

Заклад вищої освіти „Подільський державний університет”
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЇХ ЗАХИСТУ»

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-професійної
програми «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

ЛАПЧЕНКО Дмитро Володимирович

Керівник канд. техн. наук, доцент

ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« ____ » _____ 2025 р.

Допускається до захисту:

« ____ » _____ 2025 р.

Гарант освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
канд. техн. наук, доцент

Павло ПОТАПСЬКИЙ

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій
Освітній ступінь «Магістр»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри,

_____ Ігор ГАРАСИМЧУК

« ____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
здобувачу вищої освіти**

ЛАПЧЕНКУ Дмитру Володимировичу

1. Тема роботи: «ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЇХ ЗАХИСТУ»

2. Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Затверджено наказом ЗВО «ПДУ» від 24 березня 2025 року №162с.

Тема кваліфікаційної роботи уточнена згідно наказу ЗВО «ПДУ» від 19 листопада 2025 року №1331с «Про зміни до наказу №162с від 24 березня 2025 року».

Строк подання закінченої роботи 25 листопада 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Правила влаштування електроустановок.
2. Аналіз іноземних та вітчизняних публікацій.
3. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

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

ВСТУП

1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В
2. ПОШКОДЖЕННЯ ТА НЕНОРМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
3. ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
4. ВИКОНАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
5. ВИБІР УСТАВОК СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
6. ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ТЕЛЕКОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ ГРУПИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

7. Перелік графічного матеріалу

Презентаційні матеріали за розділами кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3	Доцент Козак О.В.		

7. Дата видачі завдання 02 липня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів КР	Підпис керівника
	ВСТУП	05.07.25	
1	ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В	20.07.25	
2	ПОШКОДЖЕННЯ ТА НЕНОРМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	15.08.25	
3	ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	20.09.25	
4	ВИКОНАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	05.10.25	
5	ВИБІР УСТАВОК СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	01.11.25	
6	ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ТЕЛЕКОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ ГРУПИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	10.11.25	
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	18.11.25	
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	25.11.25	
	ДОДАТКИ	25.11.25	

Здобувач вищої освіти

Дмитро ЛАПЧЕНКО

Керівник, к.т.н., доцент

Олександр ДУМАНСЬКИЙ

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	7
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В	9
1.1 Області застосування та умови експлуатації	9
1.2. Характеристики механізмів	13
1.3 Експлуатаційні перехідні режими електродвигунів	15
Висновки до першого розділу	17
2. ПОШКОДЖЕННЯ ТА НЕНОРМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	18
2.1 Аналіз пошкодженості високовольтних електродвигунів	18
2.2 Однофазні замикання на землю	22
2.3 Багатофазні та виткові КЗ в обмотці статора	24
2.4 Нагрів електродвигуна при перевантаженні	28
2.5 Режими несиметричної роботи	30
2.6 Втрата живлення	32
2.7 Асинхронний режим синхронного електродвигуна	33
2.8 Аварійні режими пристроїв збудження	34
Висновки до другого розділу	35
3. ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	36
3.1 Структурні схеми релейного захисту	36
3.2 Вимірювальні трансформатори струму та їхні характеристики	38
3.3 Струмові трансформатори нульової послідовності	40
3.4 Вимірювальні елементи захистів	41
3.5 Елементи логічної частини захистів	44
3.6 Сигнальні органи захистів ЕД	46
3.7 Пристрої оперативного струму	46

Висновки до третього розділу	47
4. ВИКОНАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	49
4.1 Загальні технічні вимоги	49
4.2 Захист від замикання на землю (корпус) в обмотці статора	51
4.3 Захист від міжфазних замикань в обмотці статора	54
Висновки до четвертого розділу	62
5. ВИБІР УСТАВОК СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	63
5.1 Загальні положення	63
5.2 Розрахунок струмової відсічки	64
5.3 Розрахунок диференційного струмового захисту	69
5.4 Розрахунок захисту від струмів перевантаження	72
5.5 Розрахунок захисту від асинхронного режиму	73
Висновки до п'ятого розділу	74
6. ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ТЕЛЕКОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ ГРУПИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	75
6.1 Пристрій контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів	75
6.2 Система керування та захисту асинхронного електродвигуна	79
Висновки до шостого розділу	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86
ДОДАТКИ	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронні двигуни

СД - синхронні двигуни

РУ - розподільних пристроїв

ПС - підстанцій

РП – розподільчі пристрої

ПП – перемикальні пункти

КЗ - коротке замикання

КРУ - комплектні розподільчі пристрої

ЕД - електродвигун

ЕП - електропривод

СНП - струм нульової послідовності

ТС - трансформатор струму

ТН - трансформатор напруги

ПУЕ - Правила улаштування електроустановок

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі розглянуто сфери застосування та умови експлуатації електричних двигунів, а також їхні перехідні режими. Досліджено електронний апарат для діагностики роботи асинхронних двигунів за умов асиметрії напруги, який здійснює контроль напруги зворотної послідовності та температури статорної обмотки. У разі істотної асиметрії пристрій автоматично переводить двигуни в режим зниженого навантаження до завершення виробничого циклу.

Проаналізовано типові пошкодження, аномальні режими роботи та елементи релейного захисту електродвигунів. На основі отриманих результатів запропоновано інтегрований комплекс керування та захисту асинхронних електроприводів, що підвищує їхню надійність та експлуатаційну стійкість.

ABSTRACT

The qualification work considers the scope and operating conditions of electric motors, as well as their transient modes. An electronic device for diagnosing the operation of asynchronous motors under voltage asymmetry conditions has been studied, which monitors the negative sequence voltage and the temperature of the stator winding. In the event of significant asymmetry, the device automatically switches the motors to a reduced load mode until the end of the production cycle.

Typical damage, abnormal operating modes and relay protection elements of electric motors have been analyzed. Based on the results obtained, an integrated complex of control and protection of asynchronous electric drives has been proposed, which increases their reliability and operational stability.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему “ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЇХ ЗАХИСТУ” виконана здобувачем вищої освіти ОС «Магістр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» ЛАПЧЕНКО Дмитро Володимирович на факультеті енергетики та інформаційних технологій ЗВО «ПДУ», рік захисту 2025.

Робота містить 85 аркушів, 3 таблиці, 18 рисунків, а список використаних джерел містить 21 найменування.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню релейного захисту потужних високовольтних електродвигунів змінного струму. Розглянуто умови їх роботи, конструктивні особливості, характерні робочі режими та основні перехідні процеси.

Проведено аналіз типових аварійних ситуацій та наведено принципові схеми побудови систем релейного захисту. Описано основні елементи таких систем і технічні вимоги до них. Розглянуто ключові види захисту: від замикань на землю, міжфазних коротких замикань, теплових перевантажень, асинхронного режиму та інші необхідні функції.

Подано методичні підходи до визначення уставок струмових відсічок, диференційного захисту та теплового захисту електродвигунів. Окремий розділ присвячений питанням охорони праці в електроенергетичних установках.

У роботі виконано основні завдання: систематизовано відомості про високовольтні електродвигуни, проаналізовано причини їх пошкоджень, досліджено будову захисних систем та опрацьовано методики їх розрахунку. Ключові слова: Сепаратор, вібрація, очищення, електропривод, регулювання, електродвигун, автоматизація, охорона праці, безпека.

Ключові слова: витрати ресурсу ізоляції, швидкість теплового зносу ізоляції, коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності, електродвигун.

ВСТУП

Актуальність теми. Велика аварійність асинхронних двигунів обумовлена особливостями експлуатації їх в агропромисловому комплексі, до специфічних умов якої слід віднести низьку якість напруги в мережі, зокрема, її несиметрію. Кожного року виходять з ладу 20-25 % працюючих в АПК асинхронних електродвигунів [1]. Несиметрія напруг мережі у сільських розподільчих колах 0,38/0,22 кВ викликана великою довжиною ліній електропередачі та змішаним підключенням однофазних і трифазних споживачів. Тенденція до збільшення одиничної потужності електродвигунів в сполученні з ускладненням конструкцій електричних машин з метою отримання більш високих техніко-економічних показників, робота електродвигунів в умовах, які оказують негативний вплив на електричну ізоляцію, часто в екстремальних режимах по навантаженню – все це пред'являє підвищені вимоги до релейного захисту електродвигунів.

Трифазні асинхронні двигуни (АД) є одними із найбільш поширених електричних машин. Дві третини електроенергії споживається електродвигунами, а доля АД складає близько 95% від їх загальної кількості. Висока пошкоджуваність асинхронних машин стає причиною значних збитків. Щорічно виходить із ладу 29-30% двигунів у гірничодобувній промисловості, 20% - у машинобудівній, 13% - у металургійній. Пошкодження електродвигунів складають 25-30% від загальної кількості пошкоджень електроустаткування.

Таким чином, подальше дослідження особливостей режимів роботи АД при наявності несправностей із метою розробки методів і засобів діагностування є актуальною науково-прикладною задачею. Підвищення надійності експлуатації й зниження чисельності обслуговуючого персоналу досягається введенням пристроїв релейного захисту й автоматики як на агрегатах власних потреб, так і на основному устаткуванні. До загальних заходів щодо підвищення надійності роботи двигунів власних потреб слід віднести й правильний вибір і настроювання пристроїв релейного захисту як у двигунів, так і у всіх елементів живильної мережі.

Для збереження безперервності технологічного процесу більшості сучасних виробництв, для запобігання виникнення та розвитку системних аварій, які торкаються елементів систем електропостачання до електростанцій, релейний захист електродвигунів повинен своєчасно ліквідувати пошкодження в них, реагувати на аварії у відповідних вузлах електричного навантаження, узгоджено діяти з пристроями релейного захисту та автоматики електроустановок [1, 2].

Релейний захист електродвигунів повинен реагувати на внутрішні пошкодження та небезпечні ненормальні режими. Особливе місце серед електродвигунів займають електродвигуни механізмів власних потреб електростанцій. Їх вимикання через неправильну дію захисту може порушити нормальну роботу електростанції, тому захист електродвигунів відповідальних механізмів станцій повинен мати особливу надійність.

Мета і задачі роботи. *Метою* даної роботи є дослідження особливостей захисту електричних двигунів.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі *основні задачі*:

1. Дослідження та вивчення загальних відомостей про електродвигуни напругою вище 1000 В.
2. Аналіз пошкоджень та ненормальних режимів роботи електродвигунів.
3. Дослідження елементів пристроїв релейного захисту електродвигунів.
4. Дослідження основних видів релейного захисту двигунів та їх розрахунку.

Об'єктом дослідження є режими роботи електродвигунів.

Предметом дослідження є удосконалення систем захисту електродвигунів.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В

1.1 Области застосування та умови експлуатації

При виборі електричного мотора для виробничого механізму необхідно опрацювати чимало аспектів, а саме: розрахувати його потужність, визначитися з типом струму, робочою напругою, швидкістю обертання, а також із конструктивним виконанням самого електромотора.

З цією метою важливо володіти інформацією про умови експлуатації електричних машин, які слід чітко окреслити у завданні на розробку проєкту.

Кінематична схема та архітектура машинного вузла значною мірою обумовлюються типом застосованого електроприводу, який, з одного боку, залежить від характеристик робочої машини, а з іншого – впливає на її технічні особливості. У зв'язку з цим, проєктування електроприводу здійснюється паралельно із створенням проєкту робочої машини, і це відбувається на найперших етапах.

На виробництві, під час експлуатації вже існуючих електроприводів, потреба у підборі нового двигуна найчастіше виникає під час оновлення обладнання чи зміни технологічного процесу. Хоча тут доводиться вирішувати значно менше питань, ніж при первинній розробці проєкту електроприводу, все ж таки потрібні знання та вміння для визначення оптимальних навантажень, пускових характеристик та толерантності до перевантажень самого електродвигуна [1].

Серед споживачів електроенергії на промислових об'єктах та електростанціях вагому частку складають асинхронні (АД) та синхронні (СД) машини.

Найширше застосування отримали доступні за вартістю, технологічно прості та надійні АД, які використовуються для приводів різноманітних

вентиляційних систем, насосного обладнання, транспортерів, конвеєрних ліній, димососів, перетворювальних установок тощо. СД, які характеризуються значною стійкістю до перевантажень та кращою працездатністю при падінні напруги у мережі, успішно задіюються у потужних системах як при стабільному робочому режимі, так і там, де спостерігаються різкі циклічні навантаження. Їх застосовують для живлення механізмів, якщо потрібен сталий крутний момент: двигун-генератори, газові компресори, ексгаустери, повітрорудки, млини, насоси для водопостачання та інші.

Діапазон номінальних потужностей електродвигунів (ЕД) з напругою понад 1 кВ коливається від кількох сотень кіловат до одиниць та десятків мегават.

Умови, в яких працює обладнання, значною мірою зумовлюються специфікою виробничого процесу та рольовим значенням цього механізму у ньому. Значна частина ЕД у різних секторах промисловості функціонує у складних кліматичних та технологічних умовах.

ЕД з напругою понад 1 кВ підключаються до розподільних пристроїв (РУ) підстанцій (ПС), розподільчих (РП) та перемикальних (ПП) пунктів одним із кількох існуючих методів [1, 3].

Пряме приєднання кабельною лінією до роз'єднувача РУ (Рис. 1.1, а). Типова довжина кабельної лінії не перевищує 300–400 метрів, а вибір кількості та перетину кабелів залежить від потужності ЕД, а іноді й від рівня струмів короткого замикання (КЗ) у мережі. Двошвидкісні ЕД підключаються так, що для обмотки кожної швидкості передбачається інший захисний апарат (Рис. 1.1, б). Схема, що включає реактор з постійним підключенням (Рис. 1.1, в), використовується тоді, коли необхідно суттєво обмежити струми КЗ до значень, що відповідають номінальним струмам відключення серійних комутаційних апаратів комплектних розподільчих пристроїв (КРУ): 20; 31,5; 40 кА. Виходячи з конструктивних міркувань, залежно від типу КРУ та очікуваних значень струмів КЗ, реактор може бути розташований не лише перед роз'єднувачем РУ, але й за ним, а кабельне введення тоді приєднується до реактора (Рис. 1.1, г).

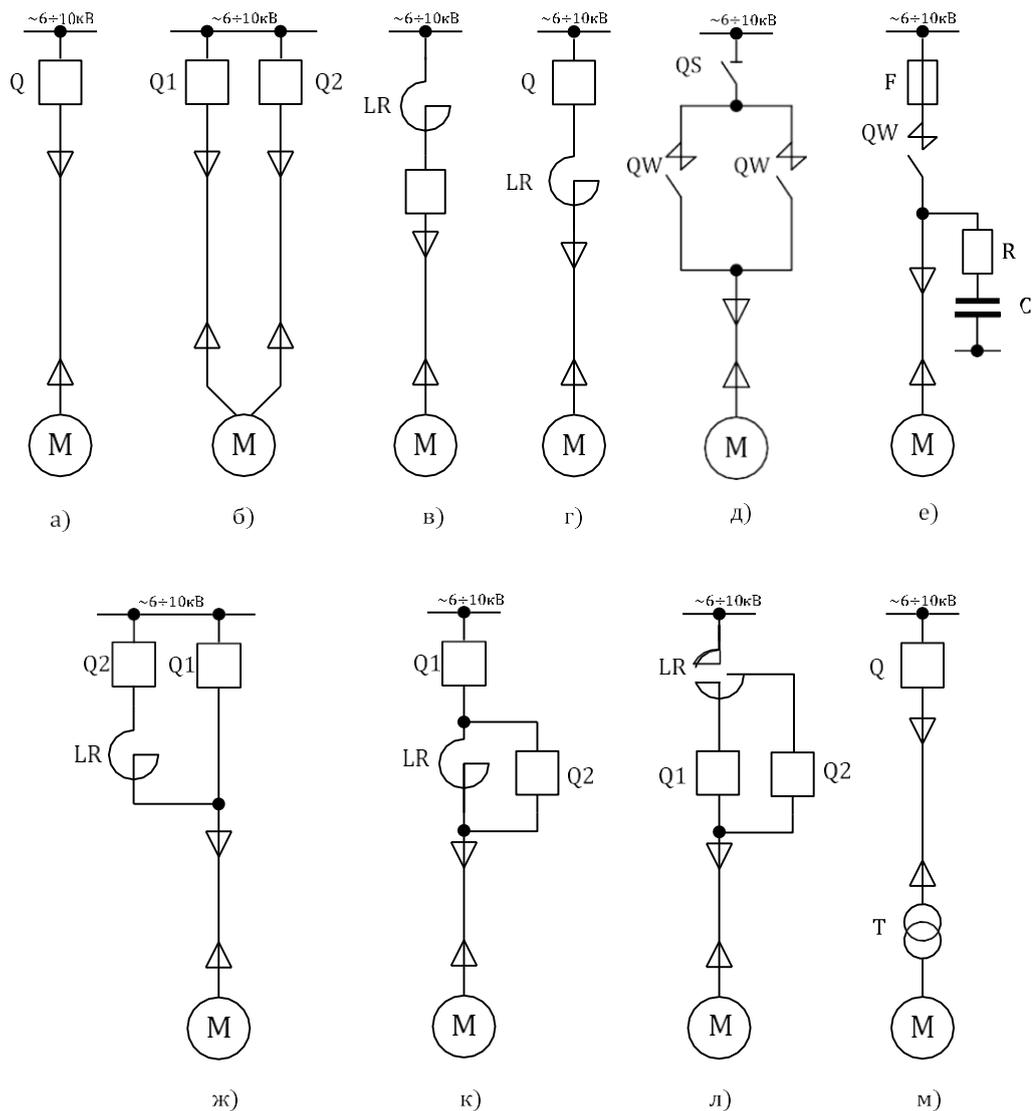


Рисунок 1.1 – Підключення електродвигунів до мережі живлення:
а, б – безпосереднє підключення; *в, г* – безпосереднє підключення з постійно увімкненим реактором LR; *д, е* – підключення за допомогою контактора QW; *ж, з, л* – схеми підключення з реакторним пуском; *м* – блок трансформатор– електродвигун

Приєднання кабельної траси до контактора (як позначено QW на малюнку 1.1, д, е) вельми поширене у подібних інсталяціях. Контактор призначений аби вмикати та вимикати електродвигун (ЕД) у стандартних робочих умовах, а також у разі аварій, що супроводжуються протіканням струму, який не перевищує максимально допустимого струму відключення (наприклад, для контактора КВМ-400/30 цей струм становить 4,97 кА). За кордоном

підключення ліній до ЕД часто реалізують через контактори, які завдяки швидкому (менше однієї періоди струму) часу гасіння дуги у вакуумному середовищі мають значний термін служби комутацій (50 тисяч увімкнень і більше). Схеми з такими пристроями виявляються вигідними з економічної точки зору, зокрема для ЕД приводів стрічкових конвеєрів, робота яких за технологічними вимогами часто передбачає багаторазові вмикання-вимикання (рис. 1.1, е). Щоб уникнути стрибків напруги в колі ЕД, інтегрують RC-демпфер. Варто зауважити, що за кордоном захист ЕД від короткого замикання (КЗ) часто забезпечується плавкими запобіжниками (F на схемі 1.1, е), а від перевантажень та несиметричних режимів – релейними захистами, які подають команду на вимикання контактора.

Схема, що містить пусковий реактор, має два вимикачі, один з яких підключається паралельно реактору, виводячи його з ланцюга після завершення пуску ЕД. Реактор використовується задля обмеження падіння напруги на збірних шинах та/або для забезпечення необхідної напруги на виводах ЕД під час запуску. Через те, що промисловість не завжди випускає реактори, спеціально призначені для пуску ЕД, як пускові застосовують струмообмежувальні реактори. Залежно від конфігурації розподільчого пристрою та самого реактора, застосовується схема з одним (Рис. 1.1, ж) або двома (Рис. 1.1, к) комутаційними апаратами в колі електродвигуна в режимі тривалої роботи. У першому випадку ЕД запускають, увімкнувши вимикач Q2, який потім вимикають після включення головного вимикача живлення Q1. У другому варіанті ЕД стартує при увімкненому Q1 і вимкненому Q2. Після завершення пуску вимикач Q2 шунтує реактор, і основне живлення ЕД відбувається по трасі: шини – Q1 – Q2 – лінія.

Схема з подвійним реактором (рис. 1.1, л) застосовується тоді, коли окрім забезпечення потрібного рівня напруги при старті, є також потреба обмежувати струм КЗ. На етапі пуску обидві гілки реактора включені послідовно (вимикач Q2 вимкнений). Після закінчення пуску одну з гілок реактора шунтують, увімкнувши Q2. Таким чином, у процесі обмеження струму КЗ бере участь лише одна секція подвійного реактора. Така конфігурація ускладнює

конструкцію апаратури, вимагає перевірки електродинамічної стійкості реактора під час КЗ. Проте для потужних ЕД, для яких зазвичай необхідне значне зниження напруги на виводах при запуску, ця схема, як правило, є обґрунтованою з техніко-економічної позиції.

Схема "трансформатор – електродвигун". На сьогодні не всі типи ЕД виробляються для номінальної напруги 10 кВ. Тому, для підключення окремого електродвигуна на номінал 6 кВ до головної розподільної мережі з напругою 10 кВ, задіюють індивідуально встановлений трансформатор 10/6 кВ.

1.2 Характеристики механізмів

З огляду на їхнє призначення та функціональну роль у технологічному ланцюжку, устаткування поділяють на важливе та менш критичне [4]. До категорії важливого устаткування власних потреб (ВП) електростанцій потрапляють ті агрегати, вихід з ладу яких спричиняє або зниження виробничого навантаження, або повне припинення роботи котлів та турбін. Сюди належать такі елементи, як дутьові вентилятори, димососи, насоси живильної та циркуляційної систем тощо. На виробничих об'єктах критичним вважається таке обладнання, раптова зупинка якого створює загрозу життю персоналу, загрожує пошкодженням дорогоцінного та унікального технологічного апарату, призводить до тривалих простоїв виробництва і значних втрат випущеної продукції.

До менш критичного устаткування належать ті механізми, нетривала відмова яких не спричиняє порушення штатного ходу технологічних процесів. Прикладами є системи хімічного водоочищення, подачі палива та видалення попелу на електростанціях, а також обладнання для дроблення руди, екскаватори та стрічкові конвеєри у гірничодобувній галузі.

За рівнем значущості, електричні машини (ЕД) також класифікують як критично важливі або другорядні. Критично важливі зазвичай відносять до електроприймачів першої, рідше – другої категорії надійності електропостачання, тоді як другорядні – до третьої, а у певних випадках – до

другої категорії.

