

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний авіаційний університет

В. Д. Козлов, В. П. Захарченко,  
О. М. Тачиніна

# ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ

Підручник

За загальною редакцією В. Д. Козлова

Київ 2018

УДК 621.316 (042.4)  
ББК 3 260 я 7  
К 592

Рецензенти:

*М. Й. Бурбело* – д-р техн. наук, проф. (Вінницький національний технічний університет);

*В. І. Дешко* – д-р техн. наук, проф. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»);

*О. І. Лисенко* – д-р техн. наук, проф. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»)

*Рекомендовано вченою радою Національного авіаційного університету (протокол №5 від 31.05.2017 р.).*

**Козлов В. Д.**

К 592

Електрична частина станцій та підстанцій аеропортів : підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова.– К. : НАУ, 2018. – 312 с.

ISBN 978-966-932-088-9

Мета підручника – дати студентам знання, необхідні для розуміння фізики процесів, що відбуваються в електричних апаратах за різних режимів їх роботи, конструкції сучасних електричних апаратів напругами до 1000 В та 6 – 35 кВ, принципів їх роботи, а також грамотного вибору електричних апаратів для розподільних мереж цих напруг.

Для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізацій «Електротехнічні системи електроспоживання», «Світлотехніка і джерела світла», «Енергетичний менеджмент». Може бути корисним для інженерно-технічних працівників електроенергетичних служб, компаній і підприємств.

**УДК 621.31 (042.4)**  
**ББК 3 260 я 7**

ISBN 978-966-932-088-9

© Козлов В. Д., Захарченко В. П.,  
Тачиніна О. М., 2018  
© НАУ, 2018

## УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АБЖ	– агрегат безперебійного живлення
АВР	– автоматичне введення резерву
АДЖ	– автономне джерело живлення
АПЗ	– апарат позисторного захисту
ВН	– вимикач навантаження
ГПП	– головна понижуюча підстанція
ЗРП	– закритий розподільний пристрій
КДП	– командно-диспетчерський пункт
КЗ	– коротке замикання
КК	– косинусні конденсатори
КЛ	– кабельні лінії
КРП	– комплектний розподільний пристрій
КПР	– керування повітряним рухом
МВР	– механізм вільного розчеплення
ПММ	– паливно-мастильні матеріали
ПЛ	– повітряні лінії
ПС	– повітряне судно
ПУЕ	– правила устрою електроустановок
РЗІА	– релейний захист і автоматика
РП	– розподільний пункт, пристрій
РЩ	– розподільний щит
СЕ	– система електропостачання
СЕА	– система електропостачання аеропорту
ТК-ТС	– телекерування - телесигналізація
ТН	– трансформатор напруги
ТНП	– трансформатор нульової послідовності
ТП	– трансформаторна підстанція
ТВП	– трансформатор власних потреб
ТС	– трансформатор струму
ЦРП	– центральна розподільна підстанція
ШБЖ	– шини безперебійного живлення
ШГЖ	– шини гарантованого живлення
ЕА	– електричний апарат
ЕРС	– електрорушійна сила
ЕУ	– електроустановка

## ПЕРЕДМОВА

---

Дисципліна «Електрична частина станцій і підстанцій» належить до циклу дисциплін професійної підготовки бакалаврів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Класичні російськомовні підручники в цій галузі авторів О. О. Васильєва [16], О. А. Чуніхіна [17], І. С. Таєва, Г. М. Александрова, М. О. Бабікова та інших призначалися передусім для студентів, які спеціалізуються в електроапаратобудуванні. У них детально розглянуті всі електричні, теплові й електромеханічні процеси, що відбуваються в електричних апаратах за різних режимів їх роботи. У такому глибокому вивченні теорії електричних апаратів для спеціалізацій «Електротехнічні системи електроспоживання», «Світлотехніка і джерела світла» та «Енергетичний менеджмент» немає потреби.

У модулі I викладено загальні питання електричних апаратів: основні вимоги до апаратів, електродинамічні зусилля, теплові процеси, методи гасіння електричної дуги, електричні контакти й електромагнітні пристрої в електричних апаратах.

У модулі II розглянуто конструкції та принципи роботи низьковольтних і високовольтних (6...35 кВ) комутаційних електричних апаратів та їх приводів, детально висвітлено вибір цих апаратів.

У модулі III наведено перелік контрольно-вимірювальних приладів, що встановлюють на ЦРП аеропорту, призначення, конструкції, розглянуто схеми увімкнення та вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги, захисних апаратів (запобіжників, УЗВ, струмообмежувальних реакторів), вимірювальних та допоміжних реле.

У модулі IV викладено основні вимоги до конструкцій трансформаторних підстанцій, електричні схеми РП 6 – 35 кВ і РП – 0,4 кВ для електроприймачів різних категорій надійності електропостачання, конструкції заземлювальних пристроїв і пристроїв блискавкозахисту трансформаторних підстанцій.

Автори прагнули максимально проілюструвати вивчення конструкцій електричних апаратів і трансформаторних підстанцій прикладами їх вибору та проектування.

Передмова та вступ, розд. 1–10, 12–15 написані В. Д. Козловим, розд. 16 – В. П. Захарченком, розд. 11 – О. М. Тачиніною.

Автори висловлюють щиру вдячність рецензентам за зауваження, які були враховані під час готування посібника до друку та сприяли покращанню посібника.

Усі зауваження та пропозиції щодо вдосконалення посібника автори приймуть із вдячністю.

Зв'язатись з авторами можна за *e-mail: kozlovvd@ukr.net*

## ВСТУП

Усі електротехнічні пристрої та системи сучасного аеропорту або промислового підприємства, включно з устаткуванням їх станцій і підстанцій, за функціонально-електричним призначенням можна поділити на три великі групи: джерела електроенергії, електрична мережа (зокрема трансформаторні підстанції) і електроприймачі (рис. В.1).

