ротора і моменту, що розвивається, при зменшенні навантаження двигуна. Із зменшенням навантаження на валу двигуна гальмівний момент стає менше обертаючого, що приводить до збільшення частоти обертання ротора або до зменшення плину. В результаті зменшуються ЕРС і струм в обмотці ротора, а отже, і обертаючий момент, який знов стає рівним гальмівному моменту. Двигун з короткозамкненим ротором при малій потужності його в порівнянні з потужністю джерела енергії пускають в хід безпосереднім включенням до мережі. При великій же потужності двигуна пусковий струм зменшують, знижуючи прикладену напругу. Для пониження напруги на час пуску двигун включають в сіть через знищуючий автотрансформатор або реактори. При обертанні ротора з нормальною частотою двигун перемикають на повну напругу мережі.

Осереддя статора дано на рис. 1.2. Воно набирається із сталевих пластин завтовшки 0,35 або 0,5 мм. Пластини штампують із пазами, ізолюють лаком або окалиною для зменшення втрат на вихрові струми збирають в окремі пакети і кріплять в станині двигуна 3. До станини прикріплюють також бічні щити з розміщеними на них підшипниками, на які спирається вал ротора. Станину встановлюють на фундаменті. В подовжні пази статора укладають провідники його обмотки 2, які відповідним чином сполучають між собою так, що утворюється трифазна система. На щитку 4 машини є шість затисків до яких приєднуються початки і кінці обмоток кожної фази. Для підключення обмоток статора до трифазної сіті вони можуть бути з'єднані зіркою або трикутником, що дає можливість включати двигун в сіть з двома різними лінійними напругами. На щитку машини вказано обидві напруги сіті, на які розрахований двигун, тобто 220/127 В або 380/220 В. Для більш низьких напруг, вказаних на щитку, обмотка статора з'єднується трикутником, більш високих - зіркою.

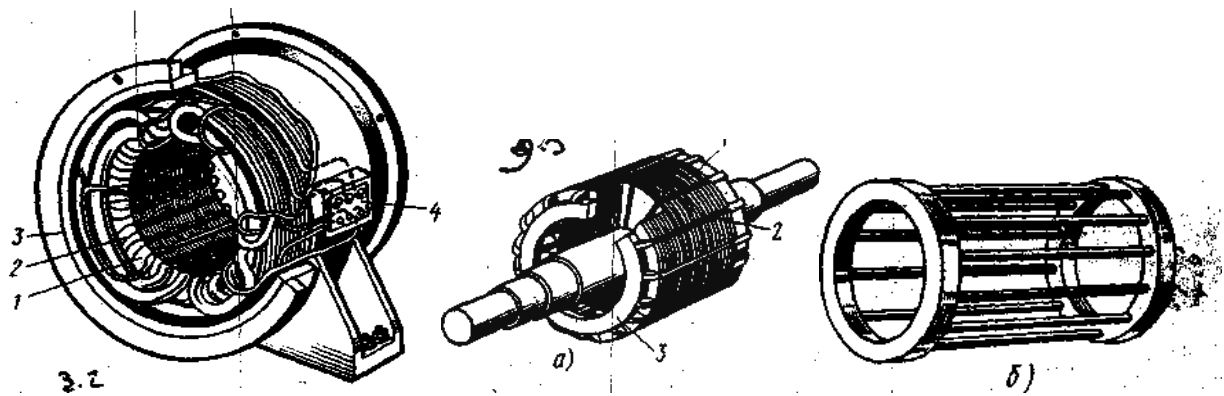


Рис.1.2. Складові частини статора асинхронного двигуна

Для з'єднання обмотки статора трикутником, на щитку машини верхні затиски сполучають перемичками з нижніми, а кожену пару сполучених разом затисків підключають до лінійних дротів трифазної сіті. Для включення зіркою три нижні затиски на щитку сполучають перемичками в загальну крапку, а верхні підключають до лінійних дротів трифазної мережі.

Осереддя ротору також набирають із сталевих пластин завтовшки 0,5 мм, ізолювані лаком або окалиною для зменшення втрат на вихрові струми. Пластини штампують з пазами і збирають в пакети, які кріплять на валу машини. З пакетів утворюється циліндр з подовжніми пазами, в яких укладають провідники обмотки ротора. Залежно від типу обмотки асинхронні машини можуть бути з фазним і короткозамкненим роторами. Короткозамкнена обмотка ротора виконується по типу білячого колеса. В пазах ротора укладають масивні стрижні, сполучені на сторонах торців мідними кільцями 3. Часто короткозамкнену обмотку ротора виготовляють з алюмінію. Алюміній в гарячому стані заливають в пази ротора під тиском. Така обмотка завжди замкнута коротко і включення опору в неї неможливе [1-4].

Стрілочні асинхронні двигуни серії МСТ виконуються з завищеним плинном, який дорівнює $S=18\%$. Підвищення плину проти звичного для двигунів однакової потужності зроблено для збільшення пускового моменту. Номінальні параметри асинхронного двигуна приведені в табл.1.1.

Параметри стрілочних двигунів

Величина	Значення характеристик двигуна типу МСТ-0,25
Напруга, В	220/127
Струм, А не більше	1,4/2,4
Потужність, Вт	250
Обертаючий момент, Н·м	1,57
Частота обертання, об/хв.	1250
ККД, % не менш	59
Коефіцієнт потужності $\cos \phi$	0,78
Частота, Гц	50

Електродвигун типу МСТ-0,25 є трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненою обмоткою (білячою клітиною). Обмотка статора розміщується в пазах в 2 ряди і ізолювана від сердечника картонною ізоляцією і має діаметр 0,55 мм проводу типу ПСВ- 2. Число пар полюсів $p=2$, пазів 24, фаз 3, число пазів на полюс і фазу $q=2$, паралельних віток 1. Фазні виводи обмотки статора кріпляться до корпусу двигуна через ізолюючу прокладку. На панелі розташовано 6 виводів – по парі на 1 фазу. Обмотки можуть бути з'єднані зіркою чи трикутником [1].

Повітряний зазор між статором і ротором повинен бути якомога меншим, бо статор і ротор пов'язані між собою лише через магнітний потік, який створюється статором. Чим меншим буде повітряний зазор, тим менше магнітний опір і краще магнітний зв'язок між статором і ротором. Короткозамкнена обмотка ротора складається з 18 мідних стержнів діаметром 3,8 мм, які укладені в пази осереддя, і двох замикаючих кілець з перерізом 60 мм^2 . Стержні приварюють до кілець.

Пускові характеристики двигунів стрілочних приводів приведені нижче в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Пускові характеристики стрілочного асинхронного
двигуна з короткозамкненим ротором

Параметр	МСТ-0,25
Кратність пускового струму $I_p/I_{ном}$	2,7
Кратність пускового моменту $M_p/M_{ном}$	2,2

Задовольняючий пусковий момент досягається за рахунок підвищення плинності за рахунок збільшення активного опору клітини ротора по відношенню до індуктивного. Практично це реалізовано за рахунок збільшення перерізу осереддя ротора і статора і зменшення перерізу стержнів білячої клітини. Завдяки таким пусковим характеристикам можливий прямий пуск двигуна до мережі при номінальній напрузі.

Щодо нагріву двигуна розраховані на роботу в повторно-коротко-часовому режимі з тривалістю включень ПВ=15%. Назначений ресурс – 500000 переводів стрілок при умові виконання правил експлуатації.

Частоту обертання двигунів регулюють не тільки зміною числа пар полюсів, але і частоти струму. Цей метод може бути застосований у випадку використання двигунів для стрілочних приводів на механізованих горках.

Електромеханічні характеристики електроприводів з двигунами типу МСТ-0,25 приведені в табл.1.3 [1].

Електромеханічні характеристики електродвигунів типу МСТ-0,25

Параметри	Напруга двигуна, В	Значення характеристик в залежності від навантаження на шибєрі, Н				
		0	1000	2000	3000	4000
Струм, А	127	1.55	1.87	2.3	2.95	3.5
	220	0.9	1.05	1.3	1.65	2.1
Час перевodu, с	127	2.57	2.75	2.95	3.25	3.94
	220	2.58	2.75	2.93	3.23	3.81
Активна потужність, Вт	127	150	225	339	480	600
	220	135	202	330	465	645
Корисна потужність, Вт	127	-	55	102	140	153
	220	-	55	103	140	159
ККД	127	-	0.244	0.297	0.292	0.255
	220	-	0.271	0.311	0.301	0.247
$\cos \phi$	127	0.44	0.545	0.67	0.74	0.78
	220	0.397	0.506	0.67	0.74	0.8

1.3. Аналіз методів та засобів технічної діагностики трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

Аналіз існуючих методів технічної діагностики електродвигунів показує, що існують два напрямки їхнього розвитку. До першого напрямку відносяться методи, які використовуються при проведенні профілактичних випробувань і ремонтів (тобто на непрацюючих електродвигунах) і що дозволяють виявляти практично всі можливі види ушкоджень. До другого напрямку відносяться експрес-методи, що використовуються на працюючих електродвигунах, але спрямовані на виявлення одного певного виду дефектів [5-16].

Широко використаний в промисловості метод вібродіагностування стану елементів електродвигунів. Даний метод є досить дорогим і трудомістким, потребуючим застосування спеціальної вимірювальної техніки й програмного забезпечення. При застосуванні вібродіагностування необхідний доступ до елементів двигуна й механічного пристрою (що не завжди можливо). Крім того, необхідно "прикладати" вібродатчики в трьох проекціях. І, нарешті, не завжди буває можливо відбудуватися від вібрацій, викликаних "сусіднім" устаткуванням.

Використання методів і засобів контролю й аналізу поточного технічного стану дозволяє впровадити технологію обслуговування електродвигунів "по стані". Суть технології полягає в тому, що обслуговування й ремонт виробляються залежно від реального поточного технічного стану механізму. Стан контролюється в процесі експлуатації без яких-небудь розбирань і ревізій на базі вимірів відповідних параметрів. При цьому витрати на технічне обслуговування електродвигунів знижуються на 50-75 % у порівнянні з обслуговуванням "за регламентом" (система планово-попереджувальних ремонтів).

Відомо, що найбільш часто ушкоджуються обмотки статора й ротора АД, для діагностування яких запропоноване ряд методів. Так у роботі [5] для діагностування обмоток ротора короткозамкненого АД використовується контроль пускового струму статора асинхронного електродвигуна. У роботах [6, 7] оцінка технічного стану обмоток електродвигуна здійснюється по величині третьої гармонійної складового струму статора. У роботах [9, 10] діагностування стрижнів короткозамкненого ротора асинхронних електродвигунів виконується з використанням пульсацій узагальненого вектора струму статора. До недоліків зазначених методів можна віднести такі: погрішності діагностування при наявності пульсацій і гармонійних складових у живлячій напрузі, а також труднощі, пов'язані з оцінкою технічного стану електродвигуна з використанням одного з перерахованих критеріїв.

Облік дефектів й несправностей можна проводити за допомогою різних систем. Серед сучасних систем ідентифікації параметрів АД з ураху-

ванням дефектів і несправностей можна виділити системи технічного діагностування, що виконують безперервні або періодичні діагностичні виміри з необхідним інтервалом в автоматичному режимі [5]. Методики виявлення дефектів і несправностей систем технічного діагностування ґрунтуються на показаннях контрольно-вимірювальних приладів і на результатах випробувань при проведенні ремонтів електродвигунів. При цьому розрізняють системи діагностування за регламентом і по стані. Система діагностування за регламентом заснована на системі планово-попереджувальних ремонтів, недоліками яких є необґрунтована заміна вузлів з більшим залишковим ресурсом, зниження надійності роботи електричної машини після розбирання й заміни деталей і т.д. Системи діагностування по стані технічно вірогідно визначають необхідні строки й обсяги ремонтних і налагоджувальних робіт, контролюючи якість їхнього виконання. У цілому недоліком таких систем є неможливість вчасно виявити дефекти й несправності через відносно більші строки між випробуваннями. Також застосування таких систем не завжди виправдано, тому що часто приводить до необхідності відключати працездатне встаткування, що, у свою чергу, викликає ріст матеріальних і трудових витрат, погіршення техніко-економічних показників.

