

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

«Розроблення автоматизованої системи
діагностики асинхронних двигунів»

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КАс-41
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Кирилюк Д.О.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Дмитрів О.Р.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Козбур В.Р.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Савків В.Б.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u>Стухляк Д.П.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Кирилюк Денис Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення автоматизованої системи
діагностики асинхронних двигунів»

Керівник роботи к.т.н., доцент Дмитрів О.Р.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Методи контролю діагностики асинхронних двигунів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1) аналітична частина; 2) проектна частина;

3) спеціальна частина; 4) безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Презентація кваліфікаційної роботи 12 аркушів формату А4

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди). Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи становить 12 слайдів. Об'єм пояснювальної записки складає 68 друкованих сторінок формату А4 (210×297).

Кваліфікаційна робота складається з чотирьох розділів, в яких нараховується 24 рисунків та 16 таблиць з даними. В роботі використано 17 літературних джерел.

В кваліфікаційній роботі бакалавра на основі аналізу сучасного стану діагностування електрообладнання, методологічних підходів, які покладені в основу їх діагностування та класифікації технічних засобів для діагностування електрообладнання проводиться моделювання дефектів вібраційних відмов та вибір методу діагностування асинхронних двигунів (АД).

Виходячи з вибраного методу діагностування АД – частотно-резонансного, розроблена структурна схема системи їх діагностування, а також розроблено підсилювач потужності електричних сигналів звукового діапазону та змодельовано його частотні характеристики.

.

ЗМІСТ

Вступ	5
1. Аналітична частина	6
1.1 Методологічні підходи, що складають основу для розробки діагностики електрообладнання	6
1.2 Вібраційні і комутаційні відмови асинхронних двигунів	8
1.3 Визначення вузлів і деталей асинхронних двигунів, що підлягають діагностуванню	13
1.4 Основні положення технології діагностики електрообладнання	16
1.5 Класифікація засобів діагностування електрообладнання	19
1.6 Постановка задачі роботи	21
2. Проектна частина	23
2.1 Моделювання дефектів вібраційних відмов	23
2.2 Вибір параметрів і розробка методу діагностування асинхронних двигунів	24
2.3 Пошук дефектів асинхронних двигунів	30
2.4 Розробка структурної схеми системи діагностування асинхронних двигунів	32
2.5 Розробка підсилювача потужності електричних сигналів звукового діапазону та моделювання його частотних характеристик	33
3. Спеціальна частина	40
3.1 Вібродіагностична система ПУЛЬС	40
3.2 Аналіз вібраційних сигналів підшипникових вузлів	43
4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	47
4.1 Аналіз потенційних небезпек і шкідливостей виробничого середовища	47
4.2 Забезпечення нормальних умов праці	48
4.3 Розрахунок захисного заземлення	51
4.4 Пожежна безпека та заходи безпеки при обслуговуванні електрообладнання	54
4.5 Охорона навколишнього середовища	55
Висновки	57
Перелік посилань на джерела	58

ВСТУП

Мета діагностики полягає в забезпеченні найбільш економічної роботи електрообладнання при заданому рівні надійності, зниженні витрат на технічне обслуговування та ремонт. Ця мета досягається шляхом визначення технічного стану електрообладнання, запобігання поломкам, скорочення простоїв через несправності та реалізації комплексу заходів щодо забезпечення роботи електрообладнання згідно з діагностичною інформацією, тобто шляхом управління технічним станом електрообладнання під час експлуатації.

В роботі запропонована схема системи діагностування електричних машин на основі вібраційної діагностики, що базуються на аналізі коливань машин, яка дозволяє виявляти несправності машин при їх експлуатації. Основні види випробувань регламентуються ДСТУ 20815-93.

Аналізуючи ці методи, їхніми основними недоліками є висока вартість, а також неможливість керування електричною частиною асинхронної машини, що є найпоширенішою несправністю.

Віброакустичні методи діагностики базуються на вимірюванні вібраційних та акустичних параметрів. Ця група методів дозволяє виявляти дефекти, що розвиваються, у міру їх утворення, що дозволяє прогнозувати аварійні ситуації. Основними недоліками є: складність ізоляції корисного компонента за наявності великої кількості перешкод.

Методи аналізу спектру фазних струмів базуються на аналізі спектру струмів, що споживаються електродвигуном на певній частоті, що відповідає певному типу несправності. Ці методи дозволяють отримати достовірну інформацію про тип несправності та рівень її розвитку. Однак, при виникненні перешкод в електричній мережі з'являються хибні гармоніки, що спотворює результати діагностики.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Методологічні підходи, що складають основу для розробки діагностики електрообладнання

Для зниження експлуатаційних витрат на електрообладнання та підвищення його експлуатаційної надійності використовуються методи та засоби діагностики, під якими розуміється визначення технічного стану електрообладнання без його пошкодження або розбирання. Використання діагностики дозволяє вдосконалювати та проводити профілактичний плановий ремонт лише тоді, коли враховується технічний стан електрообладнання, тобто коли знос деталей та вузлів досяг рівня, який може призвести до подальшого виходу з ладу або є економічно не вигідним.

Навіть кваліфіковані фахівці зазначають, що будь-яке розбирання та складання призводить до зниження надійності та терміну служби електрообладнання, оскільки можуть бути порушені з'єднання деталей, а окремі деталі та вузли, особливо обмотки електрообладнання, можуть бути пошкоджені. Після розбирання без попереднього точного визначення технічного стану технічний стан електрообладнання під час ремонту часто задовільний, тобто ремонт не потрібен, а регулювання та змащення можна проводити без розбирання.

Крім того, без точного визначення технічного стану неможливо гарантувати, що окремі одиниці електрообладнання не вийдуть з ладу протягом ремонтного періоду при проведенні ремонтних робіт у середні терміни.

Головне завдання діагностики полягає в отриманні достовірної інформації про технічний стан електрообладнання без його демонтажу та спрямоване на визначення необхідності заміни змінних деталей та вузлів, регулювання, ремонтних заходів (поточного та капітального ремонту), причин несправностей електрообладнання, якості ремонтних робіт.

Технічний стан вузлів та деталей електрообладнання змінюється під час експлуатації залежно від режиму роботи та зовнішніх впливів. Тому параметри, що характеризують стан вузлів та деталей, є змінними величинами. Під час експлуатації електрообладнання може перебувати в обмежених станах. Цю сукупність станів можна розділити на дві частини: справний та несправний стани.

Аналіз робочого стану електрообладнання дозволяє визначити ступінь спрацювання та момент переходу в пошкоджений стан, тобто прогнозувати стан електрообладнання. Якщо електрообладнання знаходиться в пошкодженному стані, одним з основних завдань діагностики є пошук несправностей та причин їх виникнення.

Тестова та функціональна діагностика використовуються для визначення технічного стану електрообладнання залежно від його функціональних та конструктивних особливостей. Під час тестової діагностики до електрообладнання застосовуються тестові дії, що виконуються діагностичними засобами. Тестова діагностика проводиться як у вимкненому стані електрообладнання, так і під час роботи. Функціональна діагностика проводиться під час експлуатації електрообладнання, при якій виконуються лише робочі дії.

Часто, щоб підвищити ефективність тестування та функціональної діагностики, необхідно налаштувати діагностичне електрообладнання, зробивши додаткові відгалуження. Крім того, використовуються спеціально встановлені додаткові прилади (датчики вібрації, лінійного переміщення, температури тощо).

Основними етапами розробки діагностики електрообладнання з урахуванням вимог до діагностики та досвіду її впровадження є: обмеження терміну служби електрообладнання та визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностиці; вибір параметрів для діагностики електрообладнання; пошук несправностей в електрообладнанні.

1.2 Вібраційні і комутаційні відмови асинхронних двигунів

Сьогодні визначено два типи простих відмов стосовно електричних машин [1–5]: вібраційні і комутаційні.

Вібраційні відмови виникають в обмотках через втомні злами при резонансних коливаннях в дефектах такого вигляду - окремо віддалених, погано пов'язаних і не склеєних в загальний масив дротів. Такі процеси відмов виявлені при аналізі першопричин і місць відмов двигунів при ремонтах і після відмов в прискорених випробуваннях на надійність.

Частота вільних коливань таких дефектів залежить від модуля пружності, розмірів поперечного перетину і довжини дроту, умов затискання його на опорах. Для круглих мідних дротів частота вільних коливань визначена формулою:

$$f_{CB} \approx 3n_1^2 \frac{d_{Cu}}{l^2}, [\text{кГц}] \quad (1.1)$$

де: d_{Cu} - діаметр дроту, [6–7]; l - довжина дроту між крапками кріплення, [8–9].

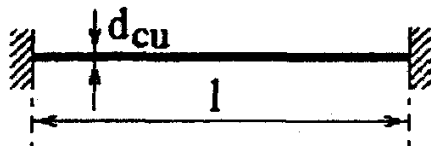


Рис. 1.1 Схематична модель вібраційного дефекту

Рис. 1.1 - це схематична модель дефекту, а формула (1.1) — математична модель частоти вільних коливань дефекту; значення коефіцієнта $n_1=2;2,5;3$ залежить від жорсткості кріплення кінців провідника – чим більша жорсткість, тим більший коефіцієнт.

Розмах коливань залежить від близькості частоти власних коливань до частоти якої-небудь гармоніки змушуючої сили магнітного, вентиляторного або підшипникового шуму, від амплітуди гармоніки цієї сили, дисипативних властивостей дроту і опор. Резонанси можуть мати місце на одному або декількох швидкісних режимах при регулюванні або в процесі пуску. Частоти власних коливань і дисипативні властивості дефектів змінюються при зміні навантаження, оскільки при зміні температурного поля змінюються властивості

дроту і лаку, яким він просочений. Втомний злам резонуючого дроту можливий в схемі з'єднання обмотки, на поверхні або усередині котушок в порожнинах, утворених міхурами і розшаруваннями в просочуючому лаку. Вони можуть бути і в пазовій і в лобовій частинах обмотки.

Якщо дріт знаходився в розтягнутому стані і обрив відбувся при роботі на малому струмі, або після відключення машини, то при пошуку першопричини і місця відмови фіксують "обрив фази" без слідів електричної дуги. Якщо обрив відбувається при великих пускових струмах, то в місці обриву виникає електрична дуга. Так само закінчується процес у випадках повільного зростання поперечних тріщин дротів при одночасній дії вібрацій і окислювального процесу, коли відбувається зростання місцевого електричного опору. При повторному пуску під дією великого пускового струму в цьому ослабленому місці відбувається швидкий нагрів, оплавлення міді і вибух з подальшою електричною дугою. При аналізі фіксують "обрив фази" з характерними кульками оплавленої застиглої міді з обох боків від місця обриву. Такі наслідки відмов спостерігають в погано пов'язаних міжкотушкових з'єднаннях і вивідних дротах, що проходять через жорстку ізоляційну трубку із завищеним внутрішнім діаметром. Якщо описаний процес виникає в глибині котушки або на її поверхні, коли поблизу розташовані інші дроти, то електрична дуга, розбризкуючи мідь, замикає дріт на корпус, іншу котушку, фазу або сусідні витки.

Важливим випадком можна вважати результати аналізу причин відмов двигунів зі всипними обмотками потужністю від 20 до 40 кВт в багатофакторному експерименті. В жодному з 28-ти двигунів, що відмовили, не визнані відмови типу "обрив дроту", але були відмови типа "виткові замикання" і "множинні замикання" із слідами електричної дуги. Адже у ряді випадків першопричиною могли бути вібраційні дефекти. Після обриву вібруючого дроту АД не відмовляв відразу тому, що котушки були намотані 6-ма елементарними дротами, двигун продовжував брати участь у випробуваннях до тих пір, доки уламки дроту, що коливався з тією ж резонансною частотою (!), викликали "множинні замикання".

Цей випадок показав, що дослідники, який аналізують експлуатаційні дані про відмови, перебільшують частоту комутаційних відмов, оскільки візуальна оцінка місць відмов не дозволяє виявити першопричину відмови - наслідки і комутаційних і вібраційних відмов можуть бути однакові.

Формула (1.1) є важливою для пояснення вібраційних відмов, але вона не перевірялася експериментом.

Комутаційні відмови відбуваються в результаті старіння ізоляції електричними розрядами, що виникають під дією КП. Саме цей тип відмов (за умовчанням) моделювали всі дослідники [3–9, 11–14] без точного обліку комутаційних явищ. Тому вивчення типів комутаційних напруг, генерації їх на контактах пускачів і розповсюдження по всипній обмотці - було важливою метою співробітників КП [12–15].

Комутаційні явища експериментально вивчали на АД з відпаюваннями на обмотці. Генераторами КП є комутуючі апарати, які створюють зрізи струмів. За формою і амплітудою КП різноманітні навіть для одного виробу, оскільки залежать від випадкових чинників: миттєвих значень струму і напруги, що розриваються на контактах, хвильових властивостей комутуваної обмотки і всіх пов'язаних з нею ланцюгів, змінних умов пробою і іскрогашення на контактах. Форма осцилограм комутаційних напруг, зареєстрованих між відпаюванням від обмотки і корпусом, має два характерні процеси: пилкоподібний і хвильовий.

Хвильовий процес (Рис.1.2) може не супроводжуватися попередньою пилкоподібною напругою. Він відбувається або при обриві дуже малих струмів, коли не відбувається пробій міжконтактного проміжку, або при обриві великих струмів, коли спалахує електрична дуга і велика частина індуктивної енергії втрачається в дузі, напруга після згасання дуги не викликає повторних іскрових пробіїв міжконтактних проміжків. Частота вільних коливань хвильових процесів визначається схемами заміщення обмоток, що враховують подовжні і поперечні ємнісні зв'язки між витками в пазах, котушками в лобових частинах, обмоткою і корпусом.