Вплив, що чинить механізм на навантажену електричну машину, зазвичай описується моментом опору M_C . Момент опору загалом складається з початкового статичного моменту $M_{C\text{поч}}$, необхідного для початку руху, та залежності M_C від швидкості обертання n вала ЕД. Залежно від залежності M_C від швидкості $M_C(n)$, усі механізми можна розділити на дві групи [4]. До першої групи належать ті, чий момент опору практично не змінюється зі зміною частоти обертання n вала ЕД. Це, наприклад, кульові млини, приводи прокатних станів, конвеєри, поршневі компресори та подібні. Залежно від умов експлуатації, момент опору для механізмів цієї групи може набувати різноманітних значень. Як правило, для обладнання, що працює в тривалому безперервному режимі, $M_C = (0,8 \div 0,9) M_{\text{ном}}$, де $M_{\text{ном}}$ – момент, що відповідає номінальній потужності та номінальній швидкості обертання ЕД. Однак при роботі з різко змінним, ударним або циклічним навантаженням, значення M_C може сягати $(2 \div 2,5) M_{\text{ном}}$.

Другу групу формують механізми із т.зв. "вентиляторним" моментом опору, який може бути виражений наступним співвідношенням [4]:

$$M_C = M_{C\text{поч}} + (M_{C\text{ном}} - M_{C\text{поч}}) \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^p. \quad (1.1)$$

Приймаючи $M_{C^*} = M_C / M_{C\text{поч}}$ та $M_{C\text{поч}^*} = M_{C\text{поч}} / M_{C\text{ном}}$, отримаємо:

$$M_{C^*} = M_{C\text{поч}^*} + (1 - M_{C\text{поч}^*}) \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^p, \quad (1.2)$$

де $M_{C\text{поч}}$ – початковий момент опору механізму без врахування моменту тертя спокою;

$M_{C\text{ном}}$ – номінальний момент опору механізму;

p – показник ступіні, $p \neq 0$;

$n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання, об/хв., при якому момент опору дорівнює номінальному.

Для вентиляторів, димососів та газовидувків середнє значення $M_{C\text{поч}} = 0,15$, $p = 2$. При цьому з (1.2) отримаємо:

$$M_{C*} = 0,15 + 0,85 \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^2. \quad (1.3)$$

Для поршневих компресорів середнє значення $M_{C.\text{пoch}^*} = 0,25$, а $p = 2$, як і для вентиляторів.

Центр обіжні насоси мають в середньому $M_{C.\text{пoch}} = 0,15$, а показник ступіні p може змінюватися в широких межах в залежності від характеру роботи насоса. Зі збільшенням статичної складової в загальному тиску величина p може досягти 5÷6.

На рисунку 1.2 наведено характеристики $M_{C*} \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)$ для різних механізмів промислових підприємств та власних потреб електричних станцій

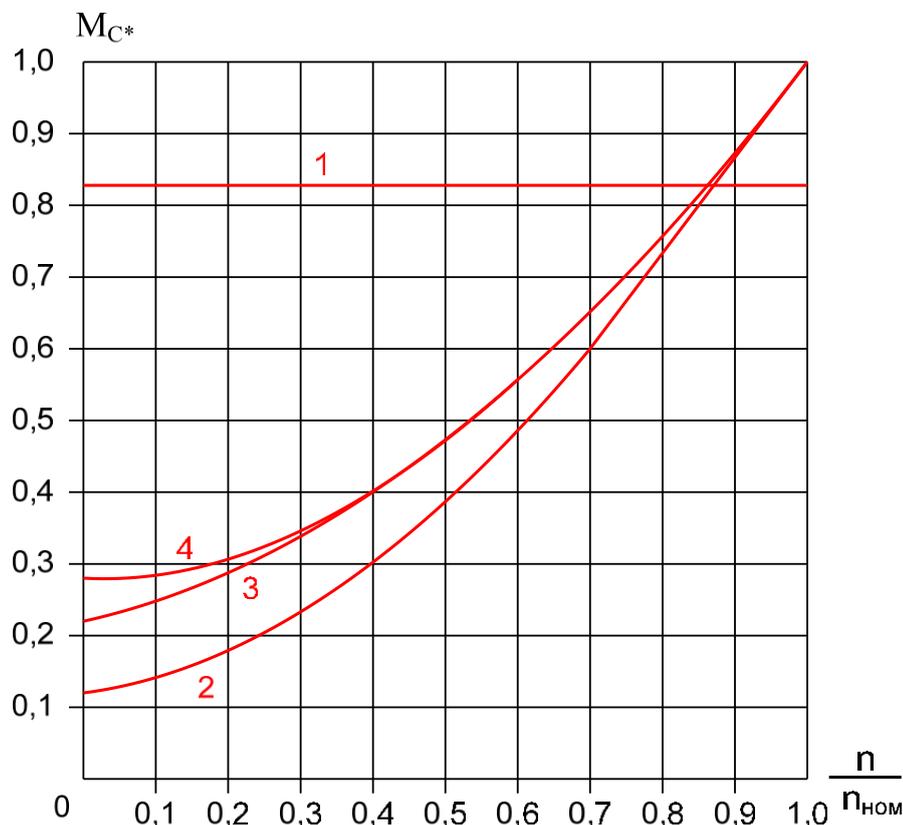


Рисунок 1.2 – Криві моментів опору різних механізмів: 1 – стержневий млин; 2 – димосос; 3 – дроблене вугілля; 4 – поршневий компресор

1.3 Експлуатаційні перехідні режими електродвигунів

Головними методами запуску є прямий та з використанням реактора. При першому варіанті напруга мережі, до якої приєднаний електродвигун (ЕД),

подається на нього шляхом замикання вимикача. У другому ж випадку ця напруга спочатку подається на пусковий реактор, вибір якого зумовлений необхідністю найбільш сприятливого розвитку електромеханічних процесів як в самому ЕД, так і в мережі. Застосування останнього методу призводить до того, що внаслідок падіння напруги, спричиненого пусковими струмами в реакторі, на клеммах ЕД вона залишається зниженою протягом майже усього етапу пуску.

Запуск синхронного двигуна (СД) принципово відрізняється від запуску асинхронного двигуна (АД) тим, що потребує узгодження швидкості СД з частотою мережі. На сучасному обладнанні збудження ця процедура реалізується автоматично.

Динамічне уповільнення. Прискорене, тобто динамічне, гальмування СД застосовують, скажімо, у ситуаціях, коли інерція механізму настільки велика, що оберти СД після вимкнення тривають надто довго, і такий час зупинки є неприйнятним з огляду на виробничі вимоги. Цей режим досягається шляхом розриву зв'язку обмотки статора з мережею та одночасного підключення до її з'єднаних у зірку потужних активних резисторів (так званих опорів динамічного гальмування), при цьому живлення обмотки збудження зберігається. Таким чином, СД фактично переходить у режим, подібний до зовнішнього короткого замикання, де він, працюючи як генератор, створює гальмівний момент. Ефективність гальмування значно зростає, якщо струм збудження подається від джерела, яке не має механічного зв'язку з валом СД. Струм, що циркулює у колі статора, зазвичай перевищує номінальний показник, тому це має бути враховано при налаштуванні релейного захисту СД.

Висновки до першого розділу

Серед нестационарних робочих станів електродвигунів, які істотно відрізняються від їхнього штатного (номінального) режиму, можна виокремити ті, що є для них типовими експлуатаційними явищами. До таких, насамперед, належать запуск, самозапуск та динамічне гальмування. З позиції системи релейного захисту важливо проаналізувати, які саме параметри змінюються у цих режимах і які закономірності описують ці зміни. Подібний детальний розбір дозволить гарантувати, що захисні пристрої не спрацюють помилково, а також визначити граничні умови, за яких перехідний процес стає загрозливим для цілісності ЕД.

РОЗДІЛ 2

ПОШКОДЖЕННЯ ТА НЕНОРМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1 Аналіз пошкодженості високовольтних електродвигунів

25–30% усіх поломок електричного обладнання високої напруги трапляються через електричні розряди (ЕД). Механічні пошкодження, як правило, складають не більше 5–15% від усіх несправностей двигунів, і значна частина цих проблем стосується ЕД, які функціонують при різко змінному навантаженні на валу, в умовах підвищеної вібрації та струсу, а також за низьких температур. Головним типом несправності все ж вважаються пошкодження електричного характеру, що пов'язані з порушенням стану ізоляції обмоток як статора, так і ротора. Найчастіше, у 80–95% випадків, виходить з ладу саме обмотка статора. При цьому близько 70% електричних ушкоджень припадає на пазову та лобову частини обмотки, а решта 25–30% — це міжвиткові замикання та пробої ізоляції у вводах [5, 6].

У таблиці 2.1, яка базується на аналізі статистичних даних про вихід з ладу статорів ЕД на промислових об'єктах, наведено уявлення про найпоширеніші дефекти ізоляції, а також чинники їхнього виникнення, прояви та еволюцію у певні типи замикань.

Приблизно чверть усіх дефектів ізоляції виникає через неякісно проведене відновлення (ремонт) ЕД, тоді як 20–25% спричинені низькою якістю виготовлення та монтажу. Понад половина (55–58%) вразливих місць в ізоляції формується як наслідок роботи ЕД у несприятливих умовах.

Електричний вплив на ізоляцію обмотки статора проявляється різними видами перенапруг. Найбільш загрозливими є внутрішні перенапруги, що виникають під час дугових замикань на землю та резонансних явищ у мережі, до якої підключено ЕД, а також при вимиканні асинхронних двигунів (АД) малої потужності.

Таблиця 2.1 – Дані про пошкодження статорів ЕД на промислових підприємствах

Причина несправності	Супутні обставини	Причини порушення ізоляції	Вид дефекту ізоляції	Прояв дефекту та місце пошкодження	Вид електричного пошкодження
1	2	3	4	5	6
Порушення жорсткості кріплення обмотки: – лобових частин	Часті пуски, вібрація, часті динамічні перевантаження на валу та динамічні навантаження на ізоляцію	Вібрація лобових частин	Перетертя	Пробої ізоляції на бандажне кільце або на корпус при виході з пазу	$K_B^{(1)}, K_3^{(1)}$
– секцій (пазовими клинами)	–	Вібрація стержня обмотки	Перетертя	Пробої ізоляції на корпус в пазу або при виході з пазу	$K_3^{(1)}$
– виводів	Вібрація, наявність вологи, бруду, хімічних відходів та струмопровідного пилу в коробці виводів	Наближення виводу до корпусу або торкання виводом обмотки корпуса	Зменшення ізоляційного проміжку	Перекриття ізоляції по повітрю на корпус в коробці виводів	$K_3^{(1)}$
	–	Касання виводом обмотки інших виводів або наближення до них	Зменшення ізоляційного проміжку	Перекриття ізоляції по повітрю між фазами в коробці виводів	$K^{(2)}, K^{(3)}$
Незадовільне кріплення наконечників кабелю живлення та виводів обмотки	Вібрація	Перегрів контактного з'єднання, відгорання виводів, виникнення дуги між наконечником та виводом обмотки	Іонізація ізоляційних проміжків	Перекриття ізоляції по повітрю між фазами в коробці виводів	$K^{(2)}, K^{(3)}$
Попадання в зазор або між лобовими частинами статора та ротора стороннього предмету	–	Механічний вплив стороннього предмету	Перетертя	Багаточисельні пробої ізоляції на корпус. Перекриття ізоляції по повітрю	$K_3^{(1)}, K_3^{(2)}$

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
Тривале перебування вологи в корпусі двигуна	Наявність мілких дефектів ізоляції	Зволоження ізоляції та деталей кріплення	Зниження опору	Перекриття між стержнями різних фаз. Пробій ізоляції на корпус	$K^{(2)}$, $K_3^{(1)}$
Неякісне виготовлення або укладка обмотки	Наявність вологи, забруднень; вібрація, динамічні навантаження на ізоляцію	Вплив згинаючих зусиль	Тріщини	Пробій ізоляції на корпус в пазу або при виході з пазу	$K_3^{(1)}$
Часті та тривалі перевантаження	Динамічні навантаження на ізоляцію	Теплове старіння	Розшарування	Пробій ізоляції на корпус в пазу або при виході з пазу	$K_3^{(1)}$
Дефект активної сталі	Вібрація та динамічні навантаження на ізоляцію Вібрація	Місцевий перегрів Механічний вплив уламків активної сталі	Розшарування Перетертя	Пробій ізоляції на корпус при виході з пазу Пробій ізоляції на корпус при виході з пазу	$K_3^{(1)}$ $K_3^{(1)}$

Шкідливий вплив перевищень напруги, спричинених процесами вмикання-вимикання електроприводів (ЕП), помічається нерідко через збільшення кількості циклів спрацювання комутаційної апаратури (автоматичних вимикачів та контакторів) у сучасних виробничих системах. Можна виділити два типи загрозливих перенапруг під час вимкнення ЕП: середньочастотні та хвильові.

Перші виникають унаслідок перехідного явища з частотою в межах $1 \div 10$ кГц, яке з'являється через розрив індуктивного струму комутаційним апаратом до того, як цей струм природно досягне нуля. Такі перенапруги характеризуються квазістаціонарною поведінкою; на всіх ділянках ізоляції обмотки виявляється напруга, що перевищує робочу у K разів. Величина цього коефіцієнта K значною мірою залежить не лише від типу комутаційного апарату та методу гасіння дуги в ньому, але й від довжини кабелю, що з'єднує ЕП з апаратом, від миті комутації, а також від номінальної напруги, потужності та режиму функціонування ЕП. Найбільшої величини перенапруги досягають при розриві струму двигуна, що розкручується чи гальмує, невеликої

потужності (до 1000 кВт), підключеного до комутаційного апарату коротким кабелем (рис. 2.1).

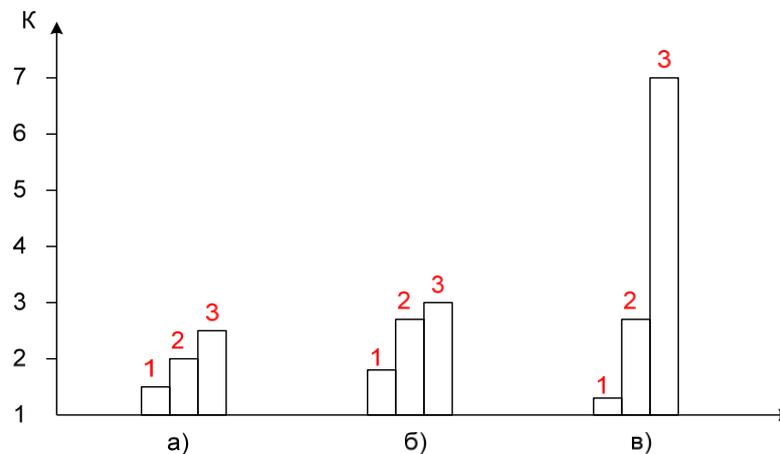


Рисунок 2.1 – Характеристики перенапруг, які виникають в результаті зрізання струму при вимиканні АД ($P_{\text{ном}} = 210$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; довжина кабелю 350 м): а) холостий хід; б) повне завантаження; в) початковий період пуску; 1÷3 – різні способи гасіння

При тестуванні електричних двигунів (ЕД) на номінальній напрузі 3 та 6 кВ було зафіксовано стрибки напруги між початком статорної обмотки й корпусом машини, що у 7 разів перевищували фазову складову напруги; зокрема, при номінальному значенні 6 кВ зафіксований пік сягав 34 кВ.

У цих же дослідженнях спостерігалось зростання напруги між витками приблизно у сім разів порівняно з її нормальним робочим рівнем. Проте, оскільки ізоляційний бар'єр провідників має достатню електричну стійкість, аби витримати такі навантаження, найбільша загроза стосується ізоляції обмотки статора по відношенню до маси двигуна. Статистика експлуатації свідчить, що відключення ЕД під час пуску спричиняють пошкодження ізоляції приблизно у 16% випадків, з яких 2% припадає на вимикання вже загальмованих двигунів.

Ізоляційна система ЕД також зазнає впливу імпульсів напруги, що генеруються короткими замиканнями на землю в електромережі. Величина цих перенапруг залежить від того, чи є нейтраль мережі ізольованою, чи заземленою через дросель для гасіння дуги, від точності компенсації ємнісних струмів замикання землі, природи самого замикання (дугове чи металеве), а також від рівня струму замикання на землю.

2.2 Однофазні замикання на землю

Переважає більшість виходів з ладу статорної обмотки відбувається через коротке замикання однієї з фаз на корпус ЕД, який для безпеки персоналу обов'язково заземлюється. З таблиці 2.1, можна виділити такі шляхи розвитку пошкоджень ізоляції аж до однофазного замикання на корпус. Перший сценарій пов'язаний із поступовим деградуванням ізоляції (наприклад, внаслідок механічного стирання), яке триває до моменту пробією під впливом звичайної робочої напруги. Сюди ж належать випадки замикань на корпус, що виникають під дією робочої напруги у місцях, де провідники з ослабленою ізоляцією виступають із пазів, або в розподільчій коробці, коли вібрації змушують стрижень або вивід обмотки торкатися заземлених елементів статора. Другий шлях — це пробій ізоляції, що має незначні вади, але функціонує задовільно в нормальному робочому режимі, спровокований комутаційними чи іншими стрибками напруги.

Оцінка серйозності замикання на корпус базується на обсязі розплавленої активної сталі статора, можливості швидкого відновлення за допомогою простих методів, та ймовірності / швидкості переходу цього однофазного КЗ у складніші форми, як-от міжвиткове чи багатофазне замикання. Ці параметри визначаються динамікою процесу, яка, у свою чергу, залежить від місця виникнення замикання, типу пробією, характеристик ізоляції, значення та тривалості струму у зоні пошкодження, а також наявності та налаштувань системи компенсації ємнісних струмів (дугогасильних реакторів).

Зазвичай, замикання фази на корпус відбувається через електричну дугу. На початковій стадії це явище має переривчастий характер, тобто складається з послідовних пробіїв ізоляції, які супроводжуються періодичним горінням дуги заземлення. Залежно від локації, дуга може концентруватися або у вузькому отворі, що проходить крізь ізоляційний шар провідників обмотки, або в повітряному середовищі. Перший варіант частіше трапляється при замиканні провідників фази на корпус у пазі статора. Цей процес супроводжується випаровуванням та хімічним розкладанням компонентів ізоляційного матеріалу

з виділенням газів, що деіонізують середовище. Чим вищий струм замикання на корпус, тим більш виражене руйнування ізоляції та електродів (як міді, так і сталі) у зоні дефекту. Початково, пошкодження дугового характеру виникає при кожному проходженні струму через нуль або близьких до цього моментах, а надалі, у міру нагрівання електродів, при третьому та четвертому нулях. У разі обриву дуги можливе повторне замикання провідного каналу, що особливо характерно для ізоляційних систем на основі компаунду. Якщо ж простір довкола пошкодження залишається чистим від продуктів горіння дуги, ізоляційна стійкість проміжку фаза–корпус може виявитися достатньою для запобігання повторному пробію. Проведені дослідження дають підстави вважати, що самоліквідація такого замикання можлива при струмах дуги, які не перевищують 10 А протягом перших 0,2 секунди після початку. Згодом, ймовірність самостійного усунення явища різко падає, зокрема, через нагрівання електродів.

Замикання на корпус у місцях виходу провідників із пазів, у лобових частинах та у вивідній коробці завжди мають електрично-дуговий характер. Якщо ж у пазах статора довжина дуги залишається практично незмінною, то тут вона може розтягуватися під дією теплових потоків та руху повітря. Область, яку охоплює дуга, швидко іонізується. Дуга здатна перекидатися на відстані, що в багато разів перевищують початковий повітряний зазор, спричиняючи пошкодження ізоляції інших ділянок обмотки статора і призводячи до розвитку міжвиткового або міжфазного КЗ. Горіння дуги у вивідній коробці зазвичай завершується (якщо двигун не відключити вчасно) міжфазним замиканням або замиканням на нейтраль. Тривалість безперервного горіння дугового замикання, незалежно від схеми заземлення нейтралі, іноді може сягати кількох хвилин.

Небезпека струму замикання на землю для ЕД оцінюється за обсягом ураження активної сталі статора та здатністю до усунення пошкодження простими методами, наприклад, без необхідності перешивання обмоток. Струм, що дорівнює або перевищує 5 А, вважається критичним для двигуна. При менших значеннях струму виплавлення заліза протягом 0,4 до 4 секунд є

малоймовірним.

При проектуванні захисту ЕД необхідно брати до уваги такі особливості процесів, що відбуваються при замиканнях на землю [1, 3, 7]:

1. Пікові значення струмів перехідного процесу, які проходять усіма елементами мережі та обмотками ЕД, суттєво залежать від моменту пробною ізоляції. Замикання, що збігаються з піком напруги ушкодженої фази, викликають максимальні струмові кидки, що на один-два порядки перевищують амплітуду усталеного струму. Найменші перехідні струми спостерігаються, коли пробій відбувається при напрузі, близькій до нуля, і вони мінімум у 1,5 рази більші за амплітуду усталеного струму замикання на корпус.

2. Найбільший імпульс струму виникає саме на пошкодженій ділянці. Амплітуди перехідних струмів у неушкоджених фазах прямо пропорційні ємнісним властивостям їхніх фаз відносно землі.

3. У спектрі струму дугового замикання на землю в сталому режимі присутні вищі гармоніки.

4. Полярність перших напівхвиль розрядних струмів на пошкодженій і неушкодженій ділянках є протилежною.

5. У першій напівхвилі перехідного процесу напівхвилі струму в ураженій фазі та напруги $3U_0$ збігаються за часом, чого не відбувається у неуразеній фазі.

2.3 Багатофазні та виткові КЗ в обмотці статора

До багатофазних коротких замикань (КЗ) належать випадки з'єднання між двома чи трьома фазами обмотки статора, а також подвійні замикання на землю, коли одне з них відбувається у фазній обмотці статора, а інше – в іншій фазі, електродвигуні (ЕД) чи мережі, до якої він підключений. Замикання витків охоплюють один або декілька витків в межах однієї фази.

Міжфазні та виткові пошкодження трапляються доволі рідко. Якщо вони не спричинені стороннім предметом (через тертя), то зазвичай є наслідком розвитку замикання на корпус, локальних перегрівів ізоляції, дефектів активної

сталі статора або пробою фази статора на корпус. Подвійне замикання найчастіше виникає за умови вже наявного замикання на землю в мережі, причому другий пробій нерідко фіксується у вивідній коробці або на перших витках обмотки.

Багатофазні КЗ можуть статися як на виводах статорної обмотки, так і в середині ЕД, тоді як виткові КЗ – лише в корпусі ЕД. Внутрішні КЗ класифікують на дві групи: трифазні КЗ з однаковою кількістю замкнених витків у кожній фазі (симетричні КЗ) та несиметричні КЗ з різною кількістю замкнених витків у фазах. До останньої групи належать замикання усіх або частини витків однієї фази, а також трифазні й двофазні КЗ з нерівною кількістю замкнених витків у фазах.