Розповсюдженою системою технічного обслуговування й ремонту в цей час є система, що базується на індивідуальному спостереженні зміни технічного стану в процесі експлуатації шляхом проведення діагностики з періодичністю, установленною технічною документацією.

Велика кількість методів використовують дані про миттєві значення напруг і струмів статора [11-15].

Це пов'язано з високою інформативністю й доступністю сигналів, можливістю проведення діагностування в ході експлуатації.

У цей час широкий розвиток одержують системи ідентифікації ЕМП АД за допомогою гармонійного аналізу напруги й токи статора [1, 5, 9].

Також для виявлення несправностей можуть бути використані інтелектуальні системи діагностики технічного стану АД з використанням нечіткої логіки й нейронних мереж [7, 8].

Одним з перспективних напрямків технічного контролю й діагностики, що визначають підвищення якості інформаційних технологій контролю й діагностики варто вважати інтелектуалізацію процесів обробки діагностичної інформації з використанням технології експертних систем. При цьому вони повинні забезпечувати підвищення якості розпізнавання технологічного стану об'єкта.

Апарат нечіткої логіки дозволяє оцінювати технічний стан й обґрунтовано ухвалювати рішення щодо наявності дефектів і необхідності проведення ремонтних операцій.

Нейронні мережі широко застосовуються в завданнях діагностування. Існує велика кількість пристроїв, які ухвалюють рішення щодо наявності несправності на підставі даних про струми, напруги й частоту обертання вала двигуна за допомогою системи нейронних мереж.

Значна кількість систем побудована на основі контролю віброакустичних сигналів. Джерелами коливальних сил асинхронних двигунів можуть бути несправності обмоток статора, нерівномірності повітряного зазору, нерівноваженості ротора, дефекти підшипників й ін. Системи вібраційної діагностики здійснюють оцінку коливальних сил, пов'язаних з наявністю тих або інших дефектів. Маючи велику базу даних і результати вимірів для окремо взятого двигуна, можливо ідентифікувати несправність й оцінити ступінь її розвитку, у тому числі й в автоматичному режимі. Системи вібродіагностики малоефективні у виявленні несправностей на ранніх стадіях розвитку, зокрема , міжвіткові замикань. Відсутні дані про можливості впливу несиметрії живильної мережі на вібраційний сигнал. Вібрації вимірюються за допомогою безлічі дорогих датчиків, чутливих до перешкод.

Можна виділити системи діагностування, побудовані на порівнянні перехідних процесів випробуване АД й отриманих з моделі [6]. У випадку ідеаль-

но симетричної машини обидві моделі дадуть однакові результати розрахунку параметрів стану машини. Якщо ротор має один або більше ушкоджених стрижнів, то лінійні напруги й струми будуть спотворюватися. Більше того, момент на валу й швидкість ротора показують подвійну модуляцію ковзання в часовій області. Використання моделі просторових векторів виражають різні вхідні кількості й обчислюють різні змінні стани, у яких також з'являються згадані модуляції. Певні розходження в моменті машини використовуються далі залежно від розподілу просторового потоку. Для виявлення ушкодженого ротора за допомогою системи моніторингу повинні бути вимірними лінійні напруги, струми й положення ротора. Це завдання виконується за допомогою портативної вимірювальної системи, що має допоміжні карти АЦП. Модель просторового вектора розраховується в автономному режимі після виміру зареєстрованих даних.

З використанням моделювання існують системи, які дозволяють виявити одиночний обірваний стрижень обмотки ротора під час роботи АД з повним навантаженням. Ці системи здатні відрізнити конструктивну несиметрію машини від дійсного ушкодження й дозволяють виконувати дві функції: обробку сигналів й розв'язання алгоритму для повідомлення операторові інформації про стан ротора. Обробка сигналів містить у собі блок перетворення сигналів зовнішнього потоку розсіювання й блок, що розкладає робочий струму в спектр частот. Далі розглядаються спектри, які характеризують дефект відповідно до заданого алгоритму [7].

Окремою групою виділяють системи діагностування, побудовані з використанням математичних моделей АД, що дозволяють розрахувати характеристики справного двигуна в певних умовах, і зрівняти їх з показниками реального двигуна. Математична модель асинхронного двигуна являє собою систему диференціальних рівнянь, розрахунок якої вимагає застосування промислового контролера.

В останні роки в багатьох країнах миру спостерігається тенденція усе більше широкого застосування новітніх інформаційних технологій з вико-

ристанням інтелектуальних систем. До таких систем відносяться й експертні системи, що представляють собою програмні комплекси, які забезпечують можливість придбання знань кваліфікованих фахівців - експертів у певній проблемній області й використанні цих знань для оцінки складних ситуацій і видачі рекомендацій з оптимального виходу з них. Концепція побудови автоматизованої експертної системи для оцінки експлуатаційного стану енергетичного об'єкта, що складається із двох незалежних систем (системи централізованого контролю й самої експертної системи), запропонована в роботах [8, 9]. Вихідні параметри системи централізованого контролю є вхідними параметрами експертної системи, які використовуються при оцінці експлуатаційного стану об'єкта. Вихідні дані розробленої системи технічної діагностики також можуть служити вхідними параметрами для відповідної експертної системи.

Отже, існуючі пристрої ідентифікації електромагнітних параметрів (ЕМП) АД з урахуванням дефектів і несправностей у тому або іншому ступені вирішують поставлені розроблювачами завдання, однак доцільною є розробка системи, що дозволяла б на ранній стадії виявляти дефекти.

Тому розробка методу з використанням апаратно-програмного комплексу цифрової системи контролю характеристик асинхронного двигуна, що дозволить одночасно діагностувати різні види несправностей АД за спектральним складом робочого струму є досить актуальною задачею. З використанням даного апаратного забезпечення одержати цифрові дані, які можуть бути використані в ряді методів по діагностуванню електродвигунів. До того ж за вихідними параметрами комплексу можна зробити оцінку експлуатаційного стану електродвигуна, досить точно визначити його параметри, досліджувати двигун у різних режимах.

Для реалізації поставленої задачі й наукового обґрунтування необхідно виконати моделювання електромеханічних перехідних й усталених процесів, що припускає попереднє знання певної сукупності активних й індуктивних опорів, що відбивають зв'язок між струмами й потокозчепленнями в магні-

тозв'язаних контурах АД. Умови роботи АД в системі електропривода визначаються її електромагнітними параметрами. Використання електромагнітних параметрів АД, що адекватно відображають реальні фізичні процеси, дозволить вирішувати широкий спектр технічних завдань прогнозування, контролю, керування процесами в електромеханічних й енергетичних системах, що включають асинхронні машини. На сьогоднішній день існує велика кількість систем ідентифікації ЕМП АД.

1.4. Несправності асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором

Усі причини несправностей розділяють на електричні, магнітні й механічні. До електричних причин відносяться: пробій ізоляції обмоток, їх обрив, поганий контакт у місцях з'єднання провідників, обгорання колекторних пластин або контактних кілець й ін. До магнітних причин відносяться: ослаблення пресування листів сталі, замикання між ними й ін.

До механічних причин відносяться: несправності підшипників, несправності бандажів (розриви, ослаблення, спадання), биття колектора або кілець, скривлення й поломка вала, поломка щіткотримачів, невірноваженість обертових частин й ін.

Однієї з найпоширеніших несправностей асинхронних електродвигунів є ушкодження обмоток. Виткові замикання в котушці, міжфазні короткі замикання в обмотці й замикання обмотки на корпус є, як правило, наслідком зношування ізоляції: обриви в обмотках - наслідком розпаювань місць з'єднання або механічного псування обмотки малого перетину.

Найбільш уразливими місцями обмотки є місця виходу її з пазів, вигини або перехрещування в лобових частинах, сполучних проводах котушкових груп. Ушкодження можуть бути й у місцях з'єднання виводів обмотки з мережевим кабелем.

Зовнішніми ознаками короткого замикання в обмотці можуть бути: ненормальне гудіння електродвигуна, неоднакова величина струмів у колах фаз, ускладнений пуск, перегрів котушок обмоток.

Щоб визначити обсяг ремонту електричної машини, необхідно виявити характер її несправностей. Несправності електричної машини розділяють на зовнішні й внутрішні.

До зовнішніх несправностей відносяться: обрив одного або декількох проводів, що з'єднують машину з мережею, або неправильне з'єднання; перегорання плавкої вставки запобіжника; несправності апаратури пуску або керування, знижена або підвищена напруга живильної мережі; перевантаження машини; погана вентиляція.

Внутрішні несправності електричних машин можуть бути механічними й електричними. Механічні ушкодження: порушення роботи підшипників; деформація або поломка вала ротора (якоря); розболтування пальців щіткотримачів; утворення глибоких утворювань ("доріжок") на поверхні колектора й контактних кілець; ослаблення кріплення полюсів або сердечника статора до станини; обрив або сповзання дротових бандажів роторів (якорів); тріщини й підшипникових щитів або в станині й ін. Електричні ушкодження: міжвиткові замикання; обриви в обмотках; пробій ізоляції на корпус; старіння ізоляції; розпаювання з'єднань обмотки з колектором; неправильна полярність полюсів; неправильні з'єднання в котушках й ін. Класифікація видів несправностей і їх причин для АД з короткозамкненим наведена в табл. 1.4.

Виткові замикання (коротке замикання в одній фазі) в обмотці статора можуть бути виявлені по сильному перегріванні котушки (або котушкової групи), за збільшеним значенням струму в ушкодженій обмотці при з'єднанні обмоток зіркою.

При з'єднанні обмоток трикутником амперметр, включений у коло ушкодженої фази, показує менше значення в порівнянні з амперметрами, включеними в колі двох інших фаз. Визначення дефектної фази рекомендується проводити при зниженій напрузі (0,25 - 0,3 від номінального).

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

Можливі несправності і причини їх виникнення

Ротор двигуна не обертається	Відсутній струм в статорі через перегорання запобіжника чи вимкне несправний автоматичний вимикач
Ротор двигуна не обертається, але при розгортанні його рукою працює товчками й сильно гуде	Обрив в одній фазі мережі чи внутрішній обрив в обмотці статору при з'єднанні фаз «зіркою»
Двигун обертається вхолосту, але при навантаженні зупиняється	Заниження напруги в мережі, неправильне з'єднання фаз обмотки статора «зіркою». Якщо обмотка з'єднана «трикутником», то, ймовірно, має місце обрив в колі однієї із фаз обмотки статору
Двигун гуде, ротор обертається повільно, струм в усіх трьох фазах різний і навіть на холостому ходу перевищує номінальний	Обрив одного чи декількох стрижнів обмотки ротору, неправильне з'єднання початку та кінця обмотки статору (фаза «перевернута»)
Двигун нагрівається при номінальному навантаженні	Виткові замикання в обмотці статору, погіршення умов вентиляції в результаті запилення вентиляційних каналів
Неприпустимо низький опір ізоляції обмотки статору	Зволоження чи сильне забруднення ізоляції обмотки статору, старіння чи ушкодження ізоляції
Неприпустимо низький опір ізоляції обмотки статору	Порушення співосності валів, неврівноваженість ротору (дисбаланс)
Двигун сильно вібрує, але вібрація припиняється після відмикання від мережі. Двигун сильно гуде, струм в фазах різний, одна із ділянок статору швидко нагрівається	Коротке замкнення обмоток статора

Дослід визначення дефектної фази рекомендується робити при зниженій напрузі ($1/3 - 1/4$ номінального), у випадку асинхронного двигуна з фазним ротором обмотка останнього може бути розімкнута, а у випадку асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором може обертатися або бути загальмованим. При проведенні дослідів із асинхронним двигуном у нерухомому стані його обмотка збудження повинна бути замкнута накоротко або ж на розрядний опір.

У досліді з нерухомою асинхронною машиною струми в її фазах будуть розрізнятися навіть у тому випадку, якщо машина справна, що пояснюється магнітною асиметрією її ротора. При повертанні ротора ці струми будуть змінюватися, однак при справній обмотці межі їхніх змін будуть однакові.

