

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

_____ В.В. Чумак
(підпис)

«__» _____ червня 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електричні машини і апарати»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему : « Використання низьковольтних комутаційних апаратів в колах захисту
асинхронних двигунів »

Виконав: студент IV курсу, групи ЕМ-11

_____ Левчук Роман Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник: Асистент, д.ф., Ігнатюк Євген Станіславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Рецензент: Доцент, Красношопка Наталія Дмитрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.В. Чумак
(підпис)

«__» _____ червня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Левчук Роман Ігорович

1. Тема роботи Використання низьковольтних комутаційних апаратів в колах захисту асинхронних двигунів,
керівник роботи Ігнатюк Євген Станіславович, асистент, д.ф.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1720-с

2. Термін подання студентом роботи 12.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: Апаратура захисту при навантаженні електричних машин з комутаційними апаратами до 1000В, релейна схема захисту з відпрацьовуванням до 49.5 Гц, максимальний захист при навантаженні на електричні машини до 1000В, радіальна система живлення електродвигуна.

4. Зміст роботи: Вступ, Способи захисту електричних кіл споживачів електроенергії, Особливості низьковольтних мереж, Комутаційні апарати та пристрої захисту в колах низьковольтних асинхронних двигунів, Вибір основних елементів захисту, Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація, доповідь.

6. Дата видачі завдання: «20» вересня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вивчення матеріалу по темі та збір джерел літератури, що допоможе у вирішенні задач	23.09.2024 – 01.12.2024	
2	Аналіз способів захисту електричних кіл споживачів електроенергії та вивчення тонкощів низьковольтних мереж	12.12.2024 – 21.02.2025	
3	Проведення дослідження комутаційних апаратів та пристроїв захисту в колах низьковольтних асинхронних двигунів. Вивчення їх можливостей, принципу дії та класифікації	03.03.2025 – 25.04.2025	
4	Вибір основних елементів захисту та їх розрахунок	11.05.2025 – 28.05.2025	
5	Оформлення дипломної роботи та подача на захист	01.06.2025 – 03.06.2025	

Студент

(підпис)

Левчук Р.І.

Керівник роботи

(підпис)

Ігнатюк Є.С.

РЕФЕРАТ

Робота зосереджена на питанні, що має значну практичну та теоретичну цінність: підвищення надійності та безпеки експлуатації асинхронних електродвигунів за допомогою сучасних низьковольтних комутаційних апаратів.

У роботі досліджено особливості конструкції, принцип дії та застосування низьковольтних комутаційних апаратів, що використовуються для захисту та керування асинхронними електродвигунами. Розглянуто класифікацію та характеристики основних типів апаратів, зокрема автоматичних вимикачів, пускачів, контакторів та теплових реле. Проаналізовано режими роботи асинхронного двигуна та умови, за яких виникають аварійні ситуації, що потребують відповідного захисту. Виконано прикладний розрахунок для асинхронного двигуна потужністю 30 кВт та трансформатора 2150 кВА з метою підбору відповідного обладнання, що забезпечує надійний захист у стандартних та нестандартних умовах експлуатації.

Робота містить три розділи, 71 сторінку, 22 рисунки та 15 бібліографічних найменування за списком використаної літератури.

Ключові слова: асинхронний двигун; автоматичний вимикач; теплове реле; комутаційна апаратура; захист; струм короткого замикання; номінальний струм.

ABSTRACT

The thesis focuses on an issue of significant practical and theoretical value: improving the reliability and safety of asynchronous electric motor operation through the use of modern low-voltage switching devices.

The study investigates the design features, operating principles, and applications of low-voltage switching devices used for the protection and control of asynchronous motors. It examines the classification and characteristics of key equipment types, including circuit breakers, starters, contactors, and thermal relays. The operational modes of asynchronous motors are analyzed, with attention given to conditions that lead to fault scenarios requiring protective intervention. A practical calculation is performed for a 30 kW asynchronous motor and a 2150 kVA transformer to select appropriate equipment that ensures reliable protection under both normal and abnormal operating conditions.

The work consists of three chapters, 71 pages, 22 figures, and 15 bibliographic references.

Keywords: asynchronous motor; circuit breaker; thermal relay; switching equipment; protection; short-circuit current; rated current.

ЗМІСТ

Перелік скорочень і умовних позначень	8
Вступ.....	9
Розділ 1. Способи захисту електричних кіл споживачів електроенергії.	
Особливості низьковольтних мереж	11
1.1 Ефективність та способи захисту електричних кіл споживачів електроенергії.....	11
1.2 Особливості низьковольтних мереж	15
Розділ 2. Комутаційні апарати та пристрої захисту в колах низьковольтних асинхронних двигунів.....	20
2.1 Автоматичні вимикачі, конструкція і основні характеристики.	20
Конструкція автоматичних вимикачів:	24
2.2 Магнітні пускачі та контактори	26
2.3 Пристрої захисного вимкнення (ПЗВ) та диференціальні автоматичні вимикачі (ДАВ)	29
2.4 Запобіжники.....	32
2.5 Апарати теплового та температурного захисту.	36
2.6 Апарати струмового захисту і комутаційних перенапруг.....	44
Розділ 3. Вибір основних елементів захисту	46
3.1 Вибір контактора (магнітного пускача) для забезпечення керування та захисту асинхронного двигуна загального призначення з короткозамкненим ротором потужністю 30 кВт	46
3.2 Вибір автоматичного вимикача для захисту ланцюга від КЗ та перевантаження в асинхронному двигуні для радіальної схеми живлення двигун	48

3.3 Вибір реле контролю трифазної напруги	61
Висновок	68
Перелік посилань	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

КЗ - коротке замикання

ДАВ - диференціальний автоматичний вимикач

ПЗВ - пристрій захисного вимкнення

ВСТУП

Сучасне промислове та сільськогосподарське виробництво в Україні значною мірою базується на використанні електричних асинхронних двигунів. Ці пристрої є фундаментальними компонентами, які забезпечують безперебійну роботу насосів, вентиляторів, транспортерів, систем автоматизації та інших технологічних механізмів. В умовах інтенсивної експлуатації асинхронні двигуни нерідко стикаються з різноманітними аварійними ситуаціями, такими як коротке замикання, перевантаження, перегрів, перекоси фаз або обрив однієї з фаз. Виникнення цих явищ не лише призводить до зупинки виробничих процесів, але й може спричинити серйозні пошкодження обладнання, збільшення витрат на ремонтні роботи, зниження ефективності виробництва та навіть небезпеку, що загрожує персоналу.

Враховуючи сучасні виклики, з якими стикаються українські підприємства, особливо в умовах нестабільності енергопостачання та підвищених вимог до економії електроенергії, питання ефективного захисту електродвигунів набуває особливого значення. Використання низьковольтних комутаційних апаратів — автоматичних вимикачів, магнітних пускачів, теплових реле, пристроїв захисного відключення та реле контролю фаз — є одним з ключових напрямів у забезпеченні надійності електроустаткування.

Правильно спроектовані й реалізовані схеми з низьковольтними комутаційними апаратами здатні оперативно реагувати на виникнення аварійних ситуацій, запобігаючи пошкодженню двигунів та обладнання, а також значно знижуючи ризики пожеж і травматизму. Це особливо важливо в українських умовах, де значна частина промислового обладнання є застарілою або працює в умовах підвищених навантажень, характерних для сільського господарства, металургії, харчової промисловості, будівництва та інших стратегічно важливих галузей економіки.

Крім того, в сучасних реаліях, коли підприємства стикаються з проблемами економії ресурсів та енергозбереження, впровадження сучасних

низьковольтних комутаційних пристроїв дозволяє оптимізувати режими роботи двигунів, підвищуючи їх енергоефективність і знижуючи експлуатаційні витрати. Це, своєю чергою, створює конкурентні переваги для українських виробників як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

Метою цієї роботи є дослідження сучасних низьковольтних комутаційних апаратів та супутнього обладнання, їхніх технічних характеристик в схемах живлення асинхронних електродвигунів, а також аналіз перехідних і комутаційних процесів, що виникають у цих пристроях.

Об'єктом дослідження є схеми живлення та захисту низьковольтних асинхронних двигунів.

Предметом дослідження виступають технічні характеристики, конструктивні особливості та процеси функціонування сучасних низьковольтних комутаційних апаратів у нормальних і аварійних режимах експлуатації.

Для досягнення мети в роботі потрібно вирішити такі завдання:

- аналіз аварійних режимів роботи асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором та визначення оптимальних способів їх захисту;
- проведення аналізу сучасних низьковольтних комутаційних апаратів, визначення їх технічних характеристик та особливостей конструкції;
- розрахунок струмів короткого замикання для радіальних схем живлення асинхронних двигунів;
- вибір відповідних живильних кабелів, автоматичних вимикачів та магнітних пускачів для забезпечення ефективної роботи електродвигунів;
- аналіз та підбір пристроїв релейного захисту й автоматичних вимикачів для різних режимів експлуатації електроустаткування.

Також за результатами дипломної роботи було опубліковано статтю у міжнародно науково-технічному журналі “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики”, під назвою: “INFLUENCE OF REPLACING SQUIRREL-CAGE MATERIAL OF AN INDUCTION MOTOR”.

РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. ОСОБЛИВОСТІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ

1.1 Ефективність та способи захисту електричних кіл споживачів електроенергії

Надійність електропостачання є критичною умовою для сучасного виробництва. У господарствах, де використовуються широкий спектр електроприладів — від потужних асинхронних електродвигунів до освітлювальних установок і силових напівпровідникових приладів — питання захисту електричних кіл набуває особливої актуальності. Відповідно до досвіду, викладеного у роботі Бабича [6], використання сучасних методів захисту та автоматичних систем відключення дозволяє мінімізувати ризики аварійних ситуацій і продовжити термін служби електроустаткування.

Дослідження аварійних режимів роботи електродвигунів свідчать, що асинхронний двигун з короткозамкненим ротором може стикатися з рядом специфічних проблем. Наприклад, при короткому замиканні, яке виникає в зонах стику або в обмотках статора, спостерігається раптове зростання струму до критично високих рівнів. Порушення подачі електроенергії, зокрема через обрив однієї з фаз, часто виникає внаслідок спрацьовування запобіжників і негативно впливає на безперебійну роботу агрегату. Також, надмірний пусковий струм під час безпосереднього старту може викликати гальмування або затримку оборотів ротора, що позначається на загальній ефективності пристрою. Крім того, у ході звичайної експлуатації двигуна можуть виникати технологічні навантаження, що створюють додатковий вплив на його роботу. Проблеми з охолодженням, зумовлені відмовою системи примусової вентиляції, спричиняють перегрів, а поступове погіршення опору ізоляції через старіння матеріалів в умовах циклічних температурних навантажень може стати причиною як додаткових струмових впливів, так і коротких замикань.

При таких умовах струм може миттєво зростати до 12–17 разів більше за номінальне значення або, у разі тривалих перевантажень, залишатися на рівні,

що перевищує номінал у 5–7 разів. Для своєчасного захисту електричних кіл використовують автоматичні вимикачі з високою швидкістю спрацювання, струмові реле та запобіжники. Оптимальний вибір захисних заходів визначається характером аварійної ситуації: при обриві фази найефективніше поєднання мінімальних струмових заходів із температурним контролем, а при гальмуванні ротора максимальні струмові реле у комбінації з температурними сенсорами показують кращу дієвість у порівнянні з використанням лише теплових реле.

У випадках технологічних навантажень або порушень охолодження особливу увагу приділяють температурному захисту, який, поєднаний з моніторингом стану ізоляції, дозволяє своєчасно виявити її погіршення.

Таким чином, застосування комплексної системи захисту, адаптованої до конкретного режиму аварійної роботи, забезпечує стабільну та надійну експлуатацію електродвигунів навіть у нестандартних умовах, коли агрегат зазнає значних струмових перевантажень та інших несприятливих факторів.

Освітлювальні системи, що забезпечують працездатність будівель та складів, вимагають особливої уваги до безпеки електросистем. Часті коливання напруги, пилове середовище та інші несприятливі умови потребують надійних захисних рішень, що гарантують ефективну роботу обладнання та мінімізують ризики аварій.

Основним аварійним режимом в освітлювальних установках є коротке замикання. Захист від перевантаження традиційно використовується для пристроїв, встановлених у замкнутих приміщеннях або в умовах підвищеного ризику вибуху та пожежі. Найбільш розповсюдженим захисним пристроєм залишається автоматичний вимикач, що миттєво розриває електричний ланцюг, запобігаючи подальшим ушкодженням.

При увімкненні ламп розжарювання спостерігається короткочасне зростання струму, яке може перевищувати номінальний показник у 10–20 разів протягом приблизно 0,06 секунди. Величина цього імпульсу прямо залежить від потужності використовуваних ламп, тому вибір засобів захисту необхідно

прив'язувати до їх пускових характеристик.

На сьогоднішній день для запобігання пошкодженням напівпровідникових елементів внаслідок коротких замикань, як зовнішніх, так і внутрішніх, застосовуються різні типи комутаційної апаратури: високошвидкісні автоматичні вимикачі, напівпровідникові й вакуумні вимикачі, імпульсні дугові комутатори, плавкі запобіжники зі скороченим часом спрацьовування тощо. Вибір конкретного варіанта захисту визначається умовами експлуатації пристрою.

Окрему увагу приділяють захисту електричних мереж, які в сучасних системах розподілу охоплюють діапазон напруг від 0,4 до 750 кВ. Найсерйознішою загрозою в таких мережах є аварійні режими, особливо короткі замикання між фазами або на землю, які трапляються найчастіше.

Нині в промисловому секторі та суміжних галузях застосовують електромережі з різними робочими напругами. Найпоширенішими залишаються системи на 0,4 кВ, 6 кВ, 0,66 кВ та 10 кВ. Для живлення об'єктів постійного споживання та стандартних систем освітлення зазвичай використовують трифазні схеми з чотирма провідниками, де робоча напруга розподіляється як 380/220 В, а нульовий провід безпосередньо заземлено для забезпечення стабільності мережі.

У конструкції систем електропостачання розрізняють два основні підходи: силові споживачі живляться від джерел лінійної напруги, що характерно, наприклад, для двигунів із потужністю понад 160 кВт, вони живляться напругою 660 В, 6 та 10 кВ, тоді як елементарні освітлювальні прилади отримують живлення від джерел фазної напруги. Такий поділ дозволяє врахувати специфіку експлуатації кожного типу споживачів.

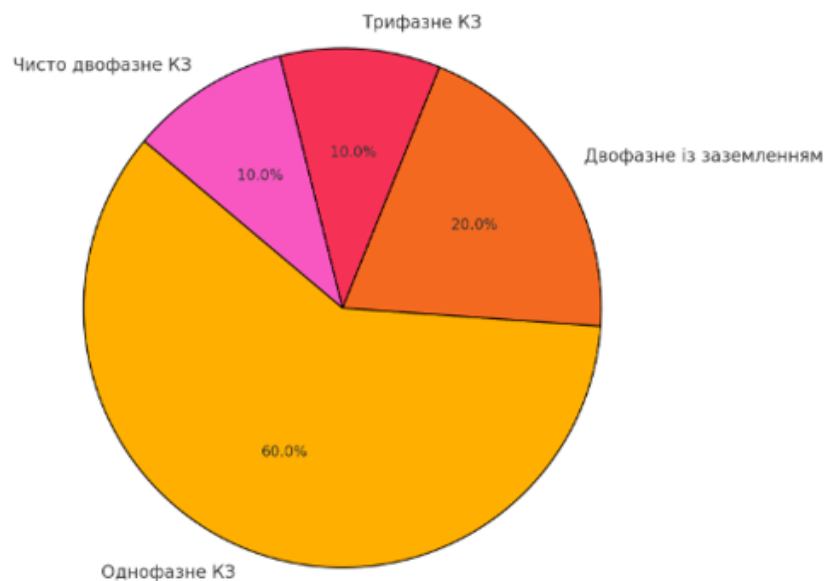


Рисунок 1.1 Статистика аварійних ситуацій, що створюють різні типи коротких замикань

Аварійні умови в електромережах мають різноманітну природу (рис. 1.1). За статистикою, найбільш частими є однофазні короткі замикання (до 60% усіх випадків), тоді як трифазні короткі замикання фіксуються в близько 10% інцидентів. Крім того, двофазні короткі замикання на землю можуть становити до 20%, а чисто двофазні — близько 10%. Така статистика формує базу для прийняття відповідних заходів із захисту мереж.