Небезпека внутрішніх КЗ полягає в тому, що струми у зоні пошкодження багаторазово зростають порівняно зі струмами в обмотці статора при замиканні на лінійних виводах. У синхронних двигунах (СД) при внутрішніх багатофазних КЗ у двох сформованих контурах струми спрямовані протилежно. У цьому випадку струми в стрижнях фазної обмотки, розташованих в одному пазу, можуть мати різний напрямок, що призводить до зменшення взаємних індуктивностей.

Струми КЗ здатні викликати механічні зусилля, які спричиняють пошкодження пазових клинів та деформацію обмотки. Потужна електрична дуга, що виникає в місці КЗ, зазвичай призводить до займання в ЕД, руйнуючи суттєву частину обмотки статора, а якщо КЗ сталося в пазовій зоні обмотки – виплавляє значні обсяги активної сталі. Окрім руйнувань дугою, при багатофазних КЗ можливі значні деформації обмотки статора, особливо її лобових частин, через великі механічні напруження, спричинені дією пускового струму. За однакових умов, обсяг пошкоджень СД із збудженим полем завжди більший, ніж у асинхронного двигуна або синхронного без збудження. Наслідки багатофазних КЗ настільки серйозні, що ремонт ЕД часто вимагає перешарування осердя статора та заміни частини, а інколи й повної заміни обмотки статора.

Багатофазні КЗ, що трапляються неподалік лінійних виводів статорної

обмотки, також викликають різке падіння напруги на клеммах усіх споживачів, підключених до тих же шин, що живлять пошкоджений ЕД, і значні (внаслідок різкого зростання струмів у фазах) динамічні навантаження на лобові та пазові частини обмоток статорів неушкоджених електричних машин.

Релейний захист ЕД має реагувати на внутрішні пошкодження з належною чутливістю та швидкістю. Оскільки захист зазвичай спрацьовує на параметри підведеного струму, необхідно мати достовірні методи розрахунку струмів у ЕД, значень симетричних складових струмів залежно від місця та типу КЗ, опору системи живлення та перехідного опору в точці замикання, параметрів двигуна тощо [6, 8, 9]. Розраховані значення струмів дозволяють провести аналіз різних принципів побудови пристроїв релейного захисту двигунів та визначити їхні уставки й час спрацювання [2, 10].

Найпростіше розраховується струм міжфазного (дво- чи трифазного) КЗ на лінійних виводах обмотки статора. З боку джерела – системи електропостачання – до точки КЗ протікає струм, який визначається електрорушійною силою (ЕРС) системи та опором між ЕРС і виводами ЕД. При обчисленні початкового значення сталої складової струму КЗ, понадперехідну ЕРС системи приймають рівною 1,05 номінальної напруги. Враховуючи, що для оцінки чутливості захисту від багатозазних КЗ необхідне значення струму на виводах обмотки, режим системи живлення обирається таким чином, щоб забезпечити мінімально можливий струм у місці розміщення захисту. Для схеми електропостачання, показаної на рисунку 2.2, опори замісної схеми зручно виразити в умовних одиницях за такими формулами [1, 3, 6]:

– для системи, Ом:

$$X_c = U_{\text{ср.ном}}^2 / S_{\text{к.мін}},$$

де $U_{\text{ср.ном}}$ – середня номінальна напруга сторони ВН силового трансформатора Т, кВ;

$S_{\text{к.мін}}$ – найменше значення потужності КЗ на шинах живлячої підстанції, МВА;

– для ліній електропередачі w, Ом:

$$X_w = X_{\text{пит}} \cdot l,$$

де $X_{\text{пит}}$ – питомий опір лінії, Ом/км;

l – довжина лінії, км;

– для силового трансформатора T без регулювання коефіцієнта трансформації під навантаженням, Ом:

$$X_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$$

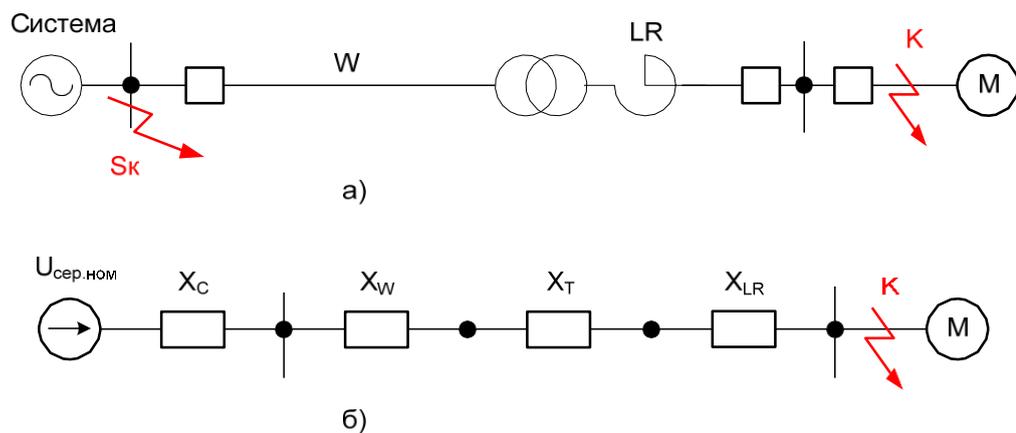


Рисунок 2.2 – Схема електропостачання ЕД промислового підприємства (а) та заступна схема (б) для розрахунку струмів КЗ

Для силового трансформатора з пристроєм РПН необхідно враховувати залежність опору від положення регулятора РПН. Розрахунки здійснюються на основі заводських значень напруги КЗ $U_K\%$ при середньому та крайніх положеннях регулятора. Опір трансформатора визначається за виразом:

$$X_{Tn} = \frac{U_{\text{кн}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{In}}^2}{S'_{\text{ном}}}$$

де $U_{\text{кн}}\%$ – напруга КЗ;

U_{In} – значення регулюємої напруги, яке відповідає відгалуженню n обмотки ВН трансформатора.

Опір реактора LR приводиться до сторони ВН силового трансформатора за формулою:

$$X_{LR} = X_{LR.\text{ном}} \cdot K^2,$$

де K – дійсний коефіцієнт трансформації силового трансформатора,
 $K=U_{1n}/U_{Hn}$;

$X_{LR,ном}$ – номінальний опір реактора, Ом.

Струм трифазного КЗ на виводах ЕД знаходиться за формулою:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{сер.ном} \cdot K}{\sqrt{3}(X_C + X_w + X_{T,n} + X_{LR})},$$

а двофазного КЗ – за формулою:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)} = \frac{U_{сер.ном} \cdot K}{2 \cdot (X_C + X_w + X_{T,n} + X_{LR})}.$$

Струм, який приходить до місця КЗ зі сторони нульових виводів обмотки статора, обумовлено ЕРС електродвигуна та понадперехідними опорами X''_d для СД і X_K для АД. Розрахунок цього струму може бути виконано також, як і при зовнішньому КЗ в режимі втрати живлення. При трифазному КЗ, яке виникає при пуску ЕД, струм зі сторони нульових виводів може бути відсутнім. При подвійному замиканні на землю $K^{(1,1)}$ (перше – фази В обмотки статора на корпус поблизу лінійного виводу, а друге, наприклад, фази С в мережі) розрахунок струмів зручніше проводити методом симетричних складових за допомогою відповідних заступних схем прямої, оберненої та нульової послідовностей.

2.4 Нагрів електродвигуна при перевантаженні

Збільшення струму в котушках електромашин (ЕД) спричиняє теплове навантаження – це ситуація, коли температура складових частин ЕД перевищує норму, встановлену для штатного режиму роботи. Теплове навантаження може мати локальний або загальний характер.

Локальні зони перегріву найчастіше спричинені недоліками у самій активній частині станини або в базових провідникових елементах. Схожим чином виникає перегрів ізоляційного матеріалу, що є наслідком виткових

замикань або однофазних замикань у обмотці статора на корпус.

Для ЕД загальне теплове навантаження визначається як одночасне підвищення температури у всіх секціях або у переважній частині одного з головних компонентів: обмоток чи осердя статора, чи то обмоток, полюсів, чи осердь ротора. Зазвичай це трапляється у випадках внутрішніх чи зовнішніх коротких замикань, під час запуску чи самозапуску, а також через несправності механічних вузлів електроприводу чи пов'язаного технологічного обладнання. Природа та місцезнаходження перегріву у специфічних конструкціях ЕД напряду залежать від першопричини. Наприклад, при пуску синхронних двигунів (СД) надмірне нагрівання охоплює усі їхні обмотки та полюси ротора значної маси, тоді як при технологічному перевантаженні, як правило, страждає лише обмотка статора [7].

Термін служби електричної ізоляції перш за все корелює з її температурним режимом, а точніше – зі співвідношенням поточної робочої температури та максимально допустимої, яка асоціюється з класом термостійкості даного типу ізоляції. Ізоляція обмоток ЕД відповідає класу стійкості до нагрівання В. Максимально допустима температура (v_{\max}), яка визначається як сума дозволеного перевищення температури ($\Delta v_{\text{доп}}$) і температури 40°C (що відображає граничну температуру навколишнього газоподібного середовища), згідно з чинними стандартами, становить:

$$v_{\max} = \Delta v_{\text{доп}} + 40^{\circ}\text{C} = 120^{\circ}\text{C}.$$

Для створення грубого уявлення про темпи старіння можна прийняти за умову, що термін експлуатації, наприклад, компаундованої ізоляції на основі мікаленту та реактопластів, скорочується у 2-2,5 рази при зміні температури на кожні 20°C [3].

Перевантаження по струму, що спричиняють підвищення температури обмоток електричних машин (ЕД), класифікують за їх тривалістю. Якщо за час дії такого перевантаження температура обмоток не встигає досягти практично стаціонарного значення, його називають короткочасним; у протилежному випадку таке перевантаження слід вважати тривалим [7].

За винятком випадків коротких замикань у мережі чи ЕД, а також роботи

двигунів у режимі холостого ходу колективними причинами виникнення струмових перевантажень є [7]:

1. Порушення встановленого технологічного процесу.
2. Технічні вади механізму або самого електродвигуна.
3. Недостатня якість напруги, що надходить із живлячої мережі. Оскільки крутний момент асинхронного двигуна (АД) прямо пропорційний квадрату прикладеної напруги, зниження останньої змушує ЕД працювати з більшим ковзанням, що, у свою чергу, призводить до зростання споживаного струму.

2.5 Режими несиметричної роботи

При роботі в несиметричному режимі струми статора ЕД можуть бути розкладені на симетричні компоненти — струми прямої та зворотної послідовностей. Струми прямої послідовності формують магнітне поле, яке обертається з синхронною кутовою швидкістю у тому ж напрямку, що й ротор двигуна. Поле, створене струмами зворотної послідовності, також обертається з синхронною швидкістю, але у протилежному напрямку. Це поле має як тепловий, так і механічний вплив на ЕД. Тепловий ефект виражається у збільшенні втрат у роторі, які найбільш помітні при номінальній швидкості ротора. У цьому випадку в замкнутих контурах ротора індукуються струми з частотою близько 100 Гц, які спричиняють посилений нагрів поверхневих елементів явнополюсного ротора (наприклад, пазових клинів, зубців, бандажних кілець, особливо у торцевих зонах та місцях їх сполучення). Електродвигуни з явнополюсними роторами, а також АД (хоча й меншою мірою), нагріваються струмами, що мають подвійну частоту, що зумовлено або наявністю спеціальної обмотки збудження, або наявністю короткозамкненої обмотки на роторі.

Механічний вплив виявляється у створенні знакозмінного електромагнітного моменту, що призводить до посилення вібрацій елементів статора та ротора. Найбільші механічні коливання діють на зварні шви, клини, якими закріплена активна сталь до основи корпусу, та на лобові ділянки обмотки статора, особливо там, де вони виходять із пазів.

Несиметричний режим роботи може мати як тривалий, так і короткочасний характер. Стандарт якості електроенергії встановлює гранично допустиме значення напруги зворотної послідовності для тривалого режиму:

$$U_{2*} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \leq 2\%,$$

де U_{2*} – відносна напруга оберненої послідовності, % номінальної;

U_2 – напруга оберненої послідовності.

Значення U_2 визначається за виразом:

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C),$$

де U_A, U_B, U_C – фазні напруги;

$a = e^{j120^\circ}$ – фазний множник.

Прийнятність тривалого асиметричного режиму для потужних синхронних машин, відповідно до того, як вони експлуатуються на практиці, залежить від нерівномірності фазних струмів, тобто від їхньої арифметичної різниці. Машини з явно вираженими полюсами можуть витримувати тривалу асиметрію за умови, що жоден із фазних струмів не перевищує номінального значення, а арифметична різниця струмів становить не більше 20% від номінального струму, якщо охолодження обмотки статора повітряне. Для машин з неявно вираженими полюсами, таких як синхронні турбодвигуни, з огляду на гранично допустиму температуру для сталі зубців ротора, торцевих вставок та обмотки збудження (яка становить $+130^\circ\text{C}$), дозволяється тривала робота при струмі зворотної послідовності $I_2 = 0,08I_{\text{ном}}$ та за умови, що фазні струми не перевищують номінальних значень.

Для синхронних двигунів (СД) небезпеку може становити зовнішнє несиметричне коротке замикання (КЗ) у мережі. У такій ситуації СД починає жити місце КЗ, створюючи значні струми, які призводять до посиленого нагріву масивних частин ротора. Критерій, що визначає допустимість короткочасного несиметричного перенавантаження [3, 8]:

$$I_{2*}^2 \cdot t = A = \text{const},$$

де $I_{2*} = I_2/I_{\text{ном}}$ – відносний струм I_2 ;

t – час перевантаження;

A – постійна стала для даної системи охолодження.

Якщо за час t струм I_2 змінюється, то потрібно визначити відносний тепловий імпульс струму оберненої послідовності:

$$W_{K2*} = \int_0^{t_{\text{вим}}} I_{2t*}^2 \cdot dt,$$

де $t_{\text{вим}}$ – час з моменту виникнення короткочасного несиметричного режиму до його вимикання;

I_{2t*} – поточне відносне діюче значення струму I_2 .

Для здійснення повноцінного захисту ЕД від перевантаження струмом оберненої послідовності необхідно для АД та, особливо, СД мати дослідні дані за критерієм $I_{2*}^2 \cdot t$.

2.6 Втрата живлення

Найпоширенішою причиною збоїв у роботі електродвигуна (ЕД) є проблеми з електроживленням. Коли через будь-які неполадки в мережі передача активної потужності від постачальника енергії до ЕД повністю припиняється або ж стає настільки незначною, що її не вистачає для стабільної та тривалої роботи комплексу "електродвигун – механізм". Ця ситуація зачіпає кожен ЕД у групі навантаження, яка залишилася без живлення.

Залежно від того, де і як сталася аварія, електричне з'єднання ЕД з джерелом живлення може бути тимчасово розірване або ж зберегтися, проте напруга на клеммах ЕД істотно спадає. З огляду на це, виділяють два типи проблем: різке падіння напруги та повне припинення електропостачання. Відновлення напруги розпочинається одразу після усунення причини несправності, тобто через:

$$t_U = t_{P3} + t_{\text{ВВ}}, \quad (2.1)$$

де t_{P3} та $t_{\text{ВВ}}$ – час спрацювання релейного захисту та вимикання вимикача, які забезпечують ліквідацію КЗ.

Якщо увімкнення здійснюється засобами автоматики (АВР, АПВ), то час перерви живлення складає:

$$t_{ПЖ} = t_{P3} + t_{ВВ} + t_{3П} + t_a + t_{УВ},$$

де $t_{3П}$ – час змінювання параметрів, на які реагують пускові органи автоматики, від нормального рівня до уставки спрацювання;

t_a – власний час дії автоматики;

$t_{УВ}$ – час увімкнення вимикача.

2.7 Асинхронний режим синхронного електродвигуна

Ключова ідея будь-якого несинхронного (або коливального) режиму полягає в тому, що ротор обертається з кутовою швидкістю, яка не дорівнює синхронній $\omega_s = \omega(1 - S) \neq 2\pi f_1 / p$, тоді як магнітне поле статора продовжує обертатися зі швидкістю, заданою частотою мережі живлення. Цей режим може бути цілком передбачуваним: наприклад, при асинхронному пуску чи повторному введенні в синхронізм. Якщо параметри цього режиму, зокрема його тривалість, не перевищують розрахункових значень, він вважається безпечним і може класифікуватися як робочий. Інша ситуація виникає, коли несинхронний режим настає раптово. Це трапляється, коли під дією технологічних перевантажень (тривалих чи короткочасних), коливань, спричинених аваріями в зовнішній електромережі, чи короткочасних розривів живлення та замикань у електродвигуні (ЕД), машина втрачає синхронізм і певний час функціонує в такому стані.

Під час роботи в несинхронному режимі синхронний двигун (СД) не лише втрачає свої експлуатаційні та економічні переваги перед асинхронними двигунами, але й потрапляє в умови, що сприяють перегріву його обмоток, послабленню механічного кріплення елементів та виникненню вібрацій.

Тривала робота синхронного двигуна номінальною потужністю 10–20 МВт і більше в несинхронному режимі може спричинити коливання в енергосистемі, а у гіршому випадку — призвести до втрати синхронізму інших синхронних двигунів.

Найчастіше несинхронний режим викликаний відсутністю або порушенням

роботи системи збудження, що пов'язано з несправностями в колі ротора або в самому пристрої збудження. Для безщіткових та тиристорних систем збудження такий режим виникає щоразу, коли напруга на шинах, які живлять блок живлення збудження (БПЗ) та трансформатор збудження (ТПЗ), падає нижче ніж на 0,5 від номінальної. Під несинхронним режимом незбудженого СД мають на увазі стан, коли котушка збудження замкнена накоротко або підключена до гасильного резистора.

Математичне моделювання несинхронного режиму збудженого СД є доволі складним, тому його, як правило, розглядають як суперпозицію двох режимів: асинхронного ходу без подачі збудження та роботи з живленням обмотки збудження від збудника з напругою U_f при замкненій на опір обмотці статора — що є свого роду варіантом режиму електричного гальмування.

Допустимий час $t_{\text{доп}}$ перебування СД у несинхронному режимі визначається тепловими обмеженнями ротора та статора. Для незбудженого СД, який функціонує при коефіцієнті короткого замикання $K_z = 0,9$, цей час орієнтовно коливається від 30 секунд до кількох хвилин. Для турбодвигунів з великими індуктивними опорами цей час переважно обмежений нагрівом ротора внаслідок струмів, що наводяться в клинах пазів та провідному шарі осердя. Прийнятне навантаження у несинхронному режимі можна приблизно розрахувати, виходячи з умови, що втрати потужності у роторі не повинні перевищувати номінальну потужність збудження:

$$M_{\text{ном}} \cdot S \cdot \omega < P_{f,\text{ном}}$$

Для явнополюсних СД тривалість роботи в асинхронному режимі визначається, як правило, нагрівом обмотки статора і легко піддається обліку.

2.8 Аварійні режими пристроїв збудження

Ключові аварійні стани безщіткових та тиристорних систем збудження узагальнюються так [3, 8]: внутрішні короткі замикання, спричинені пробоями силових випрямних діодів (чи тиристорів); зовнішні КЗ на клемниках силового

випрямляча, а також вихід з ладу пускозахисної апаратури, що тягне за собою тривалу протікання струму через пускові резистори. Дефекти БПЗ мають певну специфіку, зумовлену зростанням індуктивностей у ланцюгах КЗ та неможливістю прямого доступу до контурів якоря та силового випрямника.

Якщо внаслідок короткого замикання або обриву фазного діода силового випрямляча стається вихід з ладу, збудник починає функціонувати у несиметричному режимі. Це створює загрозу як для генератора БПЗ, так і для силового трансформатора ТПЗ, через ризик перегріву кріпильних елементів обмоток, що може спричинити розпалювання та виникнення виткових чи інших видів внутрішніх замикань.

Типовою несправністю БПЗ є пробій тиристора у складі пускозахисного механізму. У такій ситуації приріст струму збудника незначний, проте темп зростання температури пускового резистора може сягати 100°C за секунду або навіть перевищувати цей рівень. Як наслідок, стається руйнування пускового резистора або вузла його кріплення. Надалі запуск синхронного двигуна (СД) відбувається при частково чи повністю розімкнутій обмотці збудження, що провокує подальший розвиток аварії – пробією діодів силового випрямляча.

Висновки до другого розділу

Чверть усіх дефектів ізоляції виникає через неякісно проведене відновлення (ремонт) ЕД, тоді як 20–25% спричинені низькою якістю виготовлення та монтажу. Понад половина (55–58%) вразливих місць в ізоляції формується як наслідок роботи ЕД у несприятливих умовах.

Типовою несправністю БПЗ є пробій тиристора у складі пускозахисного механізму. У такій ситуації приріст струму збудника незначний, проте темп зростання температури пускового резистора може сягати 100°C за секунду або навіть перевищувати цей рівень.