Виткові замикання в обмотці ротора можуть бути виявлені аналогічно (за допомогою амперметрів). У цьому випадку обмотка ротора перегрівається, величина струму у фазах коливається, обмотка статора нагрівається більше звичайного. При пуску й роботі з резисторами в роторному колі обмотка ротора димить, з'являється характерний захід палаючої ізоляції.

Основною ознакою, за якою можна знайти замикання в обмотках електродвигуна змінного струму, є нагрівання короткозамкненого контуру. Для цього необхідно обмацати обмотку електродвигуна після її відключення. Обмацування обмотки варто робити тільки при виключеній обмотці.

Фаза, що має замикання, може бути визначена й за значенням її опору постійному струму, обмірюваного мостом або по методу амперметра - вольтметра, менше опір буде мати фаза із замиканням. Якщо ж немає можливості роз'єднати фази, то роблять виміри трьох міжфазних опорів [16-19].

У випадку з'єднання фаз електродвигуна зіркою (рис. 1.3, а) найбільшим буде міжфазний опір, обмірюваний на кінцях фаз, що не мають замикань, два інших опори будуть рівні між собою й будуть менше першого. У випадку з'єднання фаз електродвигуна трикутником (рис. 1.3, б) найменший опір буде на кінцях фази, що має замикання, два інших виміри дадуть більші значення опору, причому обоє вони будуть однакові.

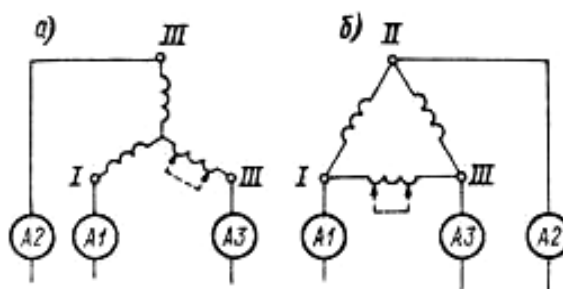


Рис. 1.3. Пояснення ознак замикання в обмотках при з'єднанні зіркою (а) і трикутником (б)

Котушкові групи або котушки, що мають замикання, можуть бути знайдені при живленні змінним струмом всієї її обмотки або тільки дефектної фази по нагріванню або за значенням спадання напруги на їхніх кінцях. Котушкові групи або котушки, що мають замикання, будуть сильно нагріті й мати менше спадання напруги (при вимірі напруги зручно користуватися гострими щупами, якими проколюють ізоляцію сполучних проводів). У цьому випадку, так само як і вище, дефектні котушки можна знайти за значенням опору постійному струму.

Замикання в обмотці генератора можуть бути знайдені за значенням індукованої ЕРС у фазах обмотки, у її котушкових групах або в котушках. Для цього генератор пускають у хід, зрушують його з місця й виконують виміри фазних напруг; якщо обмотки з'єднані трикутником, то фази варто роз'єднати. Фаза, що має замикання, буде мати меншу напругу. Для знаходження котушкової групи або котушки, що має замикання, вимірюють напругу на їхніх кінцях. Для висковольтної машини досвід можна зробити при залишковій напрузі.

У тих випадках, коли необхідно з'ясувати, чи є дефект у статорній або роторній обмотці, надходять у такий спосіб.

Статорну обмотку включають на знижену напругу ($1/3 - 1/4$ номінального) при розімкнутому роторі й вимірюють напругу на кільцях ротора, повільно повертаючи ротор. Якщо напруги на кільцях ротора (попарно) не рівні між со-

бою й міняються залежно від положення ротора стосовно статора, то це вказує на замикання в статорній обмотці.

При замиканні в роторній обмотці (при справній статорній) напруга між кільцями ротора буде неоднаковим і не буде мінятися залежно від положення ротора.

Дослід може бути здійснено при живленні ротора й вимірі напруги на застисках статора, при цьому вийде зворотна картина. Напруга, що підводиться до ротора повинна становити $1/3 - 1/4$ номінальної напруги на кільцях ротора, тобто напруги на кільцях при нерухомому роторі й статорі, включеному на номінальну напругу.

Після того як встановлено, яка з обмоток (роторна чи статорна) має з'єднання між витками, визначають дефектну фазу, котушкову групу або котушку розглянутими вище способами.

У складних випадках (при замиканні великої кількості котушок) або коли короткозамкнену галузь за якимись причинами не вдається виявити, прибігають до методу розподілу обмотки на частині. Для цього обмотку ділять спочатку навпіл і перевіряють мегомметром з'єднання між собою цих частин. Потім одну із цих частин ділять знову на дві частини й кожну з них перевіряють на з'єднання з першою половиною й так далі доти, поки не будуть знайдені котушки, що мають з'єднання.

Щоб знайти дефект у фазному роторі асинхронного двигуна, ротор загальмовують і включають статор у мережу. У випадку замикання значної частини обмотки ротора або, якщо двигун має більшу потужність, загальмовування при номінальній напрузі стає неможливим, тому що викликає більшу силу струму в статорі й спрацьовування захисту двигуна. У таких випадках випробування рекомендується робити при зниженій напрузі.

У деяких випадках короткозамкнену частину обмотки електродвигуна можна відразу визначити при зовнішньому вигляді - по обвуглій ізоляції.

Варто мати на увазі, що при наявності паралельних галузей в обмотці коротке замикання в одній з галузей фази (при значному числі витків, що за-

мкнули) може викликати нагрівання й іншої галузі, що не має короткого замикання, тому що остання виявляється замкнутої витками дефектної частини обмотки.

Фазу, що має замикання, можна знайти за несиметрією споживаного струму з мережі. При з'єднанні обмотки електродвигуна зіркою (рис. 1.3, а) у фазі, що має замикання, струм (A_3) буде більше, ніж у двох інших фазах. При з'єднанні обмотки електродвигуна трикутником (рис. 1.3, б) у двох фазах мережі, до яких приєднана дефектна фаза, струми (A_1 й A_3) будуть більше, ніж у третій фазі (A_2).

Якщо при поворотах загальмованого ротора присутня нерівність напруг, то виткові замикання відбулося в обмотці статора, а якщо напруга не змінюється, то, в обмотці ротора. При цьому напруга між кільцями двох фаз, одна з яких ушкоджена, буде меншою, чим напруга, що відповідає двом неушкодженим фазам.

Визначення місця міжвиткових замикань обмотки.

Місце виткового замикання після розбирання електродвигуна й роз'єднання паралельних кіл обмотки статора можна виявити, наприклад, за допомогою методу виміру опору котушок подвійним мостом або методом амперметра-вольтметра.

Замикання обмотки статора на корпус і міжфазове коротке замикання може бути виявлене за допомогою мегомметра. Місце замикання на корпусі виявляється або при огляді обмотки, або одним зі спеціальних способів.

Якщо в місці замикання незначно ушкоджена тільки ізоляція (але не провідник), то її можна тимчасово відновити прокладками з відповідних ізоляційних матеріалів із просоченням їх лаком. Якщо ж ушкоджені провідники обмотки або ізоляція зруйнована на значній ділянці, то заміняють ушкоджену котушку.

Наприклад, обриви в обмотках кранового електродвигуна можуть бути виявлені також за допомогою мегомметра. Однак перш ніж приступити до відшукування обривів або поганого контакту в обмотці необхідно переконатися у ві-

дсутності цих дефектів поза обмоткою (через недостатнє прилягання контактів пускових апаратів, нещільності контактів вивідних кінців і т.д.).

При обриві мегомметр покаже нескінченно великий опір. При з'єднанні обмоток трикутником один з його кутів ("початок" однієї обмотки й "кінець" іншої) при випробуванні розмикають. При з'єднанні обмоток зіркою фаза мережі мегомметр підключається до виводу кожної фазної обмотки й до нульової точки обмоток. Після виявлення несправної фазної обмотки випробуванню на обрив підлягають всі котушки, а потім після ретельного огляду визначають місце обриву в ушкодженій котушці.

Для того, щоб знайти котушкову групу або котушку, що має обрив, один кінець мегомметра приєднують до одного вивода фази, а інший - по черзі до всіх сполучних проводів між котушковими групами й котушками, після розслідування частин обмоток з обривом, мегомметр дає більші показання відповідно до опору ізоляції випробуваної обмотки (при цьому зручно користуватися гострими щупами, щоб уникнути зачищення сполучних проводів).

Найбільш ймовірні місця обривів у дровових обмотках перебувають у міжкотушечних з'єднаннях, а в стрижневих обмотках - у пайках (хомутиках). У короткозамкнених обмотках роторів асинхронних електродвигунів обриви або поганий контакт мають місце через погану приварки або пайки в місцях з'єднання стрижнів із замикаючими кільцями.

Обриви в короткозамкнених обмотках можуть мати місце в пазових частинах у результаті механічних ушкоджень. У роторах асинхронних електродвигунів з литою алюмінієвою обмоткою обриви в пазовій частині можуть бути через дефекти при литті.

Для того, щоб переконатися в наявності обриву або поганому контакту в короткозамкнених обмотках роторів, проводять наступний дослід. Ротор загальмовують і на статорній обмотці подають напругу, що дорівнює 20 - 25 % від номінального. Потім ротор повільно повертають і вимірюють величину струму в обмотці статора (в одній або трьох фазах). При справній обмотці ротора вели-

чина струму в обмотці статора у всіх положеннях ротора буде однаковою, а при обриві або поганому контакті буде змінюватися залежно від положення ротора.

Якщо замикання відбулося між двома фазами, то місце з'єднання знаходять аналогічно попередньому, роз'єднуючи обмотки пофазно. Котушки однієї з фаз, що має з'єднання, розділяють на дві частини й мегомметром перевіряють наявність з'єднань кожної такої половини із другою фазою. Потім ту частину, що з'єднана з іншою фазою, знову розділяють на дві частини й кожну з них знову перевіряють і т.д..

Метод послідовного розподілу на частині застосовують при знаходженні замикання в обмотках, що мають паралельні галузі. У цьому випадку необхідно дефектні фази розділити на паралельні частини й визначити спочатку, між якими галузями є з'єднання, а вуж потім застосувати до них цей метод.

Тому що замикання між фазами або котушковими групами частіше бувають у лобових частинах обмотки або сполучних провідників, то іноді вдається відразу ж знайти місце з'єднання шляхом підняття й ворушіння лобових частин з одночасною перевіркою мегомметром.

Усі ці методи визначення несправностей в електричному асинхронному двигуні мають суттєві недоліки. А саме, значні затрати у часі на виявлення несправності, людській фактор, який веде за собою суб'єктивність при виконанні діагностичних вимірів, а інколи й недбайливість.

Ушкодження ізоляції.

Для визначення місця ушкодження ізоляції обмотки електродвигуна наперед необхідно роз'єднати фазні обмотки й виміряти опір ізоляції кожної фазної обмотки від магнітопроводу або принаймні перевірити цілість ізоляції. При цьому вдається виявити фазну обмотку з ушкодженою ізоляцією. Для визначення місця ушкодження ізоляції обмотки електродвигуна можуть бути використані різні методи: метод виміру напруги між кінцями обмотки й магнітопроводом, метод визначення напрямку струму в частинах обмотки, метод розподілу обмотки на частини й метод "пропалювання".

При першому методі (рис.1.4) на фазну обмотку електродвигуна з ушкодженою ізоляцією подається знижена змінна або постійна напруга й вольтметрами V1 й V2 вимірюють напругу між кінцями обмотки й магнітопроводом. За співвідношенням цих напруг можна судити про положення місця ушкодження обмотки щодо її кінців. Цей метод не забезпечує достатньої точності при малому опорі обмотки.

Другий метод (рис.1.5) полягає в тім, що постійна напруга подається на об'єднані в загальну крапку кінці фазної обмотки й на магнітопроводу. Для можливості регулювання й обмеження струму в колі включають реостат R. Напрямку струмів в обох частинах обмотки, розмежованих крапкою С - з'єднання з магнітопроводом, будуть протилежними [16].