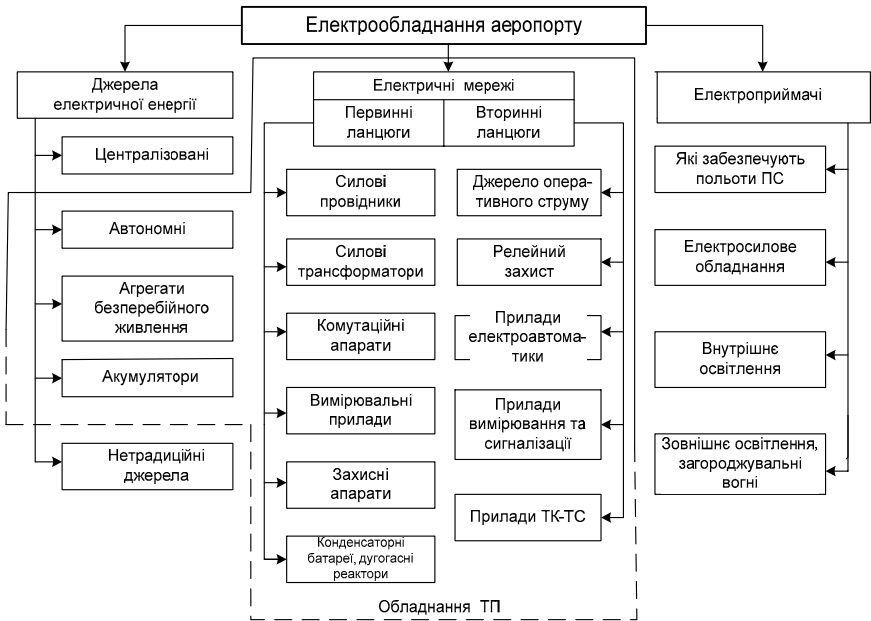


Рис. В.1

*Джерела електроенергії.* В аеропорти та промислові підприємства електроенергію подають централізовано від державної (комерційної) електроенергосистеми або від власних (автономних) електростанцій.

*Централізоване електропостачання* – електропостачання підприємства від енергосистеми, що здійснюється на напрузі 6...110 кВ.

Централізоване електропостачання є найбільш надійним і економічним. Сучасний аеропорт має, зазвичай, не менш як два незалежні централізовані джерела електропостачання.

*Автономні електростанції* є резервними джерелами електроенергії, що запускаються у разі відмови централізованих джерел. У вітчизняних аеропортах як резервні джерела широко використовують дизель-електричні агрегати серій ДГА, АСДА та ін. У закордонній практиці разом із дизельним приводом генераторів (потужністю до 1000 кВА) використовують бензинові та турбінні двигуни.

*Агрегати безперебійного живлення* (АБЖ) призначені для електропостачання особливо відповідальних електроприймачів, навіть короточасна перерва електроживлення яких викликає порушення технологічних процесів, пов'язаних із безпекою польотів. Наприклад, автоматизовані системи керування повітряним рухом (АС КІР). Відомі АБЖ, що накопичують кінетичну енергію в маховику, а також статичні перетворювачі – інвертори, що перетворюють енергію постійного струму акумуляторних батарей на змінний струм (див. підрозд. 15.3).

*Акумуляторні батареї* слугують джерелом резервного електроживлення для важливих приймачів невеликої потужності (аварійні зв'язкові радіостанції, курсоглісадні системи посадки та ін.), а також джерелом енергії для АБЖ.

В умовах зростання вартості електроенергії в аеропортах світу почали використовувати нетрадиційні джерела електроенергії: сонячні, вітрові, термальні та ін. Так, в аеропорті Даллас (США) сонячні батареї використовують як резервне джерело для зарядження акумуляторних батарей особливо важливих електроприймачів КДП.

*Електрична мережа.* Електрична мережа аеропорту або підприємства – це сукупність електроустановок для передавання та розподілу електроенергії. Мережа містить кабельні (КЛ) і повітряні (ПЛ) лінії електропередачі, трансформаторні підстанції (ТП) і розподільне обладнання (РО). В електричній мережі виділяють первинні та вторинні ланцюги.

*Первинні (силові) електричні ланцюги* призначені для передавання електричної енергії від джерел до споживачів (іноді їх використовують для передавання службової інформації, наприклад, у високочастотних приладах РЗІА). Первинні ланцюги містять силові провідники КЛ і ПЛ, силові трансформатори, комутаційні апарати (вимикачі, роз'єднувачі, контактори, рубильники, автоматичні ви-

микачі та ін.), захисні апарати (запобіжники, розрядники, струмообмежувальні реактори та ін.) і конденсаторні батареї. В аеропортах і на промислових підприємствах первинні ланцюги виконують на напругу 0,4...35 кВ.

*Вторинні (допоміжні) ланцюги* призначені для контролю, керування та сигналізації про режим роботи первинних ланцюгів. До складу вторинних ланцюгів входять джерела оперативного струму, пристрої вимірювання та сигналізації, пристрої телекерування-телесигналізації (ТК-ТС), пристрої релейного захисту і автоматики (РЗіА). У вторинних ланцюгах використовують напругу 12...220 В постійного та змінного струмів. Первинні та вторинні ланцюги, зазвичай, між собою електрично не пов'язані.

*Електроприймачі.* Електроприймачами називають апарати, агрегати, механізми, призначені для перетворення електричної енергії на інший вид енергії (механічну, теплову, світлову та ін.). Електроприймачі за рівнем надійності їх електропостачання відносяться до першої, другої і третьої категорій [11]. У першій категорії відокремлюють особливу групу, до якої відносять електроприймачі, що безпосередньо забезпечують безпеку польотів.

*Споживачем електричної енергії* називають електроприймач або групу електроприймачів, об'єднаних технологічним процесом і розміщених на певній території [11]. На сучасних підприємствах використовують найрізноманітніші споживачі електроенергії. Значна різноманітність споживачів електроенергії є і в сучасному аеропорту. Функціонально їх можна поділити на такі групи:

- електроприймачі, що безпосередньо забезпечують польоти повітряних суден (ПС) (радіо- та світлосигнальне обладнання систем посадки ПС, засоби навігації та радіолокації, контролю та керування повітряним рухом, об'єкти зв'язку та метеослужби);

- електросилове обладнання пасажирських, службових і виробничих будівель та споруд аеропорту, складів, насосних паливно-мастильних матеріалів (ПММ) і котельнь та ін.;

- внутрішнє освітлення пасажирських, службових і виробничих будівель і споруд аеропорту;

- зовнішнє освітлення місць стоянок ПС, перонів, площ, доріг, територій складів та сховищ ПММ, загороджувальних вогнів висотних перешкод;

- агрегати спецструмів, що виробляють змінну напругу 230 В частотою 400 Гц і постійну напругу 27 В, необхідну для обслуговування ПС на землі.