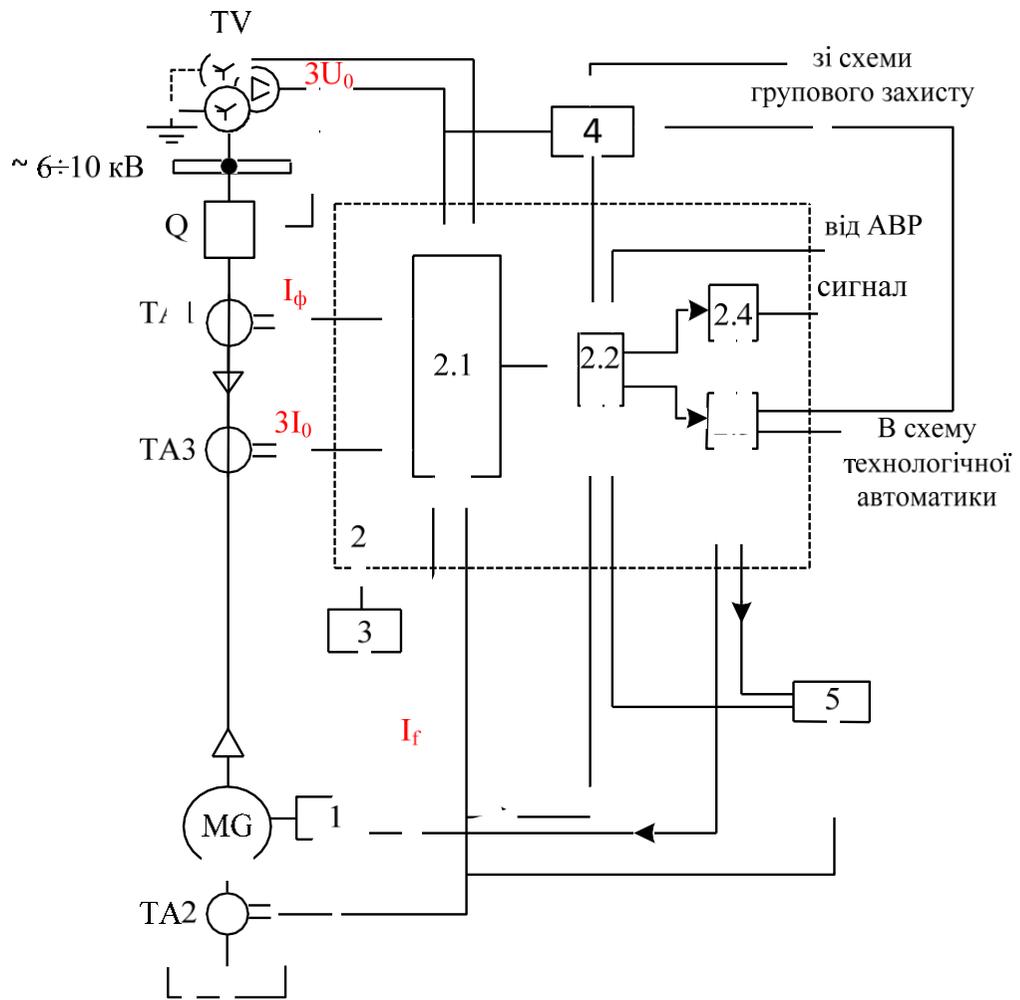
РОЗДІЛ 3

ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

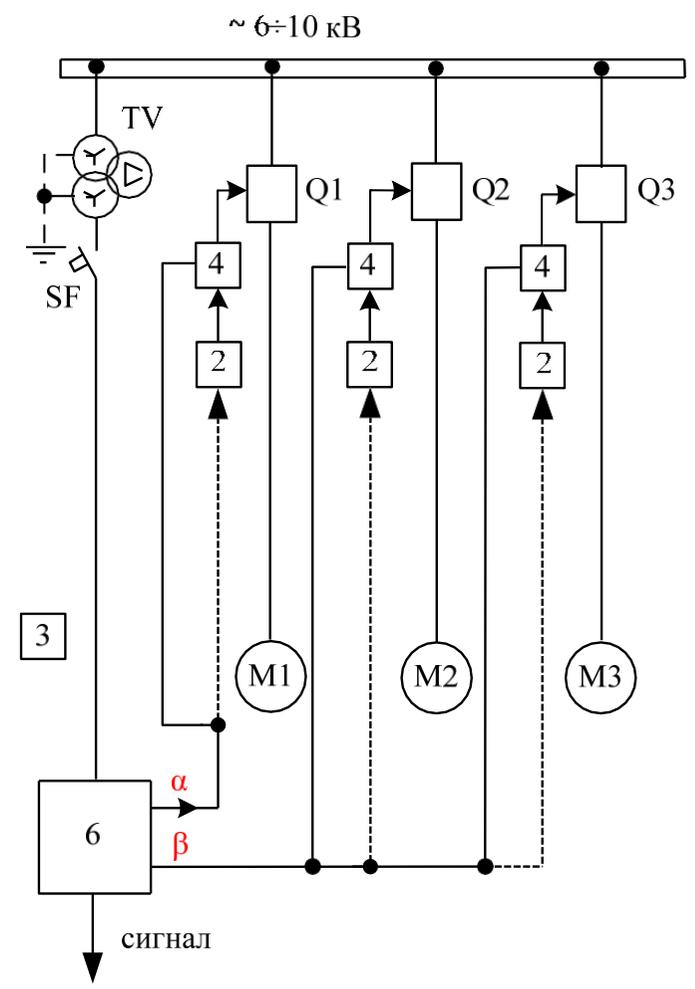
3.1 Структурні схеми релейного захисту

Пристрої релейного захисту електричних двигунів (ЕД) поділяються на два класи: індивідуальні та групові. Індивідуальний захист, як правило, відстежує робочі умови лише одного такого двигуна й у разі виникнення аварійної ситуації ініціює команди управління для пристрою збудження комутаційних апаратів, а також, за потреби, для технологічної установки та механізму, пов'язаного із захищуваним ЕД. На рисунку 3.1 (а) зображено структурну схему індивідуального захисту синхронного двигуна (СД), підключеного до мережі через вимикач Q, а також показано його спільну роботу з первинним та допоміжним електротехнічним обладнанням.

Через вимірювальний орган 2.1 релейний захист одержує дані від трансформаторів струму ТА1, ТА2, ТА3, встановлених у колі статора ЕД, трансформатора напруги TV секції шин 6–10 кВ, а також від пристрою збудження 1. Залежно від типу захисту, як інформація про стан ЕД можуть застосовуватися фазний струм статора I_{ϕ} , різниця струмів у двох фазах, потрійний струм нульової послідовності $3U_0$, комбінації струмів у колі статора й напруг на секції лінійних та потрійного нульового послідовності $3U_0$, струм збудження тощо. Вимірювальний орган виявляє аварійний чи небезпечний ненормальний режим, зазвичай шляхом зіставлення поточного значення контрольованого параметра з встановленим значенням, і видає логічний сигнал (0 або 1) на один із входів логічної частини захисту 2.2. У загальному випадку, спрацювання вимірювального органу завжди свідчить про настання нового режиму, який є або може стати загрозливим для ЕД. На інші входи 2.2 можуть надходити сигнали від пристрою збудження 1, схеми 4 керування вимикачем Q, схеми 5 пускової автоматики, схеми автоматичного введення резерву (АВР). Логічна частина 2.2, базуючись на отриманій інформації, формує та спільно з вихідним органом захисту 2.3 видає керуючі команди до схем управління вимикачем, пускової та технологічної автоматики.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Структурні схеми релейного захисту ЕД

Водночас засобом сигналізації 2.4 реалізується фіксація спрацювання того чи іншого захисного пристрою та доведення цієї інформації до чергового персоналу. Останнє є надзвичайно важливим, оскільки раптове відключення електродвигуна (ЕД) без чіткого з'ясування причин може бути сприйнятим оператором технологічного процесу як хибне, що спричинить повторне введення пошкодженого двигуна в мережу.

Для належного функціонування пристрою захисту потрібне джерело оперативного струму 3 в якості якого можна використовувати [1, 2, 8]: струмові трансформатори приєднання, що захищається, а також трансформатори напруги та власних потреб (для змінного оперативного струму), групові блоки живлення та попередньо заряджені конденсатори, підключені до струмових чи напругових трансформаторів, а також трансформаторів власних потреб розподільного пристрою (РУ), від яких живиться двигун (для випрямленого оперативного струму), або ж акумуляторна батарея.

Груповий захист 6 (рис. 3.1, б) здійснює моніторинг таких параметрів мережі (наприклад, напруги, частоти, напрямку потужності), які дають змогу оцінити ступінь небезпеки певного режиму для ансамблю ЕД, що, як правило, підключені до однієї секції шин. У разі аварійної ситуації груповий захист зазвичай впливає на всю групу ЕД або на окремі її підгрупи. Керуючі впливи α та β викликають згасання поля синхронного двигуна (СД), вимикаючи всі або частину ЕД з мережі, використовуючи ланцюги індивідуальних захистів 2 або схеми керування 4 вимикачами Q1, Q2, Q3.

3.2 Вимірювальні трансформатори струму та їхні характеристики

Струмові трансформатори (СТ) забезпечують гальванічне розділення релейного захисту ЕД від високовольтних кіл та зменшують первинний струм до величин, придатних для вимірювання.

В електроустановках напругою 6–10 кВ, включно з приєднаннями ЕД, СТ

зазвичай монтуються у комірках КРУ, що зумовлює малу довжину (близько 2–5 м) з'єднувальних провідників від СТ до реле захисту [1, 5]. СТ, призначені для диференціального захисту ЕД (на рисунку 3.1, а – гілка від ТА2 зі сторони нульових виводів обмотки статора), розміщуються зовсім поруч із ЕД на шинах, які з'єднують обмотку статора у з'єднання "зірка" або "трикутник". Відстань від цих СТ до реле захисту, розташованих у КРУ, є суттєво більшою, і може досягати 200–500 м. Нерідко для підключення захистів ЕД застосовуються вбудовані в статор СТ. У вітчизняних КРУ інсталиуються СТ таких типів, як ТПЛ-10, ТПЛУ-10, ТЛК-10, ТВЛМ-10, ТПОЛ-10, ТПЛК-10, ТПЛМ-10 [10, 11].

Похибки СТ впливають на функціонування захистів ЕД та можуть знижувати їхню швидкодію. Найбільш значні похибки СТ спостерігаються у перехідних режимах, коли первинний струм містить аперіодичну складову. Розрахунки показують, що постійна часу спаду цієї складової становить у середньому 0,05 с, а для потужних ЕД вона може сягати 0,1 с. За таких умов тривалість існування підвищених похибок перехідного режиму може становити 0,15–0,3 с, що значно перевищує швидкодію пристроїв релейного захисту (РЗ). Таким чином, необхідно брати до уваги похибки СТ як у сталому, так і в перехідному режимах, причому доцільно мати або відносно нескладні аналітичні залежності, або графічні матеріали [2].

За розрахунками на основі довідкових даних сучасних СТ встановлено, що за умови повної похибки $\varepsilon = 10\%$ при синусоїдальному первинному струмі у діапазоні крайніх значень первинного струму, що відповідає опорам навантаження $Z_n = 0,2 \div 5$ Ом при номінальному вторинному струмі СТ $I_{2\text{ном}} = 5$ А, індукції напруженості магнітного поля можуть розташовуватися як вище, так і нижче коліна кривої намагнічування.

3.3 Струмові трансформатори нульової послідовності

Відомості про струм нульової послідовності у первинній мережі, необхідні для захисту ЕД від замикань на землю в обмотці статора, можна отримати двома шляхами [1 – 3].

Перший метод полягає в тому, що фазові струми, які протікають у колі статора, спочатку трансформуються за допомогою стандартних СТ у вторинне коло, а потім їх виконується геометричне сумування (рис. 3.2). Унаслідок цього струм у реле КА стає рівним

$$\underline{I}_p = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \frac{I_A}{n_c} + \frac{I_B}{n_c} + \frac{I_C}{n_c} + I_{2нб},$$

де n_c – коефіцієнт трансформації ТС, що створюють фільтр струмів нульової послідовності;

$I_{2нб}$ – вторинний струм небалансу, що обумовлений неідентичністю ТС.

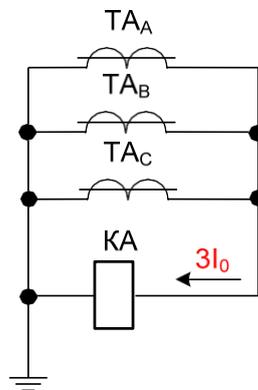


Рисунок 3.2 – Тритрансформаторний фільтр струмів нульової послідовності

В режимах пуску, самозапуску або зовнішнього КЗ, коли допускається робота фазних ТС з похибкою $\varepsilon = 10\%$, в реле буде протікати струм:

$$I_{2нб} = \frac{I_{\max}'' \cdot \varepsilon}{100 \cdot n_c} = \frac{0,1 \cdot I_{\max}''}{n_c}$$

Відповідне значення первинного струму $I_{1нб}$, від якого захист повинен бути відстроєний, складе:

$$I_{1нб} = I_{2нб} \cdot n_c = 0,1 \cdot I_{\max}'' .$$

Для СД типу СТД-1250-2 ($U_{\text{ном}} = 6$ кВ) значення $I_{1нб}$ при зовнішньому трифазному КЗ дорівнює:

$$I_{1нб} \approx \frac{1,1 \cdot I_{\text{ном}}''}{x_d} \cdot 0,1 = \frac{1,1 \cdot 139 \cdot 0,1}{0,138} = 110 \text{ А} .$$

Зрозуміло, що дістати початковий струм спрацювання захисту від замикання на землю $I_{\text{сз}} < 5$ А, що становить лише одиниці та частки відсотка від фазного струму електродинамічного двигуна (ЕД), використовуючи фільтр струмів нульової послідовності (СНП), складений із трьох трансформаторів струму (ТС), практично неможливо. Саме через цю особливість виділення струму нульової послідовності (СНП) розглянутим методом набуло поширення лише у схемах захисту ЕД від замикань на землю в мережах, де нейтраль заземлена через резистор або наглухо.

Другий підхід ґрунтується на застосуванні трансформатора струму нульової послідовності (СНП), який являє собою замкнений осердя з намотаною на ньому вторинною обмоткою. Первинною обмоткою слугують три фази одного або кількох кабелів, що проходять крізь отвір осердя. Магнітні потоки Φ_A , Φ_B і Φ_C , які створюються фазними струмами I_A , I_B та I_C , індукують ЕРС у вторинній обмотці ТСНП.

Залежно від кількості кабелів, що живлять ЕД, та типу реле захисту від замикань на землю, застосовують один або кілька ТСНП для одного кабеля або один ТСНП з додатковим підмагнічуванням змінним струмом (ТНП) [1 – 3].

3.4 Вимірювальні елементи захистів

До вимірювальних елементів (ВЕ) захистів ЕД висуваються такі загальні вимоги [1, 2]:

1. Точність спрацювання, що характеризується основною похибкою за параметром спрацювання. У релейних захистах (РЗ) зазвичай застосовують ВЕ

класу точності 5 та 10, що добре узгоджується з класами точності ТС та трансформаторів напруги (ТН), до яких підключаються захисти ЕД. Точність впливає на параметри спрацювання і, зрештою, на чутливість захисту, оскільки зі зростанням точності звужується діапазон вимірюваної величини, в якому захист не може розрізнити аварійний режим роботи ЕД від нормального.

2. Швидкодія. Цей параметр є особливо важливим для ВЕ захистів від коротких замикань (КЗ) через ризик пожежі, руйнування ЕД електричною дугою тощо. У низці випадків високої швидкодії потребують також захисти від замикань на землю з міркувань стійкості навантаження. Час спрацювання ВЕ регламентується при певних значеннях вхідних сигналів.

3. Коефіцієнт повернення є одним з ключових показників для ВЕ захистів, які мають витримку часу та налаштовуються із запасом від нормального режиму навантаження: струмових захистів від перевантаження та асинхронного режиму, а також захистів від втрати живлення.

4. Споживана потужність нормується як для вхідних ланцюгів (струму та напруги), так і для ланцюгів живлення. Зменшення потужності, що споживається у вхідних колах, дозволяє знизити похибки ТС та ТН, спростити схеми ВЕ та полегшити конструкцію захисту. Водночас, підвищення точності ВЕ у деяких випадках досягається за рахунок зростання потужності, що споживається ланцюгами живлення.

Струмові вимірювальні реле. ВЕ струмових захистів ЕД реалізують за допомогою електромеханічних або безконтактних максимальних струмових реле. Реле підключають безпосередньо до кіл вторинних обмоток ТС, встановлених у фазах — для захистів, що реагують на збільшення струму статора, або до трансформатора струму нульової послідовності — для захисту від замикання на корпус.

Принцип дії електромеханічних реле базується на електромагнітних або індукційних явищах [1, 2, 5, 8].

У захистах ЕД від втрати живлення, зокрема від зниження напруги, які виконані на електромеханічних реле, переважно використовуються реле

мінімальної напруги непрямої дії типу РН-54/160. Прямодіючі реле, які поєднують функцію вимірювання напруги та органу витримки часу, серії РНВ (або РНВЛ), мають для цих цілей малоприматні характеристики. Вони мають лише один варіант виконання з часом дії менше ніж 4 с, а похибки по напрузі спрацювання та повернення можуть сягати 100%, до того ж, таке реле є складним у налаштуванні та експлуатації. Тому РНВЛ застосовують лише у захистах ЕД некритичних механізмів.

Основним вимірювальним реле у захисті від втрати живлення є напівпровідникове реле зниження частоти типу РЧ-1, яке підключається до ТН. Реле зберігає працездатність при коливанні напруги мережі в межах (0,2–1,3) $U_{ном}$, при цьому частота спрацювання змінюється лише на 0,3 Гц.

Для фіксації припинення надходження активної потужності до ЕД з боку джерела електропостачання у типовій схемі захисту від втрати живлення застосовують реле напрямку потужності типу РБМ-171, виконане на індукційному принципі. Реле має дві системи обмоток: струмову та напругову, розташовані на чотирифлюсовій магнітній системі, у зазорі якої може обертатися легкий алюмінієвий циліндричний ротор. Обертювий момент реле [1, 2, 8]:

$$M_{об} = K \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi_p + \alpha) = K \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi - \varphi_{мч}),$$

де U_p і I_p – напруга та струм, які підводяться до реле;

K – коефіцієнт пропорційності;

$\varphi_{мч} = -\alpha$ – кут максимальної чутливості реле, який в реле типу РБМ-171/1 може бути встановлено рівним $(-30 \pm 5)^\circ$ або $(-45 \pm 5)^\circ$.

Якщо прийняти $\underline{U}_p = \underline{U}_{вс}$ та $\underline{I}_p = -\underline{I}_c$, то з урахуванням $U_{вс} = \sqrt{3} \cdot U_c$ при $\varphi_{мч} = -30^\circ$ отримаємо:

$$M_{об} = K \cdot \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_c \cdot \cos \varphi = K \cdot \sqrt{3} \cdot P.$$

Отже, у стандартному робочому стані мережі, коли живильна напруга надходить на пристрій (ЕД), крутний момент є додатним, а контакти реле

зберігають свій замкнений стан. У разі зникнення живлення, наприклад, через відключення комутаційного апарату Q, активна потужність у контрольованій точці падає до нуля, що призводить до розмикання контактів реле. Мінімальна потужність, необхідна для спрацювання реле за умови номінального струму, становить 3 ВА. Споживана потужність колами струму не перевищує 10 ВА, тоді як для кіл напруги цей показник обмежений 40 ВА. Реле коректно визначає вектор потужності при номінальному напруженні та струмі, що не є нижчим за 0,2 від номінального значення ($I_{ном}$).

Розмикання контактів, спричинене падінням струму до нуля або зміною напрямку потоку потужності, відбувається протягом часу, що не перевищує 0,05 секунди.

Таким чином, в нормальному режимі роботи мережі, коли ЕД отримує живлення від джерела, обертовий момент позитивний і контакти реле замкнені. При втраті живлення, наприклад, при вимиканні вимикача Q, активна потужність в контролюємій точці стає рівною нулю і реле розмикає свої контакти. Мінімальна потужність спрацювання реле при номінальному струму складає 3 ВА. Потужність, яка споживається по колам струму, не більше 10 ВА, а по колам напруги – 40 ВА. Реле правильно визначає направлення потужності при номінальній напрузі та струмі не менше $0,2I_{ном}$.

Час розмикання контактів при скиданні до нуля струму або при зміні направлення потужності не перевищує 0,05 с.

3.5 Елементи логічної частини захистів

Реле часу. Для досягнення затримки спрацювання пристроїв захисту електродвигунів (ЕД), що не залежить від рівня вхідного сигналу, у стандартних виконаннях застосовуються електромеханічні реле серій РВ-100 та РВ-200, а також напівпровідникові реле моделі ВЛ-34.

Реле ВЛ-34 має діапазон встановлення витримок часу від 1 до 100 секунд, з класом точності 2,5. Після зняття напруги, повернення всієї схеми у вихідне

положення займає не більше 0,2 секунди.

Енергоспоживання реле становить близько 8 Вт при роботі на постійному оперативному струмі та не перевищує 10 ВА на змінному.

Проміжні реле. Ці елементи потрібні в типових схемах захисту ЕД для передачі сигналів між різними ланцюгами та для комутації кіл із значним енергоспоживанням.

Завдяки наявності кількох груп контактів, ці реле дають можливість одночасно змінювати стан цілого набору ланцюгів.

Реле типу РП-23 (для постійного оперативного струму) та РП-25 (для змінного) побудовані на магнітній системі клапанного типу. Кожне реле обладнане чотирма замикаючими та одним розмикаючим контактом. Модель РП-23 споживає потужність до 6 Вт, а час спрацювання не перевищує 0,06 секунди.

Проміжне реле серії РПУ-2 має схожі функції та принцип роботи, замінюючи реле типів РП-23 та РП-25. Воно вирізняється меншим енергоспоживанням – лише 4 Вт (для варіанту на постійному струмі) та підвищеною швидкістю: 0,05 с для постійного струму та 0,038 с для змінного.

Проміжні реле моделей РП-251 та РП-252 використовуються у схемах захисту ЕД, коли потрібна невелика затримка при спрацюванні (РП-251) або при поверненні. У конструкції цих реле інтегровані мідні демпферні шайби, які забезпечують необхідну витримку під час перемикання контактів. Регулювання часу затримки здійснюється зміною кількості цих шайб: від 0,07 с до 0,11–0,14 с для РП-251 та від 0,5 с до 1,1–1,4 с для РП-252. При спрацюванні реле споживає потужність у діапазоні 6–8 Вт. Реле має п'ять контактів. На змінному оперативному струмі аналогом РП-252 є реле РП-256.

Проміжне реле типу РП-341 застосовується у стандартних схемах захисту ЕД на змінному оперативному струмі, коли виникає потреба у шунтуванні електромагніту вимикача. Реле має два перемикаючі контакти, один з яких є посиленням і здатний шунтувати/дешунтувати коло керування ТС при вторинних струмах до 150 А. Максимально допустимий тривалий струм через

контакти складає 5 А. Час спрацювання реле при струмі, що перевищує уставку вдвічі, не перевищує 0,06 секунди.

3.6 Сигнальні органи захистів ЕД

Як сигнальний елемент систем захисту електричних двигунів (ЕД), що реалізовані на електромагнітних реле, задіяне індикаторне реле моделі РУ-1. Найбільш поширеним варіантом у схемах захисту ЕД є послідовне підключення його струмової обмотки до контакту вимірювального чи логічного реле конкретного захисту. Це реле чи безпосередньо впливає на електромагнітний пристрій вимкнення автоматичного вимикача, чи керує спільним для всіх захисних пристроїв проміжним вихідним реле. У тих захистах, де функцією є лише «сигналізація», індикаторне реле комплектується котушкою напруги.

Реле типу РУ-1 оснащено електромагнітним операційним механізмом та потребує ручного скидання. Його час спрацювання не перевищує 0,05 секунди. Максимально допустимий пусковий струм та тривало допустимий номінальний струм контактів становлять чотири амperi. Енергоспоживання реле у момент спрацювання: для моделі зі струмовою обмоткою, розрахованою на постійний струм, це показник складає 0,25 Вт, тоді як для варіанту з обмоткою напруги – 1,75 Вт. Ці реле є працездатними як у контурах постійного, так і змінного оперативного струму.