Якщо по черзі доторкатися двома проводами від мілівольтметра кінців кожної котушкової групи, то стрілка мілівольтметра буде відхилятися в одному напрямку доти, поки провід від мілівольтметра не буде приєднано до кінців котушкової групи з ушкодженою ізоляцією. На кінцях наступних котушкових груп відхилення стрілки зміниться на протилежне.

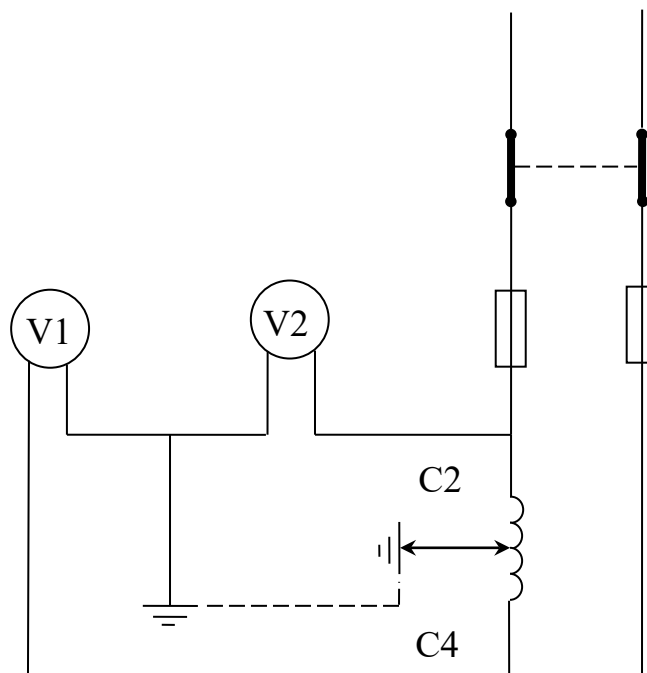


Рис. 1.4. Визначення місця ушкодження ізоляції електродвигуна двома вольтметрами

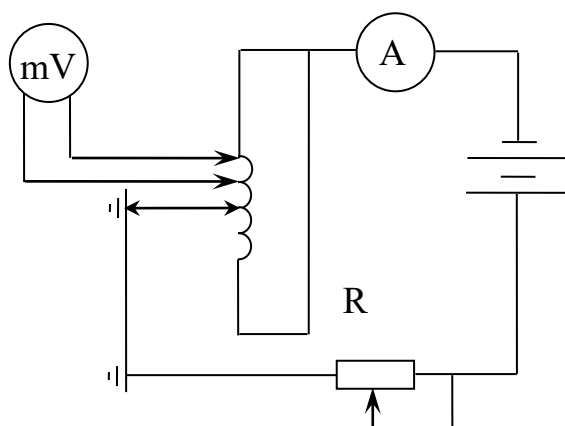


Рис. 1.5. Визначення котушкової групи обмотки електродвигуна з ушкодженою ізоляцією контрольною лампою

У котушкової групи з ушкодженою ізоляцією відхилення стрілки буде залежати від того, до якого з кінців ближче місце ушкодження ізоляції; крім того, величина напруги на кінцях цієї котушкової групи буде менше, ніж на інших котушкових групах, якщо ушкодження ізоляції не перебуває поблизу кінців котушкової групи. У такий же спосіб виконується подальше визначення місця ушкодження ізоляції усередині котушкової групи.

На рис. 1.6 показана група двошарової обмотки електродвигуна, що складається із чотирьох котушок. Залишивши без зміни схему включення фазної обмотки, вимірюють напругу між точками А - В, В - С, С - D й D - E і спостерігають за напрямком відхилення стрілки мілівольтметра. Якщо ізоляція ушкоджена в котушці В - С, то відхилення стрілки для крапок А - В буде протилежно відхиленню її для точок С - D й D - E.

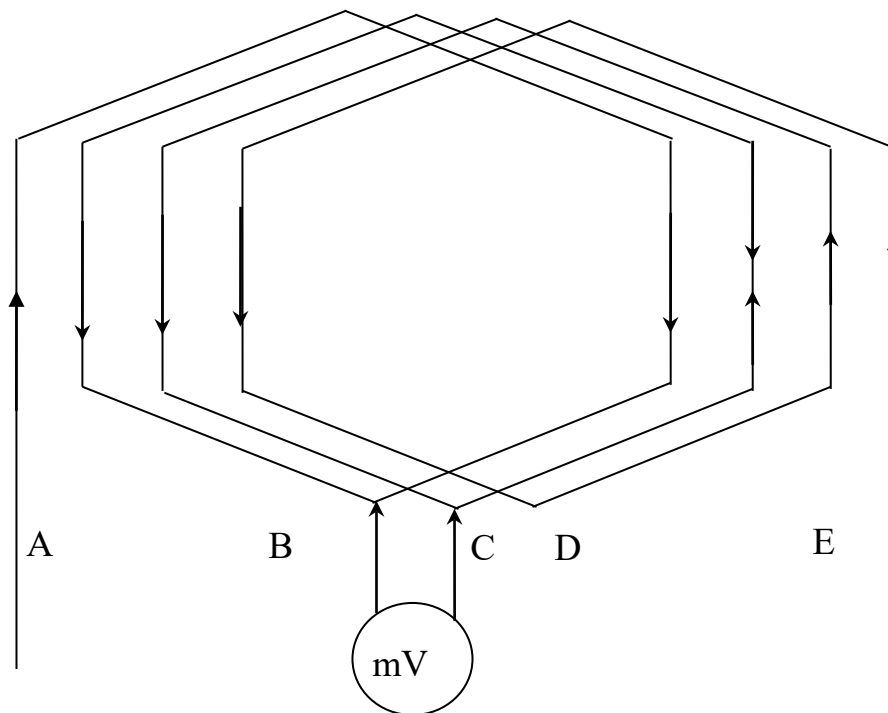


Рис. 1.6. Визначення котушки обмотки електродвигуна з ушкодженою ізоляцією

Про напрямок струму в котушці можна судити по відхиленню магнітної стрілки, розташовуваної по черзі над кожним пазом з досліджуваною обмоткою. При переході через пази, у яких розташована котушка з ушкодженою ізоляцією, відбувається зміна напрямку відхилення магнітної стрілки відповідно до зміни напрямку струму при включенні обмотки за схемою на рис. 1.5. Для виконання цього дослідження електродвигун повинен бути розібраний.

Перераховані методи дають надійні результати тільки у випадку стійкого контакту провідників обмотки з магнітопроводом.

Метод розподілу обмотки на частині полягає в тому, що фазну обмотку, що має з'єднання з магнітопроводом, ділять навпіл шляхом розпаювання міжкотушечних з'єднань і потім мегомметром або контрольній лампі визначають частину обмотки, що має з'єднання з магнітопроводом. Подібний розподіл продовжують доти, поки не буде знайдена котушка з ушкодженою ізоляцією. Якщо фазну обмотку з ушкодженою ізоляцією й магнітопровід приєднати до джерела зниженої напруги, наприклад до зварювального генератора або трансфор-

матора, то внаслідок значного нагрівання місця контакту провідників обмотки й магнітопроводу з'являється дим, а іноді й іскри (ізоляція "пропалюється").

Для запобігання більших розмірів ушкодження внаслідок обгорання ізоляції й оплавлення провідників обмотки необхідно включити в коло обмежуючий опір.

У деяких випадках місце ушкодження вдається встановити порівняно простим методом, якщо фазну обмотку з ушкодженою ізоляцією й магнітопровід включити в мережу 220 В через контрольну лампу й дерев'яний важіль зміщати лобові частини обмотки. При зсуві котушки з ушкодженою ізоляцією контрольна лампа буде мигати. Виявлену котушку з ушкодженою ізоляцією необхідно замінити. Обмежитися усуненням ушкодження можна в тому випадку, коли загальний стан ізоляції задовільне.

Якщо немає можливості виправити ушкоджену ізоляцію й електродвигун не може бути зупинений для ремонту обмотки, то варто відключити ушкоджену котушку, тобто роз'єднати кінці цієї й сусідньої котушок і потім з'єднати кінці цілих котушок. Якщо крім ізоляції котушки від магнітопроводу ушкоджена також виткова ізоляція, то таку котушку потрібно відключити й розрізати для усунення короткозамкнених контурів. Кількість відключених витків не повинне перевищувати 10% загальної кількості витків фазної обмотки.

При наявності паралельних галузей або при з'єднанні фазних обмоток електродвигуна трикутником відключення котушки може привести до появи більших зрівняльних струмів, і тому варто відключити також котушки в інших паралельних галузях (або фазних обмотках).

1.5. Висновки за розділом

Отже, аналіз існуючих методів технічної діагностики електродвигунів показує, що існують два напрямки їхнього розвитку. До першого напрямку відносяться методи, які використовуються при проведенні профілактичних випробувань і ремонтів (тобто на непрацюючих електродвигунах) і що дозволяють ви-

являти практично всі можливі види ушкоджень. До другого напрямку відносяться експрес-методи, що використовуються на працюючих електродвигунах, але спрямовані на виявлення одного певного виду дефектів.

Описані вище методи визначення несправностей в електричному асинхронному двигуні мають суттєві недоліки. А саме, значні затрати у часі на виявлення несправності, людській фактор, який веде за собою суб'єктивність при виконанні діагностичних вимірів, а інколи й недбайливість.

Щодо методів контролю ізоляції обмоток асинхронного двигуна є досить працемісткими, складними в своїй реалізації й ненадійними. Часто результати й точність вимірів залежать надійності контакту щуп вимірювального приладу – елемент АД (обмотка чи листи).

Тому розробка методу з використанням апаратно-програмного комплексу цифрової системи контролю характеристик асинхронного двигуна, що дозволить одночасно діагностувати різні види несправностей АД за спектральним складом робочого струму, є досить актуальною задачею. За вихідними параметрами комплексу стає можливим оцінити експлуатаційний стан електродвигуна досить точно визначити його параметри, досліджувати двигун у різних режимах.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ТРИФАЗНИХ ДВИГУНІВ СТІЛОЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

2.1. Ідентифікація параметрів стрілочних електродвигунів в умовах ремонтно-технологічної дільниці

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 [17-19]. 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. Розглянемо схему заміщення асинхронного двигуна наведену на рис.2.1.

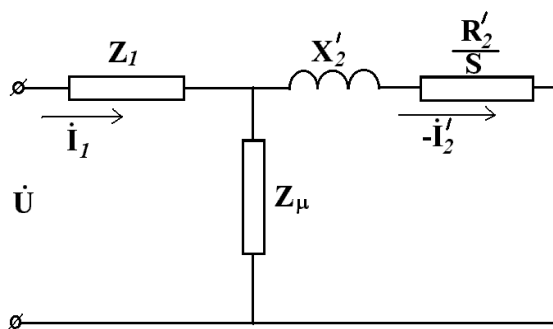


Рис.2.1.Схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Таким чином, існує можливість ідентифікації всіх параметрів асинхронного двигуна, якщо відомі повний опір кола обмотки при загальмованому роторі Z_p , і величина:

$$s_{k.o} = \frac{r_2'}{X_\mu + X_2'} \quad (2.1)$$

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:

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

звідки

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

$$X_\pi = X_1 + \frac{X_\mu \left(s_{k.o}^2 + \frac{X_2'}{X_\mu + X_2'} \right)}{s_{k.o}^2 + 1} \quad (2.4)$$

Якщо ротор машини є короткозамкненим (тобто використовується обмотка біляча клітка), зневага 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 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 $\Omega_{х.о.}$ залежить від $s_{k.o.}$ і синхронної швидкості Ω_o .

$$v_{х.о.} = \frac{\Omega_{х.о.}}{\Omega} = \sqrt{1 - s_{k.o.}^2}, \quad (2.5)$$

$$s_{k.o.} = \sqrt{1 - v_{х.о.}^2}, \quad (2.6)$$

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 $E_{т.о.}$, що наводиться в розімкненій обмотці машини.