Хвильові напруги розповсюджуються уздовж дротів обмотки із швидкістю 80-90 м/мкс, оскільки гальмуються вихровими струмами в міді і стали. Вони викликають старіння, пробої і відмови корпусної і міжфазної ізоляції. Амплітуда хвильових КП, якщо не завищена розривна здатність пускача, не перевищує 1.1,5 кВ, що неодноразово перевірялося експериментами в лабораторіях та у виробничих умовах.



Рисунок 1.2 -Хвильовий процес комутаційного пробою

Пилкоподібний процес (рис.1.3) виникає при іскрових пробоях міжконтактного проміжку, що повторюються, якщо запасена енергія достатня для іскри, але недостатня для переходу іскрового розряду в дуговий. Пилкоподібну напругу можна представити двома процесами, що чергуються: наростаючою напругою на контактах через хвильовий процес і крутопадаючою напругою через іскровий пробій на контактах апарату. Передні фронти пилкоподібної напруги утворюються початковою частиною вільного коливального процесу після кожного переривання струму. Тривалість переднього фронту порівняльно велика - 1-5 мкс.

У моменти часу, коли напруга між контактами апарату досягає межі міцності, в ньому виникає іскровий пробій. Струми іскрових пробіїв підживляються довколишніми ємностями комутуючого апарату і обмотки і енергією шихтованої сталі магнітопровода. Напруга у момент пробою швидко зменшується і утворює задній фронт пилкоподібної напруги. Тривалість заднього фронту пилкоподібного процесу вимірюється сотими частками мкс. Такий процес може повторюватися багато разів, що і формує пилкоподібну частину перенапруження. Багатократне наростання і падіння напруги і колювання струму викликають втрати в міжконтактному проміжку і інших ділянках ланцюга, зменшують запас енергії, величину і швидкість наростання переднього фронту напруги. Якщо ця швидкість

виявиться менше швидкості відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку апарату, іскровий пробій не виникає і почнеться хвильовий процес.

Комутаційну відмову слід представляти як процес накопичення пошкоджень в дефектах. На поверхні обмотувальних дротів під шаром емалі завжди є дефекти у вигляді заусениць міді розмірами в декілька десятків мікрон [16–19] і газових міхурів навколо них в емалі і просочуючому лаку. Напруженість електричного поля на вістрях заусенцев більше середніх значень в десятки разів. Напруженості поля в газових дефектах досягають критичних значень і викликають часткові розряди при кожному комутаційному перенапрузі. Енергія часткових розрядів у вигляді іонізації або іскр витрачається на збільшення дефектів. Гази, що утворюються при цьому, йдуть з дефектів, а вуглець створює струмопровідні поверхні і нитки.



Рисунок 1.3 - Пилкоподібний процес комутаційного пробою

Надалі критичні для утворення розрядів напруженості утворюються на вістрях вуглецевих ниток. В результаті відбувається проростання такими нитками щільно стислих шарів емалі дротів до тих пір, поки не утворюються наскрізні вуглецеві або газові канали. Ці канали в початковий період мають порівняно великий опір, так що відмови поки що немає. Але тепер велика частина енергії кожного перенапруження виділяється в цьому каналі, відбувається прискорений розвиток дефекту, канал збільшується і з часом виявляється достатньо навіть робочої напруги для протікання по ньому струму, необхідного для пробою, переходу в електричну дугу, замикання або обриву дроту, як при вібраційних відмовах.

Комутаційні відмови можуть починатися і за іншими схемами. Спочатку відбуваються іскрові розряди по забруднених або зволжених поверхнях або каналах в товщі ізоляції. Ці розряди є генераторами нових, внутрішніх КП.

Напруги, зареєстровані на початку і в кінці фазних обмоток, показали, що круті фронти КП величиною 300 В передаються від витка до витка в кожному пазу практично миттєво і з невеликим (на 10-30%) зменшенням. Комутуючі апарати з контактами місткового типу створюють круті фронти КП величиною до 600 В.

Іскрові пробої і електрична дуга, умови їх виникнення, стійкості і гасіння достатньо повно описані для цілей електрозварювання і для електричних апаратів. Ці умови визначаються великим числом чинників: шорсткістю і температурою поверхні електродів, умовами тепловідводу, напругою, силою струму і ін. Складний взаємозв'язок цих чинників впливу змушує враховувати їх лише імовірісно-статистичними методами, які завжди неточні, умовні.

1.3 Визначення вузлів і деталей асинхронних двигунів, що підлягають діагностуванню

Під час створення методів та засобів діагностики трапляються випадки розробки серійно вироблених та перевірених часом електричних машин та апаратів, а також розробки нового обладнання. У першому випадку зазвичай збираються дані про несправності в умовах експлуатації електричних машин та апаратів для ідентифікації вузлів та деталей, що підлягають діагностиці. У другому випадку проводяться випробування тестової партії нового електрообладнання для отримання вихідних даних.

На основі аналізу кількості та причин відмов визначається перелік конструктивних елементів, що обмежують ресурс та продуктивність електричних машин і апаратів.

Як і з будь-якою машиною чи механізмом, діагностику електрообладнання слід проводити лише тоді, коли це необхідно для отримання відповідного економічного ефекту або забезпечення безпеки експлуатації.

Загальна вартість експлуатації i -го елемента електричних машин та обладнання без використання діагностики визначається за формулою:

$$Z_{ei} = Z_{oi} + Z_{pi} + Z_{gi} + III_i \quad (1.2)$$

де Z_{oi} , Z_{pi} – зведені затрати відповідно на технічне обслуговування і ремонти (поточний і капітальний) елемента, год.; Z_{vi} – зведені затрати на усунення відмов елемента, год.; Π_i – зведені збитки від відмов елемента, год.

Збитки внаслідок поломок елементів електрообладнання часто пов'язані з простоєм працюючих машин, механізмів, технологічних ліній та обладнання. Простої призводять до зменшення кількості виробленої продукції та інших негативних наслідків.

Загальні експлуатаційні витрати на електричні машини та обладнання

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_{ei} \quad (1.3)$$

де n – кількість елементів електричної машини або апарата

Коефіцієнт — це розрахунок, який порівнює наслідки відмови елементів машини або пристрою:

$$G_i = (Z_{vi} + \Pi_i) / Z_m \quad (1.4)$$

Розташуйте значення G_i так, щоб розраховані за формулою, у порядку спадання величини та запишіть нерівність, яка показує послідовність подальшого аналізу елементів для визначення їх діагностичного потенціалу:

$$G_1 \geq G_2 \geq G_3 \geq \dots \geq G_n \quad (1.5)$$

Використання діагностики призводить до зниження витрат на технічне обслуговування, ремонт та усунення несправностей, а також загалом зменшує втрати через простої.

Загальна вартість володіння елементом з використанням діагностики визначається виразом:

$$Z_{edi} = Z_{odi} + Z_{pdi} + Z_{vdi} + \Pi_{di} + Z_{di} \quad (1.6)$$

де Z_{odi} , Z_{pdi} – зведені затрати відповідно на технічне обслуговування і ремонт елемента під час застосування діагностування, год; Z_{vdi} – зведені затрати на усунення відмов елемента під час застосування діагностування, год; Π_{di} – зведені збитки від відмов елемента під час застосування діагностування, год; Z_{di} – зведені затрати на діагностування елемента, год.

За допомогою діагностики загальна вартість експлуатації електричної машини або пристрою визначається виразом:

$$Z_{\text{мд}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{еді}} \quad (1.7)$$

Економічний ефект під час застосування діагностування елемента електричної машини або апарата визначають виразом:

$$E_{\text{еді}} = Z_{\text{еі}} + Z_{\text{еді}} \quad (1.8)$$

Під час діагностики зниження витрат досягається за рахунок збільшення ресурсу та надійності, а також встановлення оптимальних інтервалів технічного обслуговування. Якщо дисбаланс зберігається, рекомендується діагностувати елемент:

$$Z_{\text{еі}} > Z_{\text{еді}} \quad (1.9)$$

Це підсумовування витрат під час експлуатації елемента без використання діагностики. В іншому випадку діагностувати елемент (вузол або деталь) недоцільно.

Економічна ефективність діагностики електричної машини або пристрою:

$$E_{\text{мд}} = \sum_{i=1}^{n_i} Z_{\text{еді}} \quad (1.10)$$

Де n_1 – кількість елементів машини або апарата, діагностування яких забезпечує отримання економічного ефекту.

Відносна ефективність діагностування елементів визначається виразом:

$$G_{\text{ді}} = E_{\text{еді}} / E_{\text{мд}} \quad (1.11)$$

Визначені частки $G_{\text{д}}$ ефективності діагностування кожного елемента в загальній ефективності діагностування електричної машини або апарата розміщують за порядком спадання значень

Загальну діагностичну ефективність електричної машини або пристрою розташовують у порядку спадання заданого відсотка діагностичної ефективності $G_{\text{д}}$ кожного елемента:

$$G_{\text{д1}} \geq G_{\text{д2}} \geq G_{\text{д3}} \geq \dots \geq G_{\text{дn}} \quad (1.12)$$

Отриманий ряд дозволяє визначити елементи, що підлягають діагностиці, та вказати на порівняльну ефективність їх діагностики, а також встановити послідовність робіт з розробки методів та засобів діагностики елементів (деталей, вузлів) електричних машин та апаратів.

1.4 Основні положення технології діагностики електрообладнання

Відомо, що під час діагностики електрообладнання вирішуються три основні завдання: визначення його працездатності, встановлення залишкового ресурсу та пошук причини несправності. Відповідно до цих завдань розроблена технологія діагностики, яка повинна забезпечити вирішення поставленого завдання з мінімальними витратами при заданому рівні ймовірності результату.

Зазвичай діагностична технологія розробляється у вигляді технологічної карти, в якій вказується назва та зміст операції, послідовність операцій, технічні вимоги до операції, які діагностичні засоби слід використовувати для вимірювань, а також номінальні, допустимі та граничні значення діагностичних параметрів.

Розроблювана діагностична технологія повинна забезпечити найнижчу загальну вартість володіння під час експлуатації електрообладнання

$$Z_{\text{мдм}} = \min \sum_{i=1}^n Z_{\text{еді}} \quad (1.13)$$

Одним із важливих етапів розробки діагностичної технології є складання мінімального набору діагностичних тестів, а саме визначення мінімальної кількості тестів, що забезпечують необхідну ймовірність визначення та прогнозування технічного стану електричної машини або пристрою. При формуванні матриці у верхній частині (у стовпцях) розміщуються назви вузлів та елементів електрообладнання, що підлягають діагностиці, а в рядках - діагностичні параметри, вибрані з великої кількості параметрів, що характеризують технічний стан даного виду електрообладнання.

Наявність зв'язку між діагностичним параметром і технічним станом діагностованого вузла або елемента позначається числом "1", а відсутність зв'язку - "0". Зазвичай, для спрощення роботи, нулі в матрицю не вносяться. У таблиці 1.1 наведено приклад побудови діагностичної матриці для короткозамкненого асинхронного електродвигуна з накоротко замкнутими обмотками.

Мінімальна кількість перевірок визначається шляхом вибору мінімального набору рядків матриці таким чином, щоб у кожному стовпці був хоча б один рядок матриці, позначений "1". Вибір найкращого рядка здійснюється за

критерієм найменшої вартості діагностики або питомої вартості діагностики працюючого блоку електрообладнання. У цьому випадку попередньо враховується оптимальна послідовність діагностики елементів або вузлів.

Для складних машин або пристроїв мінімальні діагностичні випробування визначаються окремо для компонентів, а потім для всієї електричної машини або пристрою. Для відносно простого обладнання мінімальні діагностичні випробування визначаються одразу для всієї машини або пристрою.

Складність та вартість діагностики значною мірою залежать не лише від кількості діагностичних операцій, але й від послідовності їх виконання. У процесі розробки діагностичної технології послідовність контрольних операцій визначається мінімальною складністю діагностування електрообладнання. Якщо при діагностиці електричної машини необхідно виміряти n діагностичних параметрів, то можлива $n!$ послідовність їх виконання.

Отже, при встановленні діагностичної послідовності, перш за все, визначаються загальні умови проведення діагностики, наприклад, початковий стан або режим роботи електричної машини чи пристрою (машина працює або відключена від мережі, холодна або розімкнута тощо). Потім складається матриця режимів діагностики, у верхній частині якої (стовпцях) розміщуються всі параметри діагностики (відповідно до номінального діагностичного випробування), а в рядках - режими роботи або індивідуальні вимоги, що пред'являються при проведенні діагностики.

Під час аналізу матричних даних ми знаходимо зв'язок між діагностичними параметрами та режимами їх виконання. У цьому випадку вимірювання під час діагностики зазвичай виконуються групою параметрів у заданому початковому стані або режимі роботи електричної машини чи пристрою.

Для оптимізації алгоритму діагностики наступним кроком є визначення порядку роботи груп параметрів. Отже, спочатку вимірюються групи параметрів, які слід вимірювати, коли машина або пристрій вимкнені та майже холодні, потім групи параметрів, які слід вимірювати, коли машина ввімкнена або прогріта, і далі групи, які потребують номінального нагрівання або номінального режиму роботи.