3.7 Пристрої оперативного струму

Для забезпечення живлення кіл релейного захисту на електростанціях заведено використовувати постійний оперативний струм, що надходить від акумуляторних батарей (АБ). На ж підстанціях та розподільчих пристроях промислових об'єктів, окрім постійного оперативного струму, чимало застосування знайшла система, що базується на випрямленому оперативному струмі (СВС). У випадку міських теплових електростанцій, а також на окремих промислових підстанціях, захист елементів електричних мереж (ЕД)

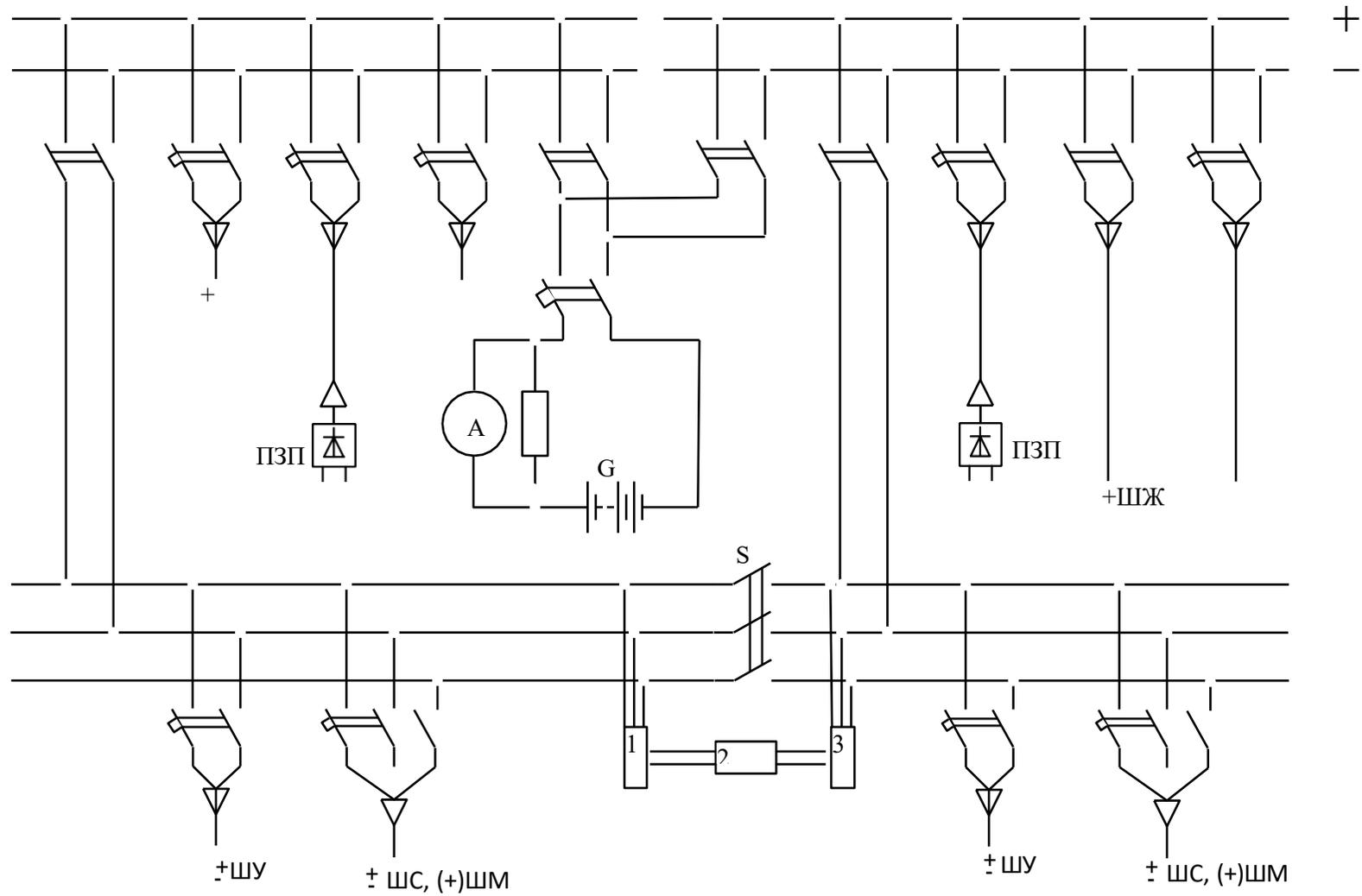
реалізується за допомогою змінного оперативного струму. Практика показує, що найбільш стабільно й надійно функціонують саме акумуляторні батареї та СВС.

Постійний оперативний струм. У ролі джерела оперативного струму зазвичай виступають акумуляторні батареї типу СК, які демонструють прийнятні техніко-економічні характеристики та тривалий термін служби. Схематичне зображення кола оперативного струму представлено на рисунку 3.3. У штатному робочому режимі живлення шин керування (\pm ШУ) та шин сигналізації (\pm ШС) забезпечується від пристрою ПЗП, котрий одночасно виконує функцію підзарядного пристрою для акумуляторів. Номінальна напруга на спільних шинах щита постійного струму, як правило, становить 220 В. У разі короткого замикання у мережі 6–10 кВ, якщо напруга на виході пристрою ПЗП падає, живлення кіл захисту, управління та сигналізації автоматично переходить на акумуляторну батарею.

Висновки до третього розділу

Для фіксації припинення надходження активної потужності до ЕД з боку джерела електропостачання у типовій схемі захисту від втрати живлення застосовують реле напрямку потужності типу РБМ-171, виконане на індукційному принципі. Реле має дві системи обмоток: струмову та напругову, розташовані на чотирифлюсовій магнітній системі, у зазорі якої може обертатися легкий алюмінієвий циліндричний ротор

У штатному робочому режимі живлення шин керування (\pm ШУ) та шин сигналізації (\pm ШС) забезпечується від пристрою ПЗП, котрий одночасно виконує функцію підзарядного пристрою для акумуляторів. Номінальна напруга на спільних шинах щита постійного струму, як правило, становить 220 В. У разі короткого замикання у мережі 6–10 кВ, якщо напруга на виході пристрою ПЗП падає, живлення кіл захисту, управління та сигналізації автоматично переходить на акумуляторну батарею.



1,3 – контроль напруги та пристрій миготливого світла; 2 – вимірювання і контроль ізоляції

Рисунок 3.3 – Спрощена схема мережі постійного струму

РОЗДІЛ 4

ВИКОНАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

4.1 Загальні технічні вимоги

Головні завдання, які покладаються на релейний захист електричних двигунів (ЕД), охоплюють таке [1, 2]:

- оперативне виявлення електричних пошкоджень (бажано на ранніх етапах їх настання та прогресування) у самому ЕД та допоміжній пусковій апаратурі, а також небезпечних для них відхилень від нормального режиму роботи;

- генерація та надсилання командних сигналів до комутаційних пристроїв, системи збудження, приводних механізмів та пускової апаратури, що дасть змогу мінімізувати розміри руйнувань, від'єднати лінію з пошкодженим ЕД від джерела живлення, запобігти розвитку небезпечного відхилення від режиму, забезпечити найкоротший час простою та швидке відновлення штатної роботи технологічних ланок та окремих агрегатів.

Ці цілі деталізуються у загальних технічних вимогах, що висуваються до РЗ, його різновидів та способів реалізації. Згідно з ПУЕ, для електричних машин (ЕА) та синхронних двигунів (СД) з напругою понад 1 кВ обов'язковим є передбачення таких типів захисту [3, 8]: від багатofазних замикань у витках статора, від одинарних замикань однієї фази обмотки статора на корпус (землю), від перевантаження, втрати живлення, короткочасного чи тривалого падіння напруги, а також (для СД) від несинхронного режиму роботи. Окрім цього, у випадках, коли умови роботи мережі живлення не виключають тривалої небезпечної нерівномірності напруги на клеммах ЕД, доцільно запровадити відповідний захист від такого стану.

Належне функціонування РЗ забезпечується його вибірковістю (селективністю), швидкістю дії та чутливістю. Під селективністю для захистів ЕД від багатofазних та одинарних замикань на корпус у обмотці статора розуміють здатність за короткий інтервал часу відключати всі замикання у зоні,

що контролюється, а також не спрацьовувати при пошкодженнях, що виникли поза цією зоною, та при аномальних режимах. Невибіркове відключення ЕД, особливо під час пуску та самозапуску, не лише порушує технологічний процес, але й може спричинити вихід з ладу самого двигуна. Вимога до швидкодії зазвичай стосується лише захистів від багатофазних замикань. Мінімальний час локалізації пошкодження, враховуючи власний час спрацювання захисту та повний час відключення вимикача 6÷10 кВ, становить приблизно 0,15÷0,18 с. Для захистів від одинарних замикань на корпус, якщо це необхідне для забезпечення недіяльності при зовнішніх замиканнях на землю, дозволяється мати витримку часу 1÷2 с.

Вимоги до чутливості захистів ЕД регламентовані в ПУЕ. Для захистів від багатофазних замикань у статорній обмотці встановлюється мінімальний коефіцієнт чутливості при двофазних металевих коротких замиканнях на виводах ЕД, а для захистів від одинарних замикань на корпус – найбільше дозволене значення первинного струму спрацювання.

Вихід з ладу захисту ЕД, як правило, призводить до вкрай серйозних наслідків, особливо для самого електродвигуна. Це зумовлено тим, що захист суміжної ділянки – мережа–збірні шини, до якої підключена лінія до ЕД, зазвичай або не реагує на КЗ у двигуні, або має витримку часу 1÷2 с відповідно до умови селективності із захистами ліній, що відходять від збірних шин. Затримка у відключенні КЗ спричиняє розвиток аварії, значне збільшення масштабу руйнувань, виникнення пожежі та пошкодження механізму, а спричинене цим падіння напруги на клеммах інших споживачів може повністю паралізувати роботу технологічного обладнання та ліній. Захисти ЕД повинні бути простими та зручними в експлуатації, а їхній ресурс надійності має дорівнювати або перевищувати термін служби самого електродвигуна.

4.2 Захист від замикання на землю (корпус) в обмотці статора

Відповідно до вимог ПУЕ, захист від однофазних замикань на землю (ОЗЗ) в обмотці статора необхідно передбачати для електродвигунів (ЕД) номінальною потужністю понад 2000 кВт у випадках, коли сумарний ємнісний струм мережі, до якої приєднано ЕД, дорівнює або перевищує 5 А. Для ЕД меншої потужності раніше вважалося достатнім установлювати зазначений захист лише тоді, коли сумарний ємнісний струм мережі становив 10 А і більше.

Такий підхід, який тривалий час застосовувався на практиці, призвів, як показав досвід експлуатації, до фактичної відсутності надійного захисту ЕД потужністю до 2000 кВт як від однофазних, так і від подвійних замикань на землю (одне в обмотці статора, інше — у мережі). Несвоєчасне відключення ОЗЗ зумовило значну кількість пошкоджень електродвигунів, у тому числі випадки вигорання кількох (трьох і більше) секцій обмотки статора. Накопичений досвід стимулював перехід до єдиного критерію встановлення захисту від замикань на землю для всіх ЕД незалежно від їх номінальної потужності.

На даний час таким критерієм вважається величина сумарного ємнісного струму замикання на землю, рівна 5 А. При $I_{\Sigma} \geq 5$ А улаштування захисту від ОЗЗ в обмотці статора є обов'язковим, а при $I_{\Sigma} < 5$ А — необов'язковим. Разом з тим слід зазначити доцільність застосування цього виду захисту й при менших величинах струму, оскільки замикання на землю в обмотці статора є найпоширенішим видом пошкоджень ЕД. Навіть при $I_{\Sigma} < 5$ А такі замикання не є самоліквідуючими та становлять значну небезпеку з огляду на можливість їх повільного переходу в коротке замикання.

Отже, чим більшою є чутливість захисту до однофазних замикань на землю в обмотці статора, тим вища ймовірність запобігання переходу пошкодження в багатофазне або виткове коротке замикання, тим меншими будуть масштаб пошкоджень і трудовитрати на ремонт ЕД.

Оцінювання якості захисту за коефіцієнтом чутливості $K_{\text{ч}}$, визначеним для режиму металевого однофазного замикання на землю на лінійному виводі ЕД, є

недостатнім, оскільки такий режим не відображає реальних умов виникнення більшості пошкоджень.

Звичайно, коли реле захисту підключається до ТСНП в РУ і в зону захисту таким чином входить лінія, що з'єднує двигун з РУ, необхідно, щоб

$$K_{\text{ч}} = \frac{I'_{\text{C}\Sigma} - I_{\text{C}}}{I_{\text{Cз}}} \geq K_{\text{ч.min}}, \quad (4.1)$$

де $K_{\text{ч.min}}$ – мінімальний коефіцієнт чутливості, який нормується для захисту ліній від ОЗЗ;

I_{C} – власний емнісний струм захищеного приєднання «лінія плюс двигун», А;

$I'_{\text{C}\Sigma}$ – найменше значення сумарного емнісного струму замикання на землю, яке повинно розраховуватися з урахуванням реального тривалого режиму роботи секції РУ, до якої підключено ЕД, без приєднань, що суттєво впливають на загальну емність мережі, А.

Отже, для захисту від струмів, спричинених однофазними замиканнями, а саме такий тип захисту є найбільш затребуваним у переважній більшості ситуацій, критично важливо встановити максимально низький струм спрацьовування, який, втім, не повинен перевищувати 5 Ампер із певним запасом, оскільки значення понад цю межу вважається небезпечним. Коефіцієнт цього запасу доречно обрати у межах 1,2–1,3.

Йдеться про захисні системи, що реагують на дійсне (ефективне) значення струму нульової послідовності. Захисти електричних двигунів (ЕД) від замикань на землю в обмотках статора, побудовані на цьому принципі, набули найширшого застосування. Як елементи вимірювання струму використовуються типові реле максимального струму серії РТЗ-51 [2, 8]. Якщо кількість кабелів, що з'єднують ЕД із розподільчим пристроєм (РУ), не перевищує чотирьох, реле підключається до серійних трансформаторів струму нульової послідовності (ТСНП) типу ТЗЛМ. У випадку п'яти кабелів як датчик струму застосовується трансформатор струму нульової послідовності з підмагнічуванням типу ТНП-7.

У мережах з компенсованою втратою на землю, з метою підвищення чутливості захисту, реалізованого з ТСНП з підмагнічуванням, передбачається наявність органу витримки часу, що спрацьовує із витримкою $t_{cp} = 1 \div 2$ с. Проте, для гарантування негайного відключення ЕД у разі подвійного замикання на землю (одне у статорі двигуна, а інше – у мережі), у вторинну обмотку ТСНП включається струмове реле, налаштоване на первинний струм спрацьовування близько 100–150 Ампер. Завдяки цьому захист отримує дворівневу (двоступеневу) характеристику.

Раніше випускалося реле типу РТЗ-50, яке у комбінації з ТСНП без підмагнічування забезпечувало мінімально можливі струми спрацьовування захисту ($I_{сз \text{ min}}$), значення яких наведені у таблиці 4.1. Так, вже при використанні трьох ТСНП (що відповідає трикабельній лінії до ЕД) для підключення реле, мінімальний струм спрацьовування становить $I_{сз \text{ min}} = 4,2$ А. З цієї причини, якщо кількість кабелів у лінії дорівнює чотирьом або більше, необхідно використовувати ТСНП з підмагнічуванням типу ТНП-4 або ТНП-7.

Таблиця 4.1 – Мінімальні струми спрацьовування захисту від замикань на землю в обмотці статора електродвигунів

Тип ТСНП	Тип реле захисту	Уставка струму спрацьовування реле, мА	Мінімальне значення первинного струму спрацьовування, А						
			один ТСНП	два ТСНП, включені		три ТСНП, включені		чотири ТСНП, включені	
				послідовно	паралельно	послідовно	паралельно	послідовно	паралельно
ТЗЛМ	РТ-40/0,2	100	8,6	11,6	12,5	13,0	–	–	–
	РТЗ-50	30		3,9	5,2	4,2	–	–	–
ТЗРЛ	РТЗ-51	20	0,69	1,25	0,97	1,95	1,19	2,48	1,43
	РТ-40/0,2	100	20	25	34	–	–	–	–
	РТЗ-50	30	–	–	–	–	–	–	–
ТЗЛ	РТЗ-51	20	0,81	1,34	1,0	1,95	1,2	2,56	1,52
	РТ-40/0,2	100	7,0	9,0	11,0	–	–	–	–
	РТЗ-50	30	3,5	4,0	6,0	–	–	–	–
ТЗЛМ-1	РТЗ-51	20	0,68	1,25	0,97	1,76	1,19	2,48	1,43
	РТЗ-51	20	0,60	1,08	0,69	1,6	0,8	2,16	0,96

Примітки:

1. Струми спрацьовування вказано при частоті $f = 50$ Гц.
2. Реле типу РТ-40/0,2 при уставці 100 мА має паралельне з'єднання обмоток.

Струмові направлені захисти. Ці засоби захисту знайшли своє головне застосування у системах з ізольованою нейтраллю, коли струми замикання на землю є невеликими. Принцип їх роботи базується на тому, що відносно вектора напруги $3U_0$, виміряного на розімкненому трикутнику допоміжної обмотки трансформатора напруги (ТН), вектор струму пошкодженої ділянки запізнюється на 90° тоді як вектори струмів неушкоджених підключень випереджають цей напруговий вектор. Така особливість дає змогу чітко ідентифікувати наявність дефекту в електричному двигуні (ЕД), а також у приєднаній лінії, якщо ТН встановлено у розподільчому пристрої (РУ). Важливою позитивною якістю напрямкового захисту є можливість визначення того, який саме елемент пошкоджений, за фазою струму нульової послідовності, незалежно від характеру замикання на корпус (металеве чи через електричну дугу), а також незалежно від величини власного ємнісного струму захищуваного елемента. Наразі серійне виробництво спрямованого струмового захисту від однофазних замикань під маркою ЗЗП-1 є поширеною практикою.

4.3 Захист від міжфазних замикань в обмотці статора

Загальні положення. Захист від багатофазних коротких замикань (КЗ) спрацьовує у відповідь на величину струму, що тече до місця пошкодження з боку мережі живлення, і діє миттєво, вимикаючи ЕД з мережі, а у синхронних двигунах (СД) — ще й збудження.

У випадку замикання між фазами обмотки статора, струм КЗ протікає принаймні у двох фазах лінії, що з'єднує ЕД з його вимикачем. Відтак, для отримання інформації про КЗ достатньо використовувати трансформатори струму (ТН) фаз А та С, розміщені у комірці вимикача ЕД у КРУ, а за наявності пускового реактора — також і в комірці вимикача реактора. При цьому зона дії захисту охоплює, окрім самого ЕД, його з'єднання з вимикачем та пусковий реактор.

Двофазне виконання захисту унеможливорює його спрацювання при

подвійних замиканнях на землю, коли одна точка замикання знаходиться у фазі В обмотки статора, а інша — у фазі А або С ділянки мережі, що електрично пов'язана з пошкодженим ЕД. Якщо не вжити додаткових заходів, значний струм через обидві точки замикання продовжуватиме протікати доти, доки відповідна ділянка мережі не буде відключена дією власного захисту від багатофазних КЗ. Темп усунення цього небезпечного для ЕД режиму та ступінь технічної досконалості цього захисту мають вирішальне значення. Як правило, основні захисти елементів мережі, суміжних з ЕД та силовими трансформаторами, спрацьовують при багатофазних КЗ із затримкою часу $0,5 \div 2$ с, і величина їх струму спрацювання іноді може перевищувати можливі значення струму подвійного замикання на землю. За таких умов пошкодження ЕД матиме серйозний характер. Уникнути цього можна, якщо реалізувати захист ЕД від міжфазних КЗ у трифазному варіанті, встановивши ТН у фазі В, або делегувати функцію вимкнення замикання в обмотці статора захисту ЕД від замикання на землю, а у випадках, коли такий захист має часову затримку або відсутній — струмовому захисту нульової послідовності від подвійних замикань на землю.

Другий підхід є оптимальним. Він забезпечує кращу реакцію на подвійні замикання на землю, особливо якщо суміжні лінії оснащені груповими або індивідуальними реакторами, що обмежують струм. Додатково це дозволяє заощадити на ТН.

За кордоном трифазне виконання захисту від міжфазних КЗ використовується у ситуаціях, коли ЕД експлуатується в мережах із заземленою через резистор нейтраллю.

Для захисту від міжфазних КЗ в обмотці статора застосовують максимальний струмовий захист (МСЗ) та диференційний захист. У вітчизняній практиці МСЗ електродвигунів часто іменують струмовою відсічкою, що означає, що його струм спрацювання у низці ситуацій обирається не виходячи з максимального робочого струму захищуваного компонента, а з урахуванням струму в точці встановлення захисту при КЗ у заздалегідь обраній ділянці

мережі. Проте слід зазначити, що для багатьох ЕД вирішальною умовою при визначенні струму спрацювання є робочий режим пуску, який є одним з природних режимів експлуатації.

Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) регламентують вибір певного способу виконання захисту від міжфазних КЗ залежно від номінальної потужності ЕД. Для ЕД з номіналом менше 5000 кВт рекомендується використовувати струмову відсічку, а для потужніших ЕД встановлюється диференційний захист, зазвичай у двофазному виконанні. Диференційний захист передбачається і для ЕД потужністю до 5000 кВт, якщо струмова відсічка не задовольняє критеріям чутливості. Доцільною є інтеграція диференційного захисту для ЕД з номінальною потужністю 3500 та 4000 кВт.

У диференційному захисті здійснюється порівняння пофазних значень комплексних змінних (або їх складових по фазах) струмів із боку живлення ЕД та з боку його нульових виводів (рис. 4.1).

У міжнародній практиці критерії застосування струмової відсічки або диференційного захисту менше корелюють із номінальною потужністю ЕД, а більше — з його відповідальністю, вартістю та чутливістю відсічки. Наприклад, у США МСЗ (струмова відсічка) монтується у тих випадках, коли співвідношення номінальних потужностей ЕД та силового трансформатора (з $U_k = 8\%$), який живить РУ та до якого підключено ЕД, не перевищує 0,5.