**■ Розділ 1**

**КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ  
ТА ОСНОВНІ ВИМОГИ, ЩО ЇМ СТАВЛЯТЬ**

**1.1. Класифікація електричних апаратів**

Електричні апарати (ЕА) охоплюють значне коло електротехнічних пристроїв. До них відносять пристрої, що використовуються для вмикання та вимикання електричних кіл, контролю, вимірювання, захисту та керування установками, призначених для передавання, перетворення, розподілу та споживання електроенергії.

Класифікувати електричні апарати можна, наприклад, за такими ознаками: призначенням, сферою використання, принципом дії, видом струму, величиною напруги, способом керування, конструктивними особливостями.

Різноманітність електричних апаратів та виконуваних ними функцій, поєднання в одному апараті кількох функцій не дозволяє здійснити точну їх класифікацію.

За призначенням електричні апарати можна віднести до таких груп.

*Комутаційні апарати* – це електричні апарати, що вмикають і вимикають електричні мережі. Апарати цієї групи характеризує низька інтенсивність спрацьовувань (мають на увазі необхідну кількість вмикань та вимикань ЕА, яка становить від кількох комутацій на добу до кількох на рік). Комутаційні апарати поділяють на низьковольтні (до 1000 В) та високовольтні (вище як 1000 В). До низьковольтних комутаційних апаратів відносять: пакетні вимикачі, повітряні автоматичні вимикачі, кнопки керування. До високовольтних комутаційних апаратів належать роз'єднувачі, відокремлювачі, короткозамикачі, вимикачі навантаження та силові вимикачі. Призначення та конструктивні особливості виконання та робота зазначених вище комутаційних апаратів розглянуті у відповідних підрозділах.

*Пускорегулювальні апарати* – це електричні апарати, що запускають електричні машини та інші споживачі електричної енергії та керують ними. Апарати цієї групи характеризує значна кількість вмикань та вимикань (до кількох тисяч за годину). До пускорегулювальних апаратів відносять контактори, пускачі, силові та командні контролери, реостати та резистори. Апарати цієї групи можуть бути автоматичними чи неавтоматичними. Автоматичні запускають заданий режим роботи електричного кола або машини. Неавтоматичними керує оператор. Ними керують дистанційно або безпосередньо (рукою, ногою).

*Захисні апарати* – це електричні апарати, що захищають електричні мережі струму від короткого замикання (КЗ), електричних перевантажень та перенапруг. Захисними апаратами є запобіжники, які поділяють на низьковольтні та високовольтні. Обмежують струм КЗ реактори, а обмеження перенапруг – розрядники та іскрові проміжки.

*Апарати контролю* – це електричні апарати, що виконують контроль заданих електричних і неелектричних параметрів. До цієї групи ЕА належать найрізноманітніші реле (струму, напруги, потужності, частоти, тиску, швидкості та ін.) і датчики. Для реле характерна східчаста зміна вихідної величини за плавної зміни вхідної величини. Датчики перетворюють зміну певної контрольованої величини на відповідний змінюваний електричний сигнал.

*Вимірювальні апарати* – це електричні апарати, що перетворюють первинний вимірюваний параметр на стандартну, зручну для подальшого оброблення величину, й одночасно ізолюють первинні (силові) мережі від вторинних (допоміжних) мереж. До вимірювальних апаратів відносять: трансформатори струму та напруги, ємнісні дільники напруги.

*Регулювальні апарати* – це електричні апарати, що регулюють певний параметр за певним законом. До регулювальних апаратів належать регулятори струму, напруги, частоти, температури, швидкості та ін.

## **1.2. Кліматичне виконання, типи атмосфери, категорії розміщення та захисні оболонки електричних апаратів**

Для надійної роботи електричного обладнання слід використовувати його в тих кліматичних умовах і умовах розміщення, для яких воно спроектоване.

**Кліматичне виконання.** Згідно зі стандартом [9] усі виробни промислового обладнання за своїм виконанням підрозділяються на виробни, що призначені для експлуатації в умовах суші, рік (озер) та моря. У табл. 1.1 наведена класифікація макрокліматичних районів і маркування виробів, призначених для експлуатації в умовах роботи на суші, або на воді – річках (озерах). На більшій частині території України помірний клімат.

*Таблиця 1.1*

Клімат у макрокліматичному районі	Позначення в маркуванні виробу	
	російське	латинське
Помірний	<i>У</i>	<i>N</i>
Помірно холодний	<i>УХЛ</i>	<i>NF</i>
Холодний	<i>ХЛ</i>	<i>F</i>
Тропічний	<i>T</i>	<i>T</i>
Тропічно-вологий	<i>ТВ</i>	<i>TH</i>
Тропічно-сухий	<i>ТС</i>	<i>TA</i>
Усі райони, окрім районів з дуже холодним кліматом	<i>O</i>	<i>U</i>

**Типи атмосфер.** Залежно від кількості забруднювачів (сірчанний газ, хлориди та ін.) в об'ємі і від кількості осаду речовин за добу ( $\text{мг/м}^2\text{добу}$ ) атмосферу поділяють на умовно-чисту, промислову, морську та приморсько-промислову.

**Категорії розміщення.** Згідно зі стандартом [9] усе обладнання залежно від навколишнього середовища, де їх будуть експлуатувати, поділяють на п'ять категорій розміщення.

*Обладнання першої* категорії розміщення призначене для експлуатації на відкритому повітрі. Так, вимикачі цієї категорії розміщення повинні нормально працювати в умовах зледеніння за товщини льодового покриву до 20 мм і за швидкістю вітру 15 м/с, а без зледеніння – за швидкістю вітру до 40 м/с.