Для визначення значень струмів короткого замикання та ударних струмів у системі використовуються спеціальні методики розрахунку, що враховують питомі опори кабелів, параметри трансформаторів та характеристики захисної апаратури. Точність розрахунків значно підвищується, якщо врахувати нюанси застосування методик [7].

Для електричних систем з робочою напругою до 1000В загалом використовують апаратуру захисту, здатну своєчасно розірвати ланцюг у разі перевантаження або короткого замикання. У випадку мереж із напругою понад 1000В перевага надається релейним схемам, які дозволяють досягнути вищих показників швидкодії, селективності та точності дії захисних компонентів.

Серед широко застосовуваних засобів захисту відзначаються автоматичні

вимикачі та запобіжники. Проте, коли необхідно забезпечити надзвичайну чуйність або швидкість відключення, використовують спеціальні релейні системи, що поєднують можливості реле з дією автоматичних вимикачів. Такий комплексний підхід дозволяє ефективно реагувати на різноманітні нестандартні режими роботи мережі.

Особливу увагу приділяють внутрішнім електричним системам, де робоча напруга не перевищує 1000 В. У таких випадках встановлюють захист від перевантажень за допомогою автоматичних вимикачів, оснащених тепловими або комбінованими розчіплювачами, що допомагає запобігти перегріву та зберегти цілісність кабельних інсталяцій.

Кінцевим завданням при підборі захисного обладнання є ретельне зіставлення характеристик захисту з максимально допустимими навантаженнями на електричні ланцюги та їх компоненти. Застосування спеціалізованих рішень для різних типів споживачів дозволяє досягти оптимальної узгодженості, мінімізуючи ризики перевантажень та аварійних ситуацій у мережі. Цей адаптивний підхід до організації захисту сприяє підвищенню надійності електропостачання, що є особливо важливим у сучасних умовах, коли електроенергетична система повинна працювати без перебоїв навіть за наявності високих пускових струмів та потенційних коротких замикань.

1.2 Особливості низьковольтних мереж

У сучасних технологічних системах електроенергія виступає ключовим ресурсом, що забезпечує безперебійну роботу різноманітних процесів – від автоматизації систем водопостачання та роботи насосного обладнання до організації систем освітлення, вентиляції та кліматичного контролю. Мережі з номінальною напругою 0,4 кВ є загальноприйнятим стандартом завдяки своїй економічності, простоті монтажу та високому рівню безпеки. Точність розрахунків втрат напруги у таких мережах має ключове значення для забезпечення безперебійної роботи системи, що дозволяє мінімізувати

експлуатаційні витрати та підвищити рівень безпеки [8]. Однак специфіка умов експлуатації – значні відстані між споживачами, сезонність навантажень, постійний вплив атмосферних чинників і нерегулярність робочих режимів – накладає додаткові вимоги до проектування та обслуговування таких мереж. При цьому необхідно враховувати високі пускові струми асинхронних двигунів, що використовуються для запуску спеціального обладнання, і забезпечувати мінімальні втрати напруги на довгих ділянках кабельних ліній.

Ефективність мережі безпосередньо залежить від розрахунків струмових навантажень та правильного підбору кабельної продукції, здатної витримувати імпульсні навантаження при ввімкненні двигунів і стабільно працювати. Сучасний підхід до проектування передбачає інтеграцію систем автоматичного захисту, які розрізняють короточасні імпульсні перевантаження від аварійних станів, що гарантує оперативне відключення несправних ділянок без зупинки роботи всієї мережі. Крім того, технологія дистанційного моніторингу дозволяє у режимі реального часу спостерігати за параметрами мережі, своєчасно виявляти відхилення та проводити профілактичні роботи, що підвищує безпеку експлуатації і продовжує термін служби обладнання.

Відповідно до Яндульського та співавторів, основні елементи низьковольтної підстанції — трансформатори, вимикачі та роз'єднувачі — повинні відповідати певним технічним вимогам щодо надійності та розрахункових параметрів [9].

Одним із ключових рішень для підвищення надійності електропостачання є використання радіальної схеми живлення (рис 1.2).

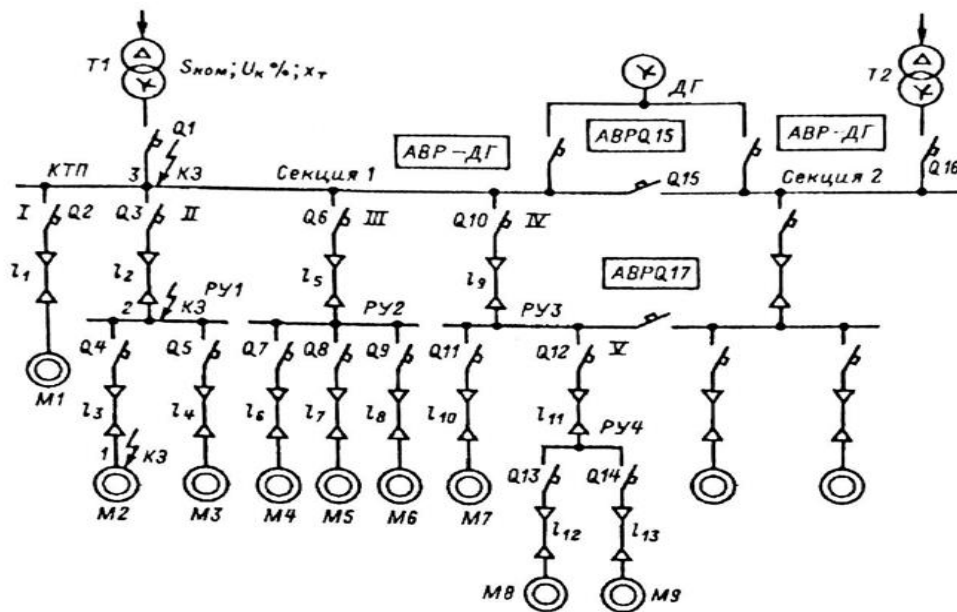


Рисунок 1.2 Радіальна схема живлення електродвигунів

Ця схема реалізована таким чином, що електроенергія надходить від основних трансформаторних підстанцій (умовно позначених як T1 та T2) через систему автоматичних вимикачів (QF1, QF2, QF3, QF4) безпосередньо до груп споживачів – двигунних агрегатів (M1, M2, ..., M7). Така топологія передбачає послідовне розгалуження від головного джерела живлення до кінцевих споживачів, що дозволяє ефективно локалізувати несправності: при виникненні короткого замикання або іншої аварійної ситуації пошкодження обмежується окремою гілкою, не впливаючи на роботу всієї мережі. Крім того, така схема дозволяє зменшити витрати на кабельну продукцію, оскільки кожен напрямок формується відповідно до конкретного навантаження та відстані до споживача, а також дає можливість оперативної інтеграції резервних джерел живлення (наприклад, аварійних дизель-генераторів або відновлюваних джерел).

Щоб ілюструвати важливість правильного підбору кабелю, розглянемо приклад розрахунку втрати напруги на кабельній лінії. Припустимо, що довжина кабелю (з врахуванням повного контуру – до споживача і назад) складає 600 метрів, а номінальний струм навантаження становить 50 А. Для розрахунку втрати напруги використовується формула:

$$R = \rho \cdot L \div S, \quad (1.2.1)$$

де ρ – питомий опір матеріалу (для міді приймаємо 0,0175 Ом·мм²/м); L – довжина кабелю (в нашому випадку 600 м); S – січення кабелю (мм²).

Втрату напруги ΔU можна обчислити як:

$$\Delta U = I \cdot R \quad (1.2.2)$$

Нижче наведено розрахункову таблицю для кількох варіантів січення кабелю:

Таблиця 1.2.1 – розрахункова таблиця для різних варіантів січення кабелю

Січення кабелю, S (мм ²)	Опір R (Ом)	Втрата напруги ΔU (В)	Відсоток втрати (%) при 400 В
16	$0,0175 \times 600 / 16$ $\approx 0,656$ Ом	$50 \text{ А} \times 0,656 \text{ }\Omega \approx$ 32,8 В	$(32,8 / 400) \times 100$ $\approx 8,20$ %
25	$0,0175 \times 600 / 25$ $\approx 0,42$ Ом	$50 \text{ А} \times 0,42 \text{ }\Omega \approx 21$ В	$(21 / 400) \times 100 \approx$ 5,25 %
35	$0,0175 \times 600 / 35$ $\approx 0,30$ Ом	$50 \text{ А} \times 0,30 \text{ }\Omega \approx 15$ В	$(15 / 400) \times 100 \approx$ 3,75 %
50	$0,0175 \times 600 / 50$ $\approx 0,21$ Ом	$50 \text{ А} \times 0,21 \text{ }\Omega \approx$ 10,5 В	$(10,5 / 400) \times 100$ $\approx 2,63$ %

Цей розрахунок демонструє, що при використанні кабелю з недостатнім перерізом (наприклад, 16 мм²) втрата напруги може сягати понад 8 %, що перевищує допустимі норми для стабільної роботи обладнання. Збільшення перерізу кабелю до 50 мм² дозволяє забезпечити втрату напруги на рівні близько 2,63 %, що є більш прийнятним з точки зору норм проектування та надійності системи. Подібні розрахунки є невід’ємною частиною процесу проектування мереж 0,4 кВ, адже вони дозволяють оптимізувати як початкові інвестиційні витрати, так і подальші експлуатаційні витрати.

Окрім розрахунку втрати напруги, при проектуванні мереж важливо враховувати і пускові струми асинхронних двигунів, які можуть перевищувати номінальний струм у 3–6 разів. Наприклад, якщо режимний струм двигуна становить 50 А, то пусковий струм може досягати 200–300 А. Хоча ці імпульсні навантаження тривають короткий проміжок часу, кабелі і засоби захисту мають бути вибрані таким чином, щоб вони безпечно витримували такі навантаження, не викликаючи надмірного нагрівання або пошкоджень ізоляції.

Сучасні підходи до модернізації електричних мереж враховують не лише технічні характеристики компонентів, а й специфіку експлуатації в реальних умовах. Завдяки використанню інноваційних систем автоматизації і дистанційного контролю, можливо не лише підтримувати стабільність роботи мережі, але й інтегрувати її з альтернативними джерелами енергії, створюючи автономні та масштабовані системи живлення. В результаті комплексне застосування сучасних технологій дозволяє забезпечити стабільність, безпеку та економічну ефективність роботи електросистем, що є критично важливим для виробництва, де навіть короткочасні збої можуть негативно позначитися на загальній продуктивності підприємства чи господарства.

РОЗДІЛ 2. КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ ТА ПРИСТРОЇ ЗАХИСТУ В КОЛАХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

2.1 Автоматичні вимикачі, конструкція і основні характеристики.

Автоматичні вимикачі представляють собою електричні пристрої, розроблені для безперебійного проведення струму у звичних умовах експлуатації та негайного роз'єднання електричного ланцюга при виникненні аварійних чи аномальних режимів роботи системи. Вони активуються під час коротких замикань, перевантажень, розривів фаз або небезпечного зниження напруги, а також використовуються для рідкісних операцій ручного чи дистанційного перемикавання електричних кіл. Якщо в конструкцію вимикача інтегровані додаткові елементи керування, такий апарат здатний автоматично відключати споживачів при надмірному падінні напруги, а також реагувати на появу небажаного струму в нульовому проводі чи при короткому замиканні в колах керування. Крім цього, розширені функції дозволяють контролювати сигнальні пристрої та організовувати систему блокувань, забезпечуючи тим самим підвищений рівень захисту електропостачання. Вигляд одного із таких вимикачів ви можете побачити на рисунку 2.1.1.



Рисунок 2.1.1 Автоматичний вимикач серії А3100, автомат А3134 — з 3-х полюсним вимикачем.

Автоматичні вимикачі, які використовуються в електроустановках, поділяються на різні типи залежно від умов експлуатації. У мережах із напругою до 1000 В найчастіше застосовують вимикачі таких серій, як АП, А-2000, А-3100, А-3700, а також сучасні моделі, що випускаються компаніями АСКО-УкрЕМ (Україна), ІЕК (РФ), АBB, Siemens, Moeller та іншими європейськими виробниками. Ці пристрої забезпечують надійний захист електричних мереж від перевантажень і коротких замикань, тому широко використовуються в побутових, комерційних та промислових установках.

Класифікація:

Автоматичні вимикачі класифікують за видом струму, кількістю полюсів, наявністю струмообмеження, типом розчіплювача та характеристикою витримки часу спрацювання [1].

Відповідно до стандарту ГОСТ 9098-78 автоматичні вимикачі поділяють за основним принципом, що полягає у розподілі **за видом струму головного ланцюга**. До цього розподілу входять пристрої, розраховані на роботу з постійним струмом, змінним струмом або з можливістю застосування для обох типів струму.

Номінальні струми головних ланцюгів вимикачів, що експлуатуються при температурі навколишнього середовища 40 °С, повинні відповідати вимогам ГОСТ 6827. При цьому номінальний струм для головних ланцюгів обирається з наступного ряду значень: 6,3; 10; 16; 25; 32; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300 А, а також можливо виробництво вимикачів з номінальними струмами 1500; 3000 та 3200 А. Щодо максимальних розчіплювачів струму, їх номінальні значення, призначені для роботи при 40 °С, також мають відповідати вимогам ГОСТ 6827. Допускаються наступні номінальні значення: 15; 45; 120; 150; 300; 320; 600; 1200; 1500; 3000; 3200 А.

Вимикачі класифікують **за кількістю полюсів** головного ланцюга: їх можуть виготовляти як однополюсні, так і двополюсні, три- чи чотириполюсні пристрої.

За наявністю струмообмеження розрізняють моделі, які або здійснюють обмеження струму, або не мають такої функції.

Конструктивно вимикачі поділяються **за видом розчіплювача**: застосовують розчіплювачі з максимальним струмовим відключенням, незалежні розчіплювачі або ті, що забезпечують мінімальне (або нульове) розчеплення напруги.

Також важливо враховувати характеристику витримки часу розчіплення. Вимикач може відключатися миттєво або з певною затримкою, при цьому затримка може бути фіксованою, залежати від величини струму, або поєднувати обидва ці параметри.

Функціональність пристрою може бути доповнена **наявністю вільних контактів** («блок-контактів») для вторинних ланцюгів, або ж, навпаки, їх відсутністю.

Приєднання зовнішніх провідників здійснюється різними способами. Можна застосовувати заднє або переднє приєднання, комбіноване приєднання (де, наприклад, верхні затискачі встановлюються із заднього боку, а нижні – із переднього або навпаки) або універсальне приєднання, яке дозволяє використовувати як переднє, так і заднє підключення.

За типом приводу вимикачі поділяють на пристрої з ручним, моторним або пружинним приводом.

Також вони класифікуються **за ступенем захисту від впливу навколишнього середовища** та можливості недопущення контакту з рухомими або напруженими частинами, що розташовані всередині оболонки, відповідно до вимог ГОСТ 14255.

Згідно з ГОСТ Р 50345-99, автоматичні вимикачі поділяють **за струмом миттєвого розчеплення** наступним чином:

- Тип "В" – пристрій відключає ланцюг при струмі, що перевищує $3 \cdot I_n$, але не перевищує $5 \cdot I_n$ (де номінальний струм I_n – це максимальне значення струму (змінного або постійного), що протікає в тривалому режимі через автоматичний вимикач за нормальних умов експлуатації.);

- Тип "С" – при струмі, що перевищує $5 \cdot I_n$, але не більше $10 \cdot I_n$;
- Тип "D" – для струму, що перевищує $10 \cdot I_n$ і може сягати $50 \cdot I_n$.