Значно зручніше виходять співвідношення, якщо для визначення $E_{т.о.}$ користуватися наступним виразом:

$$\frac{E_{т.р.}}{I_{с.о.}(r_{п.} - r_l)} = \frac{(s_{k.o.}^2 + 1) \sqrt{1 - s_{k.o.}^2}}{2 s_{k.o.}}, \quad (2.7)$$

де $E_{т.о.}$ -це ЕРС, яка наводиться в розімкненій обмотці машини в режимі самоходу; $I_{в.о.}$ - 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.
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.

Відомий цілий ряд методів, визначення $s_{k.o.}$ (табл.2.1)

Методи визначення критичного плинусу S

Метод	Переваги	Недоліки
Визначення $s_{k.o.}$ трифазного асинхронного двигуна за опитом xh	Цей метод є придатним для всіх асинхронних машин.	Недоліком даного способу є трудність забезпечення необхідного режиму роботи машин, обумовлена необхідністю симетричного живлення двигуна.
Визначення $s_{k.o.}$ по механічним характеристикам	Параметри асинхронної машини, в тому числі $s_{k.o.}$ та інші можуть бути визначені по механічним характеристикам	Для отримання задовільних результатів необхідна висока точність при знятті механічних характеристик, вимагаюча прецизійних вимірників моментів і швидкостей.
Визначення $s_{k.o.}$ шляхом вимірювання струму в обмотці збудження в однофазному режимі живлення при обертанні ротора з синхронною швидкістю	Для визначення $s_{k.o.}$, r_p і r_1 , достатньо виміряти напругу і величину струму в обмотці збудження в режимі, коли ротор обертається з синхронною швидкістю ($s=0$), а кола обмотки управління розімкнені	Недоліком даного способу є необхідність застосування додаткового двигуна, що забезпечує обертання ротора досліджуваного двигуна з синхронною швидкістю
Визначення $s_{k.o.}$ по характеристиках машини, що працює в режимі тахогенератора	Дозволяє визначити величину $s_{k.o.}$ шляхом вимірювання напруги E_{tg} і струму I_b (э.д.с. і струм, відповідні обертанню ротора з швидкістю n)	Недоліком розглянутого методу є необхідність застосування додаткового двигуна
Визначення $s_{k.o.}$ способом, який базується на використанні властивостей двигуна, який працює в режимі самоходу	Для визначення $s_{k.o.}$ достатньо виміряти швидкість двигуна при однофазному підключенні до мережі	Сильний нагрів машини (час опиту повинен бути якомога меншим)

В процесі експерименту були проведені наступні вимірювання:

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

2. 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:

$$r_{\pi} = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{3 I_k^2}, \quad (2.8)$$

$$X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - r_{\pi}^2}, \quad (2.9)$$

3. Проводився нормальний пуск асинхронного електродвигуна без навантаження при $U_{\phi} = U_{\text{ном}}$ 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:

$$r_{\mu} = \frac{P_0}{3 I_0^2}, \quad (2.10)$$

$$X_{\mu} = \sqrt{Z_{\mu}^2 - r_{\mu}^2}, \quad (2.11)$$

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.

$$P_{\text{эм}} = F \cdot n = E \cdot I, \quad (2.12)$$

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

$$P_{\text{ем}} = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi, \quad (2.13)$$

де m - число фаз роторної обмотки.

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

$$P_{\text{ем}} = mUI \cos \phi = 9,8M\Omega, \quad (2.14)$$

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 $S = 0$.

2.2. Математична модель слабопотужного стрілочного трифазного асинхронного електродвигуна 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]

$$I_2^1 = \frac{U_1}{(r_1 + r_2' + \frac{1-S}{S}r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}, \quad (2.15)$$

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.

На рис.2.2. дана еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна.

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

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{9,81\Omega_1} = \frac{P_{2\text{э}}}{s\Omega_1 9,81} = C_m \Phi I_2^1 \cos \varphi \quad (2.16)$$

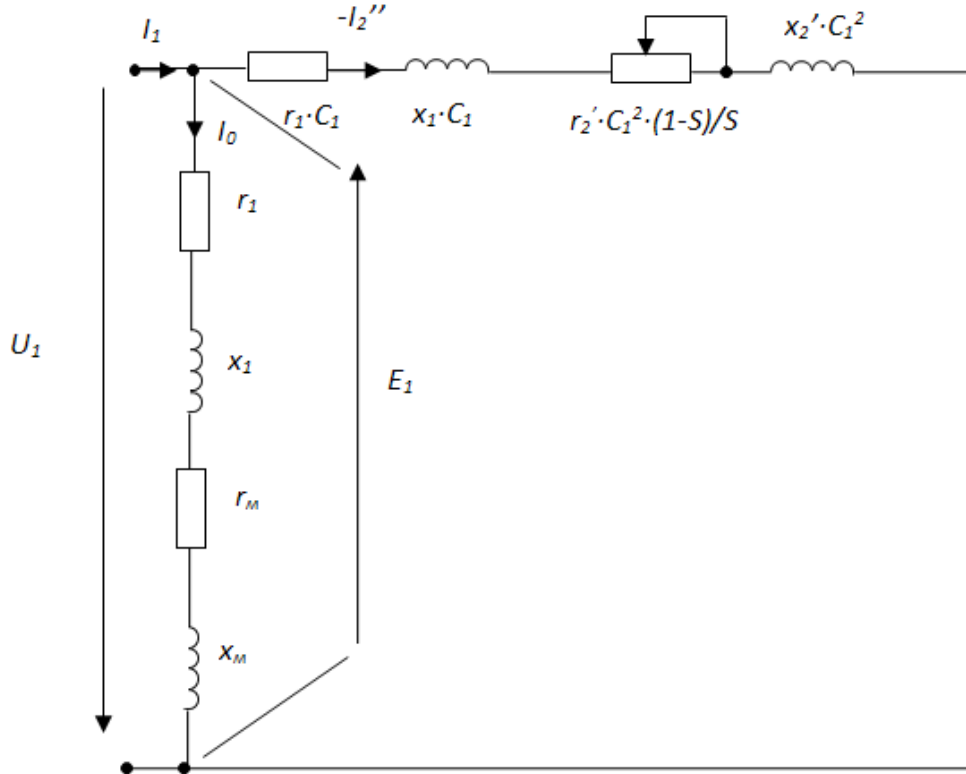


Рис.2.2. Еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

де I – струм, пропорційний робочому потоку і активній складовій струму ротора $I_{2s} = I_2^1 \cos \varphi_2$, де $S = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}$, $P_{2\text{э}} = m_1 I_2^1 r_2'$ – 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 можна записати у такому вигляді:

$$M = \frac{m_1 r_2 U_1^2}{9,81 s \Omega_1 [(\eta + \frac{r_2^1}{S})^2 + (x_1 + x_2^1)^2]} \quad (2.17)$$

Таким чином, залежність 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 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:

$$S_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}, \quad (2.18)$$

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

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}}, \quad (2.19)$$

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 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 , плину 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 $S_{\text{ном}}=0,015\dots0,06$, 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 (2.37), 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 xx , 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 $\cos \phi = \min = 0,08\dots0,2$.

При навантаженні швидкість обертання ротора падає, потужність P_1 росте, $\cos \phi$ зростає до 0,75...0,95, а реактивна потужність Q_1 росте у меншій мірі, ніж P_1). Із зростанням плину 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 $P_2=0$, тому $\eta=0$. 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 плину 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 заходи, які знижують наслідки такого явища. Наприклад, збільшення активного опору ротора, застосування спеціальної конструкції короткозамкненого ротора та таке інше.

Нижче дано результати розрахунку робочих та механічної характеристик асинхронного двигуна типу МСТ, виконаного за допомогою метода описаного формулами (2.1 – 2.22).

Вихідні дані (характеристики трифазного асинхронного двигуна типу МСТ-0,25)

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

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

$$r_1=11 \text{ Ом}$$

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

Визначимо опори асинхронної машини в режимі короткого замкнення при загальмованому роторі

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

$$Z_{\Pi} = 127 / 3,84 = 33 \quad \text{Ом}$$

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

Визначимо опори намагнічування асинхронної машини

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

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

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

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).

Розрахунки виконано за допомогою програм Excel і MathCad. Результати розрахунку даних для побудови робочих й механічних характеристик двигунів типу МСТ наведено на рис. 2.3 - 2.6.

Результати розрахунку робочих та механічної характеристик дано в табл. 2.2 для всіх типів двигунів стрілочних приводів змінного струму (МСТ-0,25).

Слід зазначити, що двигун типу МСТ-0,6 має найвищий ККД ($\eta=0,69$) й коефіцієнт потужності ($\cos \varphi=0,84$) при роботі в номінальному режимі. Для порівняння ККД двигунів типу МСП-0,15 – $\eta=0,55\dots0,6$, МСП-0,25 – $\eta=0,6\dots0,8$ в залежності від навантаження на валу і напруги живлення (30/110/160В). Але все ж таки ці значення ККД й коефіцієнта потужності є невисокими.



Рис.2.3. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Результати розрахунку робочих характеристик МСТ-0,25														Таблиця 2.2	
Расчетные формулы	Значення S													S _{nom}	S _{kr}
	1,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30						
$(C1^2)r2' / s$		8415,58	4207,79	2103,89	420,78	210,39	105,19	70,13	0,45						
$R2''=C1r1+(C1^2)r2'/s$		8426,59	4218,80	2114,91	431,79	221,40	116,20	81,14	116,88						
$Rnp=(C1^2)r2'(1-s)/s$		8394,54	4186,75	2082,86	399,74	189,35	84,16	49,09	127,89						
$Z2''=(R2''^2+x2''^2)^{(1/2)}$		8426,71	4219,04	2115,39	434,13	225,94	124,64	92,81	95,84						
$\cos(f2'')=R2''/Z2''$		1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,93	0,87	0,94						
$I2''=U1f/Z2''$		0,02	0,03	0,06	0,29	0,56	1,02	1,37	0,94						
$I2a''=I2''\cos f2''$		0,02	0,03	0,06	0,29	0,55	0,95	1,20	0,88						
$I2p''=(I2''^2-I2a''^2)^{(1/2)}$		0,00	0,00	0,00	0,03	0,11	0,37	0,66	0,31						
$I1a=I10a+I2a''$		0,27	0,29	0,32	0,55	0,81	1,21	1,45	1,14						
$I1p=I10p+I2p''$		1,05	1,05	1,05	1,08	1,16	1,42	1,71	1,36						
$I1=(I1a^2+I1p^2)^{(1/2)}$	1,08	1,08	1,09	1,10	1,21	1,41	1,86	2,25	1,77						
$\cos(f1)=I1a/I1$	0,24	0,25	0,26	0,29	0,45	0,57	0,65	0,65	0,64						
$Rnp=m1Rnp*(I2''^2) \quad m1=3$		5,72	11,38	22,52	102,63	179,48	262,13	275,74	252,22						
$Rдоб=адоб*(I1^2)$		1,23	1,23	1,26	1,53	2,08	3,61	5,26	3,28						
$P2=Pnp-(P_{мех}+P_{доб})$	0,00	3,50	9,15	20,27	100,10	176,39	257,52	269,49	247,94						
$P1=3*U1n*I1a$		103,12	108,84	120,24	208,23	307,23	459,34	553,14	433,93						
$W1=w1/P2$		130,83	130,83	130,83	130,83	130,83	130,83	130,83	130,83						
$W=W1(1-s)$		130,51	130,18	129,53	124,29	117,75	104,67	91,58	107,28						
$M2=P2/W$	0,00	0,03	0,07	0,16	0,81	1,50	2,46	2,94	2,31						
$KПД=P2/P1$	0,00	0,03	0,08	0,17	0,48	0,57	0,56	0,49	0,57						
$n=n1(1-s)$		1246,88	1243,75	1237,50	1187,50	1125,00	1000,00	875,00	1025,00						
$M2/Mmax=$		0,01	0,02	0,04	0,20	0,36	0,60	0,72	0,56						
$M^*=M/Mmax$		0,01	0,02	0,04	0,22	0,42	0,74	0,92	0,69						