*Обладнання другої* категорії розміщення призначене для експлуатації під накриттям, або у приміщеннях, захищених від прямого потрапляння сонячних променів та опадів, і де коливання температури та вологості не суттєво відрізняється від коливань на відкритому повітрі (намети, кузови, металеві приміщення без теплоізоляції та ін.).

*Обладнання третьої* категорії розміщення призначене для експлуатації в закритих приміщеннях з природною вентиляцією без

штучного регулювання клімату, де коливання температури та вологості, дія піску та пилу суттєво менші, ніж на відкритому повітрі (кам'яні, бетонні, дерев'яні та металеві з теплоізоляцією приміщення без опалення або з опаленням, яке здійснюється дуже рідко).

*Обладнання четвертої* категорії розміщення призначене для експлуатації у приміщеннях зі штучно регульованими кліматичними умовами. Цю категорію, своєю чергою, поділяють на підкатегорії: вироби для експлуатації в приміщеннях із частковим кондиціонуванням повітря та вироби для експлуатації в лабораторіях, капітальних, житлових та подібних приміщеннях.

*Обладнання п'ятої* категорії розміщення призначене для експлуатації у приміщеннях з підвищеною вологістю, де можливий тривалий вплив води та інтенсивна конденсація вологи (шахти, підвали, корабельні приміщення та ін.).

Умовне позначення кліматичного виконання та категорії розміщення виробів завжди вказують у кінці маркування виробу. Наприклад, агрегат безперебійного живлення АБП-1-50-400-50 УХЛ4; запобіжник кварцовий для захисту трансформаторів напруги ПKN 001-10 У1.

Слід пам'ятати, що на роботу електричних апаратів суттєво впливає атмосферний тиск. Зниження тиску погіршує діелектричні властивості повітря та інтенсивність охолодження апаратів. У зв'язку із цим апарати стандартного виконання призначені для роботи на висоті до 1000 м над рівнем моря. Якщо планують використовувати такий апарат на більшій висоті, то слід враховувати необхідність відповідного зменшення його електричного навантаження. Мікрокліматична зона, категорія розміщення та тип атмосфери впливають на вибір апаратів для роботи в певних умовах.

**Захисні оболонки.** Згідно зі стандартом [10] рівень захисту корпусів електрообладнання від потрапляння у середину них сторонніх тіл та захисту персоналу від контактування з деталями під напругою або рухомими частинами позначають двома латинськими літерами **IP** та двома цифрами за ними.

*Перша цифра* (від нуля до шести) характеризує рівень захисту персоналу від розташованих усередині корпусу елементів під напругою або рухомих частин, а також рівень захисту внутрішніх частин виробу від потрапляння всередину твердих тіл (табл. 1.2).

*Друга цифра* (від нуля до восьми) характеризує захист виробу від потрапляння всередину води (табл. 1.3). Наприклад, рівень захисту IP54 забезпечує захист від пилу, але не виключає можливості

його обмеженого проникнення, а також забезпечує повну бризко-захищеність апарата, але апарат може виходити з ладу у разі потрапляння на нього потоку води. Корпуси з таким рівнем захисту найбільш пристосовані для використання в умовах промислового виробництва, але не на вулиці.

Таблиця 1.2

Рівень захисту	Характеристика захисту персоналу або захисту від потрапляння твердих тіл
0	Захист відсутній
1	Захист від потрапляння всередину оболонки значної частини поверхні людського тіла, наприклад, рук або потрапляння твердих тіл діаметром більшим за 50 мм
2	Захист від потрапляння всередину оболонки пальців або предметів довжиною більшою як 80 мм та твердих тіл діаметром більшим за 12 мм
3	Захист від потрапляння всередину оболонки інструментів, дроту, твердих тіл діаметром більше ніж 2,5 мм
4	Захист від потрапляння всередину оболонки дроту чи твердих тіл діаметром більшим як 1 мм
5	Частково захищає від потрапляння всередину оболонки пилу, але можливе потрапляння його кількістю, яка не впливає на роботу апарата
6	Повне запобігання потрапляння пилу

Таблиця 1.3

Рівень захисту	Характеристика захисту обладнання від води
0	Захист відсутній
1	Краплі води, що вертикально падають на оболонку, не повинні завдавати ушкоджень обладнанню
2	Краплі води, що падають під кутом 15° до вертикалі, не повинні завдавати ушкоджень обладнанню
3	Дощ, що падає на оболонку під кутом 60° до вертикалі, не повинен пошкоджувати обладнання
4	Вода, що розбризкується у будь-якому напрямку відносно обладнання, не повинна його пошкодити
5	Потік води, що летить на обладнання у будь-якому напрямку, не повинен його пошкодити
6	Сильний потік води (100 л/хв за 100 кПа) або хвилі, не повинні викликати потрапляння води в оболонку обладнання кількістю, достатньою для нанесення шкоди
7	Вода не повинна потрапляти в оболонку під час занурення у воду на глибину до 15 см
8	Обладнання придатне для довготривалого занурення у воду за умов, встановлених їх виробником

Для постійного використання поза приміщенням необхідно використовувати корпуси з рівнем захисту IP65, які забезпечують повний захист від пилу та потоку води. За наявності, наприклад, накриття, можна використовувати корпуси з рівнем захисту IP64.

### 1.3. Номінальні параметри та основні вимоги до електричних апаратів

**Номінальні параметри.** *Номінальним значенням параметра* (номінальним параметром) називають зазначене виробником електротехнічного пристрою значення параметра, яке є початковим для підрахунку відхилення від цього значення при експлуатації та випробуваннях пристрою [11].

Загальними для електротехнічного обладнання є такі номінальні параметри.

*Номінальна напруга  $U_{\text{ном}}$*  – напруга, за якої передбачена довготривала нормальна робота електротехнічного пристрою. Вона зумовлює необхідну електричну ізоляцію апарата.