У класифікації європейських виробників можливе певне відхилення від зазначених стандартів. Зокрема, додається тип "А" для струмів, що лежать в діапазоні понад $2 \cdot I_n$ до $3 \cdot I_n$, а верхня межа для типу "D" часто встановлюється на рівні $20 \cdot I_n$. Окремі виробники, наприклад, АВВ, пропонують додаткові криві відключення, такі як криві К (від 8 до $14 \cdot I_n$) та Z (від 2 до $4 \cdot I_n$), що відповідають стандарту МЕК 60947-2. Характеристики автоматичних вимикачів за типом спрацювання можна подивитись у таблиці 2.1.1.

Відключення може здійснюватися як без витримки часу, так і з нею. Час відключення (t_c , с) визначається як проміжок від моменту перевищення контрольованого параметра до початку розмикання контактів. Нормальні вимикачі мають t_c , с в діапазоні 0,02–1 с, селективні – з витримкою часу, а швидкодіючі вимикачі характеризуються значеннями менше 0,005 с. Слід зазначити, що нормальні та селективні автоматичні вимикачі не володіють струмообмежуючою дією, тоді як швидкодіючі, подібно до запобіжників, переривають ланцюг до досягнення струмом критичного значення (I_y).

Селективні автоматичні вимикачі забезпечують організацію селективного захисту мережі шляхом розміщення пристроїв з різними витримками часу: найменша затримка відключення застосовується на рівні споживача, а з поступовим збільшенням затримки – у напрямку до джерела живлення.

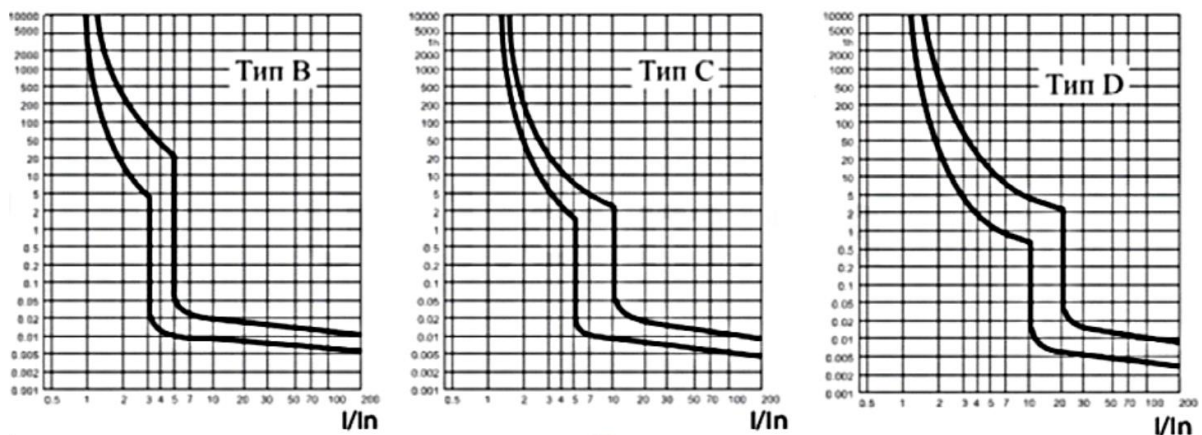


Рисунок 2.1.2 Час-струмові характеристики автоматичних вимикачів за типом спрацювання

Таблиця 2.1.1 – Характеристики автоматичних вимикачів за типом спрацювання

Тип вимикача	Кратність струму спрацювання	Сфера застосування
Тип В	$(3 - 5) \cdot I_n$	Приміщення з побутовими навантаженнями без високих пускових струмів: офіси агропідприємств, освітлення господарських приміщень, системи відеонагляду, автоматизовані системи контролю клімату.
Тип С	$(5 - 10) \cdot I_n$	Об'єкти з обладнанням середніх пускових струмів: вентиляція у тваринницьких комплексах, насоси у системах зрошення, млини, теплиці з газорозрядними лампами.
Тип D	$(10 - 20) \cdot I_n$	Обладнання з високими пусковими струмами: трансформатори, великі асинхронні двигуни, компресори, зерноочисні машини, насосні станції.

Конструкція автоматичних вимикачів:

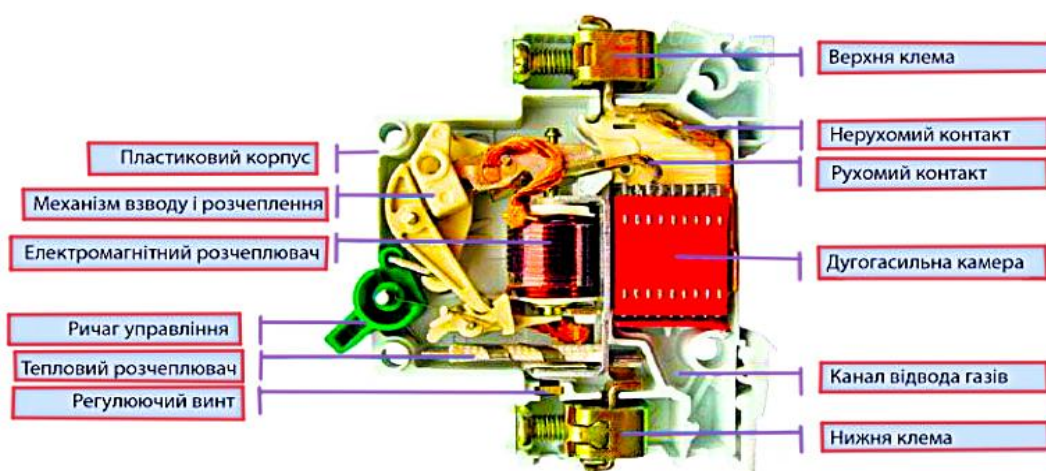


Рисунок 2.1.3 Конструкція трифазного автоматичного вимикача

Автоматичний вимикач складається з ряду функціональних елементів (рис 2.1.3), які забезпечують його надійну роботу в нормальному та аварійному режимах. Його конструкція має такі складові:

1. **Корпус** – він виготовляється з міцного термопластичного матеріалу, що має високі діелектричні властивості. Це дозволяє уникнути ураження електричним струмом навіть при роботі під напругою. Завдяки компактним габаритам і ергономічній формі, корпус легко монтується в електричних щитах, шафах керування та розподільних установках.

2. Керування автоматичним вимикачем здійснюється за допомогою **важеля управління**, який дозволяє вручну вмикати або вимикати живлення. Це є важливою функцією при проведенні регламентного обслуговування або у разі необхідності оперативного відключення мережі.

3. **Гвинтові клеми** — це елементи кріплення, призначені для надійного електричного з'єднання провідника з контактною частиною вимикача. Вони забезпечують фіксацію фазного або нульового проводу за допомогою гвинтового затискача, що запобігає ослабленню контакту під час вібрацій або нагрівання.

4. Контактна система автоматичного вимикача складається з двох основних елементів — **рухомого та нерухомого контактів**. Рухомий контакт — це механічна частина, що змінює своє положення в процесі комутації, здійснюючи замикання або розмикання електричного кола. Нерухомий контакт, у свою чергу, закріплений у корпусі вимикача та слугує постійною контактною поверхнею для з'єднання з рухомим елементом. У момент замикання ланцюга ці два елементи входять у контакт, забезпечуючи безперервний потік струму, а під час аварійного або ручного розмикання — роз'єднуються.

5. До складу захисного механізму входять два основних типи розчеплювачів: тепловий та електромагнітний. **Електромагнітний розчеплювач**, виконаний у вигляді соленоїда, забезпечує миттєвий захист у разі короткого замикання. При досягненні критичного значення струму, магнітне поле втягує осердя і ініціює негайне розмикання контактів.

Тепловий розчеплювач є біметалевим елементом, який реагує на

перевантаження. При тривалому перевищенні допустимого струму пластина нагрівається, деформується та механічно діє на механізм розчеплення, викликаючи відключення. Цей процес є уповільненим і дозволяє уникнути спрацювання при короткочасних пікових навантаженнях.

6. Дугогасильна камера виконує критично важливу функцію – вона призначена для гасіння електричної дуги, що виникає при розмиканні контактів. Завдяки спеціальним металевим пластинам відбувається розтягування, охолодження та розбиття дуги на менші частини, що зменшує її температуру та знижує знос контактів. Також камера запобігає виходу продуктів згоряння назовні та мінімізує ризик займання.

7. Канал відведення газів служить для виводу надлишкового тепла та газових утворень, що виникають під час гасіння дуги, тим самим покращуючи теплову стабільність та безпеку пристрою в процесі експлуатації.

Загалом, продумана конструкція автоматичного вимикача забезпечує не лише ефективний захист електричних кіл, а й надійність, безпеку та зручність в обслуговуванні.

2.2 Магнітні пускачі та контактори

Магнітні пускачі та контактори є ключовими електротехнічними пристроями, що забезпечують дистанційну комутацію в електричних колах. Вони широко використовуються для керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, виконуючи функції запуску, зупинки та реверсу, а також застосовуються в схемах електроприводів двигунів з фазним ротором і машин постійного струму. Для захисту електродвигунів від перевантажень пускачі можуть комплектуватися тепловими реле серій РТЛ, РТИ, РТТ, ТРН. Крім того, в системах електроприводів ці пристрої використовуються для мінімізації електромагнітних перешкод, що виникають під час перемикання котушок високої індуктивності. В Україні найбільш популярні моделі серій ПМЛ, ПМА, ПМЕ, ПІМ, ПІ (рис.2.2.1) тоді як апарати західних виробників зустрічаються рідше.



Рисунок 2.2.1 Магнітний пускач ПМ 1-18-10, виробника АсКо-УкрЕМ

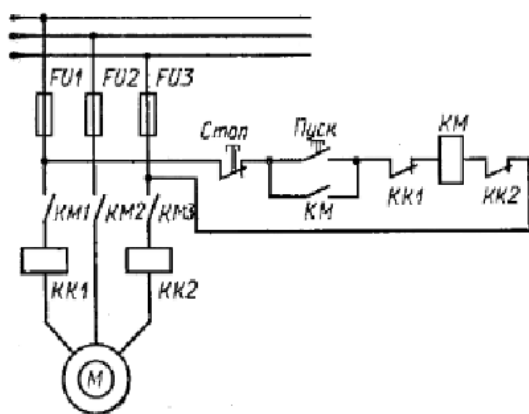
Принцип дії:

У схемі пуску асинхронного двигуна (рис. 2.2.2 (а)) захист двигуна реалізовано за допомогою теплових реле КК1 і КК2, що розміщені в двох фазах обмоток. Вони попереджають перегрів і перевантаження. Запобіжники FU1—FU3 оберігають мережу живлення від коротких замикань у двигуні.

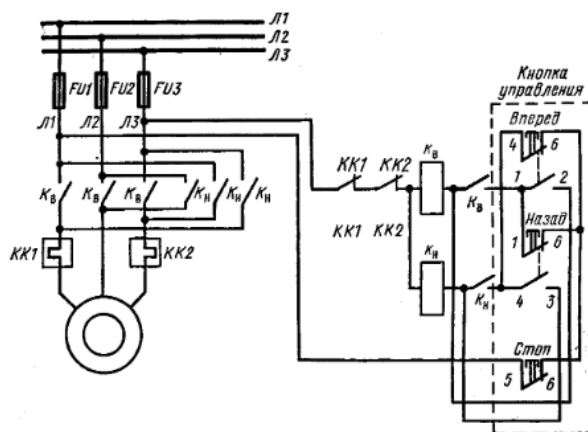
Пуск здійснюється за допомогою кнопки «Пуск», яка подає струм на котушку контактора КМ через контакти теплового реле і кнопку «Стоп». Після спрацювання КМ замикає свої головні контакти КМ1—КМ3, через які подається живлення на двигун. Паралельно з цим спрацьовує допоміжний контакт КМ, який утримує коло замкнутим навіть після відпускання кнопки «Пуск».

Зупинка двигуна виконується натисканням кнопки «Стоп». Це розмикає коло живлення котушки КМ, відповідно контакти КМ1—КМ3 розмикаються, і двигун вимикається. У разі перевантаження теплові реле КК1 або КК2 також розривають коло котушки.

Завдяки високому коефіцієнту повернення електромагнітів, при зниженні напруги нижче певного порогу (0,6–0,7 від номінальної) контактор автоматично відключається, запобігаючи мимовільному включенню двигуна після відновлення живлення.



(а)



(б)

Рисунок 2.2.2 Схеми пуску асинхронного двигуна (а) та включення реверсного пускателя (б)

Реверсивний пускач, окрім стандартного запуску та захисту двигуна, дозволяє змінювати напрямок його обертання за рахунок перестановки фаз (рис. 2.2.2 (б)). У його складі є два контактори, між якими реалізовано механічне блокування — при увімкненні одного контактора інший фізично утримується у вимкненому стані за допомогою спеціального важеля. Це виключає можливість одночасного включення обох контакторів і попереджає коротке замикання.

Кнопка «Вперед» має два типи контактів: замикальні (1-2) та розмикальні (4-6). При натисканні цієї кнопки замикаються контакти 1-2, які вмикають котушку прямого контактора (Кп), а контакти 4-6 розмикають коло живлення котушки зворотного контактора (Кз), не допускаючи їх одночасного включення.

Аналогічно працює кнопка «Назад», яка також має по дві пари контактів. При її натисканні спочатку розривається коло котушки Кп (через контакти 1-6), що відключає його, а потім замикаються контакти 4-3, подаючи живлення на котушку Кз, яка перемикає фази і запускає двигун у зворотному напрямку.

Механічне блокування підсилюється електричним: навіть якщо одночасно натиснути обидві кнопки, схема не дозволить увімкнути обидва контактори одночасно, завдяки правильному підбору логіки замикання.

Нормовані технічні характеристики магнітного пускателя:

1. Номінальний струм (I_n): Це максимально допустимий струм змінного або постійного типу, який може безперервно протікати через пристрій за

стандартних умов експлуатації. Визначається за типовим рядом значень («0» — 6,3 А, «1» — 10 А, «2» — 25 А, «3» — 40 А, «4» — 63 А, «5» — 100 А, «6» — 160 А), відповідно до умов навантаження. Залежно від струму пускач підбирається за умовним номером (так званим “габаритом”).

2. Номінальна напруга (U_n): Це робоча напруга змінного або постійного струму, при якій електричний апарат функціонує з заявленими технічними характеристиками.

3. Напруга керуючої котушки: Напруга, яка подається на керуючі обмотки пускача або контактора. Забезпечує надійне спрацювання пристрою. Типові значення для змінного струму: 24 В, 36 В, 42 В, 110 В, 230 В, 380 В.

4. Механічна та електрична зносостійкість: Оцінюється за кількістю циклів вмикання і вимикання. Впливає також тип навантаження, матеріал контактів (наприклад, вміст срібла) та конструктивні особливості. Категорії застосування:

АС1 — активне навантаження (наприклад, нагрівачі);

АС2 — стандартне пускання асинхронних двигунів;

АС3 — тяжке навантаження, включаючи реверсування двигуна.

5. Ступінь захисту оболонки: Визначається ступенем герметичності корпусу (відкритий/закритий тип) згідно з чинними стандартами, наприклад IP20, IP54 тощо.

6. Температурний діапазон роботи: Визначає межі температур навколишнього середовища, в яких пристрій може функціонувати без втрати працездатності.

7. Додаткове обладнання: Передбачає наявність таких елементів, як електротеплові реле, кнопки керування (Пуск/Стоп) і сигнальні індикатори.

2.3 Пристрої захисного вимкнення (ПЗВ) та диференціальні автоматичні вимикачі (ДАВ)

Такі пристрої належать до категорії комутаційних апаратів, що виконують ключову роль у забезпеченні електробезпеки споживачів. Їхнє головне

призначення полягає в забезпеченні безперервного пропускання електричного струму у штатному режимі роботи мережі та оперативному відключенні електропостачання у разі виявлення струмів витоку, які можуть свідчити про пошкодження ізоляції або прямий контакт струмопровідних частин з елементами, що заземлені.