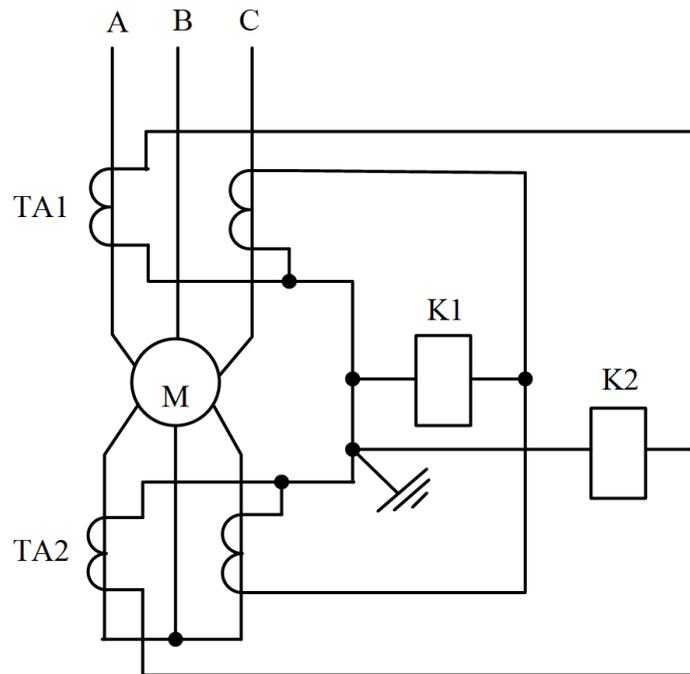


Рисунок 4.1 – Принцип здійснення двохфазного диференційного захисту ЕД

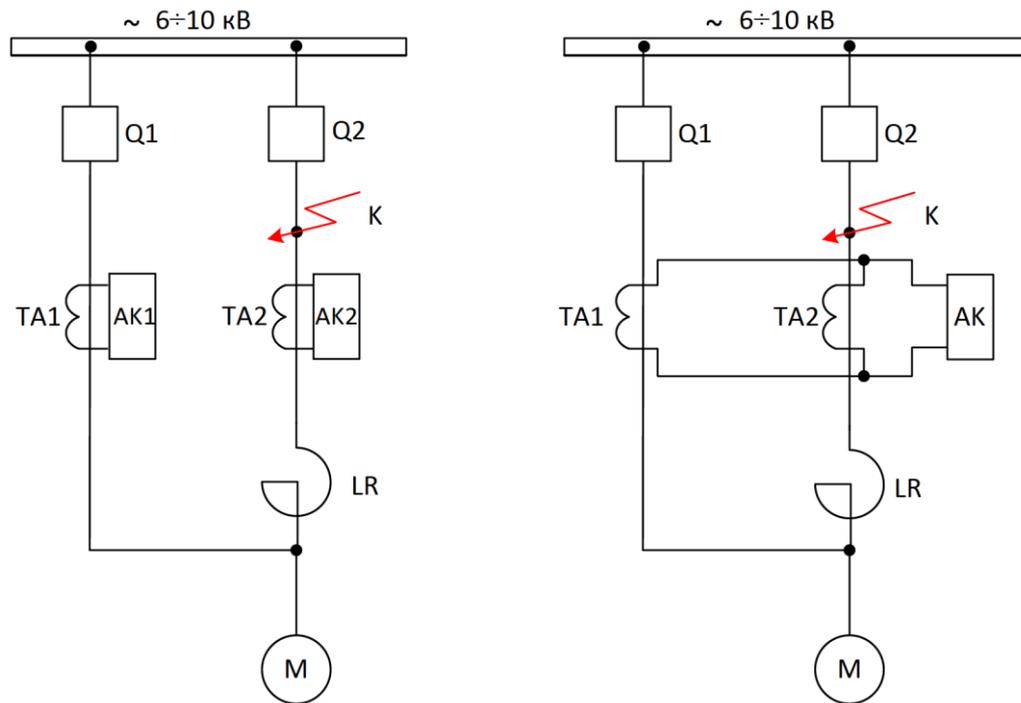
Струмова відсічка. Вимірювальний струмовий релейний апарат можна підключити на різницю вторинних струмів ТС фаз А та С (однорелейна вибійка).

Натепер зростає поширення дворелейної схеми струмової вибійки, де вимірювальні реле підключаються на фазні вторинні струми ТС фаз А та С.

Схема захисту, розглянута на прикладі двошвидкісного АД із номінальною потужністю менше ніж 5000 кВт.

На електродвигунах із реакторним пуском струмова вибійка реалізується двома комплектами. Перший підключають до трансформаторів струму у комірці вимикача основного живлення, а другий – до ТС у комірці вимикача пускового реактора (рис. 4.2, а). Другий комплект ініціює вимикання обох вимикачів та зняття поля, якщо захист встановлено на СД. Це забезпечує відключення КЗ на ділянці між трансформаторами струму та вимикачем пускового реактора, коли вимикач основного живлення замкнений.

Схема, де використовувався лише один комплект струмової вибійки, підключений до паралельно з'єднаних ТС однакових фаз комірок основного живлення та пускового реактора (рис. 4.2, б), донедавна, не давала змоги селективно усувати КЗ у цій точці.



а) з використанням двох комплектів АК1 та АК2;

б) з використанням одного комплекта КА;

Рисунок 4.2 – Схема виконання струмової відсічки для ЕД з реакторним пуском

В серійних схемах захисту для постійного та виправленого струму, як вимірювальні пристрої застосовуються електромагнітні реле лінійки РТ-40 або ж безконтактні реле у складі комплекту ЯРЕ2201.

Диференційний захист. Для реалізації переважної кількості диференційних захистів електричних двигунів (ЕД) задіюються дві групи трансформаторів струму (ТС) з ідентичними коефіцієнтами трансформації. Вони монтується з боку живлення, у шафах відповідних вимикачів комплектних розподільних пристроїв (КРУ), а також із торця нульових виводів обмоток статора.

Вторинні обмотки ТС для однойменних фаз з'єднують провідниками спільного для усіх фаз контрольного кабелю, формуючи таким чином диференційне коло, куди вводиться реле.

У робочих перехідних станах, спричинених пуском та самозапуском ЕД, вторинні струми ТС не збігаються. Цей факт призводить до формування струму нерівномірності (небалансу) у диференційному контурі (у захисному реле),

величина якого визначається за формулою [3]:

$$I_{\text{нб}} = K_a \cdot K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon \cdot I''_{\text{max}}, \quad (4.2)$$

де $K_a = 1$ – коефіцієнт аперіодичності, який враховує вплив аперіодичної складової в перехідному режимі;

$K_{\text{одн}} = 1$ – коефіцієнт однотипності ТС;

$\varepsilon = 0,1$ – розрахункова повна похибка ТС;

I''_{max} – початкове значення періодичної складової струму пуску, самозапуску або зовнішнього КЗ, дає значення струмів небалансу, які не перевищують $(0,7 \div 0,8)I_{\text{ном}}$.

Усі різновиди диференційного захисту електричних машин (ЕД) класифікують так [2, 8]:

- 1) струмові диференційні системи захисту;
- 2) струмові диференційні системи захисту, оснащені гальмуванням;
- 3) фазно-диференціальні системи захисту.

Окрім цього, існують комбіновані модифікації, де поєднуються принципи, взяті з першої та третьої груп, або ж принципи, об'єднуючі всі три перелічені групи.

Струмові диференційні системи захисту. До таких належать усталений апаратурний комплект типу РНТ-565, що активно використовується на чисельних електростанціях та промислових об'єктах [10, 11].

Інтеграція в диференціальне коло реле моделі РНТ-565 (рис. 4.3, а), яке має підвищений поріг спрацьовування відносно аперіодичної складової струму, дещо підвищує чутливість у порівнянні з простою диференційною відсічкою на стандартному реле РТ-40. Це досягається завдяки меншій реакції на невелику аперіодичну складову, яка неминуче присутня у струмі небалансу на початкових етапах запуску, самозапуску чи при зовнішньому короткому замиканні (КЗ). Однак, необхідність уникнення спрацьовування захисту при значних періодичних струмах небалансу змушує встановлювати високе порогове значення (уставку) на рівні $I_{\text{сз}} = (1,8 \div 3)I_{\text{ном}}$. Це, своєю чергою, призводить до недостатньої чутливості до струмів внутрішніх аварій при КЗ,

особливо за умов великого перехідного опору. Саме ця обставина стала рушійною силою для створення низки вдосконалених диференційних систем захисту, націлених переважно на мінімізацію впливу похибок трансформаторів струму (ТС) на функціонування захисту. До цих інноваційних рішень відносять такі розробки [2, 3]:

- диференціальний захист, доповнений стабілізуючим резистором у межах диференційного контуру (до цієї категорії належать реле виробництва компанії ASEA);
- комутаційні реле диференційного типу;
- модифіковані реле серії РНТ, чутливі до профілю (форми) підведеного струму;
- розробки, що використовують додаткові дроселі, вмонтовані у диференціальне коло.

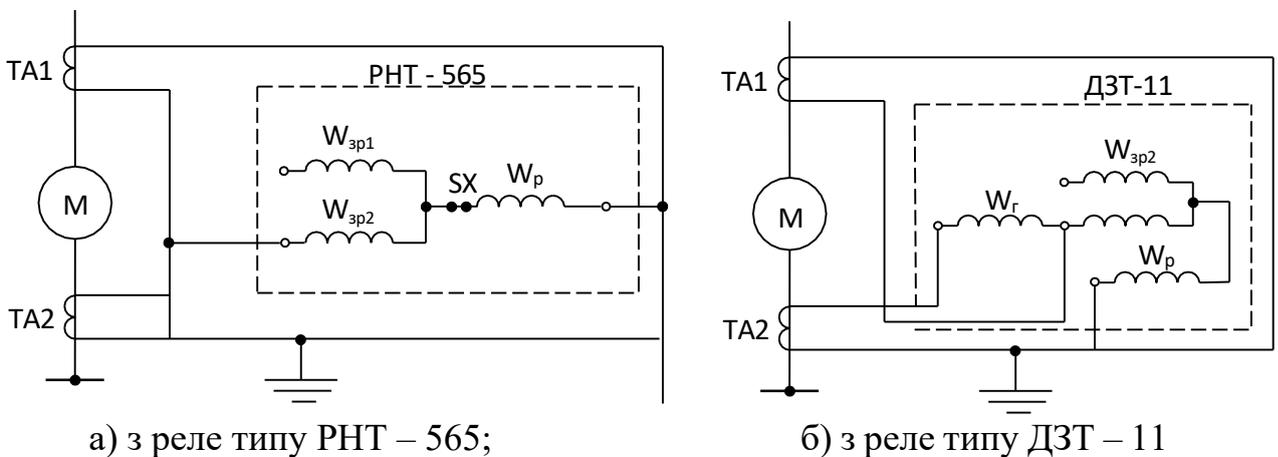


Рисунок 4.3 – Схема однієї фази диференційного струмового захисту

Вплив додаткового опору в диференційному колі на струм небалансу наближено описується виразом [3]:

$$I_{\text{нб}} \approx I_{\text{нб.мах}} \cdot \frac{Z_2}{|Z_2 + Z_{\text{дод}}|},$$

де $I_{\text{нб.мах}}$ – струм небалансу за відсутності додаткового опору в диференційному колі;

$Z_2, Z_{\text{дод}}$ – відповідно опір вторинного кола ТС найбільш завантаженого плеча захисту та додатковий опір в диференційному колі.

Диференційні захисти з гальмуванням. Застосування вторинного струму ТС з одного плеча для створення гальмування від періодичного струму небалансу дає змогу підвищити чутливість диференціального захисту. Практика експлуатації таких захистів засвідчила їхню ефективність. Без застосування гальмування, початковий струм спрацьовування захисту становить $(0,75 \div 1,4) \cdot I_{\text{ном}}$, а коефіцієнт гальмування залежить від струму небалансу захисту й може сягати $0,6 \dots 0,7$. Наявність гальмівного струму призводить до зменшення чутливості захисту. Зокрема, при номінальному гальмівному струмі спрацювання захисту настає при диференційному струмі, еквівалентному $2I_{\text{ном}}$. Це розглядається як недолік у захистах на реле з магнітним гальмуванням.

Диференційно-фазові захисти (ДФЗ) використовують для зіставлення фаз вторинних струмів ТС у плечах. Впровадження ДФЗ виправдане за умов значних похибок ТС, оскільки кутові похибки останніх змінюються в менших межах, аніж загальні. Для ДФЗ амплітуди вторинних струмів ТС відіграють другорядну роль і можуть бути визначені з помірною точністю. Таким чином, до ДФЗ висуваються менш жорсткі вимоги щодо точності роботи ТС, і допускається більший розкид їхніх параметрів, ніж у диференційних струмових захистах. Структурна схема ДФЗ показана на рисунку 4.4, а.

До ТС на лінійних виводах ЕД та зі сторони нейтралі, через перетворювачі струму TL1 та TL2, підключені формувачі Ф1, Ф2, які надають інформацію про фазовий склад струмів. Сигнали від формувачів надходять на вхід реле порівняння фаз РПФ, які реалізують обраний метод фазового зіставлення електричних величин.

У штатному режимі, а також при пуску, самозапуску ЕД чи при КЗ поза зоною дії, струми i_{11} і i_{12} , що підлягають порівнянню, збігаються за фазою (рис. 4.4, б), і захист не спрацьовує. У разі КЗ у зоні дії (рис. 4.4, в) виникає фазовий зсув між струмами i_{11} і i_{12} у діапазоні $180 \div 120^\circ$, що спричиняє спрацювання

РПФ.

Досвід експлуатації демонструє, що диференційний захист, як правило, успішно справляється із завданням захисту ЕД від багатофазних КЗ. Він забезпечує швидке вимкнення пошкодженого ЕД, сприяє локалізації аварії та запобігає подальшому розвитку пошкодження.

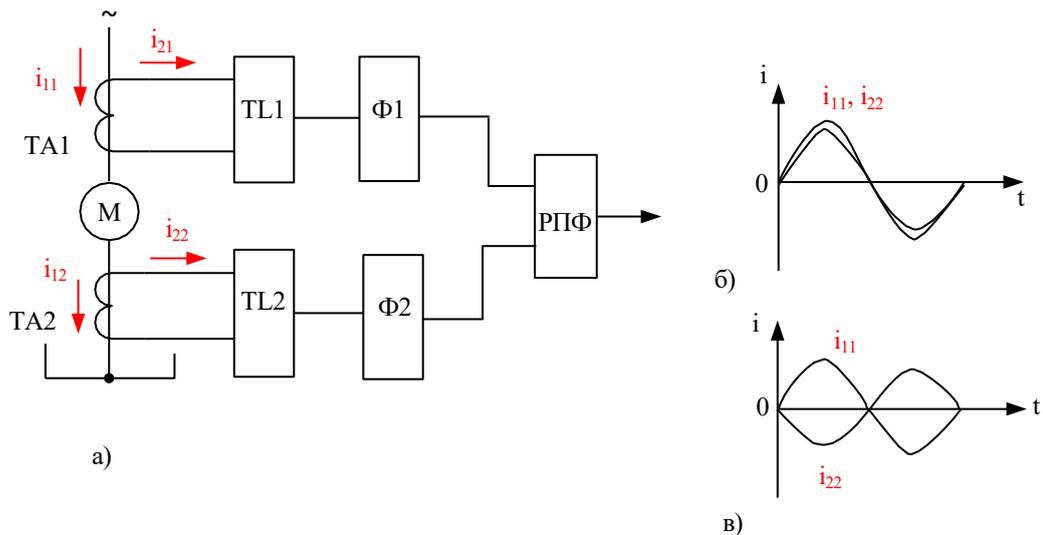


Рисунок 4.4 – Структурна схема (а) та принцип дії (б, в) ДФЗ

Висновки до четвертого розділу

Для захисту від струмів, спричинених однофазними замиканнями, а саме такий тип захисту є найбільш затребуваним у переважній більшості ситуацій, критично важливо встановити максимально низький струм спрацьовування, який, втім, не повинен перевищувати 5 Ампер із певним запасом, оскільки значення понад цю межу вважається небезпечним. Коефіцієнт цього запасу доречно обрати у межах 1,2–1,3.

Досвід експлуатації демонструє, що диференційний захист, як правило, успішно справляється із завданням захисту ЕД від багатофазних КЗ. Він забезпечує швидке вимкнення пошкодженого ЕД, сприяє локалізації аварії та запобігає подальшому розвитку пошкодження.

РОЗДІЛ 5

ВИБІР УСТАВОК СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

5.1 Загальні положення

Процедури розрахунку захисних систем полягають у визначенні параметрів спрацювання (уставок), що задовольняють вимогам селективності та необхідної швидкодії, а також у верифікації чутливості при розрахункових типах пошкоджень та робочих режимах мережі, до котрої підключено електричну машину (ЕД) [2, 3, 6].

Трансформатори струму (ТС), що застосовуються у схемах струмової відсічки та диференційного струмового захисту, мають відповідати кривим граничної кратності при десятивідсотковій похибці у ситуаціях пуску та зовнішніх коротких замикань (КЗ). У випадку КЗ у зоні дії захисту від багатозазних КЗ дозволяється експлуатація ТС зі значно більшими похибками (п'ятдесят відсотків і більше).

Згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), оцінка чутливості проводиться виключно стосовно захистів від багатозазних замикань та замикань на землю (ОЗЗ). При цьому струмова відсічка повинна мати коефіцієнт чутливості при КЗ у виводах обмотки статора в мінімальному режимі не менше двох цілих. Для диференційного струмового захисту, якщо передбачено прямий чи реакторний пуск ЕД від мережі, і якщо струм спрацювання не перевищує номінального струму ЕД, перевіряти чутливість цього захисту при КЗ у виводах ЕД немає потреби. Для ЕД з реакторним пуском захист від багатозазних замикань перевіряється також за критерієм чутливості до КЗ на виводах реактора, де мінімальне значення коефіцієнта чутливості також має становити близько двох.

Чутливість струмових відсічок, що працюють на змінному оперативному струмі та реалізовані за схемою з дешунтуванням вимикаючих електромагнітів приводу, має бути протестована з урахуванням фактичної похибки ТС після дешунтування. При цьому мінімальний коефіцієнт чутливості вимикаючих електромагнітів, що визначається для забезпечення їх надійного

спрацювання, не повинен бути меншим за два цілих і чотири десятих [3].

Чутливість ненаправленого струмового захисту нульової послідовності від ОЗЗ визначається його первинним струмом спрацювання, який має бути не більше ніж п'ять ампер.

Для струмових захистів нульової послідовності, зона дії яких охоплює лінію, що з'єднує ЕД з розподільчим пристроєм (РУ), окрім умови, зазначеної вище, необхідно дотриматись вимоги чутливості відповідно до ПУЕ щодо захистів від замикань на землю кабельних та повітряних ліній. А саме: для ненаправлених захистів мінімальний коефіцієнт чутливості має становити приблизно 1,25 для кабельних ліній та приблизно 1,5 для повітряних ліній, а для спрямованого струмового захисту – близько двох.

Для ненаправлених струмових захистів, де трансформатори струму нульової послідовності (ТСНП) монтуються безпосередньо у виводах обмотки статора, окрім обов'язкової умови мати струм спрацювання із запасом менше п'яти ампер, доцільно також задовольнити критерій:

$$I_{C\Sigma} - I_C \geq I_{C3},$$

де $I_{C\Sigma}$ – сумарний ємнісний струм замикання на землю;

I_C – власний ємнісний струм замикання на землю;

I_{C3} – струм спрацювання захисту.

Покажемо нижче розрахунок вибору уставок деяких захистів електродвигунів.

5.2 Розрахунок струмової відсічки

Розрахунок струму спрацювання I_{C3} миттєво діючого відсікаючого струму, часова характеристика якого становить 2–3 періоди промислової частоти, має бути виконаний із залученням відомостей про аперіодичну складову первинного струму та вільні аперіодичні складові струмів, що виникають у вторинних контурах трансформаторів струму (ТС) [1, 2, 8]. На практиці номінал I_{C3} обирається, базуючись на ефективних значеннях періодичної складової струму, що протікає через реле під час пуску,

самозапуску або при зовнішньому короткому замиканні. Вплив аперіодичних складових враховується шляхом цілеспрямованого підбору вже апробованого в роботі значення коефіцієнта відстроювання $K_{\text{відс}}$ у формулі, що використовується для обчислення струму спрацьовування реле [3]:

$$I_{\text{спр}} = K_{\text{відс}} \cdot K_{\text{сх}} \cdot I_{\text{max}}'' / n_c, \quad (5.1)$$

де $K_{\text{відс}}$ – коефіцієнт відстроювання, який враховує крім аперіодичних складових у струмі реле при перехідних режимах ще і похибки реле та необхідний запас;

$K_{\text{сх}}$ – коефіцієнт схеми, який враховує з'єднання ТС та реле;

n_c – коефіцієнт трансформації ТС;

I_{max}'' – найбільше діюче значення періодичної складової струму зовнішнього трифазного металевого КЗ або струму, що протікає через ТС захисту в режимах самозапуску, пуску (при номінальній напрузі та ковзанні $S=1$) та при виведених пускових пристроях.

Значення $K_{\text{відс}}$ при виконанні струмової відсічки з реле РТ-40 приймається рівним $1,4 \div 1,5$ для АД та $1,7 \div 1,8$ для СД. Якщо відсічка здійснена на реле РТ-80 або РТМ, то $K_{\text{відс}} = 2$.

Для СД, що не підлягають самозапуску, визначаючим за умовою не спрацювання відсічки є режим зовнішнього трифазного КЗ, при якому в місці встановлення захисту протікає струм:

$$I_{\text{max}}'' = I_{\text{к.д}}^{(3)} = I''(0), \quad (5.2)$$

де $I_{\text{к.д}}^{(3)} = I''(0)$ визначається за виразами, що наведені в [3].

Для АД, які не приймають участь в самозапуску, значення I_{max}'' розраховується за виразом:

$$I_{\text{max}}'' = K_{\text{п}} I_{\text{ном}}, \quad (5.3)$$

де $K_{\text{п}}$ – кратність пускового струму при повному зникненні напруги на виводах ЕД;

$I_{\text{ном}}$ – номінальний струм АД.

Якщо в електрично зв'язаній мережі відсутні АД, то для СД, які підлягають самозапуску, I''_{\max} приймається рівним більшому з двох розрахункових значень: отриманому для режиму зовнішнього КЗ з (5.2) та за формулою:

$$I''_{\max} = I_{\text{нс.і}} \quad (5.4)$$

Струм, що виникає при асинхронному включенні індивідуальних споживачів електроенергії (СД) потужністю понад 2000 кВт, які не можуть бути безпосередньо запущені від повної напруги мережі, не мусить перевищувати $I''(0)$. Отже, для таких СД завжди встановлюється $I''_{\max} = I''(0)$.