Згідно зі стандартом [13] прийнята така шкала номінальних напруг трифазного змінного струму (діюче значення лінійної напруги між фазами):

0,22; 0,38; 0,66 (кВ) – низька напруга;  
3; 6; 10; 20; 35 (кВ) – середня напруга;  
110; 150; 220; 330 (кВ) – висока напруга;  
500; 750; 1150 (кВ) – надвисока напруга.

*Номінальний струм  $I_{\text{ном}}$*  – струм, тривале пропускання якого викликає нагрівання струмопровідних елементів та ізоляції електротехнічного пристрою не більше за встановлені значення температур за номінальної температури навколишнього середовища. Номінальні значення струмів електротехнічних апаратів регламентує стандарт [14]. Значення отримують з наведеного цифрового ряду шляхом множення на 1; 10; 100 і т. ін.:

1\*; 1,25; 1,6\*; 2; 2,5\*; 3,15; 4\*; 5; 6,3\*; 8

(\* позначені значення для переважного використання).

*Номінальна частота  $f_{\text{ном}}$*  – частота за якої передбачена довготривала нормальна робота електротехнічного пристрою. Частота визначає втрати у струмовідних елементах та умови вимикання апаратів. Чим більша частота, тим більші втрати енергії в апараті. Також ускладнюються умови вимикання апарата.

Номинальна температура навколишнього середовища  $\theta_{\text{ном}}$  – умовна температура навколишнього середовища, зі якої розраховують інші номінальні параметри. Стандарт [15] визначає номінальними температурами навколишнього середовища такі:

- повітря для провідників (дроти, шини, кабелі) – 25 °С;
- повітря для апаратів – 35 °С;
- земля, вода – 15 °С.

Окрім загальних номінальних параметрів, різні ЕА мають низку інших (частота спрацьовування, час вмикання і вимикання, зносостійкість, похибки та ін).

**Основні вимоги.** Електричні апарати та пристрої повинні відповідати технічним вимогам, вимогам безпеки, естетики та ін.

До найбільш загальних технічних вимог до електротехнічних пристроїв, які використовують у первинних електричних колах, відносять:

1. Ізоляція електротехнічних пристроїв повинна мати необхідну електричну міцність для тривалого протистояння прикладеній робочій напрузі, а також витримувати короткотривалі (тимчасові) перенапруги. Протягом проектування та виготовлення електротехнічних пристроїв їх ізоляцію виконують зазвичай з певним запасом електричної міцності. Під час вибору будь-якого електричного пристрою має виконуватись така умова:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мер}}$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга пристрою (апарата);  $U_{\text{мер}}$  – напруга електричної мережі, у якій планують використовувати апарат.

2. За нормальних робочих режимів електричний пристрій повинен пропускати відповідні робочі струми тривалий час. При цьому температура окремих частин пристрою не повинна перевищувати допустимих значень, установлених заводом-виробником. Для виконання цієї вимоги повинна виконуватись така умова:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роб. max}}$$

де  $I_{\text{ном}}$  – номінальний струм пристрою;  $I_{\text{роб. max}}$  – максимально можливий робочий струм, що тече через пристрій досить тривалий час (зазвичай, це струм після аварійного режиму).

3. Електротехнічний пристрій повинен бути стійким до механічних зусиль, які виникають у ньому в результаті електродина-

мічних взаємодій в окремих його елементах. Найбільшими вони стають під час проходження через апарат максимального струму. Зазвичай, це ударні струми КЗ ( $i_y \approx 2,55I_{КЗ\infty}$ ).

Здатність електричного апарата витримувати виниклі в ньому механічні зусилля без пошкодження називають *електродинамічною стійкістю*. Електродинамічну стійкість нормує струм електродинамічної стійкості  $i_{дин}$ . Перевірка апарата на електродинамічну стійкість базується на виконанні такої умови:

$$i_{дин} \geq i_y.$$

Докладніше питанню електродинамічної стійкості буде надана увага в розд. 2.

4. У момент пропускання через електричні апарати струмів КЗ вони нагріваються. Здатність апаратів протистояти тепловій дії струмів КЗ без пошкоджень називають *термічною стійкістю*. Електричні апарати перевіряють на термічну стійкість у конкретних умовах використання з допомогою виразу:

$$I_T^2 t_T \geq I_{КЗ}^2 t_{вим},$$

де  $I_T$  і  $t_T$  – паспортні величини струму та часу термічної стійкості конкретного типу апарата за даними виробника або довідників;  $I_{КЗ}$  – можливий струм КЗ;  $t_{вим}$  – час вимкнення струмів КЗ у

робочій схемі апарата. Значення  $t_T$  бувають 1, 3, 4, 5 та 10 с.

5. Електричний пристрій повинен мати високу надійність. Відмови електрообладнання досить часто призводять до повного або часткового порушення електропостачання. Високу надійність електротехнічних пристроїв слід враховувати ще на стадії проектування шляхом використання в конструкціях апаратів прогресивних технічних рішень і матеріалів необхідної якості.

Під час проектування електроустановки потрібно враховувати мікрокліматичні райони та категорії їх розміщення (див. підрозд. 1.2). В експлуатації високої надійності досягають виконанням профілактичних та ремонтних робіт кваліфікованим персоналом у повному обсязі та у встановлені терміни.

6. Конструкція електротехнічного пристрою має бути, якщо це можливо, нескладною та дозволяти здійснювати профілактичні та ремонтні роботи з незначним обсягом складально-розбірних опера-



цій, мати невеликі габарити, масу та вартість. Апарат високої напруги за термін служби 25 років не повинен потребувати ремонту та складної ревізії.

Конкретним типам електричного обладнання ставлять низку додаткових вимог, які будуть описані під час розгляду цього обладнання.

#### **1.4. Основні матеріали електричних апаратів**

Під час виробництва ЕА використовують різні природні та штучні матеріали. Серед основних можна назвати такі:

- матеріали для провідників: мідь, латунь, алюміній та залізо;
- матеріали для магнітопроводів: різні сталі та сплави;
- газогенерувальні матеріали для гашення електричної дуги: фібра, оргскло, вініпласт;
- дугостійкі ізоляційні матеріали: азбест, кераміка, пластмаси;
- матеріали електричних контактів: мідь, срібло, вольфрам, сплави, металокераміка;
- сплави з високим питомим опором (використовують для виготовлення, наприклад, реостатів): ніхром, константан, чавун;
- біметали, у виробництві яких використовують різне лінійне розширення металів під час нагрівання;
- конструктивні (для надання апаратам та їх деталям потрібних форм та виготовлення деталей, що передають і приймають механічні зусилля): метали, пластмаси, ізоляційні матеріали.