Особливу функціональність демонструють диференціальні автоматичні вимикачі, які, окрім виявлення струмів витоку, одночасно виконують захист електричних ланцюгів від перевантаження та струмів короткого замикання. Завдяки поєднанню в одному пристрої функцій класичного ПЗВ та автоматичного вимикача, ДАВ стали невід'ємною складовою сучасних низьковольтних систем електропостачання в житловому, комерційному та аграрному секторах. Варто зазначити, що вартість диференційного автоматичного вимикача зазвичай нижча, ніж сукупна вартість ПЗВ та автоматичного вимикача з таким самим номінальним струмом. Це пояснюється високим споживчим попитом: диференційні автомати купуються значно частіше.

Ефективне застосування таких пристроїв дозволяє значно підвищити рівень безпеки обслуговуючого персоналу, зменшити ризик пожеж, а також уникнути значних матеріальних збитків унаслідок пошкодження електрообладнання.

Принцип дії:

Пристрої захисного вимкнення постійно контролюють баланс струму, що протікає по фазному і нейтральному провідниках. У разі витоку частини струму (наприклад, через тіло людини або несправність ізоляції), виникає різниця струмів, яку пристрій виявляє за допомогою диференціального трансформатора [3]. При перевищенні допустимого значення спрацює електромагнітне реле, що розмикає контакти.

Диференціальні автоматичні вимикачі працюють аналогічно, але додатково мають тепловий і електромагнітний захист, що реагує на надструми.

Класифікація:

Прилади захисного вимкнення (ПЗВ) виготовляються у варіантах із двома або чотирма полюсами (рис 2.3.1), що дозволяє їх використання як в однофазних, так і в трифазних мережах змінного струму з номінальною напругою 230 В і 400 В відповідно.

Найпоширеніші номінальні струми контактів ПЗВ становлять 16, 25, 32, 40, 50 і 63 А, хоча на ринку також доступні моделі для роботи з більшими струмами, які застосовуються у промислових або потужних розподільчих мережах.

Що стосується порогового значення диференційного (залишкового) струму, при якому спрацьовує пристрій, то воно, як правило, дорівнює 10, 30, 100 або 300 мА.

Згідно з міжнародним стандартом IEC/TR 60755:2008, що формулює загальні вимоги до пристроїв, керованих залишковим струмом, класифікація ПЗВ також здійснюється за здатністю реагувати на різні типи диференційного струму, включаючи постійну складову:

- **Тип АС** – реагує виключно на синусоїдальний змінний струм, незалежно від того, виникає він раптово чи поступово.

- **Тип А** – спрацьовує на змінний синусоїдальний та пульсуючий постійний струм, що може виникати у разі роботи електронних приладів (наприклад, пральних машин або індукційних плит).

- **Тип В** – найбільш універсальний, він реагує як на змінні, так і на постійні та випрямлені струми витоку, включаючи струми з високочастотними гармоніками, що є характерним для систем із частотними перетворювачами, сонячними інверторами або зарядними станціями для електромобілів [4].



Рисунок 2.3.1 Зовнішня конфігурація ПЗВ з двома та чотирма полюсами

2.4 Запобіжники

Запобіжник є одним з основних пристроїв захисту в електричних мережах, основним завданням якого є запобігання пошкодженню обладнання внаслідок надструмів, спричинених короткими замиканнями чи перевантаженнями. Його функція полягає у швидкому відключенні пошкодженої ділянки мережі з метою обмеження впливу аварійного режиму та забезпечення безпеки подальшої експлуатації.

Найчастіше запобіжники використовуються для захисту саме від струмів короткого замикання. Для перевантажень, як правило, застосовують теплові реле або автоматичні вимикачі, які краще реагують на тривалі перевищення номінального струму. Основним робочим елементом запобіжника є плавка вставка — струмопровідна деталь, яка при досягненні встановленого значення струму розплавляється, тим самим розриваючи електричне коло.

З конструктивної точки зору запобіжники поділяються на два типи:

- **Відкриті** — у яких вставка знаходиться у відкритому доступі або в трубчастому корпусі без герметизації.
- **Закриті** — де плавка вставка розміщена в спеціальному патроні або корпусі, що повністю ізолює її від зовнішнього середовища.

Для підвищення ефективності гасіння дуги, що виникає при розриві кола, внутрішній простір корпусу іноді заповнюється зернистим наповнювачем, наприклад, кварцовим піском.

Матеріали для виготовлення плавких вставок підбираються з урахуванням електрофізичних і термічних властивостей. Найбільш поширеними є мідь, цинк, алюміній, свинець та срібло. Мідь, попри добрі провідні властивості, схильна до окислення, що може призвести до зміни її електричних параметрів, тому її зазвичай покривають шаром олова. Срібло забезпечує кращу стабільність роботи, але через високу вартість застосовується рідше.

Захисна часострумова характеристика плавкого запобіжника зображена на рисунку 2.4.1. У цій залежності $I_{\text{ном}}$ позначає номінальний струм, який наноситься безпосередньо на корпусі плавкої вставки та відповідає довготривалому припустимому навантаженню без спрацювання. Інший важливий параметр — граничний струм $I_{\text{п}}$, при досягненні якого вставка гарантовано розплавляється за проміжок часу, що не перевищує однієї години. Саме це значення часто застосовується як орієнтир при проектуванні систем захисту.

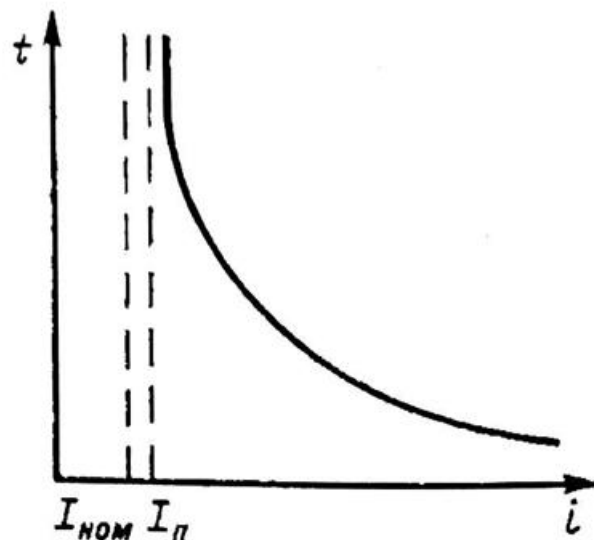


Рисунок 2.4.1 Захисна характеристика запобіжника

Поведінка запобіжника багато в чому визначається матеріалом, з якого виготовлена плавка вставка. Граничний струм зазвичай перевищує номінальний

на 10–70%, що обумовлено тепловими властивостями матеріалу. Наприклад, срібло, завдяки високій провідності та стабільності до зовнішніх впливів, демонструє мінімальне перевищення. Навпаки, алюміній, який є менш стабільним у змінних умовах навколишнього середовища, потребує більшого запасу по струму для забезпечення надійного спрацювання.

Також слід враховувати, що експлуатаційні умови (вологість, температура, пил, вібрації) можуть значно впливати на точність спрацювання запобіжника. У промислових та сільськогосподарських мережах, де коливання навантажень є звичним явищем, правильний вибір співвідношення між $I_{\text{ном}}$ і $I_{\text{н}}$ дозволяє уникнути як хибних спрацювань, так і небезпечного перегріву елементів кола.

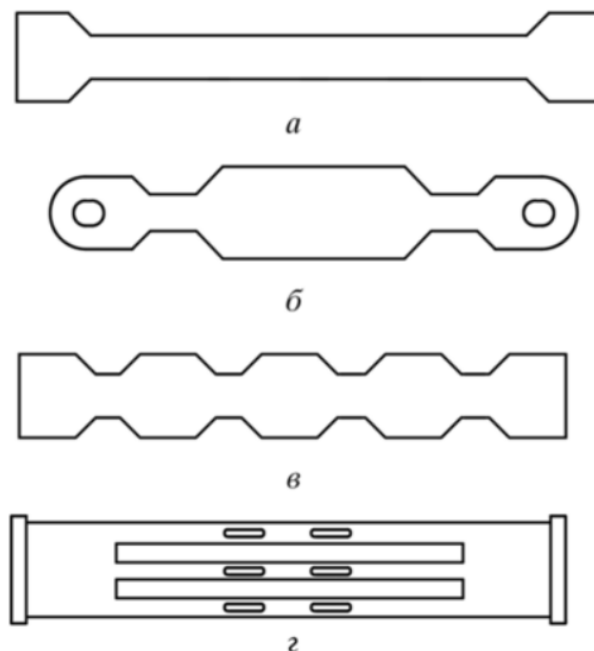


Рисунок 2.4.2 – Різні варіанти виконання плавких вставок: а – зі сталим поперечним перерізом; б – зі змінним перерізом (фігурні вставки) для напруги переважно не вище 220 В; в – зі змінним перерізом для напруги понад 380 В; г – для запобіжника з наповнювачем.

На рисунку 2.4.2 наведено різні варіанти конструктивного виконання плавких вставок.

Фігурні плавкі вставки, порівняно з плоскими, мають низку переваг: знижується рівень перенапруги під час спрацювання запобіжника, зменшується інтенсивність випаровування металу, зменшуються теплові втрати тощо.

Граничний струм запобіжника відкритого типу або струм його

спрацювання визначається на основі балансу підведеної та відведеної потужності за формулою:

$$I_{\text{н}} = \sqrt{\frac{K_T \cdot S_{\text{охл}} \cdot (u_0 - u_{\text{пл}})}{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot u_{\text{пл}})}}, \quad (2.4.1)$$

де K_T – коефіцієнт тепловіддачі; $S_{\text{охл}}$ – площа поверхні охолодження; $u_{\text{пл}}$ – температура плавлення матеріалу вставки; u_0 – температура навколишнього середовища; ρ_0 – питомий електричний опір матеріалу вставки; α – температурний коефіцієнт опору.

Граничний струм запобіжника з наповнювачем обчислюється за формулою:

$$I_n = \pi \cdot d \sqrt{\frac{u_0 - u_{\text{пл}}}{2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot u_{\text{пл}}) \left(\frac{8}{K_T \cdot D_{\text{н}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{н}}} \ln \frac{D_{\text{вн}}}{d} + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{вн}}} \right)}}, \quad (2.4.2)$$

Де $D_{\text{вн}}$ та $D_{\text{н}}$ – внутрішній та зовнішній діаметри трубки; $\lambda_{\text{н}}$ та λ_T – теплопровідність наповнювача і матеріалу трубки; d – діаметр плавкої вставки.

Повний час спрацювання запобіжника:

$$t_{\text{сп}} = t_1 + t_2 + t_3, \quad (2.4.3)$$

де t_1 – час нагрівання вставки від температури навколишнього середовища до температури плавлення; t_2 – час плавлення вставки (тобто час переходу матеріалу з твердого стану в рідкий після досягнення температури плавлення); t_3 – час гасіння дуги.

Часо-струмові характеристики запобіжника зазвичай розраховують, виходячи з припущення про адіабатичний характер нагріву, тобто без теплообміну з навколишнім середовищем. Практичний досвід підтверджує, що це припущення справедливе при струмах, які у три або більше разів перевищують номінальний.

Часові складові загального часу спрацювання запобіжника визначаються наступними рівняннями:

$$t_1 = A_1 \frac{S^2}{I^2}; t_2 = A_2 \frac{S^2}{I^2}, \quad (2.4.4)$$

де: S — площа поперечного перерізу вставки; I — струм, при якому спрацює запобіжник; A_1 і A_2 — інтегральні коефіцієнти, що характеризують електрофізичні властивості матеріалу вставки.

Типові значення коефіцієнтів A_1 і A_2 (у $A^2 \cdot c/mm^4$) для деяких металів:

$$Ag - A_1 = 62000; A_2 = 8000;$$

$$Cu - A_1 = 80000; A_2 = 11000;$$

$$Zn - A_1 = 9000; A_2 = 3000;$$

$$Pb - A_1 = 1200; A_2 = 400;$$

2.5 Апарати теплового та температурного захисту.

Апарати теплового захисту

Теплові реле є одним із найпоширеніших засобів захисту асинхронних електродвигунів від перевантаження. Приклад одного із таких реле зображено на рисунку 2.5.1. Принцип роботи біметалічних теплових реле ґрунтується на різниці у лінійному розширенні двох металів, які мають різні температурні коефіцієнти. Пластини з'єднані між собою, і при нагріванні довшається пластина з більшим коефіцієнтом, що призводить до вигину конструкції [12] (рис. 2.5.2), де $\alpha_2 > \alpha_1$.



Рисунок 2.5.1 Реле теплове АСКО РТ-1307 (1,6-2,5А)

Коли дві металеві пластини з різними коефіцієнтами лінійного розширення жорстко з'єднані між собою та піддаються нагріванню, складена пластина вигинається в напрямку металу з нижчим коефіцієнтом теплового розширення. Один з кінців цієї пластини прикріплюється до рухомого контакту, що при досягненні певної температури розмикає чи замикає електричне коло.

Для виготовлення таких пластин зазвичай застосовують пари металів із контрастними властивостями – наприклад, латунь з інваром або сталь з інваром. Біметалеві елементи можуть мати як просту плоску форму, так і більш складну – у вигляді гвинтової спіралі або пружної смуги.

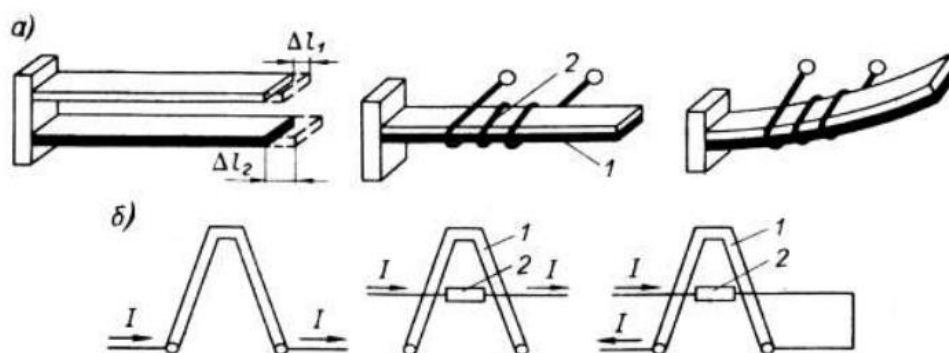


Рисунок 2.5.2 Принцип роботи біметалічних реле (а) та способи нагрівання пластин (б)

Конструкції біметалічних пластин можуть мати різноманітні форми залежно від умов експлуатації та вимог до чутливості й надійності спрацювання. Процес нагрівання таких пластин реалізується кількома способами (рис. 2.5.2 (б)), кожен з яких має свої особливості.

Перший спосіб — безпосередній нагрів, коли електричний струм навантаження протікає прямо через біметалічну пластину 1. У цьому випадку тепла енергія, яка виділяється внаслідок електричного опору матеріалу пластини, викликає її нагрівання та вигин.

Другий спосіб — непрямий нагрів, за якого струм проходить не через саму пластину, а через спеціальний нагрівальний елемент 2, що знаходиться поряд з біметалом. У результаті передача тепла від елемента до пластини здійснюється шляхом теплопровідності, що дозволяє ізолювати чутливий елемент від струмової частини кола.

Третій — комбінований спосіб нагрівання, коли частина струму проходить як через біметалічну пластину, так і через нагрівальний елемент. Така схема дозволяє досягнути оптимального балансу між швидкістю реагування пластини та її стабільністю.