Таблиця 1.1- Матриця діагностування короткозамкненого асинхронного електродвигуна

Діагностичні параметри	Вузли і елементи електродвигуна								
	Ізоляція обмотки відносно корпусу	Міжфазна ізоляція	Міжвиткова ізоляція	Обмотка статора	Короткозамкнена обмотка ротора	Підшипники	Вал	Активна сталь статора	Контакти щитка затискачів
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Перевірка працездатності									
Вібрація електродвигуна			1	1	1	1	1	1	
Шум при роботі електродвигуна			1	1	1	1	1	1	
Момент опору при прокручуванні валу						1	1		
Сліди перегорання контактних поверхонь									1
Струми втрат	1	1							
Рівень електричної міцності ізоляції	1	1	1						
Биття виступаючого кінця вала							1		
Визначення залишкового ресурсу									
Струми втрат	1	1							
Струми споживання від мережі			1	1	1				1
Радіальне переміщення вала						1			
Сліди перегорання контактних поверхонь									1
Опір обмоток постійному струму				1					1

Для зменшення складності вимірювань параметри груп поділяють на підгрупи, об'єднують спільними характеристиками або вимірюють одним приладом, наприклад, вимірюючи струми витoku та порівнюючи рівень діелектричної міцності міжвиткової ізоляції.

Зниження трудомісткості та вартості діагностичних робіт при визначенні залишкового ресурсу часто досягається створенням послідовності вимірювань, що запобігають виявленню несправностей в електричних машинах та пристроях, що зараз проходять капітальний ремонт.

1.5 Класифікація засобів діагностування електрообладнання

Класифікація засобів діагностування електрообладнання показана на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4- Класифікація засобів для діагностування електрообладнання

У майбутньому широко використовуватимуть прилади для діагностики електрообладнання, які дозволять здійснювати безперервний або періодичний

автоматичний моніторинг технічного стану та забезпечувати передачу аварійні попереджувальні сигнали. Звичайно, автоматизовані діагностичні засоби рекомендуються для моніторингу електрообладнання, пошкодження якого призводить до значних втрат, а також електрообладнання, доступ до якого важко або неможливо отримати.

За принципом роботи об'єкта діагностики діагностичні засоби поділяються на дві групи: тестові та функціональні. За допомогою засобів тестової групи під час процесу діагностики подається сигнал (тестова дія) на контрольоване електрообладнання, вимірюються необхідні параметри, що визначають реакцію електрообладнання на сигнал, і за допомогою цих показників оцінюється технічний стан. Засоби функціональної групи визначають технічний стан електрообладнання під час роботи без зовнішніх впливів.

Виходячи з досвіду розробки та впровадження діагностики в практику експлуатації електрообладнання, рекомендується поділяти діагностичні засоби на такі типи:

- Прості діагностичні засоби, що використовують обмежену кількість загальних діагностичних параметрів, які визначають загальний технічний стан електрообладнання. Ці засоби призначені для визначення технічного стану електрообладнання під час технічного обслуговування, а також для виявлення незначних несправностей;

- Повноцінний діагностичний та прогностичний інструмент, що дозволяє визначити технічний стан усіх елементів, що обмежують термін служби та працездатність електрообладнання. Ці інструменти призначені для планової діагностики та усунення несправностей електрообладнання;

- Інструмент призначений для передремонтної та післяремонтної діагностики, для використання на спеціалізованих електроремонтних заводах та відділах для визначення номенклатури ремонтних деталей та компонентів, а також якості ремонту електрообладнання.

Залежно від призначення, діагностичні засоби можуть бути портативними, мобільними, стаціонарними. Важливою характеристикою діагностичних засобів є

ступінь їх автоматизації. Умовно діагностичні засоби поділяються на автоматичні, автоматизовані та засоби ручного керування.

На початковому етапі розробки оптимальний вибір діагностичних засобів розраховується з урахуванням їх умов та ймовірності результатів діагностики. Однією з основних вимог є призначення розробленого засобу: визначити його продуктивність, ресурс; визначити його продуктивність, ресурс, пошук та усунення несправностей тощо.

Оптимальний вибір діагностичних засобів повинен забезпечити найменшу вартість тестування елементів, найменші втрати від помилок тестування елементів, а також економічну ефективність використання засобу.

Після отримання позитивного результату при перебірковому розрахунку економічної ефективності створення конкретного засобу для діагностування складають принципові кінематичні і електричні схеми, а також розраховують параметри деталей і вузлів. Потім створюють макетний або експериментальний взірець, який проходить спочатку лабораторні, а потім виробничі випробування. При випробуваннях встановлюють відповідність розроблюваного засобу своєму цільовому призначенню і його працездатність; визначають похибки і трудомісткість вимірювання діагностичних параметрів. За результатами випробувань вносять необхідні корективи в схему і конструкцію засобу і розробляють дослідний взірець. Дослідний взірець після заводських і виробничих випробувань і відповідного доопрацювання за їх результатами подається відомчій і міжвідомчій державній комісії, яка рекомендує його до серійного виробництва.

1.6 Постановка задачі роботи

Проведений аналіз сучасного стану діагностування електрообладнання показав, що в останні роки намітився перехід до впровадження системи обслуговування електрообладнання за фактичним технічним станом, що вимагає впровадження ефективних методів і засобів діагностування. Стосовно асинхронних двигунів сьогодні відсутні ефективні методи і засоби

діагностування, зокрема таких їх відмов як вібраційних і комутаційних, які призводять до виходу з ладу обмоток статора і їх ізоляції.

Існуючі засоби діагностування електрообладнання, які зведені у відповідну класифікацію, не дозволяють діагностувати вказані дефекти у зв'язку з чим в роботі пропонується:

1. Змодельовати дефекти вібраційних відмов асинхронних двигунів.
2. Обґрунтувати вибір методу діагностування асинхронних двигунів з врахуванням їх вибраних параметрів.
3. Розробити структурну схему системи діагностування асинхронних двигунів.
4. Розробити принципову електричну схему вимірювання.
5. Провести моделювання роботи системи діагностування асинхронних двигунів.

2. ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1. Моделювання дефектів вібраційних відмов

Метою цього підрозділу є експериментальна перевірка формули (1.1) частоти власних коливань вібраційного дефекту. Результати вібраційних відмов, що виявляються після розбирання відмов в інших АД є такими ж, як і результати комутаційних відмов, тому що вони теж закінчуються електричною дугою і зварюванням дротів, що торкнулися, множинним замиканням або обривом дротів. Але першопричини цих типів відмов різні. Тому модель дефекту буде трохи іншою.

2.2.1. Дефект вібраційної відмови

На відміну від комутаційної відмови, першопричиною якого є наскрізний дефект між витками, вібраційна відмова викликається наступними першопричинами:

- погане просочення обмотки в глибині пазової або лобової частини утворює дефект у вигляді окремого провідника або групи декількох вільних провідників в пазу газу або прямо в повітрі (рис. 2.1);
- погано пов'язані вивідні дроти теж утворюють дефект у вигляді одного або групи вільних провідників в повітряному просторі машини.

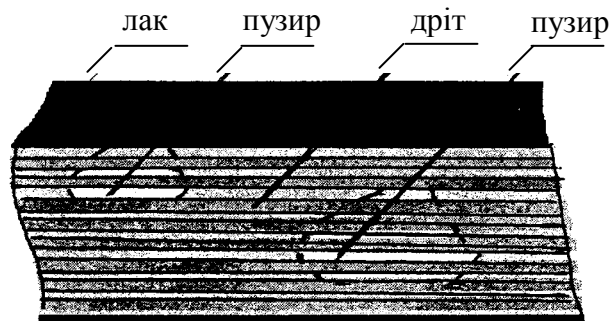


Рисунок 2.1 - Міхур

Такі дефекти можна моделювати балкою. Для них можна розрахувати частоту вільних коливань, яка може співпасти з частотою однієї із сил, що вимушують сил. Змушуючі сили можуть бути електромагнітні, від вентилятора або від

підшипників. При співпаданні вільних і вимушених частот виникає резонанс, і провідник переламується, приводячи до обриву ланцюга для струму. В деяких випадках відбувається відмова у вигляді множинного виткового замикання. Частоти власних коливань залежить від його розмірів, умов заземлення кінців і від модуля Юнга матеріалу.

2.2 Вибір параметрів і розробка методу діагностування асинхронних двигунів

Важливим і відносно складним завданням при розробці методу діагностики електрообладнання є визначення оптимального набору діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан контрольованого об'єкта. Параметри діагностування електричних машин і компонентів можна класифікувати за методом вимірювання таким чином: параметри, виражені в електричних величинах і безпосередньо виміряні (напруга та потужність змінного та постійного струму, частота імпульсів, тривалість, амплітуда, індуктивність, ємність, опір тощо); параметри, виражені в електричних величинах і потребують додаткового перетворення для їх вимірювання (великі та малі струми та напруги, модуляція тощо); параметри, що вимірюються непрямым чином; параметри, виражені в неелектричних величинах і потребують перетворення для їх вимірювання (температура, зміщення тощо); параметри, що оцінюються візуально (сліди перегріву на контактних поверхнях, наявність нагару, наявність раковин на поверхнях колектора або контактних кілець тощо).

За інформаційним змістом параметри можна розділити на дві групи: загальні та локальні. Загальні параметри містять великий обсяг інформації та характеризують стан кількох або одного вузла, кількох деталей, локальні параметри - лише однієї деталі (елемента).

Під час вибору діагностичних параметрів слід дотримуватися таких основних положень: кожному значенню параметра керування вузла або частини електрообладнання має відповідати лише одне значення діагностичного параметра (вимога унікальності); діагностичний параметр повинен бути відносно

легким для вимірювання за допомогою найпростіших методів (вимоги доступності та зручності вимірювання).

Діагностичний параметр повинен мати найбільший діапазон вимірювання при зміні параметра керування вузла або ділянки під час роботи електрообладнання, що дозволяє підвищити точність вимірювань та ймовірність діагностики (вимоги до ширини поля вимірювання).

Перш за все, аналізуються параметри, які можна виміряти безпосередньо без перетворення. При аналізі діагностичних параметрів перевага надається параметрам з прямим функціональним зв'язком з технічними умовами вузла або діагностичного блоку та з високою інформативністю. Окрім інформативності, визначаються засоби вимірювання, трудомісткість та витрати на вимірювання для кожного діагностичного параметра.

Загалом, доцільно використовувати параметр для діагностики, якщо вартість Z_{di} , необхідна для визначення технічного стану елемента за допомогою діагностичного параметра, менша або дорівнює вартості Z_{ni} , необхідної для визначення технічного стану того ж елемента шляхом вимірювання параметрів «безпосередньо» після демонтажу електричної машини або пристрою:

$$Z_{di} \leq Z_{ni} \quad (2.1)$$

де $Z_{ni} = Z_e + qZ_p$; Z_e – затрати на вимірювання параметрів елемента після розбирання електричної машини чи апарата, год; Z_p – затрати на розбірно-збірні роботи для визначення технічного стану даного елемента електричної машини чи апарата, год; q – ймовірність відмови електричної машини чи апарата внаслідок відмови одного елемента.

Під час вибору параметрів діагностування насамперед відхиляють параметри, які не задовольняють умову 2.1, а також малоефективні параметри і параметри, які мають велику вартість вимірювання. При визначенні вартості діагностики враховується час, витрачений на діагностику, рівень діагноста, тарифна ставка, відрахування на амортизацію обладнання, витрати на електроенергію та інші витрати.

Після визначення діагностичних параметрів наступним етапом роботи є вибір та розробка діагностичних методів та засобів, після чого можна буде уточнити діагностичні витрати та встановити термінологію для діагностичних параметрів. Відомі методи часто не визначають усі необхідні діагностичні параметри, що робить необхідним розробку нових діагностичних методів.

Прикладом може служити застосування методу визначення технічного стану міжвиткової ізоляції обмотки статора асинхронних короткозамкнених електродвигунів, придатного для застосування при виїнятому роторі із розстрочки статора, для діагностування зібраних електродвигунів, коли необхідно усунути магнітну асиметрію фаз двигуна, зумовлену короткозамкненою обмоткою ротора.

Часто для визначення залишкового ресурсу елементів і вузлів електрообладнання необхідно розробляти методи діагностування, засновані на застосуванні декількох характеристик одного параметра діагностування або певної комбінації двох або декількох параметрів, що дає великий обсяг інформації, знижуючи одночасно трудомісткість і спрощуючи обробку даних діагностування. Наприклад, під час діагностування корпусної і між фазної ізоляції визначають чотири характеристики параметрів діагностування – струму втрат при прикладанні напруги постійного струму: коливання або стрибки струму, що характеризує наявність тріщин, шпилькових отворів і пустот в ізоляції; абсолютне значення струму втрат, що характеризує наявність пошкодження, забруднення або пошкодження ізоляції; відносний приріст струмів втрат під час збільшення напруги на певне значення, що є додатковим критерієм для розпізнавання причини великих втрат струмів – наявність тріщин, пошкоджень або забруднення чи зволоження ізоляції; несиметрію струмів втрат обмоток фаз, що вказує на наявність місцевих дефектів в ізоляції фази.

На жаль, під час розроблення нового електрообладнання конструктори випускають з уваги вимоги забезпечення достатнього доступу під час експлуатації до вузлів електричних машин і апаратів внаслідок їх герметизації, що значно затрудняє, а в деяких випадках робить неможливим, застосування при

діагностуванні параметрів, які володіють великою інформативністю і забезпечують високу точність результатів при невеликих затратах. Наприклад, конструкцією електрообладнання не передбачаються місце встановлення датчиків і самі датчики для вимірювання узагальнених діагностичних параметрів, зокрема вібрації і, контролю технічного стану основних вузлів. Встановлення вбудованих датчиків для контролю технічного стану особливо себе виправдовує в відповідальному електрообладнанні. Великою інформативністю про технічний стан вузла підшипників обертових електричних машин володіє величина зазору між тілами кочення і біговими дорожжками, однак цей параметр легко вимірюється тільки при розібраній машині.

З урахуванням вищезазначеного, загальні вимоги до розробки або вибору методів діагностики такі: вони повинні бути простими, а їх реалізація не повинна вимагати використання або розробки складних і дорогих діагностичних засобів; вони повинні забезпечувати необхідну достовірність результатів діагностики; під час процесу вимірювання вони не повинні вимагати режимів роботи електрообладнання, які важко реалізувати на практиці; вони повинні скорочувати час і вартість діагностичних засобів порівняно з іншими методами та засобами.