#### **1.5. Види електричних схем**

Проектування електроустановки або трансформаторної підстанції починають з обґрунтування та складання її структурної схеми, на якій показують основні функціональні частини електроустановки (джерела живлення, розподільний пристрій, силові трансформатори, компенсаційні пристрої, пристрої автоматичного введення резерву та ін.).

На рис. 1.1 наведений один із можливих варіантів структурної схеми центральної розподільної підстанції аеропорту, яка включає два централізовані джерела електропостачання G1 і G2 (6 – 20 кВ), РП високої напруги (РП ВН), що складається з двох секцій шин В1 і В2 з можливістю їх об'єднання улаштуванням АВР за відмови

одного із вводів. Від секцій В1 і В2 відгалуджуються високовольтні кабельні лінії до інших ТП аеропорту. Два силових трансформатори Т1 і Т2 знижують високу напругу централізованих вводів до 0,4 кВ, яка надходить на відповідні шини низької напруги В3 і В4 РП низької напруги.

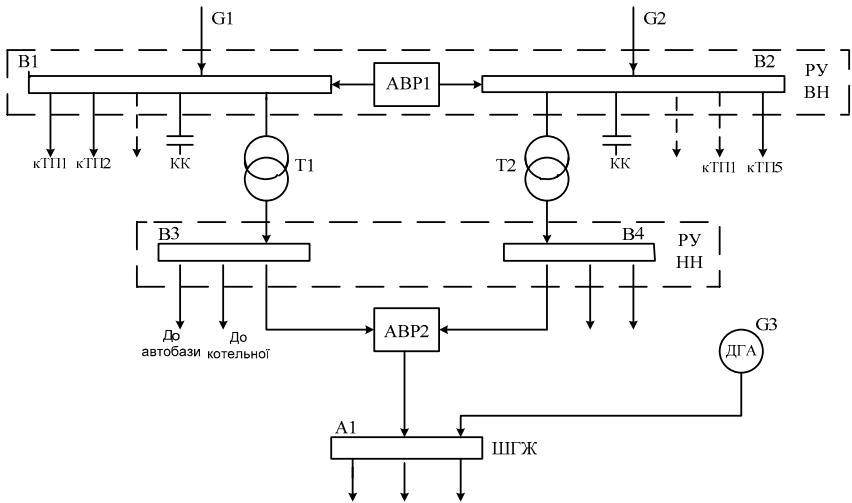


Рис. 1.1

Якщо від РП НН передбачене живлення електроприймачів I категорії особливої групи, потрібно установити третє (резервне) джерело G3 і окремі шини гарантованого живлення ШГЖ А1. У разі потреби підвищити  $\cos\phi$  СЕА в РП ВН або РП НН встановлюють косинусні конденсатори (КК).

На основі структурної схеми обґрунтовують види та вибір основних елементів первинних (силових) мереж ЦРП і складають її *спрощену принципову схему*.

На рис. 1.2 наведений приклад такої схеми для лівої частини структурної схеми (див. рис. 1.1). Для зручності високовольтні роз'єднувачі показані похилим штрихом.

Наприкінці проектування електричної частини ЦРП складають повну принципову схему первинних з'єднань (ланцюгів) включно з вимірювальними трансформаторами струму та напруги, розрядники та ін.

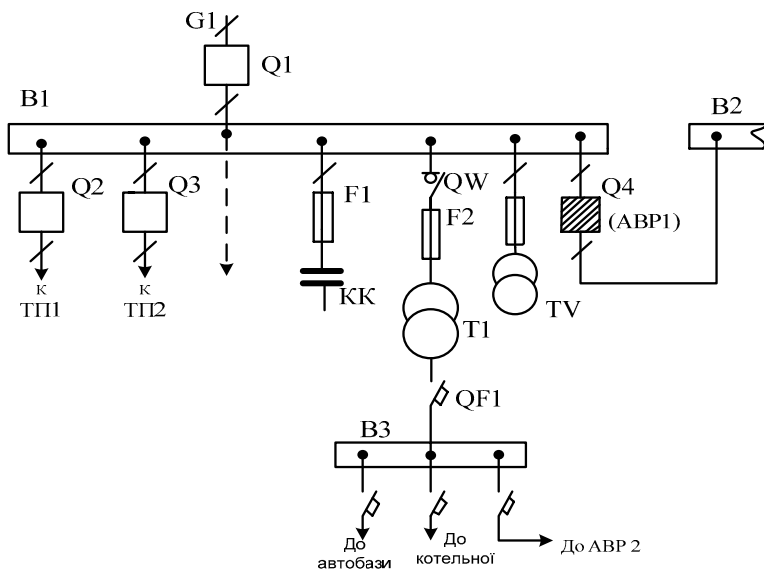


Рис. 1.2

Якщо схеми вторинних ланцюгів нескладні, їх можна зображати і на повній принципівій схемі. Складні схеми керування, вимірювання чи сигналізації складають окремі принципівій схеми вторинних ланцюгів.

Черговість підімкнення живлення та фідерів, які відгалуджуються до збірних шин у РП на принципівій схемі може бути зображена довільно. Для правильного монтажу та подальшої експлуатації РП складають схему заповнення РП, враховуючи умови прокладання кабельних каналів у приміщенні РП, взаємне розташування електричного обладнання.

Усі елементи електричного обладнання на принципівій схемі мають бути виконані у строгій відповідності до правил чинної системи ЄСКД. У додатках 13 і 14 наведені чинні, на момент написання підручника, графічні зображення елементів електрообладнання та наведені їх літерні позначення.