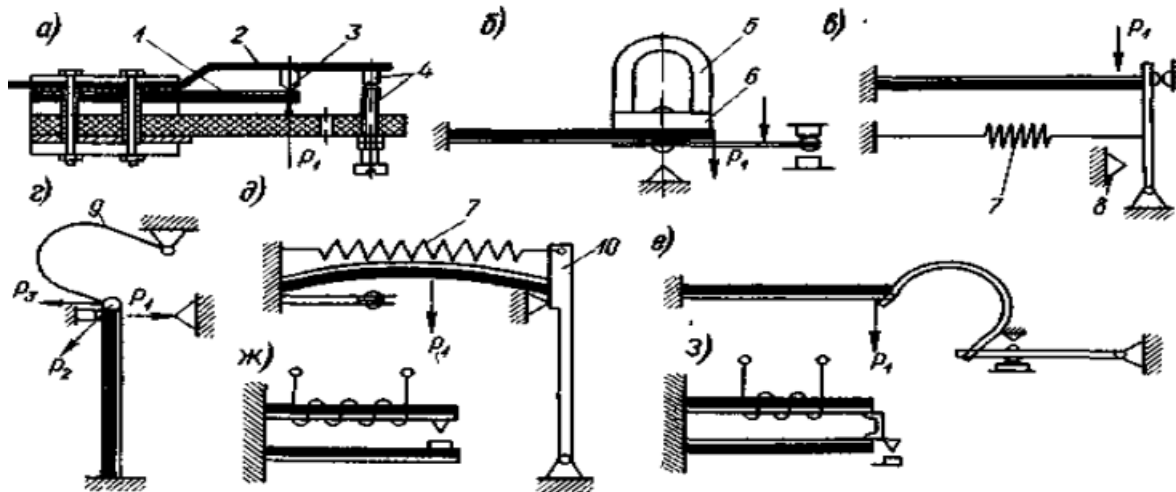


Рисунок 2.5.3 Основні варіанти реалізації біметалічних теплових реле

Різноманітність конструктивних рішень біметалевих теплових реле зумовлена прагненням забезпечити ефективний та надійний захист електричних ланцюгів, зокрема двигунів, від тривалих перевантажень. На рис. 2.5.3 представлено низку принципових схем побудови таких реле, кожна з яких має свої особливості дії та область застосування.

Найпростіший варіант, зображений на рис. 2.5.3 (а), передбачає використання біметалевої пластини (1), яка при нагріванні згинається й через ізоляційний штифт (3) впливає на контактний важіль (2), розмикаючи електричні контакти (4). Час і струм спрацювання регулюються шляхом зміни положення нерухомого контакту. Після зниження температури реле повертається в початковий стан автоматично. Основними недоліками такої схеми є повільна швидкість відключення, низька динаміка переміщення контактів та нестабільне контактне натискання, що прискорює знос контактних поверхонь.

Більш удосконалена конструкція, подана на рис. 2.5.3 (б), усуває ці недоліки шляхом застосування постійного магніту (5), який утримує якор (6), з'єднаний з біметалевою пластиною. У нормальному режимі магніт забезпечує надійне змикання контактів. При досягненні температури, що перевищує

заданий поріг, сила вигину пластини перевищує магнітне зусилля, і пластина зривається в інше положення, миттєво перемикаючи контакти. Після охолодження система самостійно повертається до початкового стану.

У конструкції на рис. 2.5.3 (в) біметалічна пластина діє як фіксатор і джерело натискного зусилля. Вона утримує контактний важіль, а при нагріванні відпускає його, що викликає спрацювання механізму за допомогою пружини (7). Після спрацювання реле не повертається автоматично — потрібне ручне втручання. Обмеження ходу контактів забезпечується упором (8).

У схемі на рис. 2.5.3 (г) використовується пружина (9), яка протидіє розмиканню контактів до моменту коли сила вигину пластини (P1) перевищить складову сили пружини (P3). У цей момент відбувається різке вигинання пластини, що приводить до перемикання контактів. Після зниження температури пластина повертається у вихідне положення автоматично.

У варіанті, поданому на рис. 2.5.3 (д), пластина попередньо вигнута в бік, протилежний напрямку вигину при нагріванні, і утримується в цьому стані пружиною (7) та важелем (10). При досягненні температурного порогу пластина стрибкоподібно переходить у протилежне положення та перемикає контакти. Ця система є самотримною та вимагає ручного повернення після спрацювання.

На рис. 2.5.3 (е) зображено схему, де відбувається синхронне стрибкоподібне вигинання біметалічної пластини та одночасне перемикання контактів. Особливістю є й те, що повернення реле до початкового стану також має характер стрибка.

Однією з проблем усіх теплових реле є залежність уставки спрацювання від зовнішньої температури. Для зменшення цієї залежності в конструкції застосовують два основні підходи: вибір біметалевих матеріалів із високою температурою спрацювання, а також впровадження компенсаційних пластин. У першому випадку компенсується прогин (рис. 2.5.3 (ж)), у другому — компенсується механічне зусилля (рис. 2.5.3 (з)), що впливає на роботу контактної групи.

Біметалеві теплові реле займають провідне місце серед засобів захисту

електродвигунів змінного струму від перевантаження. Їхня дія базується на принципі теплової інерції: пластина має досягти порогової температури саме за той час, який відповідає гранично допустимому часу роботи двигуна у режимі перевантаження. Тому надзвичайно важливою характеристикою такого реле є часо-струмова характеристика, яка описує залежність часу спрацювання від величини струму, що протікає крізь реле.

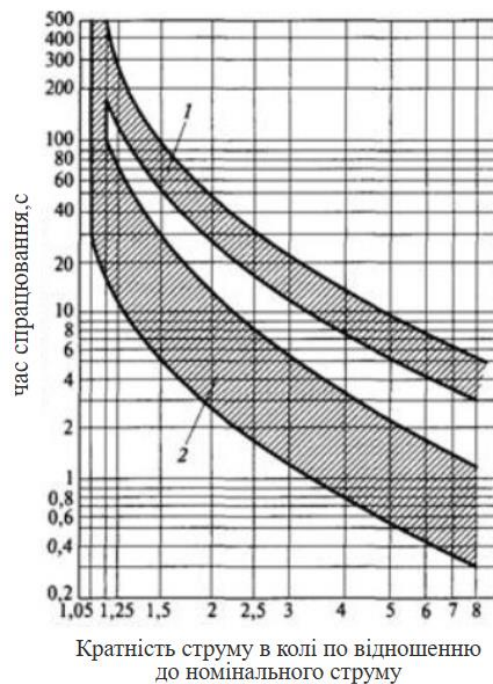


Рис. 2.5.4 Часо-струмові характеристики реле ТРН-10А:

1 — зона часо-струмових характеристик реле, яке починає роботу в холодному стані (під час пуску двигуна);

2 — зона часо-струмових характеристик реле, яке починає роботу в гарячому стані (після попереднього прогріву номінальним струмом).

Апарати температурного захисту

Основні недоліки теплових реле полягають у тому, що вони здійснюють опосередкований контроль температурного стану – замість безпосереднього вимірювання температури нагріву обмоток двигуна, захист здійснюється через аналіз струму, що викликає нагрів, при цьому часові константи захисного пристрою та захищуваного об'єкта можуть значно відрізнятися, що ускладнює їх узгодження.

Безпосередній температурний захист, заснований на вимірюванні фактичної температури, дозволяє точно визначити нагрів, тому для цього використовують температурні датчики, зокрема терморезистори та позистори, які вбудовують у статорні обмотки двигуна, створюючи таким чином систему вбудованого захисту. Серед датчиків існують як біметалеві контактні пристрої, так і напівпровідникові елементи, опір яких залежить від температури.

Термістори мають негативний температурний коефіцієнт, тобто з підвищенням температури їх опір зменшується, а позистори – позитивний, що призводить до різкого зростання опору при нагріванні, останні здобули широку популярність завдяки можливості встановлення різних порогових значень спрацювання. Послідовне з'єднання декількох позисторів підвищує крутизну характеристики опору, що збільшує чутливість системи захисту.

Фізично позистор має вигляд невеликого диску діаметром близько 3,5 мм і товщиною 1 мм, покритого кремніюорганічною емаллю, яка забезпечує належну вологостійкість та електроізоляцію, а його вибір здійснюють залежно від класу ізоляції обмоток двигуна для робочих температур 105, 115, 130, 145 або 160 °C. Зокрема, при збільшенні температури на +20 °C від номінального опір може майже утричі зрости за 12 секунд. Прилади позисторного захисту дуже ефективні за умов порушення охолодження, частих запусків, реверсів чи зміни частоти обертання двигуна, проте при раптовому нагріванні, наприклад, під час гальмування ротора або обриву однієї з фаз статорних обмоток, коли температура зростає до 10 °C за секунду, через теплову інерцію датчиків існує ризик перегріву[5]. Додатковими недоліками є нечутливість до короткочасних струмів і складність монтажу датчиків, які встановлюють у спеціально відведених пазах або на зовнішній частині двигуна.

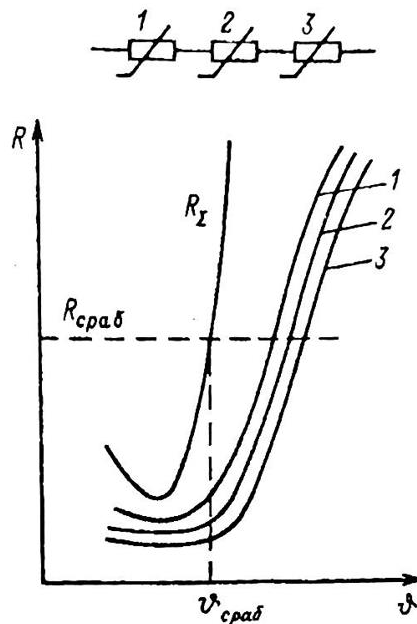


Рис. 2.5.5 Залежність опору позисторів від температури при послідовному з'єднанні трьох елементів.

Застосування знаходять прилади типів АПЗ та УВТЗ, які використовуються для температурного захисту. На рисунку 2.5.6 представлено електричну схему пристрою позисторного захисту типу УВТЗ-1 та спосіб його підключення.

Захисний пристрій приєднується до електромережі через пускову кнопку SB1. У випадку, якщо температура обмотки статора електродвигуна М не перевищує встановленого порогового значення, електромагнітне реле К2 спрацьовує. Його замикаючий контакт К2.1 активує магнітний пускач К1. Останній, у свою чергу, замикає силовий ланцюг живлення статорної обмотки двигуна (через контакти К2.1) та шунтує пускову кнопку SB1 (через контакти К1.2), забезпечуючи автозапуск системи.

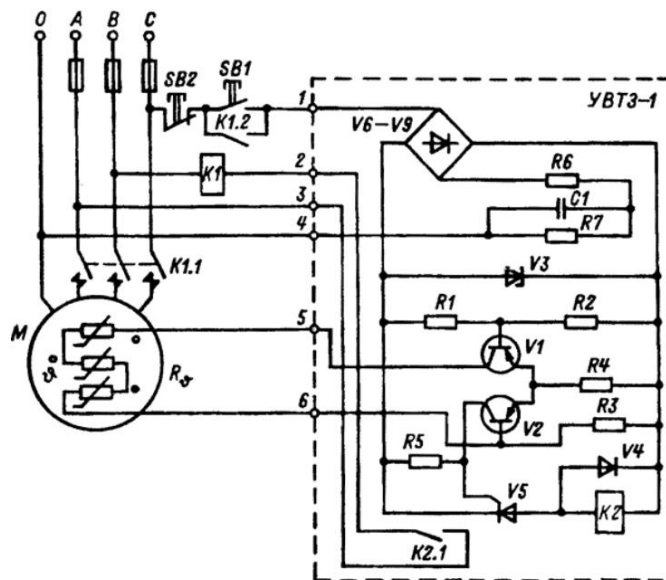


Рис. 2.5.6 Електрична схема позисторного захисту УВТЗ-1 та принцип його підключення до електродвигуна

Для живлення електронної частини пристрою УВТЗ-1 використовується стабілізоване джерело постійного струму, сформоване на основі конденсатора CU , резисторів $R6$, $R7$, випрямляючих діодів $V6-V9$ та стабілітрона $V3$.

Керування роботою реле $K2$ здійснюється за допомогою тиристора $V5$, у коло керуючого електрода якого включено тригер на транзисторах $V1$ і $V2$. Напруга на базі транзистора $V2$ визначається дільником напруги, складеним з резисторів $R3$ та R_v , де R_v — це сумарний опір трьох позисторів, підключених до клем 5 і 6. При підвищенні температури обмотки двигуна опір одного або декількох позисторів зростає, що призводить до підвищення напруги на базі транзистора $V2$ і його відкриття.

Це спричиняє вимкнення тиристора $V5$, внаслідок чого реле $K2$ знеструмлюється. Розмикаючі контакти $K2.1$ реле припиняють подачу напруги на котушку магнітного пускача $K1$, що призводить до розмикання силових контактів $K1$ і, відповідно, відключення електродвигуна.

Додатково, діод $V4$ виконує функцію захисту тиристора від перенапруг, які можуть виникнути при вимиканні котушки реле $K2$.

2.6 Апарати струмового захисту і комутаційних перенапруг.

До пристроїв, що забезпечують струмовий захист, відносять усі технічні засоби, які здійснюють контроль за величиною струму в електричному колі. Це включає в себе такі елементи, як запобіжники, автоматичні вимикачі, максимально та мінімально струмові реле. До цієї ж групи умовно можна віднести й теплові реле, які через специфіку принципу дії та широке практичне використання часто виділяють в окрему категорію — засобів теплового захисту.

Основною функцією струмових захисних апаратів є недопущення аварійних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням споживачів електроенергії, роботою в умовах втрати однієї з фаз, а також виникненням коротких замикань у мережі.

Серед різних типів струмозахисних пристроїв особливе значення мають максимально та мінімально струмові реле, забезпечуючи оперативне вимкнення обладнання при загрозливих режимах роботи.

Мінімальні реле струму призначаються для виявлення аварій, пов'язаних із втратою однієї з фаз живлення (наприклад, при обриві фази у статорній обмотці електродвигуна). У найпростішому варіанті реалізації цієї системи використовують три окремі реле, кожне з яких підключається до відповідної фази мережі живлення двигуна. Їх замикаючі контакти вмикаються послідовно в ланцюг управління магнітного пускача. Застосування таких реле особливо ефективно в системах керування асинхронними двигунами, де навіть короткочасна втрата фази може призвести до перегріву або аварійного зупинення обладнання [10].

У нормальному режимі, коли всі фази присутні, контакти всіх трьох реле замкнені, і пускач залишається увімкненим. Якщо ж у якійсь фазі трапиться обрив, то струм у цій гілці зникає, відповідне реле розмикає свій контакт, що призводить до відключення кола управління і, відповідно, самого двигуна.

Максимальні реле струму забезпечують захист обладнання від перевищення допустимого рівня навантаження або коротких замикань. Їх

використовують як на стороні споживача (всередині приладів), так і в колах загального електроживлення.

Такі реле зазвичай не активні під час нормального функціонування пристроїв. Проте якщо внаслідок перенавантаження чи короткого замикання в одній або кількох фазах спрацює хоча б одне реле, його розмикальні контакти переривають ланцюг керування пускатчем, що і забезпечує захист.

Варто враховувати, що один з головних недоліків таких реле — це неможливість виявлення обриву окремої фази, а також низька чутливість до незначних перевищень робочого струму.

Підбір максимальних реле струму для асинхронних двигунів виконується на основі номінального струму обмотки реле, який повинен бути не нижчим від номінального струму самого електродвигуна. Крім того, задається уставка спрацювання струму $I_{уст}$, залежно від типу двигуна.

Для двигунів з короткозамкненим ротором вона визначається за формулою:

$$I_{уст} \geq (1,3 \div 1,5)I_n, \quad (2.6.1)$$

а для двигунів з фазним ротором — з урахуванням пускового струму:

$$I_{уст} \geq (2,25 \div 2,5)I_{ном.дв}, \quad (2.6.2)$$

де $I_{ном.дв}$ та I_n номінальний і пусковий струм двигуна.

Це дозволяє належним чином врахувати як робочі, так і пускові режими двигуна. Крім цього, слід окремо розраховувати параметри реле, якщо воно використовується не лише для струмового захисту, а й як елемент комутаційної логіки в схемах автоматизації.