При розробці методів спрощення вимірювань та підвищення ефективності діагностики робляться спроби використовувати деталі та вузли електрообладнання як перетворювачі, як засоби передачі однієї деталі на іншу. Наприклад, при вимірюванні відстані в підшипнику обмотки та магнітопровід електродвигуна можуть бути використані як електромагніти, що переміщують ротор у радіальному напрямку паралельно отвору статора.

Одними із найбільш перспективних вважаються методи діагностування, що базуються на оцінці частотних характеристик (рис. 2.2)

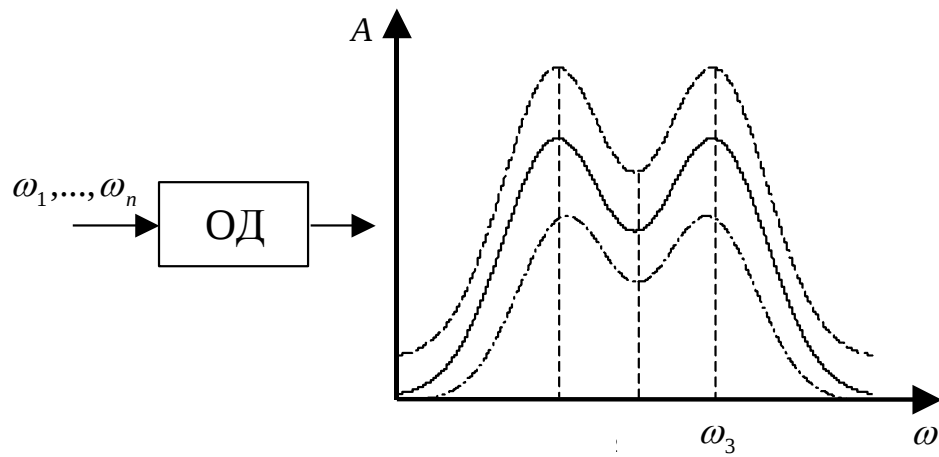


Рисунок 2.2- Метод контролю працездатності об'єкта за частотними характеристиками

На вхід ОД подається тест у вигляді синусоїдального сигналу в діапазоні частот $\omega_1 \dots \omega_n$. За вихідною реакцією будується АЧХ і ФЧХ, які порівнюються з граничними значеннями (маскою) при інтегральному оцінюванні відхилення характеристик. Можливий контроль працездатності ОД за частотними характеристиками в характерних точках ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$). В цьому випадку немає необхідності знімати всю характеристику, а достатньо оцінити працездатність за реакцією ОД на сигнали цих частот. Тест при цьому різко скорочується. У працездатного обладнання характеристика або її значення в характерних точках повинні знаходитися у встановлених межах в області працездатності.

Різновидом цього методу є частотно-резонансний, який знайшов застосування при діагностуванні ЕМ і ґрунтується на пофазному порівнянні АЧХ обмоток між собою. Для виявлення виткових замикань і визначення стану обмоток ЕМ на початок обмоток і корпус подається напруга змінної частоти. Кожна обмотка може бути представлена спрощеною схемою заміщення.

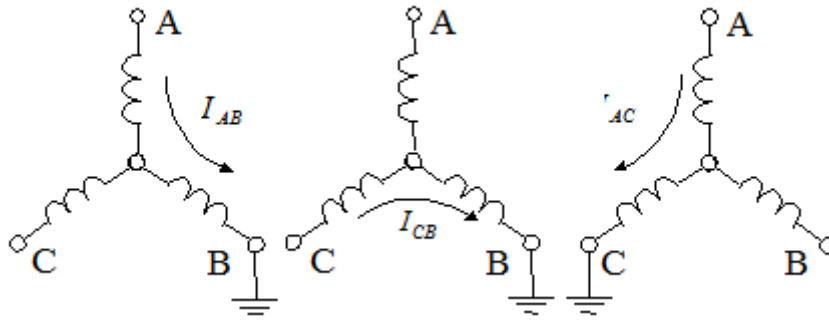


Рисунок 2.3 - Обмотки електричної машини

АЧХ для цієї схеми має вигляд:

$$K(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{(1 + R/R_i - \omega^2 LC_i)^2 + \omega^2 (RC_i + L/R_i)^2}}.$$

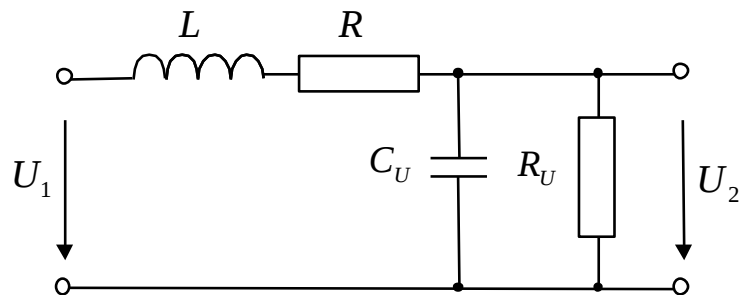


Рисунок 2.4 - Схема заміщення

Така АЧХ має один максимум

$$K(\omega)_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\frac{(RC_i + L/R_i)^2}{2L^2C_i^2} \left[\frac{4L_i - (RC_i + L/R_i)^2}{2} \right]}}$$

при резонансній частоті:

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R^2}{\rho^2} + \frac{\rho^2}{R_i^2} \right)}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_i}}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C_i}}$$

Як бачимо, максимум АЧХ і резонансна частота ω_c залежать від індуктивності і опору обмоток, опору і ємності ізоляції.

Таким чином, зміни $K(\omega)_{\max}$ і ω_c свідчать про появу короткозамкнутих витків (змінюються індуктивність і опір обмотки) і зміну стану ізоляції C_i , R_i .

2.3 Пошук дефектів асинхронних двигунів

Швидке усунення несправностей дозволяє виявити причину несправності та відновити роботу електрообладнання з мінімальними витратами. Усунення несправностей у відносно простому електрообладнанні не становить особливих труднощів, але для виявлення несправностей у складному електрообладнанні та складних схемах керування необхідно розробити алгоритми усунення несправностей, які дозволяють визначити оптимальну послідовність дій.

Водночас, пошук має здійснюватися з мінімальними витратами часу та ресурсів. Найпоширенішими методами пошуку помилок є: послідовний функціональний аналіз, напіврозбиття, ймовірнісний аналіз, метод розгалуження, граничний аналіз та їх варіації.

Метод послідовного функціонального аналізу базується на визначенні основних функцій об'єкта керування. Шляхом перевірки параметрів цих функцій виявляється елемент, що вийшов з ладу, оскільки виявляються відхилення. Метод простий, чітко визначений з точки зору результатів і не вимагає детальних вихідних даних. Основним недоліком є те, що послідовність виявлення несправностей не є оптимальною.

Метод поділу на половини може бути застосований до об'єктів керування з послідовно з'єднаними елементами. Він базується на визначенні параметрів, що визначають технічний стан таких елементів, які, незалежно від результату керування (позитивного чи негативного), поділяють об'єкт керування на дві частини, ймовірність яких однакова. Потім вибирається наступний елемент, який також поділяє несправну частину об'єкта на частини з однаковою ймовірністю стану. Операція виконується до виявлення несправного елемента.

Для довільно пов'язаних об'єктів керування з функціональними елементами використовується ймовірнісно-часовий метод, який використовує показники, що характеризують надійність елементів, для визначення порядку перевірки. Вихідними даними для цього методу виявлення несправностей є ймовірність відмови (безвідмовної роботи) елементів, час, необхідний для перевірки елемента,

а також відношення часу перевірки елемента до ймовірності його відмови або відношення ймовірності безвідмовної роботи до часу перевірки елемента. Алгоритм пошуку розробляється з урахуванням функціональної моделі об'єкта керування та матриці помилок.

Під час створення функціональної моделі враховуються такі умови: для кожного функціонального елемента відомі допустимі значення вхідних та вихідних сигналів, їх функціональна залежність та метод вимірювання; якщо на виході з'являється сигнал, що перевищує поле допуску для номінального вхідного сигналу, функціональний елемент вважається несправним; якщо на вхід функціонального елемента подається хоча б один сигнал, що перевищує поле допуску, вхідний сигнал відрізнятиметься від номінального сигналу; зовнішні вхідні сигнали мають лише номінальні значення.

Матриця несправностей побудована таким чином, що верхня частина містить список усіх основних ознак відмови (A_i), а рядки містять список причин відмови (d_i) або список елементів відмови, зміни стану яких можуть спричинити вищезазначені ознаки. Число "1" у матриці вказує на зв'язок між ознакою відмови (станом об'єкта) та елементами об'єкта або причинами відмови. Порядок перевірки елементів ймовірнісно-часового методу виявлення несправностей визначається збільшенням коефіцієнта:

$$\frac{t_1}{Q_1} < \frac{t_2}{Q_2} < \dots < \frac{t_n}{Q_n} \quad (2.2)$$

або зменшенням відношення

$$\frac{P_1}{t_1} > \frac{P_2}{t_2} > \dots > \frac{P_n}{t_n} \quad (2.3)$$

де $t_1, t_2, \dots, t_n$ – час, який затрачається на перевірку i -того елемента

$Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ – ймовірність відмови i -того елемента

$P_1, P_2, \dots, P_n$ – ймовірність безвідмовної роботи i -того елемента

Пошук несправностей починається з перевірки елемента, який має найменше відношення часу перевірки до ймовірності відмови або який має найбільше відношення ймовірності безвідмовної роботи до часу перевірки.

Побудована таким способом програма забезпечує мінімальні затрати часу на пошук несправності.

Одним з ключових критеріїв для визначення оптимальної послідовності усунення несправностей є найнижча середня вартість пошуку:

$$Z_{nc} = \sum_{i=1}^n C_i q_i \quad (2.4)$$

де q_i – ймовірність того, що відмова об'єкта зумовлена відмовою i -того елемента, C_i – загальна вартість перевірок, необхідних для виявлення i -того відмовного елемента при заданій послідовності перевірок.

Також існує мінімаксний критерій, згідно з яким найкращим порядком перевірки є такий, при якому максимальна вартість виявлення несправного елемента є найменшою порівняно з іншими порядками.

Під час визначення порядку виявлення несправностей використовуються показники надійності, а також такі показники, як вартість перевірки. В останньому випадку відповідний порядок перевірки визначається в порядку зменшення співвідношення:

$$Q_1/Z_1 > Q_2/Z_2 > \dots > Q_n/Z_n \quad (2.5)$$

За наявності одного відомого елемента і відношення:

$$Q_1/[Z_1(1-Q_1)] > Q_2/[Z_2(1-Q_2)] > \dots > Q_n/[Z_n(1-Q_n)] \quad (2.6)$$

За ймовірності одночасної наявності декількох відмовних елементів, де Q_i і Z_i – відповідно ймовірність відмови і вартість перевірки i -того елемента $i=1, 2, \dots, n$.

2.4 Розробка структурної схеми системи діагностування асинхронних двигунів

Виходячи з вибраного методу діагностування – частотно-резонансного, який базується на пофазному порівняльному ЛЧХ обмоток між собою була розроблена структурна схема системи діагностування наведено на рис.2.5.

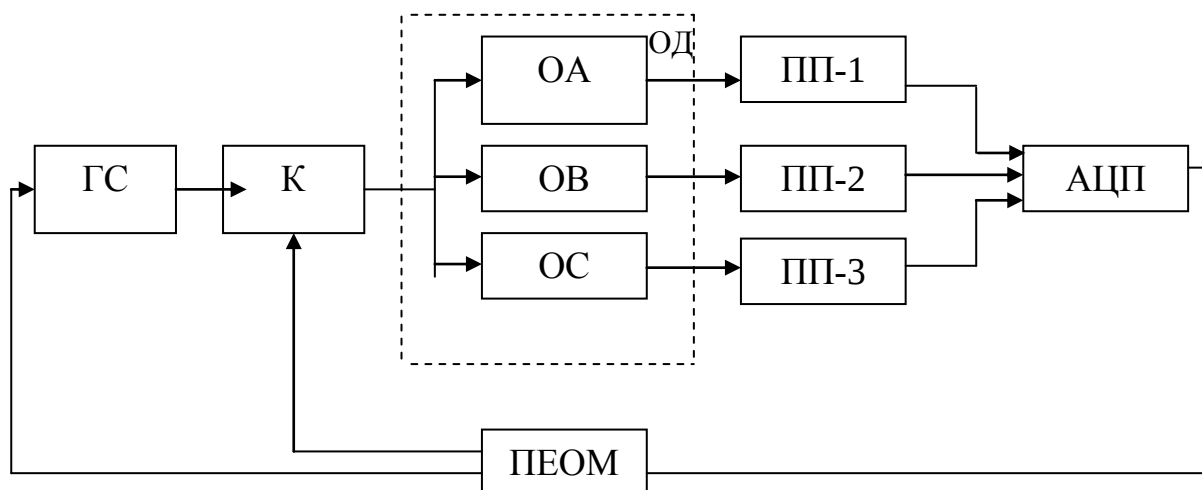


Рисунок 2.5 - Структурна схема системи діагностування асинхронних двигунів

Система діагностування складається з генератора тестових сигналів ГС – звукового генератора, комутатора К, об’єкта діагностування ОА представленого трьома обмотками ОА, ОВ і ОС, підсилювачів потужності ПП–1, ПП–2 і ПП–3, АЦП і ПЕОМ, яка виконує функції управління і обробки інформації.