Якщо асинхронні машини (АД) здатні до самозапуску за умов відсутності навантаження, то для визначення уставки струмового захисту (відсічки) можуть бути визначальними будь-які три робочі стани: процес пуску, режим самозапуску, або зовнішнє коротке замикання (КЗ). Тому, якщо тривалість переривання живлення становить менше ніж 0,5 секунди, для розрахунку I''_{\max} , який підставляється у формулу (5.1), слід брати більше значення з тих, що отримані за формулами (5.3) та (5.4). У разі, коли перерва живлення перевищує 0,5 секунди, або якщо система автоматики (АВР) гарантує відновлення живлення лише після того, як напруга на клемі споживача знизиться до рівня $0,5U_{\text{ном}}$, режим самозапуску не враховується, і I''_{\max} визначається виключно за формулою (5.3).

При одночасному самозапуску СД та АД, значення I''_{\max} слід призначати як найбільше з розрахункових значень: для СД – використовуючи вирази (5.2) та (5.4), а для АД – за формулою (5.3) та (5.4), беручи до уваги ЕРС та напруги, характерні для конкретних робочих умов, а також допустимі величини струму асинхронного збудження [3, 4, 7].

Чутливість струмової відсічки перевіряється під час металевого КЗ між двома фазами на підвідних шинах споживача в тих умовах, які забезпечують найменший струм у реле, що відповідає мінімальному режиму функціонування системи живлення [3]:

$$K_{\text{ч.мін}} = \frac{I_{\text{к.мін}}^{(2)}}{I_{\text{спр}} \cdot n_{\text{с}}}, \quad (5.5)$$

де $I_{\text{к.мін}}^{(2)}$ – періодична складова струму двохфазного КЗ в початковий момент часу у вказаному режимі роботи

При увімкненні реле на різницю струмів фаз А і С розрахунковим видом КЗ є двохфазне між фазами А і В або В і С, коли реле обтікається струмом одної фази.

Значення $K_{\text{ч.мін}}$ може бути порядку двох або більше. Слід відмітити, що в тих випадках, коли чутливість струмової відсічки з реле РТ-40 оказується недостатньою, може стати доцільним виконати відсічку на реле РНТ-565, яке має краще відстроювання від аперіодичних складових у вторинному струмі ТС. Чутливість захисту при цьому підвищується за рахунок зниження $I_{\text{спр}}$, який розраховується по (5.1) при $K_{\text{відс}} = 1,3$.

Чутливість струмової відсічки ЕД з реакторним пуском (рис. 5.1) необхідно перевіряти і при двохфазному КЗ на виводах пускового реактора LR (точка К2). Якщо значення мінімального коефіцієнта чутливості оказується при цьому менше двох, необхідно або зробити перехід на диференційний струмовий захист (при наявності шістьох виводів обмотки статора), або встановити додатковий комплект А3 максимального струмового захисту, струм спрацювання якого вибирається таким же чином, як і комплекта А2 [3, 4, 7].

Коефіцієнт чутливості дешунтуємих вимикаючих електромагнітів або реле типу РТМ визначається за виразом [3]:

$$K_{\text{ч.д}} = \frac{I_{\text{к.мін}}^{(2)} \cdot K_{\text{сх}} \cdot \left(1 - \frac{f_i}{100 \cdot K_{\text{зап}}}\right)}{m \cdot I_{\text{ном.ТС}}}, \quad (5.6)$$

де $I_{\text{к.мін}}^{(2)}$ аналогічно виразу (5.5);

$K_{\text{сх}}$ – коефіцієнт схеми підключення дешунтуємих реле або електромагнітів до ТС; для наведених схем, де ТС з'єднано по схемі неповної зірки, $K_{\text{сх}} = 1$;

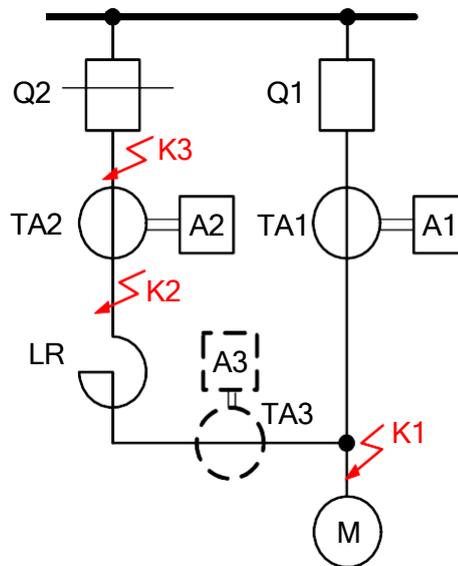
f_i – дійсна струмова похибка ТС при первинному струмі $I_{\text{к.мін}}^{(2)}$ після

дешунтування;

$K_{зап} = 1,2$ – коефіцієнт запаса, який враховує наближений характер визначення струмової похибки;

m – мінімальна кратність надійної роботи дешунтуємого електромагніта або реле, яка визначається по кривих рисунка 6.3 [3] для Z_{Σ} , визначеного по (5.9) або (5.10);

$I_{ном.ТС}$ – номінальний первинний струм ТС.



A1 – комплект струмової відсічки в колі основного живлення; A2, A3 – комплекти МСЗ в колі пускового реактора LR; М – електродвигун;
Q1, Q2 – вимикачі; ТА1÷ТА3 – трансформатори струму

Рисунок 5.1 – До вибору уставок та розрахунку чутливості захистів
ЕД з реакторним пуском

Величина f_i визначається по кривій рисунку 5.2 для коефіцієнта α , який знаходиться за виразом:

$$\alpha = m_d / m_{50}, \quad (5.7)$$

$$m_d = I_{к.мін}^{(2)} / I_{ном.ТС}, \quad (5.8)$$

де m_{50} – кратність первинного струму при 50%-ної похибці ТС, яка визначається по кривих рисунка 6.5 [3] при навантаженні Z_{Σ} на ТС після дешунтування, де:

– для схеми повної зірки: $Z_{\Sigma} = r_{\text{пр}} + Z_p + Z_{\text{ел}} + R_{\text{пер}};$ (5.9)

– для схеми неповної зірки: $Z_{\Sigma} = 2r_{\text{пр}} + Z_p + Z_{\text{ел}} + Z_{\text{р.об.}} + R_{\text{пер}};$ (5.10)

де $r_{\text{пр}}$ – активний опір з'єднувальних проводів (в один кінець);

Z_p – повний опір реле в фазному проводі найбільш завантаженої вторинної обмотки ТС;

$Z_{\text{р.об.}}$ – повний опір реле або інших апаратів (наприклад, вимірювальних приладів) в оберненому проводі;

$Z_{\text{ел}}$ – повний розрахунковий опір дешунтуємого електромагніта або реле, приймається рівним $0,8Z_b$;

Z_b – повний опір електромагніта або реле при втягнутому осерді;

$R_{\text{пер}} = 0,1$ Ом – перехідний опір контактів та затискачів в колі ТС.

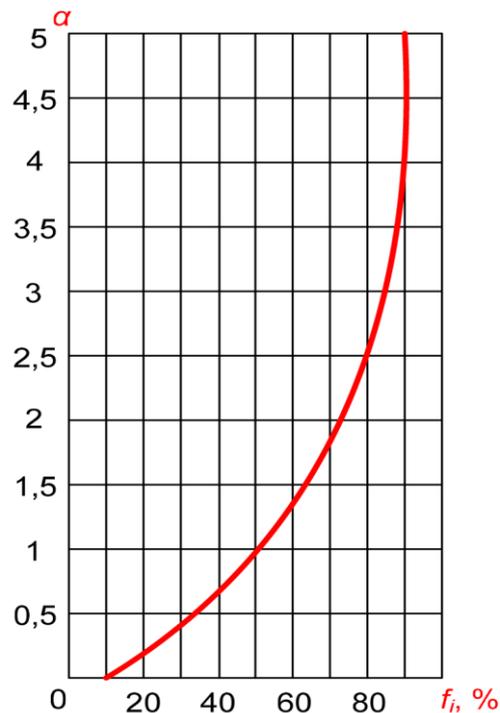


Рисунок 5.2 – Крива для визначення f_i

5.3 Розрахунок диференційного струмового захисту

Диференційний струмовий захист ЕД виконується за допомогою реле типів РНТ-565 та ДЗТ-11.

Параметри захисту вибираються за умовою надійного не спрацювання його в режимах пуску, самозапуску і при зовнішніх КЗ.

Струм спрацювання реле типу РНТ-565:

$$I_{\text{спр}} = K_{\text{відс}} \cdot I_{\text{нб}^* \text{розр}} \cdot I_{\text{мах}}'' / n_c. \quad (5.11)$$

В реальних умовах на величину $K_{\text{відс}}$ оказують вплив наступні фактори [3, 12, 13]:

а) добуток $I_{1\text{пит}} \cdot Z_{2\text{пит}}$ більш завантаженого плеча в реальних умовах не відповідає $\varepsilon = 10\%$, а значно нижче його. При цьому струм небалансу може зменшитися в 1,5 рази, тобто $K_{\text{відс}}$ достатньо приймати рівним 0,66;

б) внаслідок несприятливого сполучення залишкових індукцій в осердях ТС струм небалансу може збільшитися в 1,5 рази, при цьому $K_{\text{відс}}$ доцільно прийняти рівним 1,5.

Дія обох вказаних факторів взаємно компенсується, таким чином в (5.11) $K_{\text{відс}}$ можна допускати рівним одиниці. Однак, враховуючи можливі похибки реле, потрібно приймати $K_{\text{відс}} = 1,1$.

Число витків робочої обмотки реле визначається виразом:

$$\omega_{\text{р.розр}} = F_{\text{спр}} / I_{\text{спр}} = 100 / I_{\text{спр}}, \quad (5.12)$$

де $F_{\text{спр}} = 100 \text{ А}$ – МРС спрацювання реле типу РНТ-565.

Для встановлення на комутаторі реле вибирається ціле число витків $\omega_{\text{р}}$, що є найближчим меншим до $\omega_{\text{р.розр}}$.

Перевірка чутливості захисту здійснюється при тих же умовах, що і для струмової відсічки, коли при двохфазному КЗ на лінійних виводах обмотки статора в реле протікає найменший струм:

$$I_{\text{р.к}} = I_{\text{к.мін}}^{(2)} / n_c. \quad (5.13)$$

При цьому найменший коефіцієнт чутливості:

$$K_{\text{ч.мін}} = I_{\text{р.к}} \cdot \omega_{\text{р}} / 100 \geq 2. \quad (5.14)$$

У процесі виконання розрахунку доцільно додержуватися визначеного порядку [3]:

1. Спочатку визначається навантаження $Z_{2\text{п}}$ на ТС мало навантаженого плеча захисту з урахуванням місця їх встановлення та відстані до точки з'єднання в диференційну схему. З врахуванням спрощень, обумовлених встановленням ТС і реле в КРУ:

$$Z_{2п} = \sqrt{(R_2 + R_{пер})^2 + X_2^2}, \quad (5.15)$$

де R_2 і X_2 – параметри вторинної обмотки ТС;

$$R_{пер} = 0,1 \text{ Ом.}$$

2. Потім визначається добуток $I_{1пит} \cdot Z_{2пит}$ для того ж плеча:

$$I_{1пит} \cdot Z_{2пит} = \frac{I''_{max}}{n_c} \cdot Z_{2п} \cdot \frac{1}{q \cdot \omega_2}, \quad (5.16)$$

і по кривій рисунка 5.3 знаходиться значення $I_{нб*}$, яке відповідає $I_{1пит} \cdot Z_{2пит}$ і постійній часу затухання аперіодичної складової $T_a = 0,05$ с.

$$I_{нб*} = I_{нб}/I_{max}, \text{ в.о.}$$

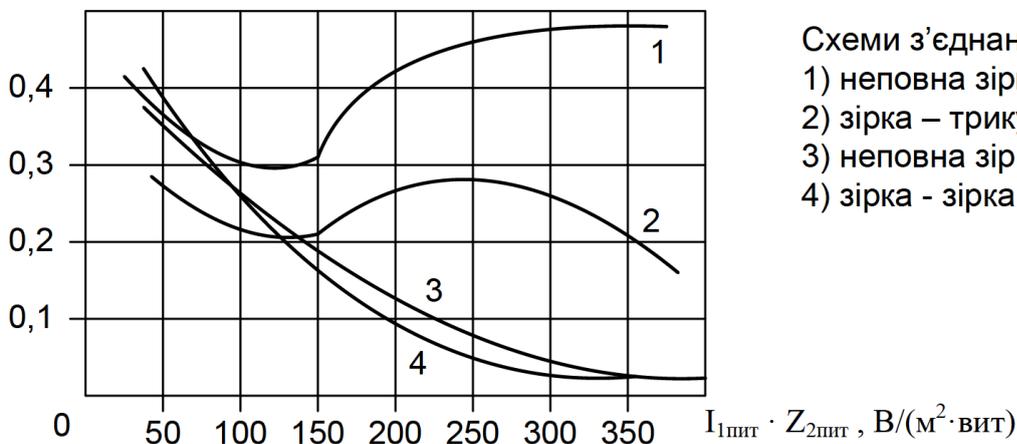


Рисунок 5.3 – Узагальнені криві максимально можливих струмів небалансу диференціальних захистів ЕД

3. Визначається дійсне значення T_a , яке відповідає прийнятому розрахунковому режиму, при якому в первинному колі протікає струм I''_{max} :

$$T_a = x_{\Sigma} / (\omega \cdot r_{\Sigma}),$$

де x_{Σ} та r_{Σ} – відповідно індуктивний та активний опори кола, по якому протікає I''_{max} .

4. Уточнюється значення $I_{нб*}$, яке відповідає визначеному значенню T_a :

$$I_{\text{нб}^* \text{розр}} = I_{\text{нб}^*} \cdot \gamma, \quad (5.17)$$

де γ – коефіцієнт, який визначається по рисунку 5.4.

5. Визначається струм спрацювання реле захисту по (5.11) і далі число витків робочої обмотки по (5.12). Потім по (5.14) перевіряється чутливість захисту.

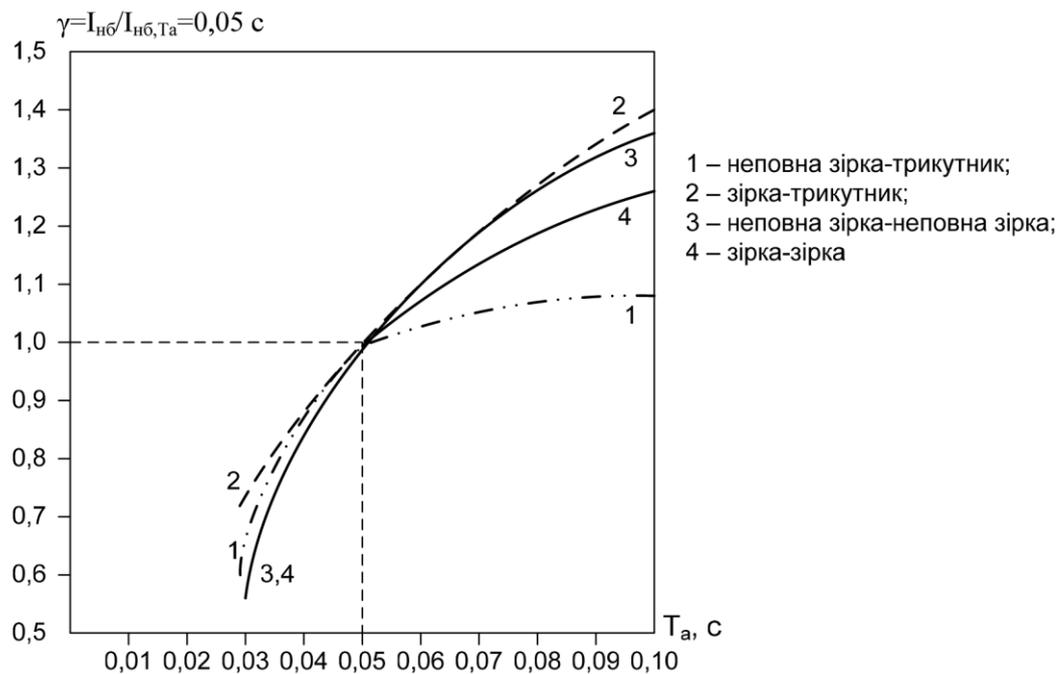


Рисунок 5.4 – Вплив на струм небалансу диференційного захисту постійної частоти часу затухання аперіодичної складової

5.4 Розрахунок захисту від струмів перевантаження

Струм спрацювання реле МСЗ від перевантаження вибирається за виразом:

$$I_{\text{спр}} = \frac{K_{\text{відс}} \cdot K_{\text{сх}} \cdot I_{\text{ном}}}{K_{\text{пов}} \cdot n_c}, \quad (5.18)$$

де $K_{\text{відс}}$ – коефіцієнт відстроювання, який враховує помилку реле та необхідний запас, приймається рівним 1,05 при дії захисту на сигнал та 1,1÷1,2 при дії на вимикання;

$K_{\text{сх}}$ – коефіцієнт схеми, який враховує з'єднання ТС та реле;

$K_{пов}$ – коефіцієнт повернення реле, який приймається рівним 0,8 для реле серії РТ-80 та 0,85 для реле серії РТ-40;

$I_{ном}$ – номінальний струм ЕД;

n_c – коефіцієнт трансформації ТС.

Витримка часу захисту від перевантаження вибирається за умови надійного не спрацювання захисту при пуску або самозапуску ЕД за виразом:

$$t_{сз} \geq K'_{відс} \cdot t_{п}, \quad (5.19)$$

де $K'_{відс} = 1,2 \div 1,3$ – коефіцієнт відстроювання;

$t_{п}$ – час пуску для ЕД, які не підлягають самозапуску, або час самозапуску для самозапускаємих ЕД.

Час спрацювання, визначений із формули (5.19) для реле серії РТ-80, відповідає часу спрацювання на незалежній ділянці його часовострумової кривої.

Струм спрацювання струмового захисту, призначеного для функції відмови механізму (заклинювання), обирається таким чином, щоб гарантувати надійне спрацювання захисту у випадку зупинки електродвигуна, коли струм у статорній обмотці становить $I_3 \geq I_{п}$, і розраховується за формулою:

$$I_{сз} \leq I_{п} / K_{відс}, \quad (5.20)$$

де $K_{відс} = 1,5$ – коефіцієнт надійності спрацювання.

Витримка часу цього захисту при встановленні його на СД приймається на ступінь селективності більше часу вимикання КЗ в мережі, де в місці встановлення захисту протікає струм $I \geq I_{сз}$. При встановленні захисту на АД час спрацювання захисту приймається для відстроювання від перехідного процесу при зовнішніх КЗ біля $t = 0,5$ с.

5.5 Розрахунок захисту від асинхронного режиму

Струм спрацювання реле максимального струмового захисту вибирається за виразом (5.18) з врахуванням $K_{відс} = 1,1 \div 1,2$.

Тривалість спрацювання ступеня захисту, призначеної для переведення

синхронного двигуна (СД) в режим роботи без збудження (АР) без замикання чи розвантаження, встановлюється на величину, що перевищує час відключення короткого замикання у мережі. Це стосується випадків, коли струм у точці встановлення захисту перевищує струм спрацювання $I \geq I_{сз}$, при цьому мінімальний час спрацювання має бути не менше, ніж 1,5 с. Час спрацювання ступеня захисту, яка ініціює вимикання, розраховується згідно з формулою (5.19).

Час повернення проміжного реле, яке забезпечує безперебійну роботу системи захисту в умовах можливих коливань струму ротора синхронного двигуна (ЕД), обирається відповідно до максимально можливого показника для реле цього типу, наприклад, для РП-252: час повернення $t_{пов} = 1,1 \div 1,4$ с.

Значення уставки спрацювання реле, яке реагує на зменшення струму збудження електродвигуна (ЕД), встановлюється на рівні:

$$I_{спр.р} = (1,3 \div 1,5) \cdot I_{f_0},$$

де I_f – струм збудження при холостому ході та номінальній напрузі

Висновки до п'ятого розділу

Процедури розрахунку захисних систем полягають у визначенні параметрів спрацювання (уставок), що задовольняють вимогам селективності та необхідної швидкодії.

В тих випадках, коли чутливість струмової відсічки з реле РТ-40 оказується недостатньою, може стати доцільним виконати відсічку на реле РНТ-565, яке має краще відстроювання від аперіодичних складових у вторинному струмі ТС.

Час повернення проміжного реле, яке забезпечує безперебійну роботу системи захисту в умовах можливих коливань струму ротора синхронного двигуна (ЕД), обирається відповідно до максимально можливого показника для реле, час повернення $t_{пов} = 1,1 \div 1,4$ с.

РОЗДІЛ 6

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ТЕЛЕКОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ ГРУПИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

6.1 Пристрій контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів

Ті методи, які наразі застосовуються для вивчення робочих станів асинхронних двигунів, зазвичай не беруть до уваги їхню залежність від нерівномірності напруги, навантаження робочих механізмів та специфіки їхніх механічних кривих. Як мірило оцінки робочих режимів асинхронних моторів переважно використовують силу струму та температуру обмотки, ігноруючи такий об'єктивний показник, як швидкість деградації ізоляційного покриття обмоток двигунів. З аналізу фахової літератури з'ясовано, що прилади моніторингу робочих станів асинхронних двигунів за умов несиметрії напруги мережі контролюють струм (максимальний, мінімальний та нульової послідовності), фазовий зсув між споживаними струмами, термічний вплив струму, напругу (прямої, зворотної та нульової послідовностей) і температуру (обмотки статора, сталі статора та корпусу). Сучасні пристрої скидають живлення з двигунів під час реалізації технологічного циклу, коли досягається граничний рівень контрольованого параметра, що тягне за собою зростання операційних витрат на усунення наслідків позапланового вимкнення. Тому при проектуванні засобів діагностики та захисту раціонально передбачити пом'якшення режиму роботи двигунів, що потрапили в аварійну ситуацію, на час завершення технологічного процесу, якщо спостерігається глибока несиметрія напруги та її значення сягає критичної позначки.

У даній кваліфікаційній роботі поставлено завдання розробити модернізований апарат для контролю нерівномірних робочих станів асинхронних двигунів, враховуючи коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності, коефіцієнт завантаження машини, що приводиться, та

особливості електроприводу.