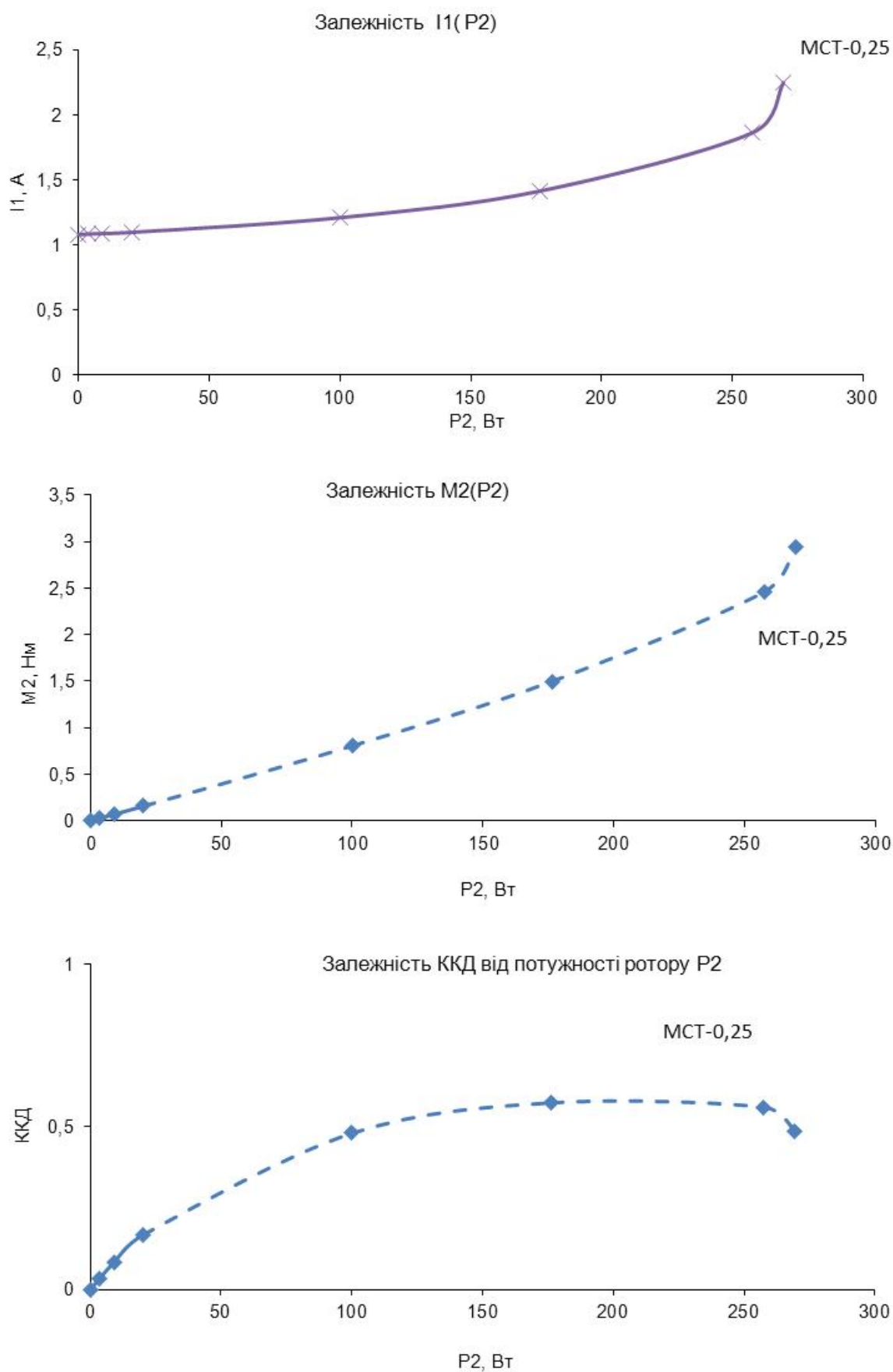


Рис.2.4. Робочі характеристики асинхронного двигунів типу МСТ-0,25

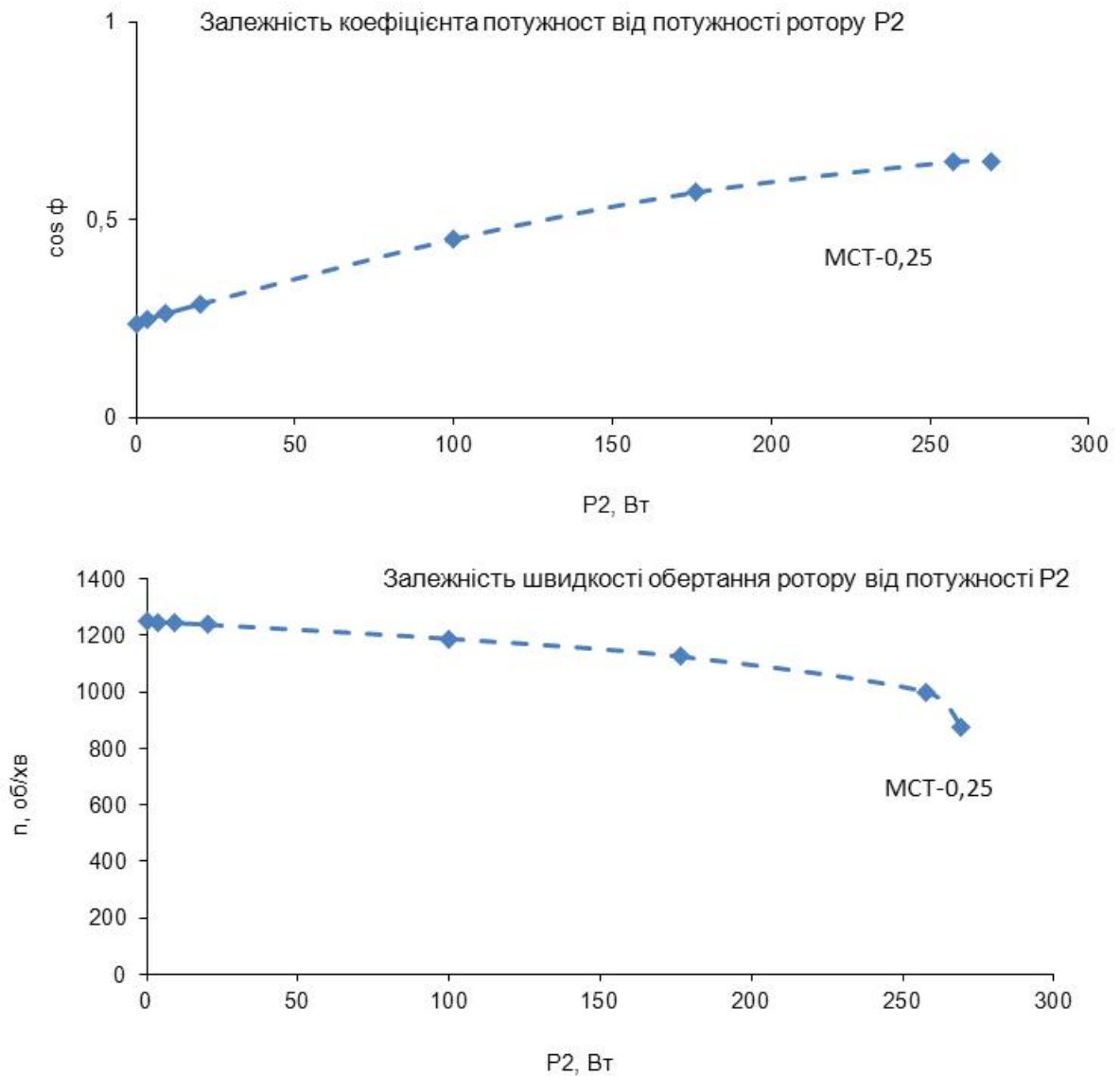


Рис.2.5. Робочі характеристики асинхронного двигунів типу МСТ-0,25

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 опробувана 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%.

2.3. Висновки за розділом

Розроблена математична модель стрілочного асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором, що дає можливість визначати його первинні параметри за результатами дослідів x_x , k_z й роботи машини в режимі самоходу, коли в роботі залишається лише одна фаза, а інші дві відмикаються.

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

Розроблена математична модель стала науковим обґрунтуванням методу виміру параметрів двигуна й визначення несправностей в ньому.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1. Осцилографування робочого струму стрілочного двигуна

У режимі осцилографа можливий перегляд графіків сигналу з 1 каналу й з 2 канали. На рис. 3.8 представлені Інтерфейс вікна режиму контролювання параметрів кодів. За допомогою процедури швидкого перетворення Фур'є, текст якої наведений у додатку Б, можливе розкладання досліджуваного сигналу на окремі гармоніки частот і виділення необхідної частоти навіть із дуже зашумленого сигналу.

Інтерфейс вікна перегляду інформації, що надходить із схеми управління стрілочним приводом представлений на рис. 3.8. Дана підпрограма повинна дозволяти переглядати, виводити на принтер, або записувати на жорсткий диск інформацію. У такий спосіб повинні виводиться данні про стан двигун. можливі його несправності архівуються. Кнопка "запис на диск" викликає діалогове вікно й зберігає дані на жорсткий диск або дискету у форматі Word, Excel, Matlab, Mathcad. Кнопка "виводу на принтер" виводить звіт про результати виміру на принтер. Кнопка "статистика" виводить діалогове вікно зі статистичними даними, зібраними за період вимірювання. Кнопка "файл звіту" заносить результати аналізу сигналу в спеціальний файл. Кнопка "вихід" дозволяє вийти з підпрограми.

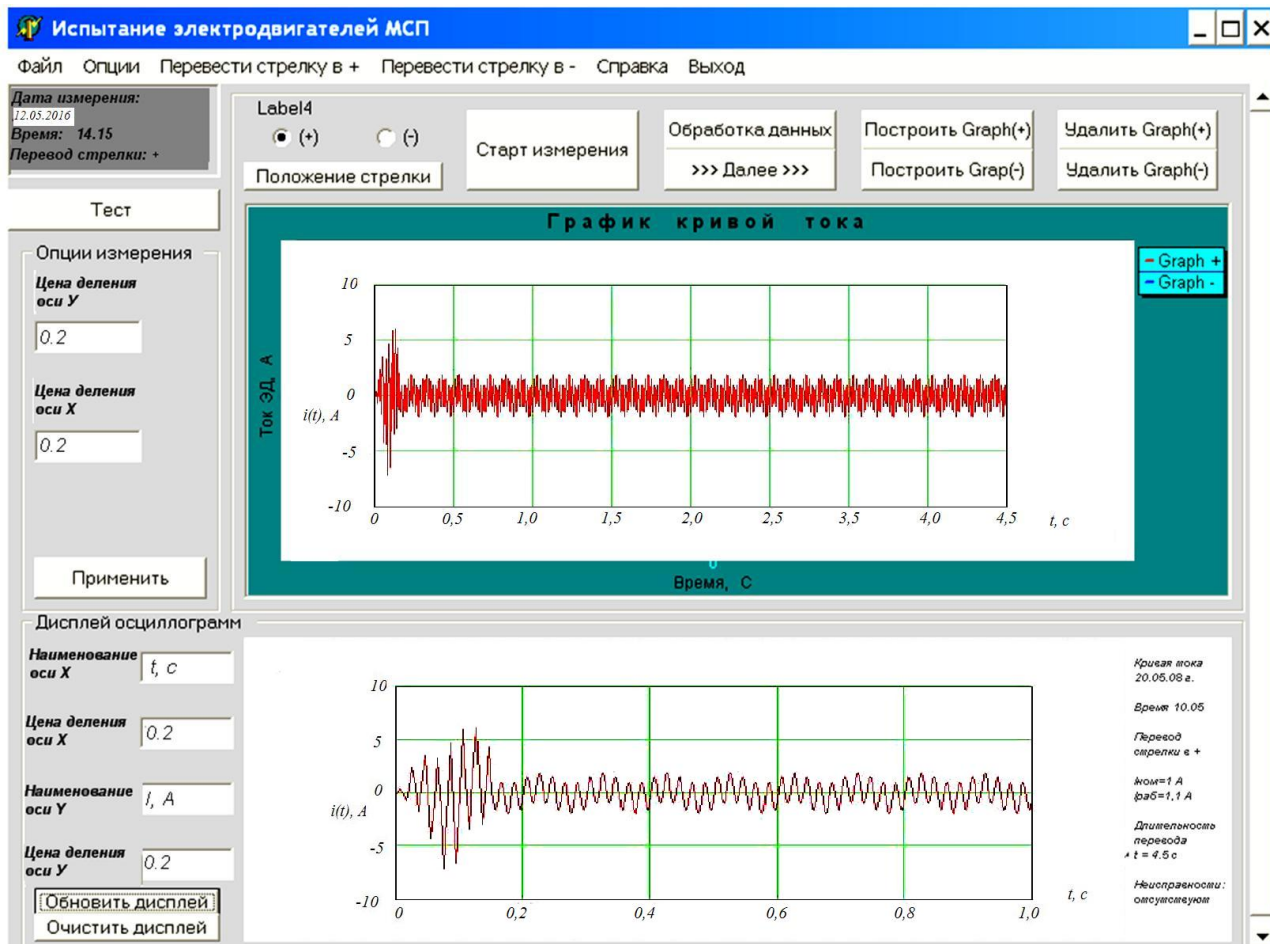


Рис. 3.1. Інтерфейс вікна режиму діагностики стану двигунів

3.2. Ідентифікація несправностей спектральним методом

3.2.1. Несправність виду «биття підшипників»