Система працює наступним чином. Під дією сигналів управління з ПЕОМ з ГС подається напруга змінної частоти звукового діапазону від 20Гц до 20кГц. Через комутатор на контур з обмоток АД. З виходу кожної із обмоток сигнал подається на підсилювач потужності звукового діапазону і через АЦП поступає в ПЕОМ де у відповідності до закладеного алгоритму проводиться розрахунок АЧХ кожної із обмоток асинхронного двигуна та подальше їх порівняння.

2.5 Розробка підсилювача потужності електричних сигналів звукового діапазону та моделювання його частотних характеристик

Внаслідок низького вхідного опору підсилювача вхідний каскад можна виконати диференційним, на біполярних транзисторах (БТ). Коефіцієнт підсилення такого каскаду можна вибрати від 30 до 100 з наступним введенням сигналу від’ємного

зворотнього зв'язку (ВЗЗ) для компенсації надлишкового коефіцієнту підсилення та зменшення коефіцієнту гармонік. При цьому здійснюється розширення смуги пропускання підсилювача. Вихідний каскад - двотактний витоковий повторювач на потужних польових транзисторах (ПТ), які забезпечують високий вхідний опір та низький коефіцієнт гармонік K_g .

З врахуванням вищесказаного структурна схема підсилювача набуде вигляду, представленого на рис.2.6.

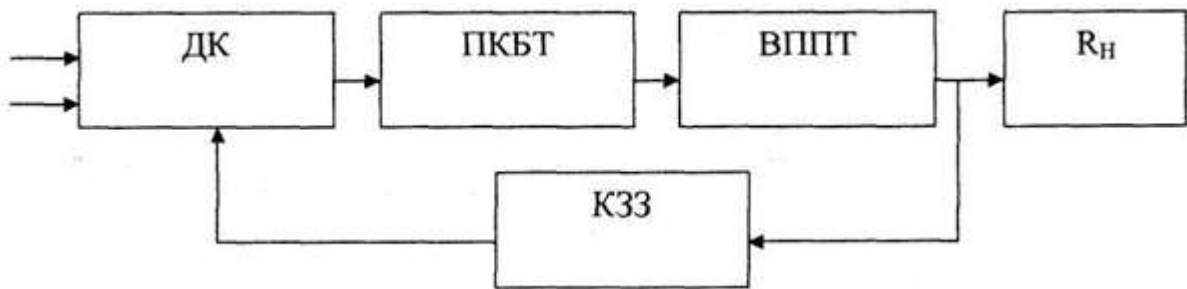


Рисунок 2.6 – Структурна схема підсилювача

Тут ДК — диференційний каскад на біполярних транзисторах, ПКБТ - підсилювальний каскад на біполярних транзисторах, ВППТ - витоковий повторювач на польових транзисторах, КЗЗ - коло зворотнього зв'язку, R_n - опір навантаження.

Оскільки розроблюваний підсилювач має дуже низьку робочу частоту $F_n = 3$ Гц, доцільно виконати його за технологією підсилювачів постійного струму (ППС), які в інтегральному виконанні відомі як операційні підсилювачі.

Кінцева схема розробленого підсилювача набуде вигляду, приведенного на рис. 2.7.

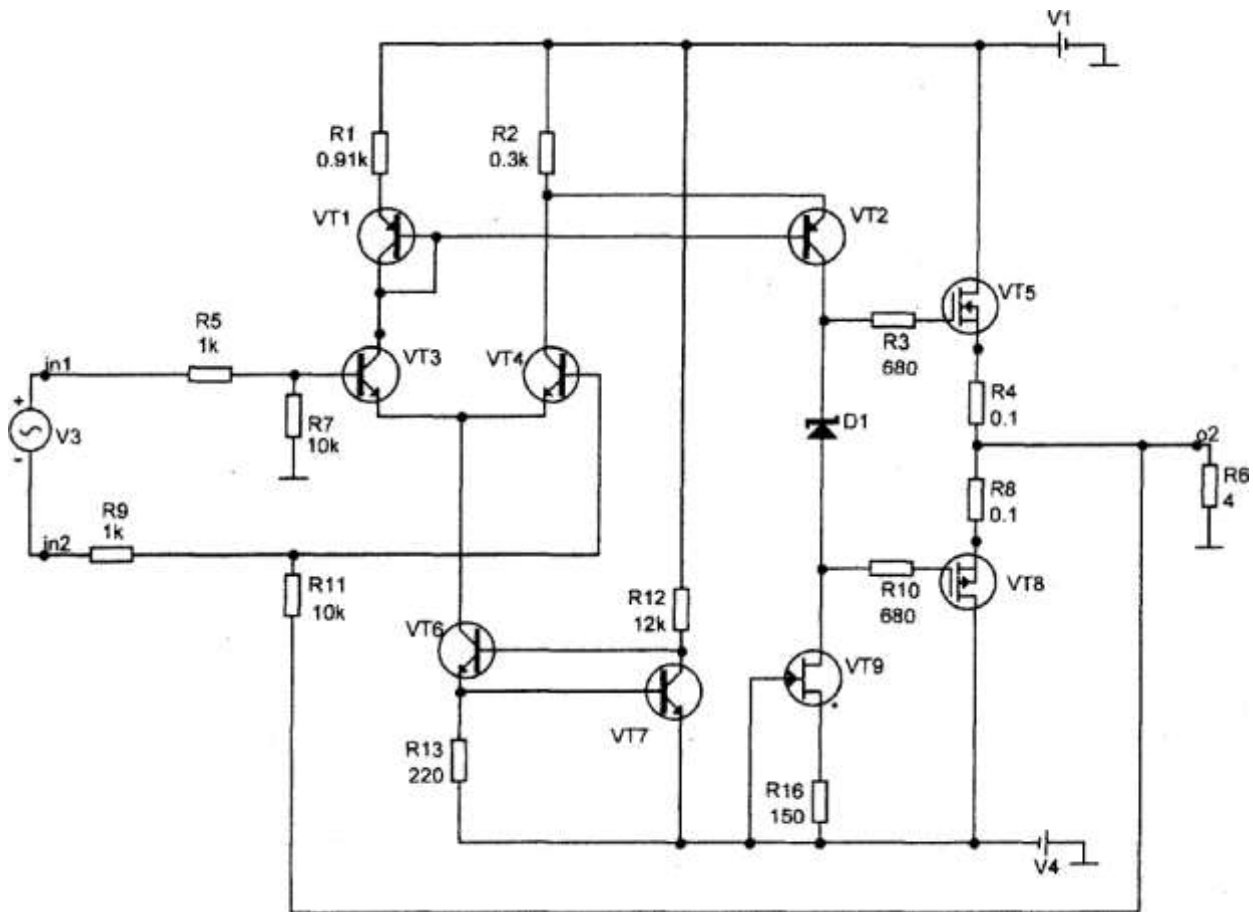


Рисунок 2.7 – Повна принципова схема підсилювача

Визначення коефіцієнта гармонік. Для вхідного диференційного каскаду на БТ коефіцієнт гармонік

$$k_{\Gamma 1 \max} \approx \frac{U_{BX \max}^4}{4\varphi_T^4} = \frac{(5 \cdot 10^{-3})^4}{4\varphi_T^4} = 0,04\%,$$

де $U_{BX \max}$ - амплітудне значення вхідного сигналу.

На жаль, ця формула справедлива тільки для режиму малого сигналу.

Для великого вхідного сигналу k_{Γ} визначимо шляхом імітаційного моделювання.

Коефіцієнт гармонік для другого каскаду

$$k_{\Gamma 2} \approx \frac{U_{BX \max}^2}{\Phi_{\Gamma}^2} = \frac{(5 \cdot 10^{-3})^2}{2} = 4\%.$$

Коефіцієнт гармонік для вихідного каскаду на ПТ визначається так:

$$k_{\Gamma 3} \approx \frac{I_{CIII} \cdot U_{BX \max}^2}{I_C \cdot (1 + S \cdot R_B)^4 \cdot U_0^2} = 0.65\%.$$

Отже, сумарний коефіцієнт гармонік

$$k_{\Gamma} = k_{\Gamma 1} + k_{\Gamma 2} + k_{\Gamma 3} = 0,04 + 4 + 0,65 = 4,69\%.$$

Зменшити коефіцієнт гармонік можна введенням від'ємноговоротнього зв'язку. В цьому випадку

$$k_{\Gamma'} = \frac{K_{\Gamma}}{(1 + \beta \cdot K_U)^2},$$

де K_{Γ} - коефіцієнт гармонік для підсилювача з розірваною петлею зворотнього зв'язку.

Для досягнення коефіцієнту гармонік 0,3% слід вибрати

$$1 + \beta \cdot K_U = \sqrt{\frac{K_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}} = \sqrt{\frac{0,65}{0,3}} = 1,47.$$

Дослідження підсилювача на стійкість. Частота одиничного підсилення вхідного каскаду

$$f_{od.n} = \frac{S}{2\pi C_{KB}},$$

де S - крутість вихідного каскаду: $S = \frac{1}{r_e} = \left(\frac{25}{1,5}\right)^{-1} = 60 \text{ мА/В};$

C_{KB} - ємність колекторного переходу ($C_{KB} = 7 \text{ пФ}$).

Підставимо дані:

$$f_{од.н} = \frac{60 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 7 \cdot 10^{-12}} = 1.36 ГГц$$

Для другого каскаду

$$S \approx \left(\frac{\varphi_T}{i_e} \right)^{-1} = \left(\frac{25}{3} \right)^{-1} = 0.12 A/B$$

Частота одиничного підсилення:

$$f_{од.н} = \frac{0.12}{2 \cdot \pi \cdot 7 \cdot 10^{-12}} = 2.73 ГГц$$

Для вихідного каскаду, виконаного на польових транзисторах

6,2

$$f_{од.н} = \frac{S}{2\pi C_{ПР}} = \frac{S}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 9,86 \text{ ГГц},$$

$$\text{де } S = \frac{I_H}{U_H} = \frac{3,5}{1,5} = 0,23 \text{ См.}$$

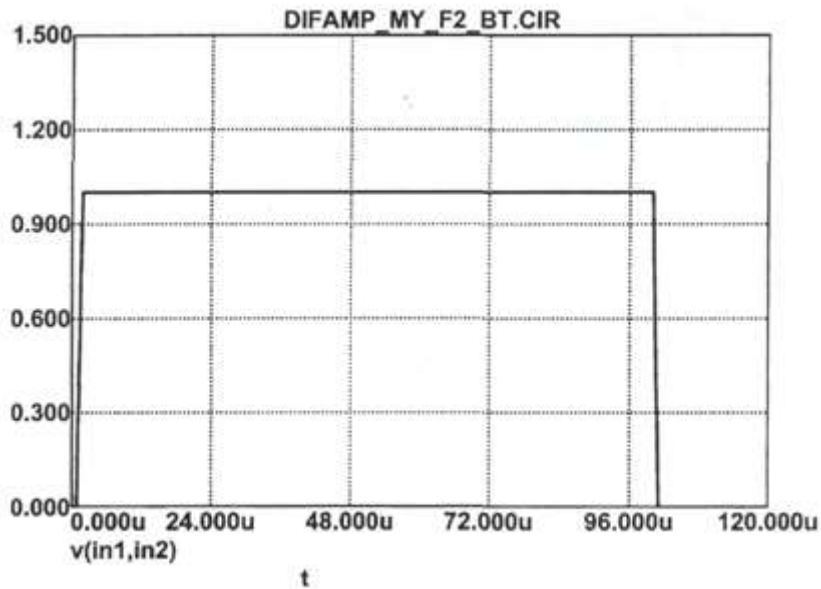
Значення одиничного підсилення для вихідного каскаду є найбільшим з усіх каскадів, тому, користуючись властивостями ЛАЧХ, знайдемо наближено частоту зрізу розроблюваного підсилювача:

$$f_{зр} = \frac{f_{од.н}}{K_U} = \frac{1.366 \cdot 10^9}{4000} = 341.6 \text{ кГц}$$

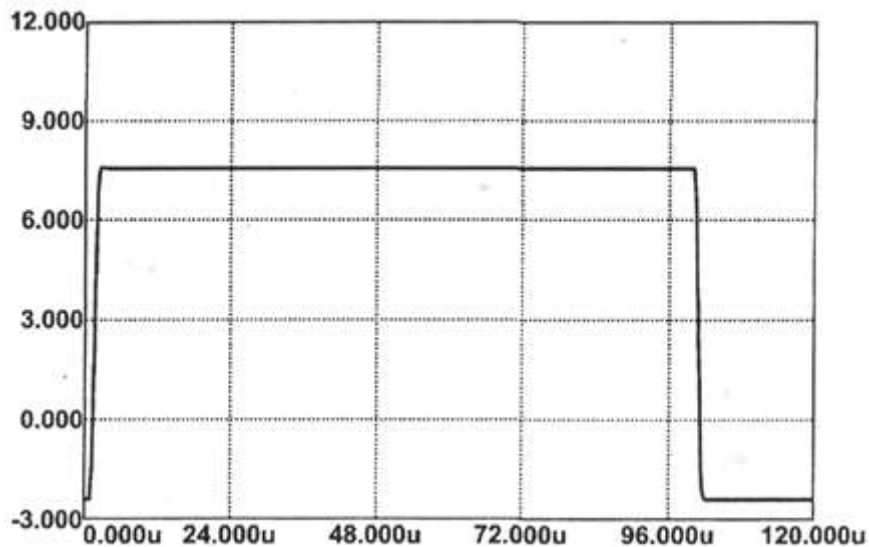
Одержане значення показує, що розроблюваний підсилювач забезпечує необхідну смугу пропускання з достатнім запасом (34 кГц проти 200 кГц).

Перевірку частотних характеристик підсилювача здійснимо числовим методом за допомогою програми Місго-Сар 7. Результати моделювання, наведені на рис. 2.8, свідчать про стійкість розроблюваного підсилювача - наявність запасу по фазі на частоті одиничного підсилення.