Залежно від розміщення на схемі окремих елементів електротехнічних пристроїв розрізняють суміщений і рознесений способи зображення. За поєднаного зображення всі електричні елементи пристрою на схемі розташовані поруч (зображують також їх механічний

зв'язок, якщо він є). На рис. 1.3, *а* наведений приклад суміщеного зображення обмотки та чотирьох контактів реле часу КТ1.

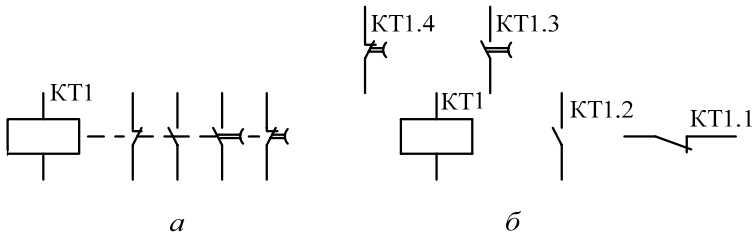


Рис. 1.3

Перший контакт – розмикальний, другий – замикальний, третій – замикальний із затримкою у замиканні і четвертий – розмикальний із затримкою у розмиканні.

За рознесеного зображення (рис. 1.3, *б*) контакти цього реле можуть знаходитися в різних частинах схеми. Для визначення належності до конкретного реле згори або праворуч від них повторюють позначення реле – КТ1, а через точку – номер контакту цього реле. Наприклад, другий контакт реле КТ1 позначений як КТ1.2.

## ■ Розділ 2

### ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

#### 2.1. Поняття електродинамічної стійкості

Із курсу фізики відомо, що якщо в однорідне магнітне поле з індукцією  $B$  умістити провідник довжиною  $l$ , через який тече струм  $i$ , то на нього згідно із законом Ампера діятиме електродинамічна сила  $F$  (рис. 2.1).

Напрямок сили, що діє на провідник, визначають за правилом лівої руки, а її величину – за відомою формулою:

$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \sin\beta.$$

Цю силу широко використовують в електричних машинах (створює обертальний момент). Слід зауважити, що в деяких випадках дія закону може призвести до негативних наслідків та значних матеріальних втрат.

Річ у тім, що за взаємодії струму, який тече в електричних апаратах з магнітними полями інших струмів утворюються електродинамічні сили. За номінальних (робочих) струмів ці зусилля незначні, і ними можна знехтувати.

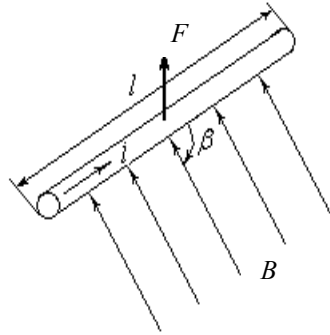


Рис. 2.1

Цілком інший характер динамічних зусиль в режимі КЗ. Як відомо, при КЗ, струми, що течуть мережею та через електричні апарати, у десятки і сотні разів можуть перевищувати номінальні (робочі) струми і сягати десятків кілоамперів.

Спричинене КЗ підвищення струму відповідно збільшує електродинамічні сили, які намагаються деформувати як струмоведучі частини електричних апаратів, так і ізолятори, якими ці частини прикріплені до заземлених елементів електричних установок. Щоб бути цілком упевненим у здатності електричного апарата протистояти руйнівній дії електродинамічних сил, необхідно вміти розраховувати механічні напруження, створювані цими силами у матеріалах апарата.

*Електродинамічною стійкістю апарата* називають його здатність протистояти дії електродинамічних сил, які виникають унаслідок пропускання через апарат струмів КЗ. Електродинамічну стійкість характеризує найбільший струм, який апарат може витримати без пошкодження.

Наприклад, якщо електричний апарат має електродинамічну стійкість 50 кА, це означає, що цей апарат здатний витримати без негативних наслідків, що перешкоджають його подальшій роботі, такі механічні напруження, які виникають у ньому внаслідок пропускання через апарат струму КЗ, не більшого як 50 кА.

Значення електродинамічної стійкості апаратів наведено в довідниках або технічних паспортах у вигляді одного із таких параметрів:

а) струму електродинамічної стійкості  $i_{\text{дин}}$  – максимального амплітудного значення струму, за якого механічні напруження, що виникають в елементах апарата, не виходять за межі допустимих значень;

б) електродинамічної кратності відносно номінального струму:

$$K_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2}I_{\text{ном}}}.$$

Перевірка апарата на електродинамічну стійкість базується на виконанні такої умови:

$$i_{\text{дин}} \geq i_y,$$

де  $i_y$  – ударний струм КЗ.

## 2.2. Електродинамічні сили в паралельних провідниках

До електротехнічних конструкцій, у яких електродинамічні сили можна розглядати як сили у паралельних провідниках, можна віднести, наприклад, електротехнічні шини (рис. 2.2), у яких утворюються значні взаємні зусилля  $F_1$ ;  $F_2$ ;  $F_3$  під час пропускання ними струмів КЗ. Ці сили намагаються зігнути шини та зламати ізолятори, на яких закріплені шини.

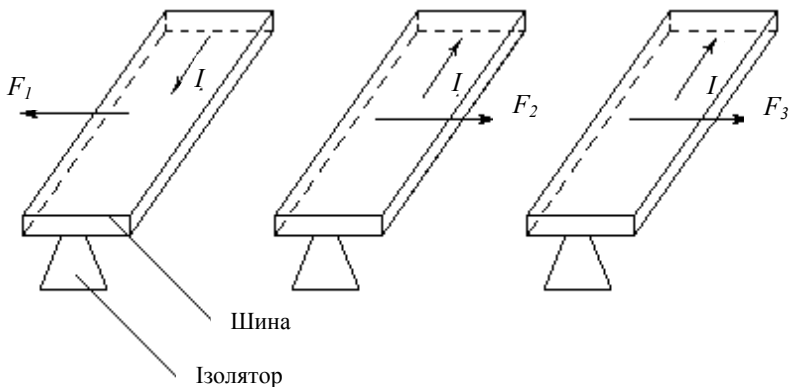


Рис. 2.2

Розглянемо випадок, коли двома дуже тонкими провідниками довжиною  $l$  течуть струми  $i_1$  та  $i_2$  (рис. 2.3). Провідники один від одного розміщені на відстані  $a$ . Якщо струми  $i_1$  та  $i_2$  зустрічно спрямовані, то на провідники будуть діяти електродинамічні сили, які прагнуть відштовхнути провідники.