Однієї з можливих несправностей, що виникають у двигунах стрілочних приводів, є "перегрівання підшипників". Нагрівання підшипників можливе через забруднення пилом, відсутність змащення, підвищеного тертя між сальником і валом, відсутності осьового люфту, необхідного для компенсації температурного подовження вала, зношування або руйнування підшипників. Руйнування підшипників можливо через їхнє биття.

Ідентифікація несправності виду "биття підшипників" здійснюється по кривій робочого струму, шляхом розкладання її в ряд Фур'є. Цьому виду несправності характерна поява в спектрі гармонійних складових низької частоти

(від 10 до 150 Гц кратних 10 Гц) амплітудою 0,5...0,8 А при робочому струмі двигуна 1...3 А. До того ж несправність виду «биття підшипників» веде до збільшення часу переводу стрілки на 20...30 %. Форма кривої струму приведена на рис. 3.1.

Алгоритм визначення несправності виду "биття підшипників" наведений на рис. 3.2. Тут використані наступні позначення:

$\Delta I_{\text{ел}}$ - амплітуда робочий струм переводу стрілки, А;

$t_{\text{пер}}$ - час переводу стрілки, с

Δt - дискрет часу - мінімальний інтервал необхідний для розкладання гармонійного сигналу низької частоти в ряд Фур'є, с

k - одномірний масив, що визначає кількість точок, на яке розбивається досліджувана крива струму для розкладання в ряд Фур'є, $k = 0, 1, \dots, t_{\text{пер}} / \Delta t$.

t_i - період i -тої гармоніки, с

A_i - амплітуда i -тої гармоніки, А.

Крім того, пропонується виконувати діагностику та визначати несправності стрілочних переводів й їхніх приводів не тільки за характером спектрального складу кривої робочого струму, але й за зміною амплітуди робочого струму.

3.2.2. Ідентифікація несправності «коротке замикання в обмотці в обмотці ротора» й пробій ізоляції в осередді ротору

Несправність виду «коротке замикання в обмотці ротору» супроводжується з одного боку більш повільним набиранням оборотів валу електричного двигуна при включенні й збільшенням часу переводу, а з іншого – скачками струму. Так, для асинхронного трифазного двигуна типу МСТ при одному кз в обмотці ротору, явище «скачок струму» буде проявлятися при проході над кожним полюсом, тобто його частоту можна визначити за формулою

$$f_{\text{кз}} = \frac{p \cdot n \cdot N_{\text{кз}}}{60}, \quad (3.1)$$

де n - швидкість обертання ротору, об/хв.; p - число пар полюсів, $N_{кз}$ - кількість відмов типу кз.

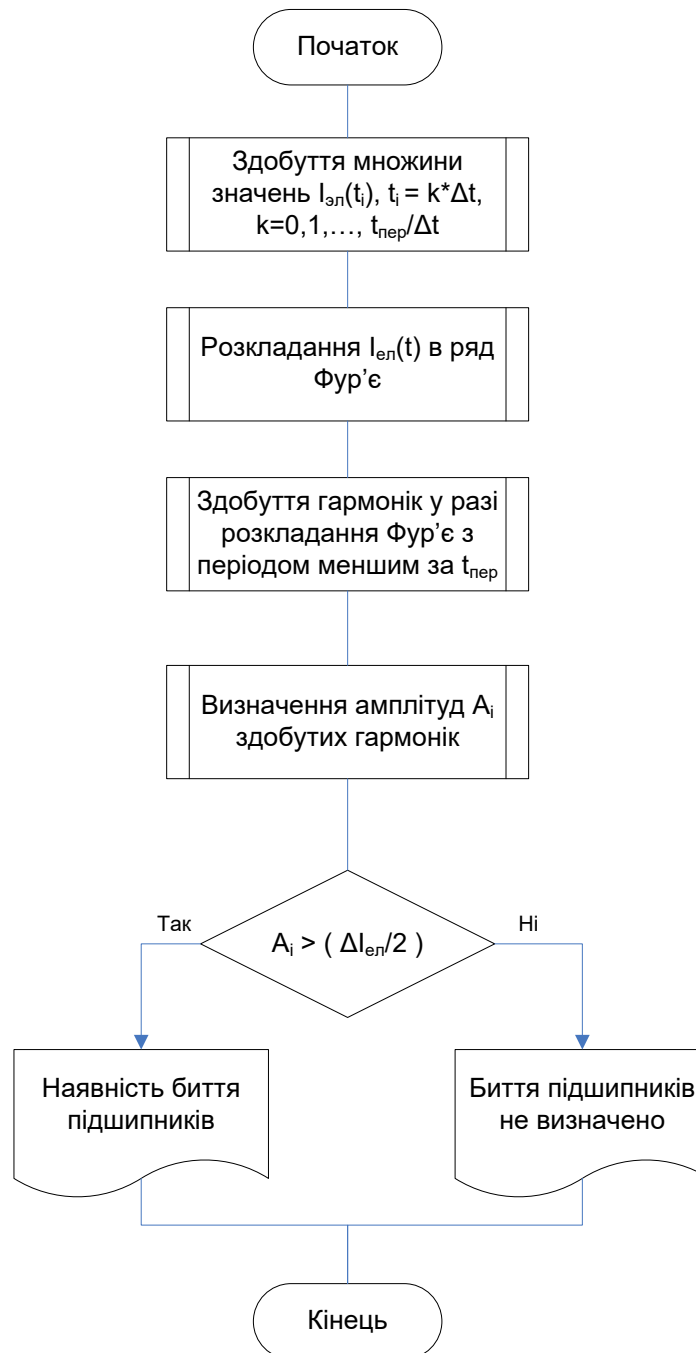


Рис. 3.2. Алгоритм визначення несправності виду "биття підшипників"

Так, частота струму короткого замикання, що має місце в роторі для двигуна типу МСТ-0,25 й кількості полюсів $p=2$ й живлені обмоток статора напруженою частотою 50 Гц, $n=1250$ об/хв. будуть кратними:

$$f_{кз} = \frac{2 \cdot 1250 \cdot 1}{60} = 41.7 \text{ Гц},$$

тобто 41,7; 83,4; 125,1 ... Гц

Оскільки за паспортними даними швидкість обертання може коливатися в межах $\pm 10\%$, то частота струму також буде коливатися в цих межах й дорівнюватиме $41,7 \pm 10\% = 37,5 \dots 45,9 \text{ Гц}$

Аналогічний спектр частот виникає й при пробі ізоляції в осередді ротору. Несправності виду кз й пробій ізоляції листів можна буде розрізнити за величиною струму. При короткому замиканні величина струму буде більшою в декілька разів.

3.2.3. Обрив в обмотках

Обрив в обмотці статора

Спектральний аналіз струму статора визначається за формулою

$$f_{bb1} = f_s (1 \pm 2ks) \quad (3.2)$$

де f_s - частота напруги живлення, S - плин, $K = 1, 2, 3, \dots$, відповідно.

Формула (3.2) описує асиметрію, що виникає у разі поломки стрижнів обмотки ротору асинхронного короткозамкненого двигуна, викликає струми у обмотці статора на частотах.

Для того, щоб мати краще розуміння зламаного стрижня ротора, необхідним є й вивчення вищих частотних складових частотного спектра робочого струму двигуна. Коли ми взяли до уваги просторові гармоніки, додаткові частоти з'являються на частотах

$$f_{bb1} = f_s \left\{ \frac{k}{p} (1-s) \pm s \right\} \quad (3.3)$$

де, p - число пар полюсів и $k/p = 1, 3, 5, 7$

Спектри струму статора навантаженої машини, коли вона працює в «здорових умовах», показані на рис. 3.3. Очевидно, що, крім частотної складової напруги живлення, компоненти з більше високими частотами існують навколо головної щільної гармоніки як передвіщалося. Деякі частотні компоненти (250,

350 Гц і т.д.) існують у результаті насичення магнітного матеріалу. Завдяки конфігурації трьох фазових обмоток, порядки існуючих гармонік, що впливають: $k/p = 1, 5, 7, 11 \dots$

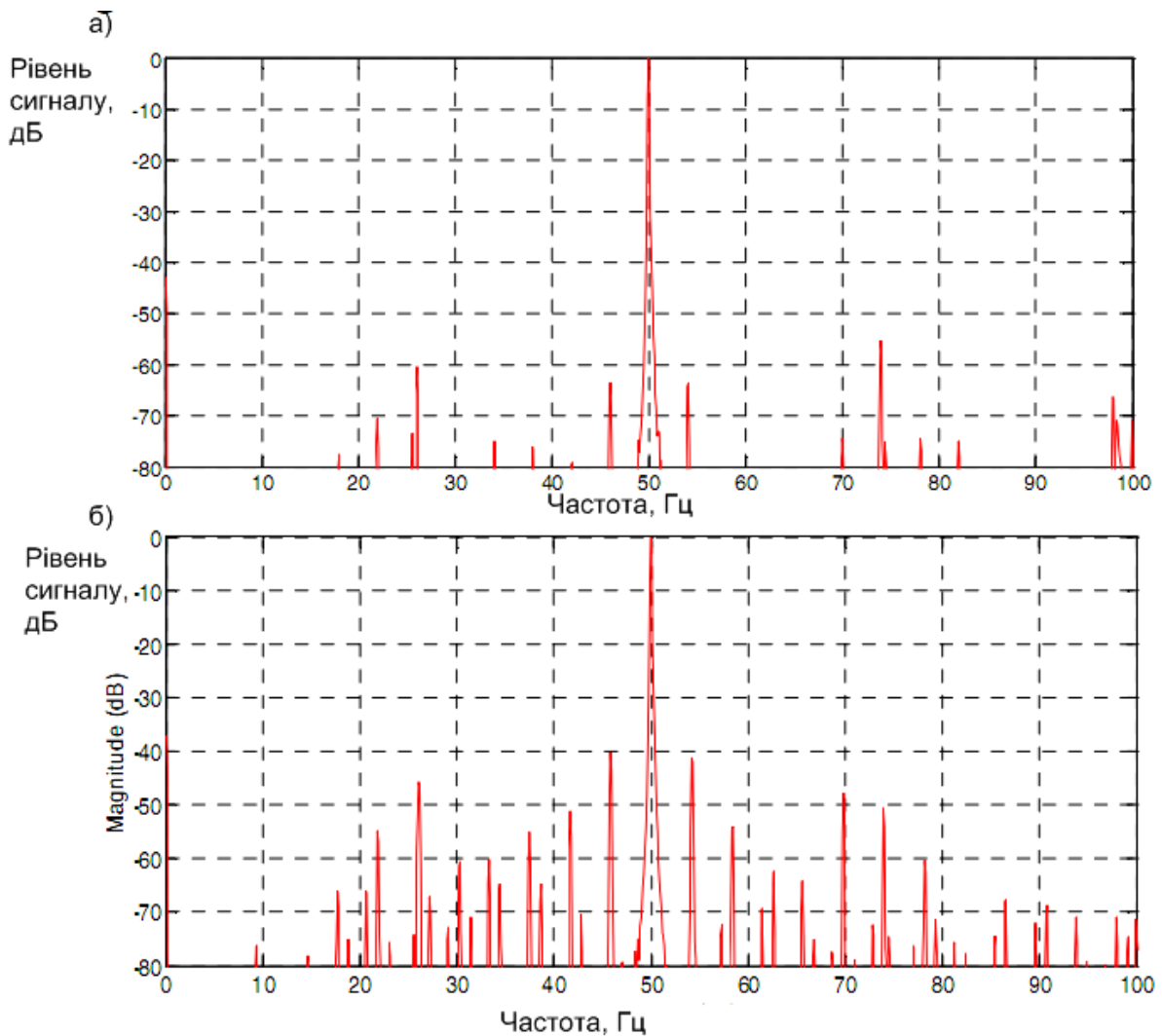


Рис.3.3. Спектр робочого струму статора двигуна: а)справного, б) із заламним стрижнем короткозамкненої обмотки ротору

Було встановлено, що в результаті магнітного насичення осереддя асинхронної машини в спектрі струму виникають гармоніки кратні 3.