На перехідній характеристиці видно відсутність викидів, що свідчить про відсутність явища перерегулювання



а)

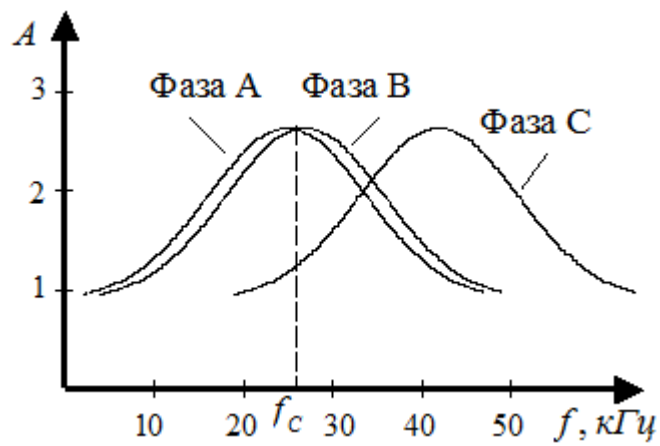


б)

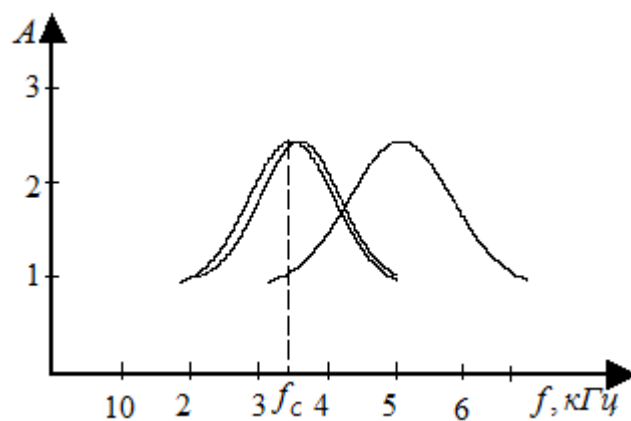
Рисунок 2.8 – Перехідна характеристика підсилювача

Виходячи зі схеми заміщення АД та його функції передачі, було проведено моделювання зміни технічного стану АД, а саме визначення стану витків статорної обмотки (короткозамкненість) та степені стану ізоляції. Для цього моделювали тестовий вплив – зміну гармонічного сигналу від 20 Гц до 20кГц постійної амплітуди і зміну технічного стану шляхом зміни параметрів схеми заміщення АД – R , L і C_u , R_u .

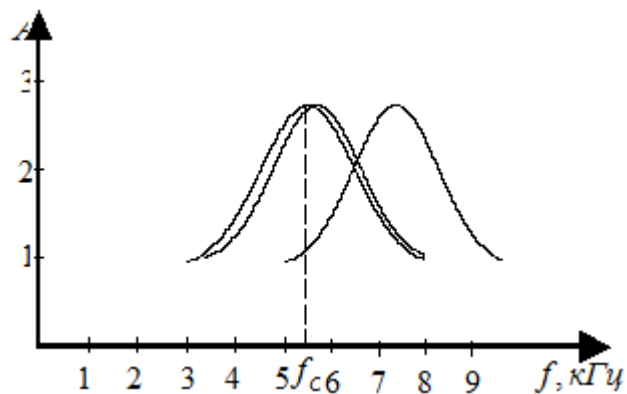
Результати моделювання наведені на рис.2.9.



а)



б)



в)

Рисунок 2. 9 -Амплітудно-частотні характеристики обмоток АД при: а – 10%, б – 18% і в – 21% короткозамкнутих витків в обмотці С.

Як видно з рис. 2.9 збільшення відсотку короткозамкнутих впливів, або погіршення стану ізоляції призводить до зміщення АЧХ в зону висотких частот.

3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Вібродіагностична система ПУЛЬС

Система руху PULSE [20–23] призначена для селекції та обробки вібраційних сигналів обертових механізмів, виявлення та запобігання аварійним ситуаціям у турбогенераторах, нафтоперекачувальних станціях, бурових установках, а також діагностики обертових тіл, електродвигунів, газоперекачувальних агрегатів, козлових кранів та енергоблоків.

На рисунку 3.1 показано зовнішній вигляд системи вібраційної діагностики PULSE.



Рисунок 3.1.- Зовнішній вигляд система PULSE

Система складається з таких основних компонентів:

- диференціальний підсилювач сигналу;
- лінійний фазовий аналого-цифровий фільтр 8-го порядку;
- контур вихідного буфера;
- схема керування частотою зрізу низькочастотного фільтра;
- високошвидкісний аналого-цифровий перетворювач Е 20-10 [24–28] з плати L-card;
- канал синхронізації вибору сигналу;
- модуль регулятора температури;

- джерело живлення;
- персональний комп'ютер з блоком підтримки алгоритмів для крос-кореляції та крос-спектрального аналізу багатовимірних вібраційних сигналів.

Для тестування системи вібраційної діагностики PULSE можна використовувати вібромеханічний стенд ВМС-1 [27–31] (рис. 3.2) для дослідження ймовірнісних характеристик багатовимірних вібраційних сигналів від елементів та вузлів обертових механізмів.

Вібромеханічний стенд ВМС-1 встановлено на прямокутному зварному металевому шасі. Він оснащений асинхронним двигуном LENZE потужністю 2,2 кВт, який приводить у рух вал довжиною 720 мм (холоднопресований), встановлений на підшипниках за допомогою гнучкої муфти.

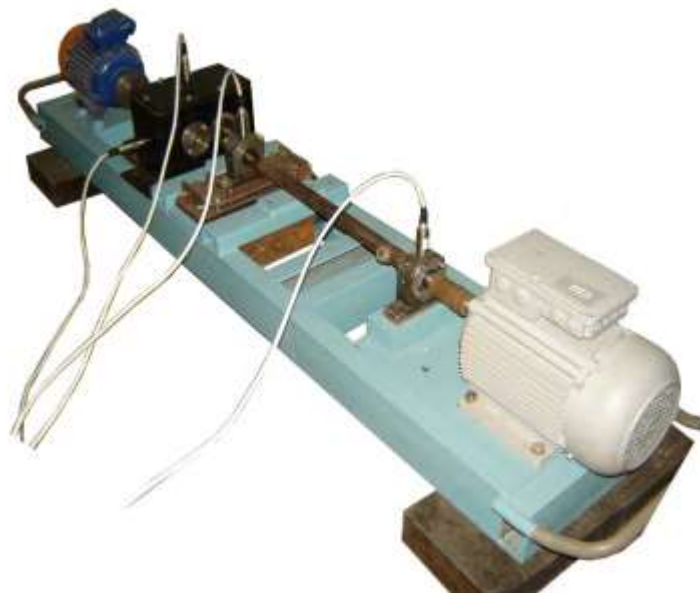


Рисунок 3.2 - Загальний вигляд стенду ВМС-1

Стійка ВМС-1 з системою вібраційної діагностики PULSE:

- реєстрація;
- вимірювання;
- аналогова низькочастотна фільтрація вібраційних сигналів;
- підсилення вібраційних сигналів;
- перетворення аналогових сигналів у цифрові коди;

- запис цифрових сигналів у пам'ять персонального портативного пристрою комп'ютера;
- основні типи цифрових фільтрів, перетворення Гільберта, диференціація вібраційних сигналів;
- статистичний спектрально-кореляційний аналіз вібраційних сигналів у
- стаціонарному підході;
- розрахунок математичного часу очікування вібраційних сигналів для реалізації ПКВП;
- розрахунок періоду кореляційної функції вібраційного сигналу як реалізація ПКВП;
- виділення детермінованої складової вібраційного сигналу та розрахунок її параметрів;
- періодична стаціонарна складова та її періодична ізоляція спектральний кореляційний аналіз методом ПКВП;
- виділення модулюючих стаціонарних складових вібраційного сигналу та їх статистичний аналіз;
- побудова та розрахунок параметричної моделі вібраційного сигналу діагностичних ознак;
- статистичне моделювання моделей ПКВП заданого вібраційного сигналу спектральної кореляційної структури;
- статистичний аналіз поліритмічних сигналів за допомогою методу квазі-ПКВП;
- ймовірнісна оцінка результатів статистичного спектрального кореляційного аналізу періодичних та квазіперіодичних корельованих нестаціонарних вібраційних сигналів.
- кореляційний аналіз багатовимірних вібраційних сигналів;
- крос-спектральний аналіз багатовимірних вібраційних сигналів.

3.2 Аналіз вібраційних сигналів підшипникових вузлів

Дослідження відмов підшипникового вузла, від локальних дефектів у ньому до відмов бабітової футеровки.

Для наочності коротко проаналізуємо зміни ймовірнісних характеристик вертикальної складової вібраційного сигналу підшипникового вузла [32–38]. Частота дискретизації сигналу становила 2 кГц, а час дискретизації – 20 секунд. Як видно з графіків (рис. 3.3), виявлення дефектів викликає періодичні викиди з частотою, що відповідає частоті обертання вала, причому в нижній частині графіків амплітуда збільшується зі збільшенням розміру дефекту.

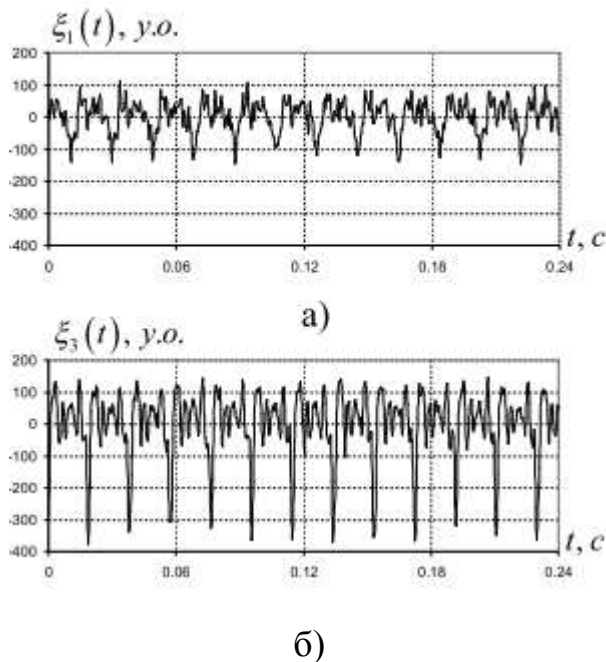


Рисунок 3.3 - Вібраційні сигнали вертикальної складової

Наявність дефектів викликає сильні випромінювання у хвості кореляційної функції, амплітуда яких зростає зі збільшенням дефекту (рис. 3.4). Варто зазначити, що середня потужність вібраційного сигналу зростає зі збільшенням дефекту.

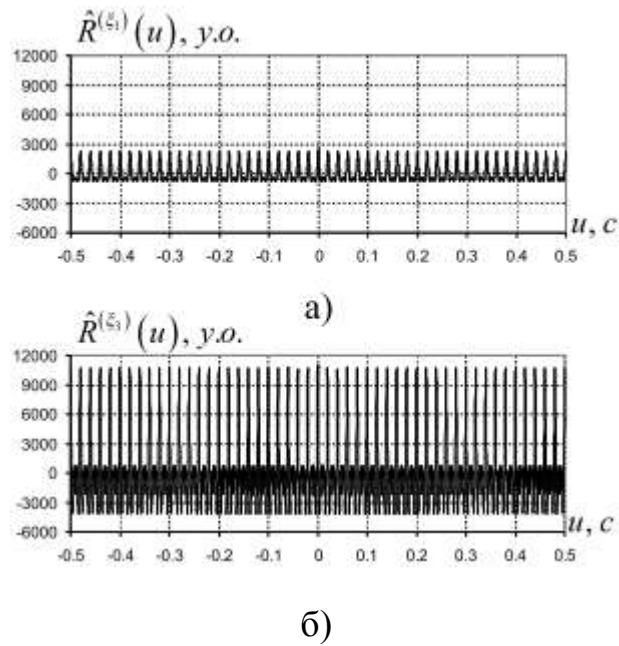


Рисунок 3.4 - Кореляційні функції вертикальної складової

У спектральній щільності потужності вібраційного сигналу стаціонарного наближення (рис. 3.5) присутня основна гармонічна складова [39–44], що відповідає частоті обертання вала (50 Гц) та її кратним. В основному, всі гармонічні складові зосереджені в смузі частот до 500 Гц. Поява дефекту та його збільшення спричиняє появу вищих гармонічних складових та збільшення їх амплітуди.

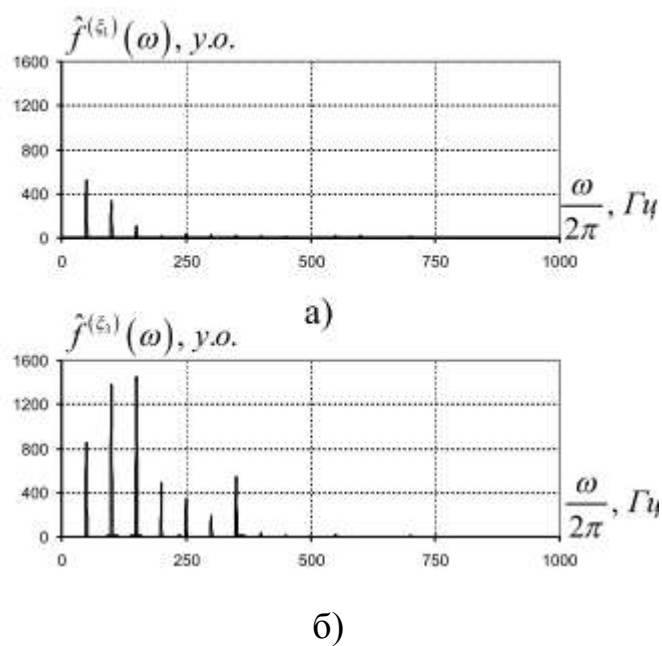


Рисунок 3.5- Спектральні густини вертикальної складової

При аналізі стохастичних складових вібраційного сигналу розподіл та фур'є-складові цих складових були розраховані за допомогою компонентного методу. Графіки розподілу показують, що розподіл початково вибраної стохастичної складової вібраційного сигналу має невеликі коливання потужності відносно певного рівня [45–51], що свідчить про нерухомість цієї складової сигналу та, як наслідок, відсутність дефектів у вузлі підшипника (рис. 3.6, а).