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ

3.1 Вибір контактора (магнітного пускача) для забезпечення керування та захисту асинхронного двигуна загального призначення з короткозамкненим ротором потужністю 30 кВт

Початкові дані:

Номінальна потужність двигуна: $P_H = 30,308 \text{ кВт}$

ККД: $\eta_H = 92,5\%$

Коефіцієнт потужності: $\cos \varphi_H = 0,857$

Номінальна лінійна напруга: $U_{H,д} = 380 \text{ В}$

Коефіцієнт кратності пускового струму: $K_n = 5,824$

Час пуску двигуна: 5с

Попередній розрахунок:

Номінальний струм двигуна:

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = 58,09 \text{ А} \quad (3.1)$$

Пусковий струм двигуна (ефективне значення):

$$I_n = K_n \cdot I_H = 5,824 \cdot 58,09 = 338,32 \text{ А} \quad (3.2)$$

Ударний пусковий струм (амплітудне значення):

$$I_{уд.н.} = (1,2 \div 1,4) \cdot \sqrt{2} \cdot I_H \quad (3.3)$$

Приймаємо:

$$I_{уд.н.} = 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot I_H = 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 338,32 = 621,1 \text{ А} \quad (3.4)$$

Вибір контактора (магнітного пускача):

Згідно з умовами експлуатації, рекомендовано застосовувати магнітний

пускач серії ПМЛ-4230 (виробник — завод «Етал», Україна), або модель CL07A311M (General Electric).

Пускач нереверсивний у кожусі, з тепловим реле, ступінь захисту IP54, з перемінним струмом у колі керування, з кнопками «стоп», «пуск», реле та сигнальною лампою, з одним розмикаючим і одним замикаючим допоміжними контактами.

Таблиця 3.1.1 – Основні параметри рекомендованого магнітного пускача

Параметр	Значення
Номінальна напруга по ізоляції, В	660
Номінальний струм головного кола, А	63
Номінальна напруга втягуючої котушки, В / 50 Гц	24, 36, 40, 48, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 500, 660
Потужність, споживана котушкою, робоча / пускова, ВА	20±4 / 200±35
Номінальний робочий струм (АС-3), А	380 В – 63 А, 550 В – 63 А, 660 В – 40 А
Механічна / комутаційна зносостійкість (АС-3), млн. циклів	А: 16, Б: 2,0, В: 10 / 1,0 / 3,0
Максимальна частота вмикань без / з навантаженням, раз/год	3600 / 1200
Наявність теплового реле	Присутнє
Потужність двигуна (АС-3, 380 В), кВт	30
Маса, кг	3,16

Перевірка контактора (магнітного пускача)

У категорії застосування АС-3 магнітний пускач повинен комутувати струм у нормальному режимі:

$$I_0 = 6 \cdot I_{н.р.} \geq I_n ; \quad (3.5)$$

у режимі рідкісних комутацій:

$$I_0 = 10 \cdot I_{н.р.} \geq I_{уд.н} ; \quad (3.6)$$

Обидві умови виконуються:

$$I_0 = 6 \cdot 63 = 378 \text{ A} \geq I_n = 338,32 \text{ A} ;$$

$$I_0 = 10 \cdot 63 = 630 \text{ A} \geq I_n = 621,1 \text{ A} ;$$

Тепове реле, яке задовольняє умови захисту двигуна, може бути: РТЛ 2061 з регульованим струмом уставки теплового захисту від 55 до 70 А (завод «Етал», Україна), RT2H 54–65A (General Electric).

3.2 Вибір автоматичного вимикача для захисту ланцюга від КЗ та перевантаження в асинхронному двигуні для радіальної схеми живлення двигун

Радіальна схема живлення двигуна представлена на рисунку 3.2.1

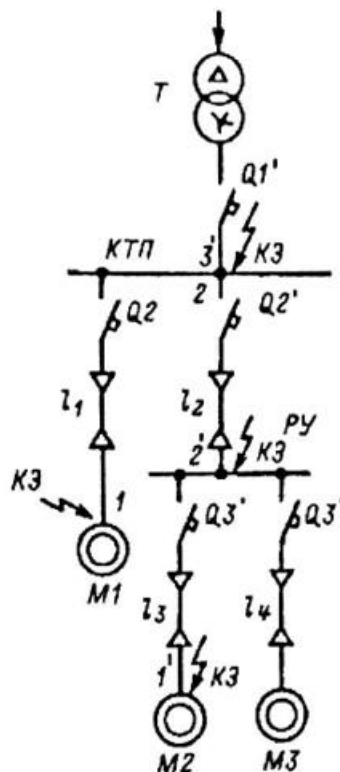


Рисунок 3.2.1 – Радіальна схема живлення двигуна.

У подальших розрахунках вважатимемо, що до наведеної схеми живлення підключено асинхронні двигуни потужністю 30,308 кВт, які були попередньо нами розраховані (таблиця 3.2.2). В якості конструктивного аналога обрано двигун серії 4АН180S4У3. Відповідно до техніко-економічного обґрунтування,

двигуни зазначеної потужності можуть підключатися як до комплектної трансформаторної підстанції (КТП), так і до розподільчого устаткування (РУ). Для живлення приймається трифазний масляний трансформатор загального призначення потужністю 2150 кВА, що був використаний у розрахунках (таблиця 3.2.1).

Таблиця 3.2.1 – Параметри трифазного масляного трансформатора загального призначення потужністю 2150 кВА

Параметр	Значення
Номінальна потужність	2150 кВА
Номінальна напруга обмотки ВН	10 кВ
Номінальна напруга обмотки НН	0,4 кВ
Схема і група з'єднання обмоток	Д/Ун – 11
Втрати холостого ходу	4,006 кВт
Втрати КЗ	22756 кВт
Струм холостого ходу	1,18256 %
Напруга КЗ	5,236 %
Регулювання напруги ПВВ	$\pm 4 \times 2,5$ %
Частота живлення	50 Гц
Кількість фаз	3
Охолодження	Масляне (М)
Кліматичне виконання	У (помірний клімат)
Категорія розміщення	1 (відкрите повітря)
Режим роботи	Тривалий (S1)

Таблиця 3.2.2 – Параметри трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором загального призначення потужністю 30 кВт

Параметр	Значення
Номинальна потужність	30,308 кВт
Кількість фаз	3
Номинальна напруга	220/380 В
З'єднання обмоток	Δ/Y
Номинальна частота обертання	1500 об/хв
Коефіцієнт потужності	0,857
ККД	0,925
Перевантажувальна здатність	$K_{mm} = 2,35$
Кратність пускового моменту	$K_{пм} = 1,487$
Кратність пускового струму	$K_{пс} = 5,824$
Ступінь захисту	IP 23
Конструктивне виконання	IM 1001
Система охолодження	IC01

Вибір автоматичного вимикача для захисту ланцюга від КЗ і перевантаження в асинхронному двигуні М1 для радіальної схеми живлення, підключеного до КТП

Вихідні дані

Номинальна потужність АД:

$$P_n = 30,308 \text{ кВт}$$

Номинальна лінійна напруга АД:

$$U_1 = 380 \text{ В}$$

Номинальний коефіцієнт потужності АД:

$$\cos \varphi_n = 0,857$$

Номинальний ККД АД:

$$\eta_n = 0,925$$

Довжина кабелю:

$$l_1 = 150 \text{ м}$$

Номинальна потужність трансформатора:

$$S_{HT} = 2150 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Втрати КЗ трансформатора:

$$P_K = 22,756 \text{ кВт}$$

Напруга НН трансформатора:

$$U_{HT} = 0,4 \text{ кВ}$$

Напруга КЗ трансформатора:

$$U_K = 5,236\%$$

Опір у місцях з'єднання кабелів і апаратів:

$$R_{nK} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Розрахунок струмів КЗ та ударних струмів у точці 1

Знаходимо номінальний струм двигуна:

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = 58,089 \text{ А} \quad (3.7)$$

За номінальним струмом визначаємо тип і переріз кабелю, вибрано кабель АСК з перерізом 16 мм², допустимий тривалий струм поза приміщенням – 111 А, всередині приміщення – 79 А.

Знаходимо активний та індуктивний опір кабелів:

$$R_{каб} = R_{уд} \cdot l_1 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 0,36 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

$$X_{каб} = X_{уд} \cdot l_1 \cdot 10^{-3} = 0,078 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

де: $R_{уд} = 2,4 \frac{\text{мОм}}{\text{м}}$, $X_{уд} = 0,078 \frac{\text{мОм}}{\text{м}}$ (таблиця 3.2.3)

Таблиця 3.2.3 – Питомий опір (прямої послідовності) кабелів з алюмінієвими жилами при температурі провідника 65 °С, мОм/м

Січення жил, мм ²	Нульова жила	$R_{уд}$	$X_{уд}$ (трижильний кабель)	$X_{уд}$ (чотирижильний кабель)
3×4	2,5	9,610	0,092	0,098
3×6	4	6,410	0,087	0,094
3×10	6	3,840	0,082	0,088

3×16	10	2,400	0,078	0,084
3×25	16	1,540	0,062	0,072
3×35	16	1,100	0,061	0,068
3×50	25	0,769	0,060	0,066
3×70	35	0,549	0,059	0,065
3×95	50	0,405	0,057	0,064
3×120	50	0,320	0,057	0,064
3×150	70	0,256	0,056	0,063
3×185	70	0,208	0,056	0,063
3×240	-	0,160	0,055	-

Знайдемо активний та індуктивний опір трансформатора:

$$R_K = 10^6 \cdot \frac{P_K \cdot U_{HT}^2 \cdot 10^{-3}}{S_{HT}^2} = 10^6 \cdot \frac{22,756 \cdot 0,4^2 \cdot 10^{-3}}{2150^2} = 7,877 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (3.10)$$

$$Z_K = 10^4 \cdot \frac{U_K \cdot U_{HT}^2 \cdot 10^{-3}}{S_{HT}} = 10^4 \cdot \frac{5,236 \cdot 0,4^2 \cdot 10^{-3}}{2150} = 3,897 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.11)$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = 3,816 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.12)$$

Індуктивний опір енергосистеми визначаємо за співвідношенням:

$$X_C = 0,1 \cdot X_K = 0,1 \cdot 3,816 \cdot 10^{-3} = 3,816 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (3.13)$$

Знайдемо сумарні активний, реактивний та повний опір:

$$R_{K3} = R_K + R_{каб} + R_{нк} = 7,7877 \cdot 10^{-4} + 0,36 + 15 \cdot 10^{-3} = 0,376 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

$$X_{K3} = X_K + X_{каб} + X_C = 3,816 \cdot 10^{-3} + 0,012 + 3,816 \cdot 10^{-4} = 0,016 \text{ Ом} \quad (3.15)$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{(0,376)^2 + (0,016)^2} = 0,376 \text{ Ом} \quad (3.16)$$

Знайдемо струми двофазного і трифазного короткого замикання:

$$I_{K3}(2) = \frac{U_1}{2 \cdot Z_{K3}} = \frac{380}{2 \cdot 0,376} = 505,153 \text{ А} \quad (3.17)$$

$$I_{K3}(3) = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,376} = 583,3 \text{ А} \quad (3.18)$$

Знайдемо ударні струми при дво- і трифазному КЗ:

$$I_{уд}(2) = \sqrt{2} \cdot I_{K3}(2) \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 505,153 \cdot 1 = 714,394 \text{ А} \quad (3.19)$$

$$I_{уд}(3) = \sqrt{2} \cdot I_{кз}(3) \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 583,3 \cdot 1 = 824,911 \text{ А} \quad (3.20)$$

де $K_{уд} = 1$, при співвідношенні $\frac{X_{кз}}{R_{кз}} = 0,042$ (аперіодична складова струму короткого замикання дуже швидко затухає і практично не впливає).

Коефіцієнт $K_{уд}$ може бути обраний із таблиці 3.2.4 відповідно до співвідношення $\frac{X_{кз}}{R_{кз}}$.

Таблиця 3.2.4 – Вибір коефіцієнта $K_{уд}$ за співвідношенням $\frac{X_{кз}}{R_{кз}}$

$\frac{X_{кз}}{R_{кз}}$	0,5	0,8	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{уд}$	1	1,02	1,05	1,12	1,2	1,35	1,46	1,53	1,59	1,63	1,67	1,71

Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) і ударних струмів у точці 3'

Знаходимо сумарні активний, реактивний і повний опір:

$$R_{кз} = R_{к} + R_{пк} = 7,7877 \cdot 10^{-4} + 15 \cdot 10^{-3} = 0,016 \text{ Ом} \quad (3.21)$$

$$X_{кз} = X_{к} + X_{с} = 3,816 \cdot 10^{-3} + 3,816 \cdot 10^{-4} = 4,198 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.22)$$

$$Z_{кз} = \sqrt{R_{кз}^2 + X_{кз}^2} = \sqrt{(0,016)^2 + (4,198 \cdot 10^{-3})^2} = 0,016 \text{ Ом} \quad (3.23)$$

Знаходимо струми двофазного та трифазного короткого замикання:

$$I_{кз}(2) = \frac{U_1}{2 \cdot Z_{кз}} = \frac{380}{2 \cdot 0,016} = 11,63 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.24)$$

$$I_{кз}(3) = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_{кз}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,016} = 13,43 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.25)$$

Знайдемо ударні струми при дво- і трифазному КЗ:

$$I_{уд}(2) = \sqrt{2} \cdot I_{кз}(2) \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 11,63 \cdot 10^3 \cdot 1 = 16,45 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.26)$$

$$I_{уд}(3) = \sqrt{2} \cdot I_{кз}(3) \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 13,43 \cdot 10^3 \cdot 1 = 18,99 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.27)$$

де $K_{уд} = 1$, при співвідношенні $\frac{X_{кз}}{R_{кз}} = 0,266$ (аперіодична складова струму короткого замикання дуже швидко затухає і практично не впливає).

Коефіцієнт $K_{уд}$ може бути обраний із таблиці 3.2.4 відповідно до співвідношення $\frac{X_{кз}}{R_{кз}}$.

Вибір вимикача Q₂

Автоматичний вимикач, найближчий до захищуваного об'єкта (асинхронного двигуна M2), обирається:

а) За номінальним струмом розчеплювача:

$$I_{н.р.} \geq I_n = 58,089 \text{ А.} \quad (3.28)$$

б) Із умов неспрацювання відсічки під час запуску двигуна. Номінальна відсічка електромагнітного розчеплення вимикача Q₂:

$$I_{отс.р} \geq (1,1 - 1,2) \cdot I_{уд.п.дв} = 1,1 \cdot 621,1 = 683,1 \text{ А.} \quad (3.29)$$

Обирається автоматичний вимикач, номінальна відсічка якого перевищує 683,1 А, або кратність уставки струму відсічення до номінального струму розчеплювача перевищує: $\frac{683,1}{I_{н.р.}}$.

в) За граничною комутаційною здатністю вимикача, значення якого має бути не менше ударного струму КЗ у точці 1, т.е. 825 А.

г) За умовою нормального пуску (самозапуску) асинхронного двигуна:

$$\frac{I_{кз}(3)}{I_n} \geq 2 - \text{при легком пуску двигуна } (t_{\text{пуск}} \leq 5\text{с}) \quad (3.30)$$

$$\frac{I_{кз}(3)}{I_n} \geq 3,5 - \text{при важком пуску двигуна } (t_{\text{пуск}} > 5\text{с}) \quad (3.31)$$

У даному випадку, для точки 1, $\frac{I_{кз}(3)}{I_n} = \frac{825}{338,32} = 2,44$ – умова самозапуску

виконується лише при легкому пуску двигуна.

Обираємо автоматичний вимикач серії G60 виробництва «General Electric»:

-Назва: G60

-Номінальний струм: 63 А

-Характеристика відключення (кратність спрацювання захисту): D (10–20)

-Струм відсічення: 630–1260 А

-Струм короткого замикання (КЗ): 6 кА

Обраний вимикач відповідає всім заданим технічним вимогам і може бути використаний для захисту асинхронного двигуна.