На рис.3.3 показані спектри обмірюваного струму сигналу зі справним ротором і з одним зламаним стрижнем. У даному спектрі видні бічні лінії, очікувані біля частоти живлячої мережі. Навіть для мотора в справному стані, завжди є частотні компоненти, правда з низькою амплітудою, це пов'язане із природною асиметрією двигуна, і з іншого боку, з живильної мережею (перекру-

чування сигналу напруги живлення). Як добре видно, виникнення одного зламаного стрижня ротора значно збільшує величини декількох бічних ліній навколо основної.

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 тиму МСТ-0,25.

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.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ДОГЛЯДІ ЗА ЦЕНТРАЛІЗОВАНИМИ СТІЛОЧНИМИ ПЕРЕВОДАМИ

До роботи по догляду за централізованими стрілочними переводами допускаються монтери колії колійних бригад, а в зимовий час - додатково монтери колії колійних машинних станцій (далі - монтери колії) не молодше 18 років, що пройшли під час вступу на роботу попередній медичний огляд, вступний і первинний інструктажі на робочому місці, стажування.

В процесі роботи монтери колії повинні проходити повторні - не рідше одного разу на три місяці, позапланові, цільові інструктажі, а також в установленому порядку періодичні медичні огляди.

До робіт з очищення централізованих стрілочних переводів від снігу в період снігопадів і хуртовин можуть також залучатися працівники залізничних підприємств, станцій, навчені прийомам безпечної роботи на станції в період снігоборотьби.

Монтери колії, які здійснюють догляд за централізованими стрілочними переводами, повинні знати:

- дію на людину небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що виникають під час роботи;
- вимоги виробничої санітарії, електробезпеки та пожежної безпеки;
- видимі і звукові сигнали, що забезпечують безпеку руху та які працюють на шляху, знаки безпеки та порядок огороження місця виконання робіт при догляді за централізованими стрілочними переводами;
- безпечні прийоми в роботі;
- порядок очищення стрілочних переводів, особливості станції, розташування стрілочних переводів, їх нумерацію;
- способи надання першої медичної допомоги;
- місця розташування медичних аптечок;
- в необхідному для них обсязі вимоги інструкцій для монтерів колії і технічно-розпорядчого акта станції (ТРА).

Монтер колії, який здійснює догляд за централізованими стрілочними переводами, повинен:

- виконувати тільки входить в його обов'язки або доручену майстром (бригадиром) роботу;
- застосовувати безпечні прийоми виконання робіт;
- містити в справному стані і чистоті механізми, матеріали, пристосування, інструмент, інвентар, а також засоби індивідуального захисту;
- стежити за сигналами і розпорядженнями керівника робіт, старшого групи і виконувати його команди;
- виконувати вимоги забороняючих, попереджуючих, вказівних і розпорядчих знаків, написів, вказівок по гучномовному зв'язку, звукових і світлових сигналів, що подаються машиністами, укладачами поїздів, водіями дрезин;
- проходити по території станції за встановленими маршрутами, пішохідних доріжках, тунелях, проходах і переходах;
- бути гранично уважним в місцях руху транспорту;
- дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку;
- виконувати вимоги режимів праці та відпочинку;
- вміти надавати першу медичну допомогу потерпілому з урахуванням можливого впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Під час роботи на монтера шляху, який здійснює догляд за централізованими стрілочними переводами, можуть впливати такі основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- рухомий рухомий склад, дрезини, колійні машини;
- підвищене значення напруги електричного кола, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- знижена або підвищена температура поверхонь обладнання, інвентарю, інструменту та металевих частин верхньої будови залізничної колії (далі - шляхи);

- недостатня освітленість робочої зони в темний час доби;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- знижена або підвищена температура, вологість і рухливість повітря робочої зони;
- фізичні перевантаження при снігоборотьбі і переміщенні тягарів вручну;
- несприятливі метеофактори: туман, злива, снігопад, хуртовина.

Роботи по догляду за централізованими стрілочними переводами виконуються цілий рік, але їх набір залежить від сезону.

Основними сезонними роботами є наступні:

весняні - очищення стрілок, хрестовин, жолобів від сміття, засорітелів, суцільне закріплення болтів, добивки милиць, очищення водовідводів, мастило болтів, гайок, поверхні ковзання черевиків;

літні - регулювання зазорів, мастило і закріплення болтів, башмаків ковзання, перевірка і заміна (при необхідності) деталей ізолюючих стиків, приведення в порядок баластного шару з чищенням та заміною його в місцях розрідження, знищення рослинності;

осінні - очищення і ремонт водовідводів, лотків, кюветів, труб та інших облаштувань, підготовка каналів в шпальних ящиках для прокладки повітропроводних шлангів під рейками (при наявності пневмообдувкою), укриття кореня дотепника від попадання снігу;

зимові - очищення стрілок і хрестовин від снігу і льоду, прибирання снігу з горловин з вивезенням за межі станції, зміст повітропроводів і облаштувань електрообігріву.

Роботи по догляду за централізованими стрілочними переводами повинні бути організовані:

- на станціях з постійною маневровою роботою групами в складі не менше двох і не більше шести монтерів колії, один з яких по кваліфікації не нижче третього розряду, призначається старшим групи. Старші груп несуть

відповідальність за дотримання працюючими в даній групі встановлених заходів безпеки;

- на роздільних пунктах, де немає постійної маневрової роботи, дозволяється виконувати роботи по догляду за централізованими стрілочними переводами одному монтеру шляху по кваліфікації не нижче третього розряду. Перелік таких роздільних пунктів визначається начальником залізниці або начальником дирекції залізничних перевезень за погодженням з Дорпрофспілка, Райпрофсожем (технічним інспектором праці профспілки залізничників і транспортних будівельників).

За кожною групою або окремо працюючим монтером шляху закріплюється постійне кількість централізованих стрілочних переводів.

ВИСНОВКИ

Впровадження інтелектуальних транспортних систем дозволить удосконалити методику технічного обслуговування пристрої СЦБ, а також підвищити безпеку руху поїздів та управління вантажопотоками при взаємодії залізничного транспорту з іншими видами транспорту, морськими і річковими портами, великими промисловими комплексами, транспортними системами інших країн та інших учасників транспортного процесу на базі ефективного використання сучасних інформаційно-керуючих технологій.

Удосконалено методику діагностування двигунів змінного струму стрілочних приводів за спектральним аналізом струму статора. Їй дано наукове обґрунтування. Виконано розрахунки за Г-подібною схемою заміщення асинхронного двигуна.

Розроблена математична модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що дає можливість визначати його первинні параметри за результатами дослідів x_x , k_z й роботи машини в режимі самоходу. Розроблена математична модель стала науковим обґрунтуванням методу виміру параметрів двигуна й визначення несправностей в ньому за спектральним аналізом робочого струму та напруги.

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

При обривах в обмотці ротору в струмі статора виникають частоти кратні додаткові частоти з'являються на частотах

$$f_{bb1} = f_s \left\{ \frac{k}{p} (1-s) \pm s \right\}, \text{де, } p - \text{число пар полюсів и } k/p = 1, 3, 5, 7 \dots$$

Під час моделювання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором ми змогли розглянути і розрахувати всі фізичні процеси, які спостерігаються в ньому. За осцилограмою напруги в роторі виявити наявність додаткових гармонік в робочому струмі асинхронного двигуна і з'ясувати види несправностей або їх відсутність в ньому.

Результати наукової роботи були представлені на 81-й Міжнародній науково-практичній конференції, проведеної на базі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, м. Дніпро, 2021 р. [20].

ЛІТЕРАТУРА

1. Резников, Ю.М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Ю.М. Резников. - М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
2. Проектирование электрических машин[Текст]/ Под ред. И.П. Копылова. М.: Энергия, - 1980. – 451 с.
3. Пиотровский, Л. М. Электрические машины [Текст]/ Л. М. Пиотровский - М.–Л.:Госенргоиздат, 1963. – 504 с.
4. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]/ А. И. Вольдек. – Л.:Энергия, 1976. – 840 с.
5. Гольдберг О.Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг, И.М. Абдулаев, А.Н. Абиев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
6. Родькин Д.И. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин // XIV міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507-512.
7. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.
8. Тэрано Т. Прикладные нёчеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
9. Бешта О.С. Ідентифікація параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна в пакетному режимі / О.С. Бешта, О.В. Балахонцев та ін. // XIV Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск, 2007. – С. 472-475.
10. Никиян Н.Г. Способ и установка для диагностики короткозамкнутых клеток электрических машин / Н.Г. Никиян, М.П. Саликов // Электрические станции. – 1999. - № 3. – С. 60-62.

11. Стогний Б.С. Интегрированные экспертные системы диагностирования в электроэнергетике / Стогний Б.С., Гуляев В.А., Кириленко А.В. и др. – Киев: Наук. думка, 1992. – 248 с.
12. Надточий В.М. Экспертные системы диагностики электрооборудования / В.М. Надточий // Электричество. – 1991. – № 8. – С. 9-16.
13. Научно-исследовательская работа "[Система контроля информации в промышленной среде](http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/fvti/kleshnin/library/s3.htm)" Клешина И.С. // <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/fvti/kleshnin/library/s3.htm> [ел.ресурс]
14. Научно-исследовательская работа "[Система сбора информации в промышленной среде](http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/fvti/zemtsova/library/s3.htm)" Земцовой Т.А. // <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/fvti/zemtsova/library/s3.htm> [ел. ресурс]
15. "[RS-485](http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/fvti/zemtsova/library/s6.htm)" Бень Є.О. // <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/fvti/zemtsova/library/s6.htm> [ел. ресурс]
16. Чечет Ю. С., Номографический метод определения рабочих характеристик однофазных асинхронных микродвигателей с расщепленной фазой, “Электричество”, 1948, №7.
17. Каспаржак И. М., Слепушкин И. Е., Исходные параметры и величины для расчета характеристик двухфазных машин и их определение, “Автоматика и телемеханика”, 1956, №7.
18. Несговорова Е. Д. Опытное определение параметров маломощных асинхронных двигателей, Известия высших учебных заведений, Электромеханика, 1962, №11.
19. Столов Л. И. К вопросу об определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя малой мощности, “Электричество”, 1962, №5.
20. Сердюк Т. М., Сердюк К. М., Шозда І. В., Перельотов А. В., Карлюкова А. Ю. Метод діагностування двигунів стрілочних приводів // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 81 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2021 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2021. – С. 394-395.