Поява дефектів за наявності стохастичних складових вібраційного сигналу набуває характеристик нерівномірності другого порядку, що проявляється у виникненні сильних розбіжностей у розподілі протягом певного періоду часу (рис. 3.6,б).

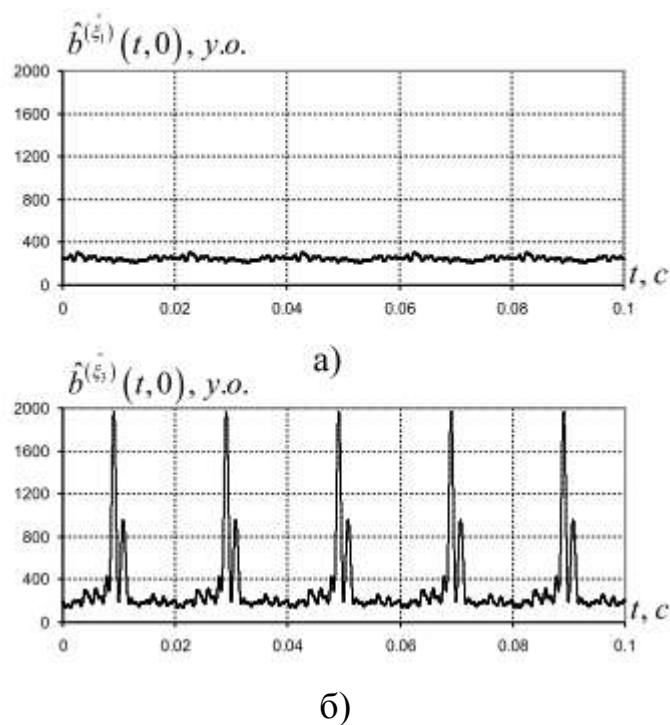


Рисунок 3.6 - Дисперсії стохастичних складових вертикальної складової

На початку дослідження серед значущих компонентів дисперсії Фур'є стохастичної складової виділеного вібраційного сигналу присутня лише нульова складова (рис. 3.7, а). Поява дефектів призводить до появи більшої кількості гармонійних компонентів дисперсії та збільшення їх амплітуди [50–55]. Через певний час дисперсія стохастичної складової виділеного вібраційного сигналу містить 15 значущих компонентів (рис. 3.7, б).

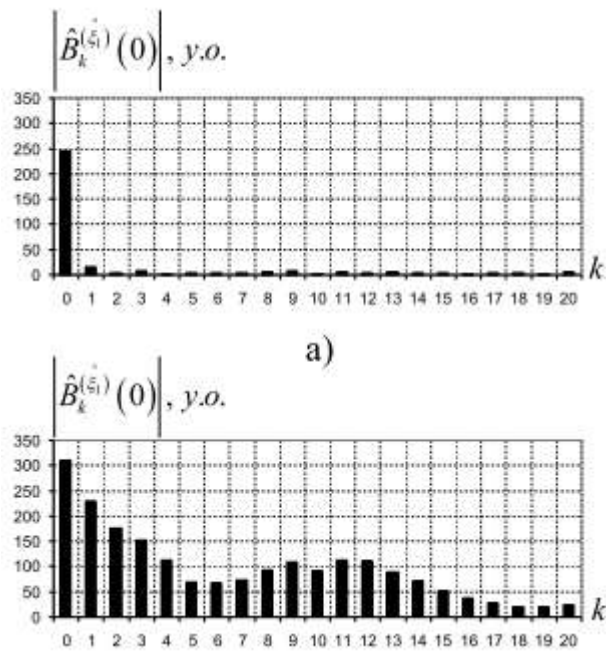


Рисунок 3.7- Компоненти дисперсії стохастичних складових вертикальної складової

Використані вище характеристики сигналу виявилися ефективними у виявленні інших дефектів у вузлах підшипників: «насичення мастилом», збільшений зазор між валом і бабітовою прокладкою та тріщини бабіту.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних небезпек і шкідливостей виробничого середовища

Особливості нафтогазових підприємств обумовлені насамперед фізичними і хімічними властивостями нафти і нафтового газу, їх вибуховістю при певних умовах і токсичності [44–46].

Пари легких фракцій нафти в суміші з повітрям при певних концентраціях утворюють вибухонебезпечні суміші. Вогненебезпечність сирової нафти характеризується температурами спалаху - найнижча температура при тиску 760 мм рт. ст., при якій вогненебезпечна рідина при випаровуванні утворює з повітрям суміш, яка дає спалах при піднесенні до неї відкритого полум'я.

Тверді, рідкі і газообразні речовини, які нагріваються зовнішнім джерелом тепла до відомої температури, при наявності кисню можуть зайнятися. Температура самозайняття більшості нафти змінюється в залежності від вуглеводневого складу від 260 до 375 С.

На підприємствах нафтогазового комплексу основними забруднюючими компонентами повітря є пари бензинів, нафти, сірчаний ангідрид, сірководень, окисли азоту, вуглеводні і механічні суміші. Їхня характеристика наведена в таблиці 4.1

При роботі з електрообладнанням завжди виникає небезпека ураження електричним струмом.

Електротравму працюючий може отримати у випадку доторкання до металевих частин електроустановок, які знаходяться під напругою, внаслідок пошкоджень електричної ізоляції; у випадку знаходження поблизу місць пошкодження електричної ізоляції або місць замикання токоведучих частин на землю (ураження визвані кроковою напругою).

Найбільш шкідливим є змінний струм промислової частоти 50 Гц. Він сильно діє на центральну нервову систему і спричиняє скорочення м'язів. Постійний струм менш шкідливий. Фізіологічна дія його в основному тепла .

Таблиця 4.1 -Характеристика шкідливих речовин.

Назва речовини	ГДК (гранично-допустима концентрація) даної речовини		Перша допомога при отруєнні
	В робочій зоні	Середньо-добова в атмосфері населених пунктів	
Бензин	100	1,5	Свіже повітря, тепло, 20-30 капель валеріани
Сірчаний ангідрид	10	0.05	Свіже повітря, тепло, дезинфекція, промивання шлунку
Газовий конденсат	300	5	Свіже повітря, дезинфекція
Пари нафти	300	-	Свіже повітря

Чим довше людина знаходиться під дією струма, тим сильніше і серйозніші наслідки після ураження. В зв'язку з цим виключно важливо швидко і правильно організувати допомогу потерпілому. Шлях струму в організмі людини теж має велике значення для потерпілого (найбільш шкідливий шлях вздовж осі тіла).

4.2 Забезпечення нормальних умов праці

Роботи на газотранспортних підприємствах зачасти проводяться на відкритому повітрі, тому вони зв'язані з впливом на працюючих різноманітних метеорологічних умов (температури, вологості повітря, вітру, природнього випромінювання) [44–46].

Несприятливі метеорологічні умови можуть являтися причиною нещасних випадків. При високій температурі повітря знижується увага, з'являється торопливість і необачність; при низькій - зменшується рухомість кінцівок внаслідок інтенсивності тепловіддачі організму. Впливає на тепловіддачу організму і вологість повітря: нормально при температурі біля 18⁰ С вологість

повинна знаходитися в межах від 35 до 70%. При меншій відносній вологості повітря рахується сухим, при більшій - з підвищеною вологістю. Це від'ємно сказується на організмі людини. Сухе повітря приводить до підвищеного випаровування і внаслідок цього з'являється сухість слизових оболонок і шкіри. Дуже вологе повітря, навпаки, затруднює випаровування.

При роботі на відкритому повітрі правилами безпеки передбачені заходи по захисту працюючих від дії несприятливих метеорологічних факторів: постачання працюючих спецодягом та спецобув'ю; улаштування укриття, зонтів над робочими місцями, приміщень для обігріву працюючих і т.д.

Під час сильних морозів, вітрів, злив всякі роботи забороняються.

Технічні засоби захисту від потенційно небезпечних виробничих факторів зведено в таблиці 4.2.

Для забезпечення нормальних умов праці при безпосередній взаємодії з електрообладнанням слід вживати ряд захисних заходів.

Таблиця 4.2 - Технічні засоби захисту від потенційно небезпечних виробничих факторів

Небезпечний фактор виробничого середовища	Зпроекований чи вибраний засіб захисту	Технічна характеристика пристрою чи засобів
Падіння з висоти	Запобіжний пояс для монтажників	ВР чи ВМ за ГОСТ 12.4.089-80
Небезпека електротравматизму	Індивідуальні засоби захисту	Диелектричні рукавиці ТУ38-40-632-72 Чоботи гумові диелектричні ТУ-38-108-97-70
	Заземлення	Шафа з обладнанням

Одним з основних захисних заходів є заземлення будь - якої частини електричної установки.

Захисне заземлення утворює між металевими конструкціями або корпусом захищеного пристрою і землею електричне з'єднання достатньо малого опору,

внаслідок чого величина струму, який проходить через тіло людини, стає нешкідливою для життя людини і його здоров'я.

Заземлення цього виду застосовують в мережах вище 1000 В з заземленою нейтраллю. У цьому випадку струми однофазного замикання протікають через землю і відключають аварійну ділянку.

У приладах з напругою до 1000 В з заземленою нейтраллю застосовується система з захисними провідниками, які з'єднані з цією нейтраллю. У такому з'єднанні при замиканні струмоведучих частин з заземленими частинами установки виникає коротке замикання, внаслідок чого аварійна ділянка відключається за допомогою автомата або запобіжника. Вказана система заземлення забезпечує автоматичне відключення ділянки мережі, на якій відбулося замикання провідника, який знаходився під напругою, з металевими частинами установки.

У тих випадках, коли забезпечити безпеку за допомогою заземлення важко, застосовують системи захисного відключення, які забезпечують швидке відключення (на протязі від 0,1 до 0,2 сек) установки або її частини при однофазних замиканнях на землю або на корпуси обладнання.

Персонал, який обслуговує СВР, повинен мати уяву про небезпеку електричного струму, про правила електробезпеки і вміти надати першу допомогу при ураженні електричним струмом.

За справний стан електрообладнання несе відповідальність служба головного енергетика підприємства. При огляді електрообладнання впевнюються в справності пристрою, звертають увагу на стан ізоляції кабелю, заземляючої проводки. Електромонтер повинен працювати в діелектричних рукавицях з використанням струмопошукача, інструмента з ізольованими ручками, електромонтерського поясу.

У відкритих розподільних пристроях і в сиру погоду можуть бути використані ізолюючі засоби спеціальної конструкції. Перед кожним використанням перевіряють справність захисних засобів, відсутність зовнішніх

ушкоджень, відчищують і обтирають від пилу. Гумові рукавиці перевіряють на відсутність проколів.

Всі захисні засоби повинні зберігатися у точній відповідності з правилами і періодично оглядатися, а також проходити електричні та механічні випробування в строки і по нормам, які встановлені вказаними правилами.

4.3 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення - це передбачене електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих неструмоведучих частин, які можуть бути під напругою внаслідок замикання на корпус і по інших причинах.

Призначення захисного заземлення - усунення небезпеки ураження струмом випадку дотику до корпусу електроустановки і інших неструмоведучих металевих частин, які виявилися під напругою внаслідок замикання на корпус і по інших причинах.

Принцип дії захисного заземлення - зниження до безпечних значень напруги дотику і кроку, які обумовлені замиканням на корпус і по іншим причинам. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зменшенням опору заземлювача), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземлюваного обладнання (підйомом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, яке близьке до значення потенціалу заземленого обладнання).

Захисне заземлення являється найбільш простою і в той же час дуже ефективною мірою захисту від ураження струмом при появі напруги на металевих неструмоведучих частинах.

Заземлюючим пристроєм називається сукупність заземлювача - провідників (електродів), які з'єднані між собою і знаходяться в безпосередньому дотику з землею, і заземлюючих провідників, які з'єднують заземлюючі частини електроустановки з заземлювачем.

Найбільший допустимий опір захисного заземлення в електроустановках з напругою до 1000 В не перевищує 10 Ом. Заземлення виконуємо з стержнів діаметром 20 мм і довжиною 3 метри.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{роз} = \rho_6 \cdot \psi, \quad (4.1)$$

де ρ_6 - виміряний питомий опір ґрунту, ψ - кліматичний коефіцієнт.

З таблиці питомий електричних опорів ґрунтів і кліматичних коефіцієнтів визначаємо кліматичний коефіцієнт для сухого ґрунту - $\psi_3 = 1.4$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{роз} = 100 \cdot 1.4 = 140 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Опір заглибленого вертикального заземлювача знаходимо по формулі:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+l}{4H-l} \right), \quad (4.2)$$

де ρ - питомий опір ґрунту; l - довжина стержня; d - діаметр;

$H_0 \geq 0.5$ м - відстань від верхнього кінця заземлювача до поверхні;

H - відстань від поверхні до середини заземлювача.