За підсумками теоретичних і експериментальних студій щодо впливу мережевої несиметрії напруги та коефіцієнта завантаження привідного механізму на швидкість термічного старіння ізоляції асинхронного двигуна, зокрема на нагрів його обмотки, сформульовано технічні вимоги до системи моніторингу, діагностики режимів роботи та захисту групи асинхронних двигунів:

- моніторинг напруги зворотної послідовності мережі на вході шафи управління технологічної лінії; світлове індикація про досягнення нерівномірності напруги максимально допустимої величини та активація системи вирівнювання напруг;

- контроль температури обмоток та напруги зворотної послідовності на кожному двигуні;

- переведення на полегшений режим роботи для кожного двигуна за умови значної несиметрії напруги на ньому;

- розрив електричного кола двигуна від мережі після досягнення обмоткою критичного значення температури;

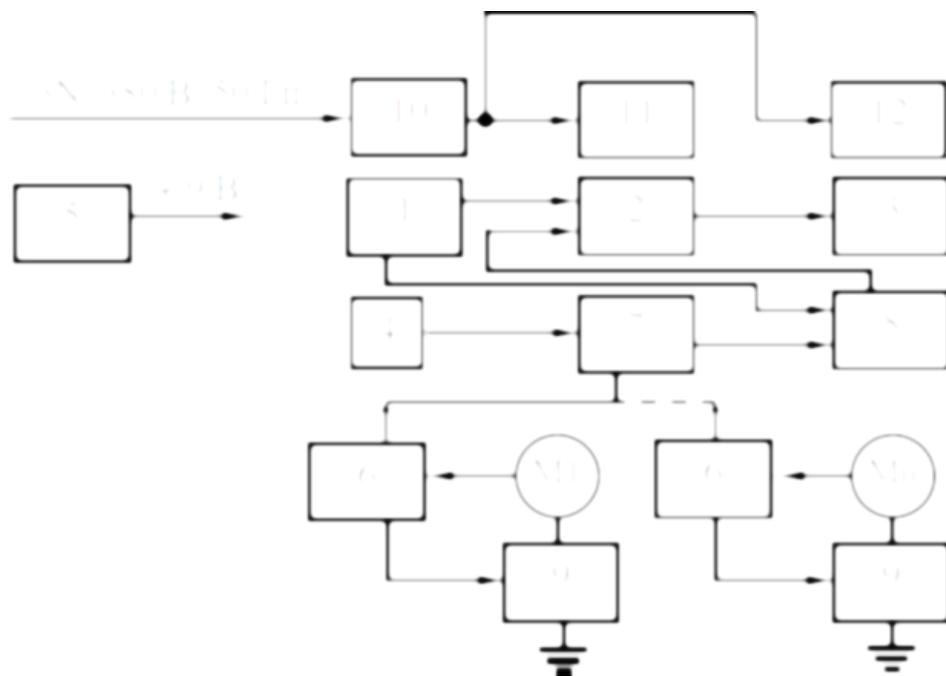
- покрокова індикація робочих станів контрольованих асинхронних двигунів та цілісності ланцюгів сенсорів.

Схема діагностичного модуля, що дає змогу контролювати робочий стан чотирьох двигунів, представлена на рисунку 6.1.

Сенсорний блок контролю ненормального режиму роботи (6) асинхронного двигуна складається з фільтра для напруги зворотної послідовності, первинного елемента перетворення температури та моделі лямбда-діода.

Фільтр напруги зворотної послідовності сконструйовано на основі двох резисторів та двох конденсаторів, з'єднаних за мостовою конфігурацією, а також потенціометра, який встановлює граничний рівень несиметрії напруги зворотної послідовності в мережі, та обмежувального резистора. Модель лямбда-діода реалізована за допомогою двох біполярних транзисторів,

з'єднаних за схемою з об'єднаними емітерами (рис. 6.2). На відміну від аналогічної моделі на польових транзисторах, тут відсутня потреба у формуванні додаткової (комплементарної) пари. Первинними датчиками температури у цьому сенсорному блоці є позистори, розміщені всередині обмоток асинхронного двигуна. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) моделі лямбда-діода на біполярних транзисторах засвідчили можливість модифікації її ВАХ у широкому діапазоні шляхом введення у коло бази одного з транзисторів термічного опору R2 [2, 3].



1 – блок часових позицій; 2 – блок виявлення ушкоджень кіл датчиків та номеру аварійного двигуна; 3 – блок сигналізації й захисту від анормальних режимів двигунів і датчиків; 4 – кероване джерело напруги; 5 – стабілізоване джерело живлення; 6 – датчики анормальних режимів; 7 – L-C контур; 8 – блок виявлення вхідних сигналів; 9 – виконуючий орган; 10 – фільтр напруги; 11 – світлова сигналізація; 12 – симетруючий пристрій.

Рисунок 6.1. Блок-схема пристрою діагностування режимів роботи асинхронних двигунів .

Коли температура обмотки електричного двигуна досягає максимального дозволеного рівня, змінюється співвідношення значень опорів резисторів R3 та

R2, які вбудовані в ланцюги баз транзисторів. Це, у свою чергу, спричиняє зростання струму через еквівалент лямбда-діода та розширення вольт-амперної характеристики (ВАХ) цього еквівалента.

У резонансному контурі L-C під номером 7 зароджуються синусоїдальні коливання. Ці коливання трансформуються у вихідний сигнал у блоці 8, призначеному для детектування входних сигналів, і цей сигнал надходить до блоку 3, який відповідає за сигналізацію та захист від відхилень у роботі двигунів, а також до блоку 2, який ідентифікує несправності в колах датчиків та визначає код аварійного двигуна. У випадку обриву фазного провада (що призводить до значного дисбалансу напруги в мережі), блок 6 контролює аномальних режимів, який має зворотний ланцюг напруги, надсилає команду на виконавчий механізм 9, щоб з'єднати нейтральну точку обмотки статора асинхронного двигуна з нульовим дротом.

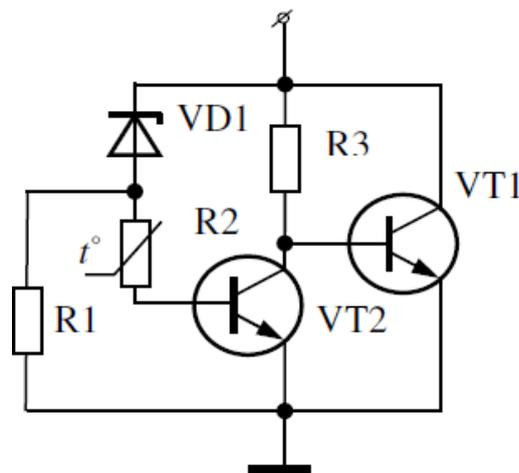


Рисунок 6.2. Принципова електрична схема аналога лямбда-діода.

Для реалізації механізму полегшеного режиму задіяно оптосемистор, який підключається між нейтральною точкою обмотки статора та заземленням корпусу двигуна. Як показують теоретичні розрахунки, це призводить до зниження фазних струмів асинхронного двигуна на величину до 20%. Крім того, швидкість зносу ізоляції асинхронного двигуна, що функціонує в умовах значної несиметрії напруги, при з'єднанні нейтралей обмотки статора та системи живлення, скорочується на 60-90% порівняно з роботою двигуна з

ізолюваною нейтраллю. Датчики, призначені для моніторингу відхилень у роботі, які інсталюються на двигунах у потоковій технологічній лінії, підключаються до апаратури за допомогою лише одного дроту. Число таких датчиків відповідає кількості електродвигунів, що підлягають контролю.

6.2 Система керування та захисту асинхронного електродвигуна

Забезпечення високої надійності експлуатації електричних машин у сфері аграрного сектору досягається завдяки впровадженню вдосконалених систем керування та захисту від функціонування в критичних режимах. Актуальність покращення механізмів регулювання та захисту електроприводів різноманітних установок зумовлена частою виникненням аварійних ситуацій з двигунами, переважно через несиметрію фаз або струмові перевантаження. Представлена стаття є логічним продовженням попередніх досліджень, спрямованих на вдосконалення методів захисту двигунів від роботи в екстремальних умовах.

Раніше ми вже презентували варіанти пропонованих нами засобів захисту електроприводу від роботи в критичних режимах [2, 3]. У цьому матеріалі ми представляємо реалізацію чергової розробки як частини інтегрованої системи керування та захисту електроприводу.

Запропонована система керування й захисту електроприводу передбачає функції запуску, зупинки електроприводу, а також негайного відключення електродвигуна від мережі у разі настання режиму нерівномірності фаз, а також при досягненні певного температурного рівня обмоток чи фіксованої швидкості його зміни.

Система керування та захисту електроприводу, яку ми пропонуємо (рис. 6.3), включає схеми для ініціації та припинення роботи, схему захисту електродвигуна від функціонування в умовах нерівномірності фаз та схему захисту від струмових перевантажень. До складу схеми керування запуском і зупинкою двигуна входять: контактор КМ1, одновипрямний діодний міст VD1...VD3, підключений через кнопку SB1 та пускову кнопку SB2 до анода та

керуючого електрода тиристора через ізолюючий діод VD4 та обмежувальний резистор R1 відповідно.

Схема захисту від нерівномірності фаз містить: діодний міст VD1...VD3, підключений до мережі, на виході якого послідовно встановлені тиристор VS1, виконавчий елемент KV1, який зашунтований ланцюгом, що складається з послідовно з'єднаних резистора R3 та конденсатора C1.

Схема захисту від струмового перевантаження складається з: резисторів R4, R5, стабілітронів VD5 і VD6, випрямлячів на діодах VD1, VD2, VD3, а також конденсаторів C2, C3; терморезистора RK1, розміщеного на осерді статора або його обмотках, резисторів для обмеження струму R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14 та R15, R16, R17, R18, транзисторів підсилювального каскаду VT1, VT2; електронних ключів VT3 і VT6 та тригера Шмітта VT4 і VT5; реле KV2, KV3 та конденсаторів C4, C5.

Принцип роботи системи: Після вмикання автоматичного вимикача QF1 вона отримує живлення від мережі 380 В. Транзистори VT1, VT2 підсилювача у схемі захисту від струмових перевантажень залишаються закритими, транзистор VT3 електронного ключа відкритий, внаслідок чого спрацьовує реле KV2, яке замикає свій контакт KV2:1. Транзистори VT4, VT5 тригера Шмітта відповідно закриваються та відкриваються; транзистор VT6 електронного ключа залишається закритим, і обмотка реле KV3 залишається без живлення. Система перебуває у стані готовності до подальших операцій. Запуск електродвигуна ініціюється натисканням кнопки "Пуск" SB2. У цей момент напруга від випрямляльного каскаду на діодах VD1...VD3 подається через діод VD4 на анод та через резистор R2 на керуючий електрод тиристора VS1. Тиристор відкривається, і починається процес заряджання конденсатора C1 у контурі, призначеному для штучної комутації, а також через ланцюг резистор R9 протікає випрямлений струм до обмотки реле KV1. Виконавче реле KV1 спрацьовує і своїм контактом KV1:1 підключає котушку контактора KM1 до мережі змінного струму, а другим контактом KM1:2 шунтує кнопку "Пуск" SB1. Контактор KM1 активується і своїми силовими контактами комутує

колове живлення електродвигуна М, забезпечуючи його запуск.

Важливо врахувати, що реле KV1 має бути підібрано таким чином, щоб мінімальний струм його спрацювання перевищував мінімальний струм утримання тиристора.

За дотримання цієї умови тиристор залишиться у відкритому стані після розблокування кнопки SB2. За нормальних робочих умов електродвигун продовжуватиме роботу доти, доки не буде натиснута кнопка "Стоп" SB1.

У разі виникнення режиму нерівномірності фаз, схема захисту відреагує практично миттєво, і двигун буде негайно відключено від мережі, незалежно від того, чи втрата фази відбулася до початку роботи двигуна, чи вже під час його функціонування [3].

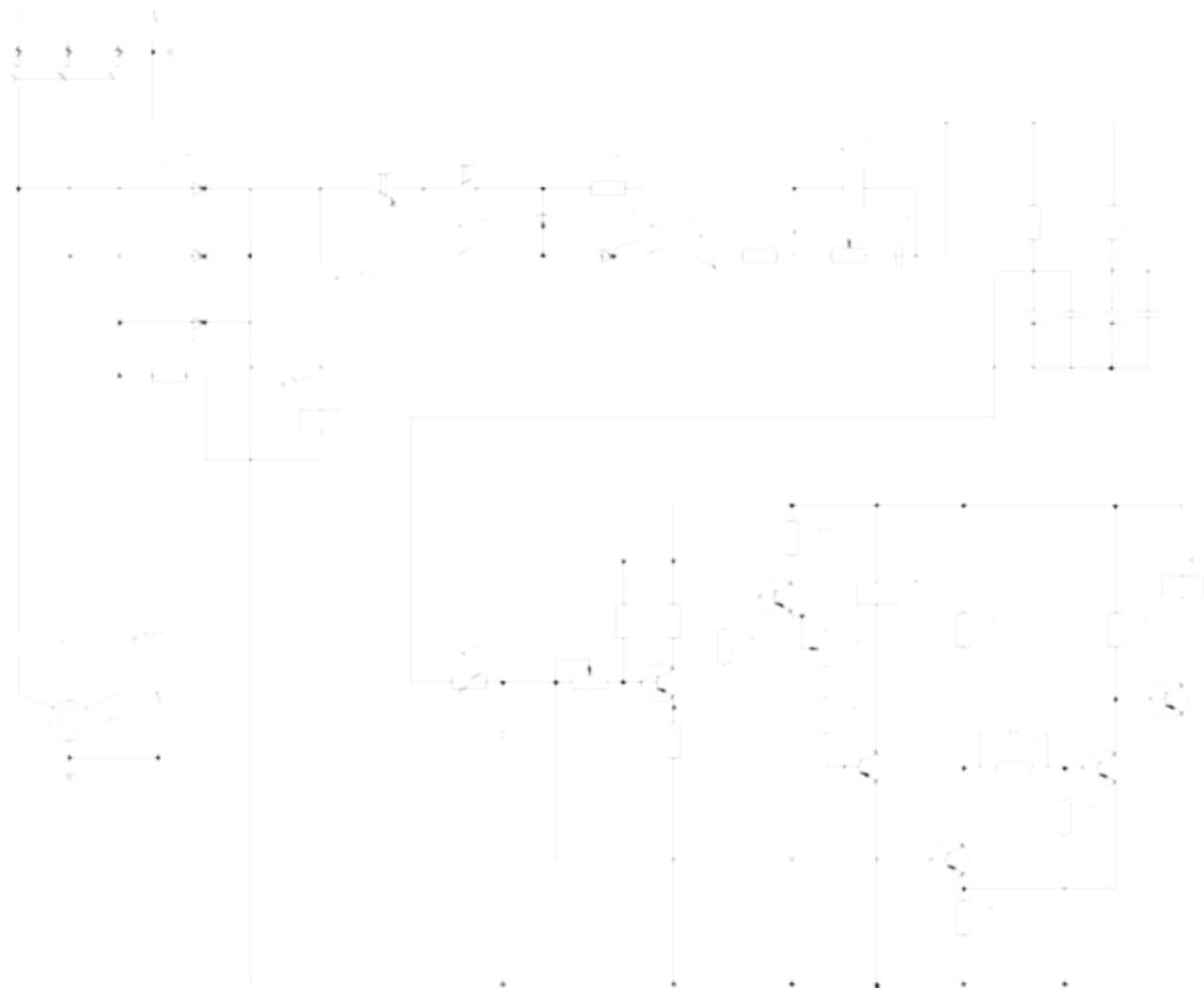


Рисунок 6. 3 - Схема керування і захисту електропривода

Особливістю розробленої системи захисту електромотора від

перевантажень є те, що запуск відбувається не лише при досягненні певної температури обмоток, а й враховує швидкість зміни цього показника. Принцип роботи схеми такий:

Коли струм в обмотках електромотора зростає, вони нагріваються, що спричиняє зниження опору терморезистора RK1. Внаслідок цього транзистор VT3 зачиняється, і котушка реле KV2 втрачає живлення. Контакт KV2:1, відповідно, розмикається. Це призводить до знеструмлення реле KV1. Його контакт у ланцюзі живлення котушки контактора KM1 розмикається, що викликає вимкнення електромотора від мережі через розмикання силових контактів контактора. Температура вимкнення електромотора регулюється у межах 60-160°C за допомогою змінних резисторів R6 та R12. При зростанні температури обмоток статора, опір терморезистора зменшується, і конденсатор C4 починає заряджатися. Оскільки ланцюг RK1-C4 виконує диференціюючу функцію щодо напруги на конденсаторі, нахил (крутизна) фронту цієї напруги прямо пропорційний швидкості зміни опору терморезистора (тобто швидкості зростання температури обмоток).

При швидкості зростання температури до 5-6°C за хвилину, ця напруга відкриває транзистори VT4 та VT6, водночас закриваючи транзистор VT5. Котушка реле KV3 починає живитись струмом і своїм контактом KV3:1 розриває ланцюг живлення реле KV1. Як наслідок, контакт KV1:1 цього реле розмикає шлях живлення контактора KM1, і електромотор відключається від мережі.

Висновки до шостого розділу

Апаратне рішення сприяє підвищенню надійності експлуатації групи електродвигунів завдяки постійному дистанційному моніторингу робочих режимів, що продовжує термін їхньої служби в агропромисловому комплексі та дає змогу ідентифікувати двигун, який функціонує в ненормальних умовах.

Розроблена система управління та захисту асинхронного електропривода, у якій інтеграція двох стабілізаторів напруги (стабілітронів) розширила можливості трипівхвильового випрямляча, дозволивши відмовитися від використання трансформатора струму та двох діодних мостів, що робить систему простішою та стійкішою.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі увага приділяється питанням релейного захисту потужних електричних машин змінного струму, а саме високовольтних електродвигунів. Розгляд охоплює як умови їхнього функціонування, так і особливості механізмів, ключові складові конструкції та найбільш типові режими роботи ЕД з перехідними явищами.

Було здійснено аналіз типових аварійних ситуацій з двигунами, представлено принципові схеми побудови системи релейного захисту, а також детальний опис її складових елементів, зокрема пристроїв, що працюють на операційному струмі.

Окремо висвітлено загальні технічні критерії, яким повинен відповідати релейний захист, детально описано різні модифікації захисних функцій: захист від ураження ізоляції статорних обмоток струмами замикання на корпус (землю), а також захист від міжфазних коротких замикань.

Щодо деяких видів захисту електродвигунів, у роботі наведені методичні підходи до визначення необхідних уставок:

- для струмових відсічок;
- для диференційного струмового захисту;
- для захисту від теплових перевантажень;
- для захисту від виникнення асинхронного режиму.

Крім того, робота містить розділ, присвячений аспектам охорони праці на об'єктах електроенергетики, включаючи технічні заходи для забезпечення безпечної експлуатації обладнання, принципи виробничої гігієни та промислової санітарії, а також питання пожежної безпеки.

Отже, у кваліфікаційній роботі було успішно реалізовано такі ключові завдання:

- проведено глибоке вивчення та систематизацію загальних відомостей про електродвигуни з робочою напругою понад 1000 В;

- здійснено аналіз причин виникнення пошкоджень та ненормальних режимів функціонування електродвигунів;
- досліджено компоненти, що формують системи релейного захисту ЕД;
- опрацьовано ключові типи захисних систем для двигунів та методики їхнього розрахунку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Рубаненко О. Є., Рубаненко О. О., Гунько І. О. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 1251с.
2. Яндутьський О. С. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання] : навч. посіб. / О. С. Яндутьський, О. О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О. С. Яндутьського. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. –102 с.
3. Релейний захист і автоматика: навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків : УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с.
4. Релейний захист електроенергетичних систем [Електронний ресурс] : підручник / Є. І. Сокол, Г. А. Сендерович, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець, І. О. Самойленко, В. В. Скопенко, І. Т. Карплюк, С. В. Швець, М. В. Черкашенко, О. Ю. Заковоротний, Н. С. Захаренко, Н. В. Рудевич, Ю. Ф. Тесик, С. Ю. Пронзалева, В. Є. Кривонос, І. С. Ярова. – Харків : ФОП Бровін О. В., 2020. – 306 с.
5. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем: навч. посібник / Кідиба В. П. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 504 с.
6. Лагутін В.М. Власні потреби електричних станцій : [навчальний посібник] / В. М. Лагутін, В. В. Тептя, С. Я. Вишневський. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 102 с.
7. Релейний захист високовольтних електродвигунів. Частина І: [навч. посібник] / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. О. Лесько, О. Б. Бурикін. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 137 с.
8. Релейний захист високовольтних електродвигунів. Частина ІІ : [навч. посібник] / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. О. Лесько, О. Б. Бурикін. – Вінниця:

ВНТУ, 2022. – 136 с.

9. Кутін В. М. Релейний захист та системна автоматика: лабораторний практикум / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 130 с.

10. Рубаненко О. Є. Мікропроцесорний релейний захист ліній електропередач : лабораторний практикум / Рубаненко О. Є., Гончарук О. Ф., Рубаненко О. О. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 130 с

11. Кобилянський О. В. Охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей: Методичні вказівки / О. В. Кобилянський, О. М. Терещенко. – Вінниця: ВНТУ, 2003. – 46 с.

12. Князевський Б. А. Охорона праці в електроустановках / Б. А. Князевський – М. : Вища школа, 2003. - 336 с.

13. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. — Київ, 2017. — 617 с.

14. Лавріненко Ю.М. Електропривод / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко [за ред. Лавріненка Ю.М.]. – К.: вид-во Лір-К., 2009. – 504 с.

15. Олійник В.С. Довідник сільського електрика / В.С. Олійник, В.Н. Гайдук, В.Ф. Гончар. [за ред. Олійника В.С.]. (3-е вид., переробл. і доповн.) – К.: Урожай, 1989. – 264 с.

16. Бондаренко В.І. Основи електричного привода / В.І. Бондаренко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – 313 с. 6. Ловейкін В.С. Частотне керування асинхронним приводом /В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – Ніжин.: Міланік, 2011. – 98 с.

17. Грундулис А. И. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А. И. Грундулис – М: Агро-промиздат, 1988.

18. Тищенко О. К. Система керування та захисту привода водопостачальної установки / О. К. Тищенко // Вісник ХДТУСГ імені Петра Василенка: «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Х.: ХДТУСГ, 2007. – Вип. 57, Т. 1. – С. 126 – 133.

19. Тищенко О. К. Система керування та захист асинхронного

електродвигуна, спроможна вимкнути електродвигун з мережі за умов: неповнофазного ре-жиму роботи, досягнення певної температури обмоток та певної швидкості її заміни / О. К. Тищенко // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка: Проблеми енергоза-безпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 78-79.

20. Патент № 22526 Україна, МПК(2006) G01K7/16. Пристрій для контролю температури / А.Я. Чураков, І.О. Попова, С.Ф. Курашкін (Україна). – № 200612431; Заявл. 27.11.2007; Опубл.25.04.2007, Бюл.№ 5.

21. Патент 28741 Україна, МПК (2006) H02H 7/09, G01K 7/16. Пристрій контролю електродвигунів при несиметрії напруги / А.Я. Чураков, І.О. Попова, С.Ф. Курашкін (Україна). – u2007 07338; Заявл. 2.07.2007; Опубл.25.12.2007, Бюл. № 21. 2007. – 7 С.