Вибір автоматичного вимикача для захисту кола від короткого замикання та перевантаження в асинхронних двигунах М2 і М3 для радіальної схеми живлення двигуна, підключеного до КТП

Вихідні дані

Номінальна потужність АД:

$$P_H = 30,308 \text{ кВт}$$

Номінальна лінійна напруга АД:

$$U_1 = 380 \text{ В}$$

Номінальний коефіцієнт потужності АД:

$$\cos \varphi_H = 0,857$$

Номінальний ККД АД:

$$\eta_H = 0,925$$

Довжина кабелю від РУ до М1(М2):

$$l_1 = 100 \text{ м}$$

Довжина кабелю від КТП до РУ:

$$l_2 = 50 \text{ м}$$

Номінальна потужність трансформатора:

$$S_{HT} = 2150 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Втрати КЗ трансформатора:

$$P_K = 22,756 \text{ кВт}$$

Напруга НН трансформатора:

$$U_{HT} = 0,4 \text{ кВ}$$

Напруга КЗ трансформатора:

$$U_K = 5,236\%$$

Опір у місцях з'єднання кабелів і апаратів:

$$R_{nK} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Аналіз струмів КЗ та ударних струмів у точці 1'

Спочатку визначається номінальний струм двигуна:

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{30,308 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,925} = 58,089 \text{ А} \quad (3.32)$$

Виходячи з цього значення, підібрано марку та переріз кабелю. У розрахунках використано кабель типу АСК з перерізом 16 мм², що забезпечує допустиме тривале навантаження: 111 А при прокладанні поза приміщенням та 79 А — у приміщенні.

Далі здійснено обчислення активного та індуктивного опору кабельних ліній на двох ділянках:

$$R_{\text{каб1}} = R_{\text{уд}} \cdot l_1 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 0,24 \text{ Ом} \quad (3.33)$$

$$X_{\text{каб1}} = X_{\text{уд}} \cdot l_1 \cdot 10^{-3} = 0,078 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.34)$$

$$R_{\text{каб2}} = R_{\text{уд}} \cdot l_2 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 0,12 \text{ Ом} \quad (3.35)$$

$$X_{\text{каб2}} = X_{\text{уд}} \cdot l_2 \cdot 10^{-3} = 0,078 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.36)$$

де: $R_{\text{уд}} = 2,4 \frac{\text{мОм}}{\text{м}}$, $X_{\text{уд}} = 0,078 \frac{\text{мОм}}{\text{м}}$ (таблиця 3.2.3)

Після цього визначається сумарний активний, реактивний та повний опір кола:

$$R_{\text{КЗ}} = R_{\text{К}} + R_{\text{каб1}} + R_{\text{каб2}} + R_{\text{пк}} = 0,376 \text{ Ом} \quad (3.37)$$

$$X_{\text{КЗ}} = X_{\text{К}} + X_{\text{каб1}} + X_{\text{каб2}} + X_{\text{с}} = 0,016 \text{ Ом} \quad (3.38)$$

$$Z_{\text{КЗ}} = \sqrt{R_{\text{КЗ}}^2 + X_{\text{КЗ}}^2} = \sqrt{(0,376)^2 + (0,016)^2} = 0,376 \text{ Ом} \quad (3.39)$$

Знайдено струми двофазного та трифазного КЗ:

$$I_{\text{КЗ}}(2) = \frac{U_1}{2 \cdot Z_{\text{КЗ}}} = \frac{380}{2 \cdot 0,376} = 505,153 \text{ А} \quad (3.40)$$

$$I_{\text{КЗ}}(3) = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{КЗ}}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,376} = 583,3 \text{ А} \quad (3.41)$$

Знайдемо ударні струми при дво- і трифазному КЗ:

$$I_{\text{уд}}(2) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{КЗ}}(2) \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 505,153 \cdot 1 = 714,394 \text{ А} \quad (3.42)$$

$$I_{\text{уд}}(3) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{КЗ}}(3) \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 583,3 \cdot 1 = 824,911 \text{ А} \quad (3.43)$$

де $K_{\text{уд}} = 1$, при співвідношенні $\frac{X_{\text{КЗ}}}{R_{\text{КЗ}}} = 0,042$ (аперіодична складова струму

короткого замикання дуже швидко затухає і практично не впливає).

Коефіцієнт $K_{уд}$ може бути обраний із таблиці 3.2.4 відповідно до співвідношення $\frac{X_{кз}}{R_{кз}}$.

Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) і ударних струмів у точці 2'

Знаходимо сумарні активний, реактивний і повний опір:

$$R_{кз} = R_k + R_{каб1} + R_{лк} = 7,7877 \cdot 10^{-4} + 0,24 + 15 \cdot 10^{-3} = 0,256 \text{ Ом} \quad (3.44)$$

$$X_{кз} = X_k + X_{каб1} + X_c = 4,198 \cdot 10^{-3} + 7,8 \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ Ом} \quad (3.45)$$

$$Z_{кз} = \sqrt{R_{кз}^2 + X_{кз}^2} = \sqrt{(0,256)^2 + (0,012)^2} = 0,256 \text{ Ом} \quad (3.46)$$

Знаходимо струми двофазного та трифазного короткого замикання:

$$I_{кз}(2) = \frac{U_1}{2 \cdot Z_{кз}} = \frac{380}{2 \cdot 0,256} = 741,99 \text{ А} \quad (3.47)$$

$$I_{кз}(3) = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_{кз}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,256} = 856,77 \text{ А} \quad (3.48)$$

Знайдемо ударні струми при дво- і трифазному КЗ:

$$I_{уд}(2) = \sqrt{2} \cdot I_{кз}(2) \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 741,99 \cdot 1 = 1,212 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.49)$$

$$I_{уд}(3) = \sqrt{2} \cdot I_{кз}(3) \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 856,77 \cdot 10^3 \cdot 1 = 1,049 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.50)$$

де $K_{уд} = 1$, при співвідношенні $\frac{X_{кз}}{R_{кз}} = 0,047$ (аперіодична складова струму

короткого замикання дуже швидко затухає і практично не впливає).

Коефіцієнт $K_{уд}$ може бути обраний із таблиці 3.2.4 відповідно до співвідношення $\frac{X_{кз}}{R_{кз}}$.

Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) і ударних струмів у точці 3'

Знаходимо сумарні активний, реактивний і повний опір:

$$R_{кз} = R_k + R_{лк} = 7,7877 \cdot 10^{-4} + 15 \cdot 10^{-3} = 0,016 \text{ Ом} \quad (3.51)$$

$$X_{кз} = X_k + X_c = 3,816 \cdot 10^{-3} + 3,816 \cdot 10^{-4} = 4,198 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.52)$$

$$Z_{\text{кз}} = \sqrt{R_{\text{кз}}^2 + X_{\text{кз}}^2} = \sqrt{(0,016)^2 + (4,198 \cdot 10^{-3})^2} = 0,016 \text{ Ом} \quad (3.53)$$

Знаходимо струми двофазного та трифазного короткого замикання:

$$I_{\text{кз}}(2) = \frac{U_1}{2 \cdot Z_{\text{кз}}} = \frac{380}{2 \cdot 0,016} = 11,63 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.54)$$

$$I_{\text{кз}}(3) = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{кз}}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,016} = 13,43 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.55)$$

Знайдемо ударні струми при дво- і трифазному КЗ:

$$I_{\text{уд}}(2) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{кз}}(2) \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 11,63 \cdot 10^3 \cdot 1 = 16,45 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.56)$$

$$I_{\text{уд}}(3) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{кз}}(3) \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 13,43 \cdot 10^3 \cdot 1 = 18,99 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.57)$$

де $K_{\text{уд}} = 1$, при співвідношенні $\frac{X_{\text{кз}}}{R_{\text{кз}}} = 0,266$ (аперіодична складова струму короткого замикання дуже швидко затухає і практично не впливає).

Коефіцієнт $K_{\text{уд}}$ може бути обраний із таблиці 3.2.4 відповідно до співвідношення $\frac{X_{\text{кз}}}{R_{\text{кз}}}$.

Вибір вимикача Qз'

Автоматичний вимикач, найближчий до захищуваного об'єкта (асинхронного двигуна М2, М3), обирається:

а) За номінальним струмом розчеплювача:

$$I_{\text{н.р.}} \geq I_{\text{н}} = 58,089 \text{ А.} \quad (3.58)$$

б) Із умов неспрацювання відсічки під час запуску двигуна. Номінальна відсічка електромагнітного розчеплення вимикача Q2:

$$I_{\text{отс.р}} \geq (1,1 - 1,2) \cdot I_{\text{уд.п.дв}} = 1,1 \cdot 621,1 = 683,1 \text{ А.} \quad (3.59)$$

Обирається автоматичний вимикач, номінальна відсічка якого перевищує 683,1 А, або кратність уставки струму відсічення до номінального струму розчеплювача перевищує: $\frac{683,1}{I_{\text{н.р.}}}$.

в) За граничною комутаційною здатністю вимикача, значення якого має бути не менше ударного струму КЗ у точці 1, т.е. 825 А.

г) За умовою нормального пуску (самозапуску) асинхронного двигуна:

$$\frac{I_{кз}(3)}{I_n} \geq 2 - \text{при легком пуску двигуна } (t_{\text{пуск}} \leq 5\text{с}) \quad (3.60)$$

$$\frac{I_{кз}(3)}{I_n} \geq 3,5 - \text{при важком пуску двигуна } (t_{\text{пуск}} > 5\text{с}) \quad (3.61)$$

У даному випадку, для точки 1, $\frac{I_{кз}(3)}{I_n} = \frac{825}{338,32} = 2,44$ – умова самозапуску

виконується лише при легкому пуску двигуна.

Обираємо автоматичний вимикач серії G60 виробництва «General Electric»:

-Назва: G60

-Номінальний струм: 63 А

-Характеристика відключення (кратність спрацювання захисту): D (10–20)

-Струм відсічення: 630–1260 А

-Струм короткого замикання (КЗ): 6 кА

Обраний вимикач відповідає всім заданим технічним вимогам і може бути використаний для захисту асинхронного двигуна.

Вибір автоматичного вимикача Q₂'

Вибір автоматичного вимикача, який захищає розподільчий пристрій РУ1, проводиться у такій послідовності:

а) За номінальним струмом розчеплювача:

Номінальний струм розчеплювача повинен бути не меншим, ніж подвійний струм лінії живлення двигуна, тобто:

$$I_{н.р.} \geq I_{н(М1,М2)} = 116,18 \text{ А, де } I_{н(М1,М2)} = 2 \cdot I_n = 116,18 \text{ А} \quad (3.62)$$

- номінальний струм лінії $l_2 = 100\text{м}$, що живить асинхронні двигуни М2, М3.

б) За номінальною відсічкою автоматичного вимикача Q₂':

Необхідна умова:

$$I_{н.Q2'} = K_{н.о.} \cdot I_{н.Q3'}, \quad (3.63)$$

де $K_{н.о.}$ — коефіцієнт надійності узгодження, який приймається в межах 1,3–1,5, або обчислюється з урахуванням розбігу спрацювання відсічок. Номінальний струм відсічки розчеплювача вимикача Q₂' визначається так:

$$I_{н. Q2'} = 1,3 \cdot 684 = 893,1 \text{ А.}$$

в) Перевірка вимикача Q_2 на здатність комутувати струм короткого замикання, що у точці 2 дорівнює 1212 А.

Обираємо автоматичний вимикач серії FD160 виробництва «General Electric»:

-Назва: FD160

-Номінальний струм: 160 А

-Характеристика відключення (кратність спрацювання захисту): D (10–20)

-Струм відсічення: 1600–3200 А

-Струм короткого замикання (КЗ): 25 кА

Вибір вимикача Q_1'

Вимикач, розміщений на комплектній трансформаторній підстанції (КТП), захищає силовий трансформатор і енергосистему, тому має характеризуватися високою надійністю роботи. Як правило, це селективні автоматичні вимикачі. Їх вибір здійснюється за такими критеріями:

а) За номінальним струмом розчеплювача:

$$I_{н.р.} \geq I_{\Sigma н}, \quad (3.64)$$

де $I_{\Sigma н}$ — сумарний струм, що протікає в ланцюзі вимикача Q_1 при одночасній роботі всіх двигунів у режимі номінального навантаження. У даному випадку це 1 двигунів М з номінальними струмами 58,089 А.

б) За номінальною відсічкою розчеплювача автомата Q_1' :

$$I_{н. Q1} = K_{н.о.} \cdot I_{н. Q2'}, \quad (3.65)$$

де $I_{н. Q2'}$ — найбільший із струмів спрацювання відсічок нижчестоячих вимикачів, т.е. приймається:

$$I_{н. Q1} = 1,3 \cdot 893,1 = 1161,3 \text{ А.}$$

Кратність уставки струму відсічки до номінального струму електромагнітного розчеплювача приймається в межах 3,5 – 4,0.

в) За умовою відключення струму трифазного короткого замикання в точці 3:

$$I_{уд}(3) = 18,99 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Гранична комутаційна здатність обраного вимикача досягає 22 кА.

Якщо погодити відсічки всіх вимикачів у ланцюзі не вдається, то вимикач на КТП обирається селективним за часом. При цьому струм миттєвого спрацювання (електромагнітного розчеплювача) Q_1 має перевищувати $I_{уд}(3)$ у точці 2.

Обираємо автоматичний вимикач серії FD63 виробництва «General Electric»:

-Назва: FD63

-Номінальний струм: 63 А

-Характеристика відключення (кратність спрацювання захисту): D (10–20)

-Струм відсічення: 1600–3200 А

-Струм короткого замикання (КЗ): 22 кА

3.3 Вибір реле контролю трифазної напруги

Реле контролю трифазної напруги застосовуються для перевірки наявності фаз та правильного чергування у трифазних системах живлення. Такі реле використовуються в автоматизованих системах керування та захисту, зокрема для попередження небезпечної асиметрії напруг або роботи електрообладнання на двох фазах.

Підбір реле здійснюється з урахуванням двох основних параметрів:

1. Номінальної напруги;
2. Номінальної потужності електродвигуна.

Для нашого асинхронного двигуна, за прототип якого прийнято модель **4АН180S4У3** з номінальною потужністю $P_n = 30,308$ кВт, і при стандартній лінійній напрузі $U_1 = 380$ В, придатними є наступні моделі реле контролю трифазної напруги, що виробляються ТОВ «Електротехнічний завод» у місті Київ: ЕЛ-11, ЕЛ-12, ЕЛ-13, ЕЛ-21, ЕЛ-21Н.

Основні параметри та функціональні можливості зазначених реле представлено в таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1 — Характеристики та особливості реле контролю
трифазної напруги

Тип виробу	Діапазон напруги спрацювання	Номинальна напруга, ~В	Кількість контактів (з-змикаючих, р-розмикаючих, п-переключаючих)	Відмінні особливості
ЕЛ-11	Однофазна $(0,6 \pm 0,05) \cdot U_{фн}$; фазні напруги менше $0,7 \cdot U_{фн}$	100, 110, 220, 380, 400, 415	1 з, 1 р	Контроль наявності та чергування фаз джерел і перетворювачів електроенергії; захист від неприпустимої асиметрії фазних напруг. Кріплення на DIN-рейку.
ЕЛ-12	Однофазна $(0,7 \pm 0,05) \cdot U_{фн}$; фазні напруги менше $0,5 \cdot U_{фн}$	100, 220, 380	1 з, 1 р	Контроль наявності та чергування фаз трифазних асинхронних двигунів загальнопромислової серії до 100 кВт. Захист від асиметрії напруг. Кріплення на DIN-рейку.
ЕЛ-13	Однофазна $(0,7 \pm 0,05) \cdot U_{фн}$; фазні напруги менше $0,5 \cdot U_{фн}$	220, 380	1 з, 1 р	Контроль наявності та чергування фаз трифазних кранових двигунів і реверсивних електроприводів до 75 кВт. Захист від асиметрії напруг. Кріплення на DIN-рейку.
ЕЛ-21	$U_{мін}=180 \text{ В}$	$3 \times 400 / 220$	1 п	Контроль наявності та чергування фаз. Модульні, малогабаритні. Кріплення на DIN-рейку.
ЕЛ-21Н	$U_{мін}=180 \text{ В}$	3×400	1 п	Контроль наявності та чергування фаз із контролем обриву нейтралі. Модульні, малогабаритні. Кріплення на DIN-рейку.