Підставляючи в формулу (4.2) числові значення $H = 1.1$ м, $l = 3$ м, $d = 0.02$ м, $\rho = 140$ Ом · м отримуємо опір розтіканню струму одиничного заземлювача:

$$R = \frac{140}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0.02} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 1.1 + 3}{4 \cdot 1.1 - 3} \right) = 7.427 (\ln 500 + 0.5 \ln 1.58) = 42.3 \text{ Ом},$$

Необхідну кількість паралельно з'єднаних заземлювачів визначаємо з формули:

$$n = \frac{R_1}{R_{из} \cdot \eta_3}, \quad (4.3)$$

де R_1 - опір розтіканню струму одного заземлювача, $R_{из}$ - максимально допустимий опір усіх штучних заземлювачів, η_3 - коефіцієнт використання заземлювачів, в якому враховується їх взаємне екранування. Для визначення коефіцієнта потрібно задати конфігурацію розташованих заземлювачів.

Розглянемо випадок, коли вертикальні стержні розташовані по контуру квадрата 15х15 м. Якщо відстань між заземлювачами складає 3 метри, то по периметру квадрата можна розмістити 10 стержнів. В якості з'єднувальної смуги використовуємо сталю шну 40х4 мм. Довжина з'єднувальної шини визначається периметром квадрата 15х15 метрів і рівна 60 метрів.

Опір розтіканню струму шини обчислюється по формулі для обчислення опору горизонтального заглибленого заземлювача:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bH}, \quad (4.4)$$

де ρ - питомий опір ґрунту; l - довжина заземлювача; H - віддаль від поверхні до заземлювача; b - ширина заземлювача.

Опір з'єднуючої шини:

$$R = \frac{140}{2\pi 60} \ln \frac{2 \cdot 60^2}{0.04 \cdot 0.6} = 0.37136 \cdot \ln 300000 = 4.6834 \text{ Ом.}$$

Так як відношення відстані між вертикальними стержнями до їх довжини рівне одиниці, число заземлювачів $k=10$, то коефіцієнт використання горизонтальної з'єднуючої смуги $\eta_n=0.34$. З врахуванням цього коефіцієнта опір шини:

$$R_z = \frac{4.6834}{0.34} = 13.6 \text{ Ом.}$$

Вертикальні стержні і горизонтальну шину розглядаємо як два паралельно з'єднаних опори. Тоді необхідний сумарний опір вертикальних заземлювачів знаходиться з умови:

$$R_{\text{вз}} \leq \frac{R_z \cdot R_0}{R_z + R_0}, \quad (4.5)$$

де $R_{\text{вз}}$ - опір розтіканню струму вертикальних заземлювачів;

R_z - опір розтіканню струму з'єднуючої шини;

R_0 - максимально допустимий опір заземлюючого пристрою.

Враховуючи коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів $\eta_s=0.5$ (при відношенні відстані між заземлювачами до їх довжини $S/l = 1$. І числі стержнів $k= 10$), визначаємо необхідну кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_l}{\eta_3 \cdot R_{\text{вз}}} = \frac{42.3}{0.5 \cdot 34.198} = 2.82 \approx 3 \text{ шт.}$$

Отже опір заземлювачів, розміщених по контуру квадрата 15x15 м не перевищує максимально допустимого значення 10 Ом.

4.4 Пожежна безпека та заходи безпеки при обслуговуванні електрообладнання

На підприємствах газотранспортної промисловості особливо ретельно потрібно планувати пожежний захист, оскільки дуже велика ймовірність виникнення пожежі. Всі речовини, з якими працюють на даних підприємствах є пожежонебезпечні і вибухонебезпечні

Джерелом пожежі також може бути і електро обладнання. Внаслідок виходу з ладу певних пристроїв може відбутись коротке замикання, дуговий пробій, іскри, що призводить до спалахування нафтопродуктів. Для ефективної боротьби з пожежою поруч з спорудами, у приміщеннях розміщено первинні засоби пожежогасіння. В таблиці 4.3 приведені первинні засоби пожежегасіння які необхідні при усуненні небезпеки пожежі.

Таблиця 4.3 - Первинні засоби пожежогасіння

Споруди	Категорія робіт по СНіП	Захисна площа, м ²	Первинні засоби пожежогасіння			
			Вуглекислотний вогнегасник	Пінний хімічний вогнегасник	Брометилловий вогнегасник	войлок-кошма
Резервуар з нафтопродуктами	А	70	ОУ-2 2 шт.	СХП-10 1 шт.	ОУБ-3А 1 шт.	2×2 2 шт.

При пожежах, ураженні людини електричним струмом, електрообладнання повинно бути відключеним.

Пожежна безпека давача рівня та мікропроцесорного модуля забезпечені конструкцією та відповідають вимогам пожежної безпеки по ГОСТ 12.1.004.

4.5 Охорона навколишнього середовища

У виробничих приміщеннях та на робочих місцях для прийняття своєчасних заходів по запобіганню можливості наявності шкідливих речовин, які перевищують допустимі санітарні норми і вимоги вибухонебезпечності, за допомогою постійного контролю якості повітря. Існує три способи виявлення газів та парів у повітрі: лабораторний, за допомогою індикаторів і автоматичний. Лабораторний спосіб самий точний, але внаслідок тривалого часу на виявлення його використовують в якості контрольного.

Аналізи повітря швидко проводяться автоматичними способами, тому вони отримали широке розповсюдження. Для визначення вмісту метана і парів легких погонів нафти у повітрі застосовують переносні електричні газоаналізатори МБ - 2 ВЗГ і ГБ - 3. Принцип дії газоаналізаторів однаковий: підвищення температури платінової спіралі, яка нагріта електричним струмом, при каталітичному згоранні на її поверхні пального компонента проби.

Для визначення наявності сірководню у повітрі використовується індикатор ВНИИТБ, який складається з мембраного насоса з рукояткою, шкали і змінною індикаторною трубкою, які занурені у дерев'яний футляр. В індикаторній трубці знаходиться стовбець сілікагеля, який насичений розчином оцетнокислого свинцю. Через нього пропускають 100 см³ досліджуваного повітря. Під дією сірководню оцетнокислий свинець темніє і фарбує сілікагель. Степінь фарбування його зрівнюють зі шкалою і визначають концентрацію сірководню.

Вміст сірководню у повітрі також визначається більш простим способом (але не точним) за допомогою фільтрувальної бумаги, яка змочується двопроцентним розчином оцетнокислого свинцю. При наявності сірководню фільтрована бумага приблизно через двадцять сек починає темніти. По степені потемніння говорять про концентрацію сірководню у повітрі: зміна бумаги від світло - жовтого до жовто - коричневого кольору вказує на концентрацію

сірководню в межах від 10 до 12 мг/м³, від жовто - коричневого до бурого від 20 до 60 мг/м³, від бурого до чорного від 60 до 152 мг/м³. Використовують для цієї мети і лакмусову бумагу, яка при наявності у повітрі сірководню червоніє.

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел у цій бакалаврській роботі показує, що на сьогоднішній день методологічні принципи діагностування електричних машин розроблені. Однак широко використовуваних на практиці методів діагностики немає. Це пов'язано з різноманітністю конструкцій електричних машин, їх призначення та умов експлуатації.

У зв'язку з цим, в результаті проведених у ході роботи досліджень, не вдається розробити єдиний метод та технічні засоби для діагностики електричних машин широкого спектру планування, що вимагає розробки методів їх діагностики, виходячи з конструктивних особливостей конкретної електричної машини та конкретних умов її експлуатації:

- виконано моделювання дефектів вібраційного пошкодження, а саме - визначено дефект вібраційного пошкодження, визначено формулу для визначення власної частоти коливань;
- на основі аналізу параметрів, що визначають технічний стан АД, обґрунтовано вибір методу його діагностики - частотно-резонансного;
- розроблено підсилювач потужності для електричних сигналів аудіодіапазону та визначено його частотні характеристики.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Основи автоматики та автоматизації: навч. посіб. / Є. П. Пістун, І. Д. Стасюк;. – Львів: Нац. ун-т "Львів. політехніка", 2014. - 333 с.
2. Ельперін І. В. Автоматизація виробничих процесів: підр. / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. – К.: Вид-во Ліра-К, 2015. – 378 с.
3. Kozhubaev Y.N. Fuzzy control system for belt conveyor / Y.N. Kozhubaev, I.M. Semenov // Results of Joint Research Activity of Scientists from SaintPetesburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover Proceeding of Symposium on. Automamated Systems and Technologies. – Hannover.: Leibniz University of Hannover – 2014. P. 111-114.
4. Lihua Shao, Typical Failure Analysis and Processing of Belt Conveyor / Shao Lihua // Volume 26 – 2011. P. 942-946.
5. Nechay O.M. Research of starting and braking modes of asynchronous electric pumps. Electrical and Computer Systems – 2014. no. 15 (91), P. 169-172.
6. Shirong, Z. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems / Z.Shirong // Applied Energy – 2010 – June 2014. P. 929-937.
7. Vasilyev D.S. Study of electromechanical processes in direct start-up and braking of asynchronous motors with the variables and comparing them with soft start and braking. Bulletin of the Kremenchug National University. – 2010. no. 4 (60).CH.1. P. 43-49. 75
8. Philip J. DomenicucciJean-Sebastien LabrieAlain Lemieux. Oven chain measurement system. 2013.
9. Viren, E. A. A Comparison of Drive Starting Mechanisms for Aggregate Belt Conveyors / E.A. Viren // SME Cincinnati. - Ohio, USA – 2013. 10 p
10. Masaharu Ogawa. Tunnel oven for making confectionery and bread: pat. JPH05168392A USA. 1991.
11. Douglas S. JonesPaul R MolloyWilliam J. Day J. Conveyorized oven with moisture laden air impingement and method: pat. US7258881B2 : IPC A21B1/48;

A21B1/245; A21B3/04; A23L3/18; A23L3/185; A23L3/365; A23L5/17 USA. 2002.

12. Електричні схеми III напівпровідники (Kuphaldt). Режим доступу – [https://ukrayinska.libretexts.org/Робоча_сила/Технологія_електроніки/Книга:_Електричні_схеми_III_напівпровідники_\(Kuphaldt\)/04:_Біполярні_транзистори/4.1](https://ukrayinska.libretexts.org/Робоча_сила/Технологія_електроніки/Книга:_Електричні_схеми_III_напівпровідники_(Kuphaldt)/04:_Біполярні_транзистори/4.1)
13. Електричні схеми IV цифрова схемотехніка (Kuphaldt). Режим доступу – [https://ukrayinska.libretexts.org/Робоча_сила/Технологія_електроніки/_Книга:_Електричні_схеми_IV_цифрова_схемотехніка_\(Kuphaldt\)/03:_Логічні_ворота/3.10:_Рівні_напруги_логічного_сигналу](https://ukrayinska.libretexts.org/Робоча_сила/Технологія_електроніки/_Книга:_Електричні_схеми_IV_цифрова_схемотехніка_(Kuphaldt)/03:_Логічні_ворота/3.10:_Рівні_напруги_логічного_сигналу)
14. Бойко В. І. Основи технічної електроніки: У 2 кн. Кн.2 Схемотехніка: підручник / Бойко В. І., Гурій А. М., Жуйков В. Я. та ін. – К. : Вища школа, 2007. – 510 с.
15. Структурна схема та принцип роботи мікросхеми ШІМ-контролера з додатковою зворотним зв'язком по струму. – Режим доступу: <http://ua.nauchebe.net/2015/04/strukturna-sxema-ta-princip-roboti-mikrosxemi-shim-kontrolera-z-dodatkovoyu-zvorotnim-zvyazkom-po-strumu/>
16. Ревко А.С. Широтно-імпульсна модуляція в квазірезонансних перетворювачах / А. С. Ревко, Д. М. Брика // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 5. – 2006. – С. 125-128.
17. Яворський І. М. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів / І. М. Яворський, П. П. Драбич, І. Ю. Ісаєв та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К. : Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – С. 113–122.
18. Texas Instruments [Електроний ресурс] / TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>

19. Мироненко П.С. Стенд для перевірки працездатності низькочастотних інерціальних модулів / П.С. Мироненко, О.М. Павловський // Вісник НТУУ «КПІ» Серія «Приладобудування» – 2018. – №56 (2), с. 7-13.
20. Яворський І. М. Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Й. Мацько, І. Г. Стецько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 4. – С. 36–41.
21. Пат. 103105 Україна, МПК G01H 11/00, G01M 7/02, G01M 13/04. Вібромеханічний стенд / Р. М. Юзефович, І. Б. Кравець, І. Г. Стецько, П. Б. Дуб, І. М. Яворський; власник Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України. – № а 2012 02316, заявл. 27.02.2012 ; опублік. 10.09.2013, Бюл. № 17.
22. Пат. 102759 Україна, МПК G01M 13/04, H03K 3/84, G01V 1/40. Вібраційна діагностична система / І. Б. Кравець, Р. М. Юзефович, І. Г. Стецько, П. Б. Дуб, І. М. Яворський; власник Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України. – № а 2012 00639, заявл. 20.01.2012 ; опублік. 12.08.2013, Бюл. № 15.
23. Трембач Р.Б. Теорія електричних та магнітних кіл. Навчальний посібник / Р.Б. Трембач–Тернопіль: ТНЕУ, 2015.
24. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
25. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 26с.

26. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка ” Модуль 4. «Мікросхемотехніка» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 44с.
27. Житецький В.Ц. Основи охорони праці.- Львів: Афіша, 2000.- 350 с.
28. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування С# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
29. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
30. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
31. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Конструкторсько-технологічна практика. Методичні вказівки для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 22 с.
32. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
33. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>

34. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
35. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
36. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
37. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
38. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>
39. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>

40. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
41. Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
42. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
43. Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. : Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійних програм «Комп’ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп’ютеризовані системи управління та прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків, П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с
44. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
45. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня бакалавр усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>

46. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
47. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
48. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
49. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
50. Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
51. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
52. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми здобуття освіти / уклад. І. С. Дідич. // ТНТУ. – 2025. – С. 92. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50293>
53. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
54. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.

55. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>