Спрацювання реле (перемикання вихідних контактів) відбувається при однофазному зниженні напруги (якщо $U_{фн}$ у двох інших фазах), а також при

симетричному зниженні фазних напруг.

Конструктивне виконання ЕЛ-11, ЕЛ-12, ЕЛ-13

Реле виготовлене у конструктивному виконанні для виступаючого монтажу з фронтальним підключенням проводів. Усі елементи схеми змонтовані на платі друкованого монтажу, яка вставляється в корпус, що складається з передньої панелі та знімної кришки.

Габаритні та установочні розміри наведено на рисунку 3.3.1.

Ступінь захисту реле:

- по оболонці — IP40;
- по підключальним клемам — IP10.

Реле має 1 замикаючий і 1 розмикаючий контакт, які електрично не пов'язані між собою.

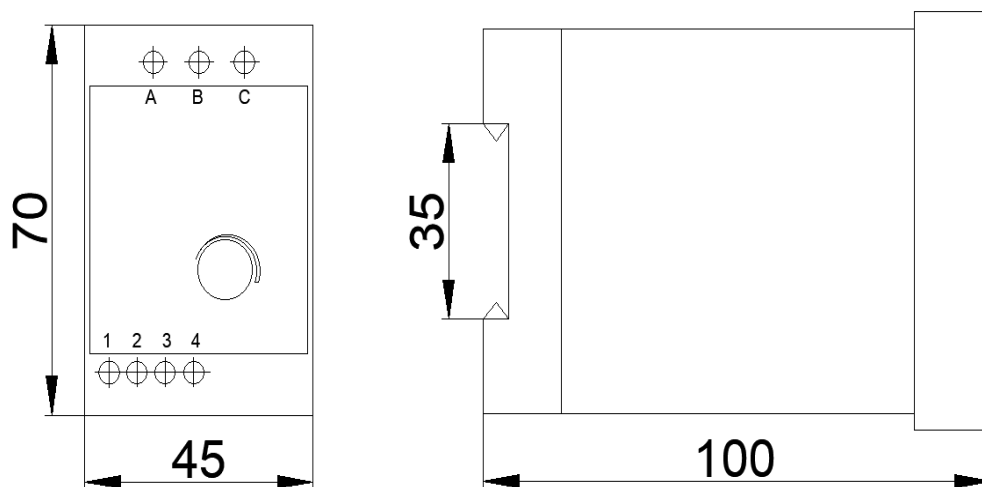


Рисунок 3.3.1 — Габаритні та установочні розміри реле

Конструкція та принцип дії реле ЕЛ-11, ЕЛ-12, ЕЛ-13

Схема підключення реле наведена на рисунку 3.3.2.

Схема реле побудована на часово-імпульсному принципі, що забезпечує високу завадостійкість.

Реле складається з таких частин:

- чутливий елемент (вхідна частина);

- логічний блок;
- схеми спрацювання;
- виконавчий елемент.

При подачі на реле симетричної трифазної напруги допустимого значення з правильним порядком чергування фаз, на виході логічної частини реле з'являються прямокутні імпульси з частотою й тривалістю, визначеними внутрішнім таймером.

Блок порівняння у схемі контролює наявність імпульсів і порядок їх чергування, видаючи команду на включення вихідного електромагнітного реле та одночасно — на світлодіодну індикацію.

При недопустимому зниженні трифазної напруги або порушенні правильного чергування фаз логічна частина припиняє генерацію імпульсів. Після закінчення витримки часу формується сигнал на вимкнення вихідного електромагнітного реле.

Світлодіод гасне. Значення витримки часу задається змінним резистором, вісь якого виведена на лицьову панель реле. Регулювання витримки часу є плавним.

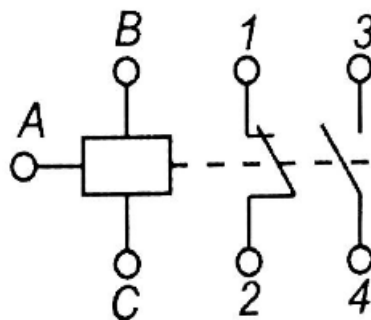


Рисунок 3.3.2 — Схема підключення реле

Реле ЕЛ-12 працює аналогічно до ЕЛ-11, відрізняючись лише допустимими діапазонами напруги живлення.

Реле ЕЛ-13 має іншу логіку: воно не реагує на зміну порядку чергування фаз та працює з фіксованою (нерегульованою) витримкою часу.

Конструктивне виконання ЕЛ-21, ЕЛ-22

Реле цих типів виконані у варіанті для виступаючого монтажу з переднім приєднанням проводів. Усі елементи схеми змонтовані на платі друкованого монтажу, яка вставляється в корпус.

Габаритні та монтажні розміри наведені на рисунку 3.3.3.

Ступінь захисту реле:

- по оболонці — IP41;
- по підключальним клемам — IP20.

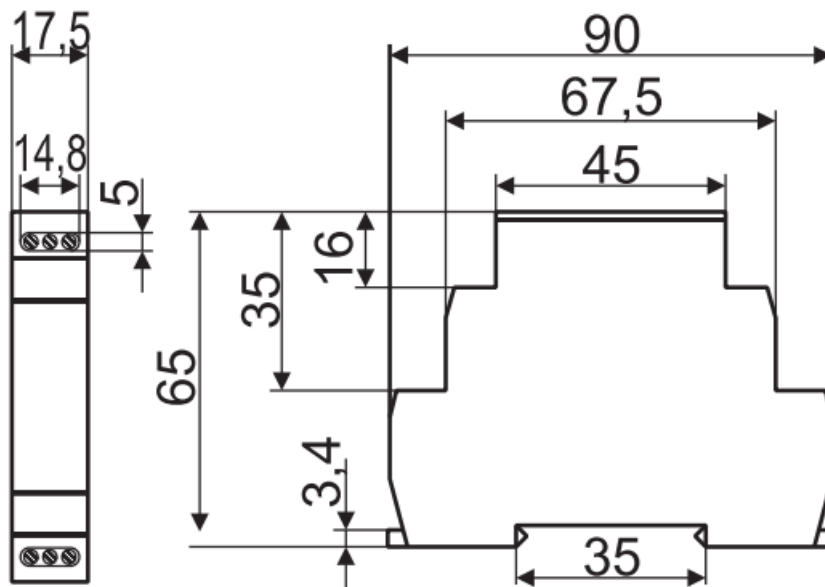


Рисунок 3.3.3 — Габаритні та установочні розміри реле

Конструкція та принцип дії реле ЕЛ-21, ЕЛ-21Н

Схема підключення реле наведена на рисунку 3.3.4, а функціональні діаграми роботи — на рисунку 3.3.5.

Зелений світлодіод світиться постійно і сигналізує про наявність живлення на реле.

У разі подачі на реле симетричної трифазної напруги в межах допустимих значень і правильного порядку чергування фаз — на виході логічної частини після витримки часу t_1 (500 мс) формується сигнал на включення вихідного електромагнітного реле.

Якщо відбувається порушення трифазної напруги, починає світитися

червоний світлодіод. На виході логічної частини після витримки часу t_2 формується сигнал на вимкнення електромагнітного реле.

Часову затримку t_2 можна регулювати за допомогою змінного резистора, виведеного на лицьову панель реле. Регулювання виконується плавно.

У разі неправильного чергування фаз починає світитися червоний світлодіод, і вихідне реле не вмикається.

При зникненні хоча б однієї з фаз живлення — електромагнітне реле вимикається, і обидва світлодіоди згасають.

Якщо напруга знижується і перетинає нижню допустиму межу — блимає червоний світлодіод. Після завершення встановленої витримки часу вихідне реле вмикається, а червоний світлодіод починає світитися постійно.

Якщо напруга живлення падає нижче 60% від номінального значення (U_{off} — рівень відключення), відбувається миттєве розмикання реле без затримки. Якщо на цей момент триває відлік витримки часу, він переривається.

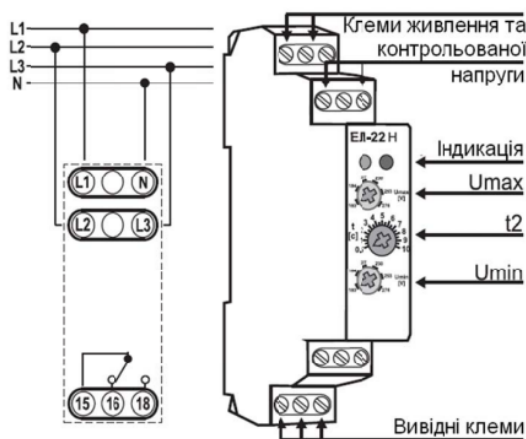
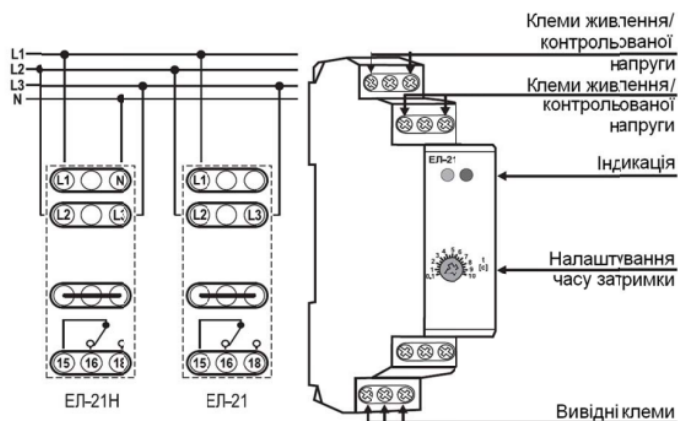


Рисунок 3.3.4 — Схема підключення реле

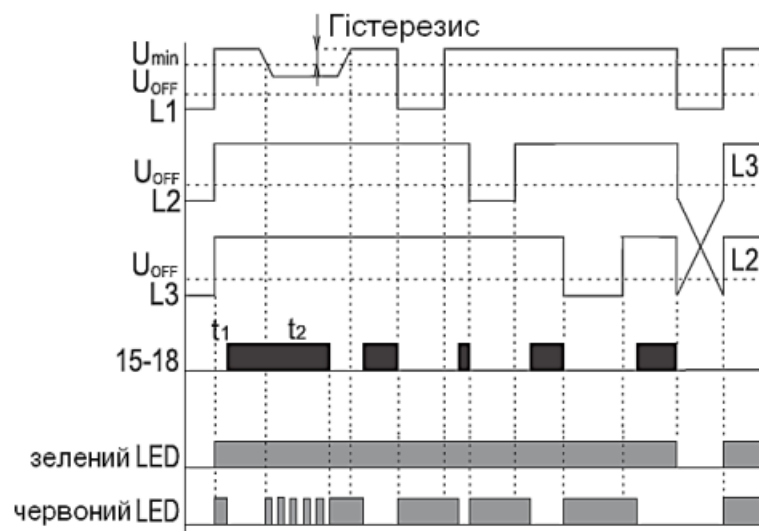


Рисунок 3.3.5 — Функціональні діаграми роботи

ВИСНОВОК

Дипломна робота була виконана з метою вирішення надзвичайно важливого та актуального питання – підвищення надійності, ефективності та безпеки експлуатації низьковольтних асинхронних електродвигунів, які є одним із ключових елементів сучасних промислових та технологічних процесів в Україні. У реальних умовах експлуатації двигуни часто стикаються з різними складними аварійними ситуаціями, такими як короткі замикання, перевантаження, обриви або перекоси фаз. Виникнення цих явищ може спричиняти серйозні технічні проблеми, зупинки виробничих ліній, значні фінансові витрати на ремонт обладнання, а також створювати загрозу безпеці людей на виробництві.

Саме тому в дипломній роботі було детально розглянуто причини виникнення таких ситуацій, щоб зрозуміти, як ефективно їх попередити та уникнути серйозних наслідків. Особливий акцент було зроблено на вивченні конструктивних особливостей, принципу дії та технічних характеристик сучасних низьковольтних комутаційних апаратів, таких як автоматичні вимикачі, магнітні пускачі, контактори, теплові та струмові реле, пристрої захисного вимкнення і запобіжники. Вивчення цього обладнання дало змогу визначити найбільш ефективні комбінації пристроїв для оперативного реагування на аварійні ситуації, що дозволяє не лише уникнути серйозних пошкоджень обладнання, але й максимально знизити ризик аварій, пожеж і травматизму на виробництві.

Важливим етапом роботи стали прикладні розрахунки, що були виконані для конкретного прикладу – асинхронного двигуна потужністю 30 кВт та живильної системи з трансформатором 2150 кВА. Розрахунок струмів короткого замикання та інших електричних параметрів дав змогу підібрати відповідні захисні пристрої, кабельні лінії, автоматичні вимикачі й магнітні пускачі, які забезпечать надійний захист у будь-яких умовах експлуатації.

Таким чином, усі ці дослідження і розрахунки були спрямовані на те, щоб сформулювати обґрунтовані практичні рекомендації, які можуть бути застосовані безпосередньо на виробництві. Реалізація цих рекомендацій дозволить підприємствам суттєво підвищити рівень безпеки, скоротити витрати на ремонтні роботи, оптимізувати енерговитрати, зменшити ризики виникнення аварійних ситуацій та, відповідно, підвищити загальну ефективність і продуктивність роботи технологічних процесів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посібник / Б. В. Клименко. – Харків : Точка, 2012. – С. 147
2. Жежеленко І. С., Писаренко В. І. Електричні апарати. Частина 2. Апарати управління і захисту : навч. посіб. – Київ : НАУ, 2009. – 316 с. – С. 112–114.
3. IEC 60755:2017. General requirements for residual current operated protective devices (RCDs). – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2017. – 116 p. – P. 21–22.
4. Lucius N. Why Four Types of Residual Current Devices? It's All About the Load. – Schneider Electric Blog. – URL: <https://blog.se.com/building-management/2019/04/25/why-four-types-of-residual-current-devices-its-all-about-the-load> (дата звернення: 10.03.2025).
5. Csányi E. Practical Tips for Installation and Using of Thermistor Motor Protection. – Electrical-Engineering-Portal. – URL: <https://electrical-engineering-portal.com/thermistor-motor-protection> (дата звернення: 12.03.2025).
6. Бабич, В.Л. Захист електричних мереж від короткого замикання: навчальний посібник – Київ: Енергетика, 2012. – 256 с.
7. Котельник, Н.І. Електротехнічні розрахунки та захист електричних мереж: навчальний посібник. – Київ: Київський політехнічний інститут, 2015. – 320 с. – С. 105–110.
8. Мельничук, В.О. Особливості побудови та управління низьковольтними

мережами: навчальний посібник. – Львів: Енергоатом, 2017. – 240 с. – С. 22–30.

9. Яндульський О.С., Стелюк А.О., Лукаш М.П. Основне електрообладнання електростанцій та підстанцій: підручник. — Київ: Либідь, 2007. — 656 с. — С. 145–150.

10. Blackburn, L. E., & Domin, T. J. Protective Relaying: Principles and Applications. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 688 p. — P. 315–325.

11. ДСТУ EN 60947-1:2017. Апаратура комплектна розподільча та керувальна низьковольтна. Частина 1. Загальні правила. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 94 с.

12. Ліпінський О. І. Релейний захист і автоматизація : навч. посіб. – Київ : КНУБА, 2021. – 220 с.

13. ABB. Low Voltage Products and Systems. ABB Catalog. – URL: <https://new.abb.com/low-voltage> (дата звернення: 13.05.2025).

14. Schneider Electric. Low Voltage Protection Devices – Product Catalog. – URL: <https://www.se.com/ua/uk> (дата звернення: 15.05.2025).

15. Коваленко, М. А., Чумак, В. В. Електричні комутаційні апарати низької напруги : лабораторний практикум : навч. посіб. для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / М. А. Коваленко, В. В. Чумак. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 72 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47703>.