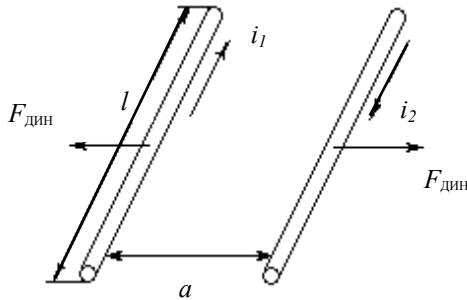


Рис. 2.3

Кількісне значення цієї сили можна визначити за виразом:

$$F_{\text{дин}} = K_{\text{к}} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7},$$

де  $K_{\text{к}}$  – коефіцієнт контуру, що дорівнює

$$K_{\text{к}} = \frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right].$$

Значення коефіцієнта  $K_{\text{к}}$  залежить лише від довжини провідників та їх взаємного віддалення. Якщо  $\frac{a}{l} \leq 0,1$ , що має місце в реальних електроустановках, то вираз у квадратних дужках близький до одиниці, а  $F_{\text{дин}}$  визначають як:

$$F_{\text{дин}} = \frac{2 \cdot l}{a} i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7}. \quad (2.1)$$

**Приклад.** Знайти електродинамічну силу взаємодії двох провідників, якщо  $i_1 = 50 \text{ кА}$ ,  $i_2 = -50 \text{ кА}$  ( $i_1$ ,  $i_2$  спрямовані назустріч один одному),  $a = 250 \text{ мм}$ ,  $l = 3 \text{ м}$ .

Визначивши відношення  $\frac{a}{l} = \frac{0,25}{3} \approx 0,081$ , можна з допомогою формули (2.1) знайти  $F_{\text{дин}}$ :

$$F_{\text{дин}} = \frac{2 \cdot 3}{0,25} 50 \cdot 10^3 \cdot (-50 \cdot 10^3) \cdot 10^{-7} = -6000 \text{ Н}.$$

Знак мінус означає, що сили спрямовані у протилежні боки, тобто відбувається відштовхування.

У розглянутій вище формулі було прийняте припущення, що провідники дуже тонкі. Реальні провідники мають певні розміри. У круглих та трубчастих провідниках магнітні силові лінії мають форму кіл, і зазвичай вважають, що струм тече у них по їхній осі, тому наведені вище формули залишаються справедливими і для таких форм реальних провідників.

Магнітні силові лінії провідників прямокутної форми (рис. 2.4) мають форму овалів. Зміну електроди-намічних сил для таких провідників враховують уведенням спеціального коефіцієнта форми  $K_{\Phi}$ .

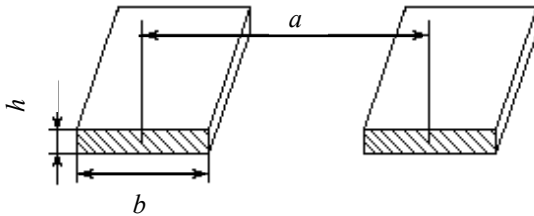


Рис. 2.4

Кількісне значення  $K_{\Phi}$  залежить від співвідношень товщини провідника  $h$ , його ширини  $b$  та відстані між осями провідників  $a$ . Коефіцієнт  $K_{\Phi}$  визначають за спеціальними кривими [17].

Тоді для провідників прямокутної форми електродинамічну силу можна визначити за формулою

$$F_{\text{дин}} = K_{\Phi} K_{\kappa} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7}.$$

### 2.3. Електродинамічні сили в перпендикулярних провідниках

Електричні апарати часто містять конструкцію, в якій струмоведучі елементи розміщені перпендикулярно один до одного (рис. 2.5, а). Таку конструкцію можна подати у вигляді вертикального провідника нескінченної довжини та горизонтального відрізка довжиною  $a$ , по яких тече струм  $i$ . Електродинамічну силу  $F_{\text{дин}}$  на горизонтальний відрізок у такій конструкції визначають за формулою

$$F_{\text{дин}} = i^2 \cdot \ln \frac{a}{r} 10^{-7},$$

де  $r$  – радіус провідника.



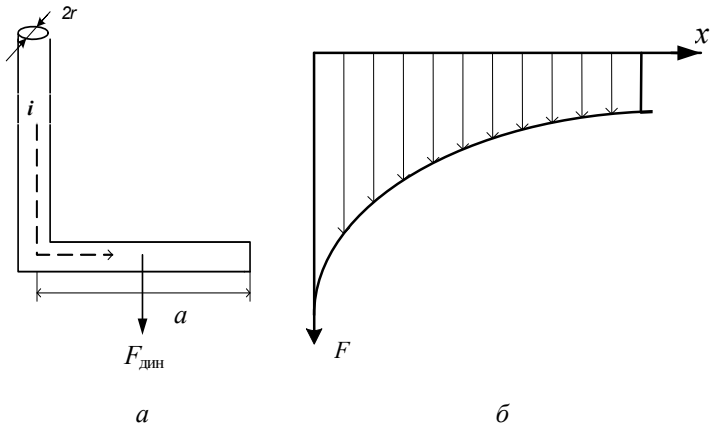


Рис. 2.5

Слід зазначити, що тоді сила спрямована в бік випрямлення провідника. Найбільше лінійне зусилля спостерігають у місці згину провідника. Якщо побудувати епюру сил (елементарних сил  $F$ ) уздовж горизонтального провідника, вона буде мати вигляд як на рис. 2.5, б.

В окремих електричних апаратах струмоведучі елементи можуть мати вигляд напівпетлі, наприклад, у місткових контактах, рубильниках та ін. Цю конструкцію можна подати як два вертикальні провідники, з'єднані перемичкою (траверсою) (рис. 2.6, а).

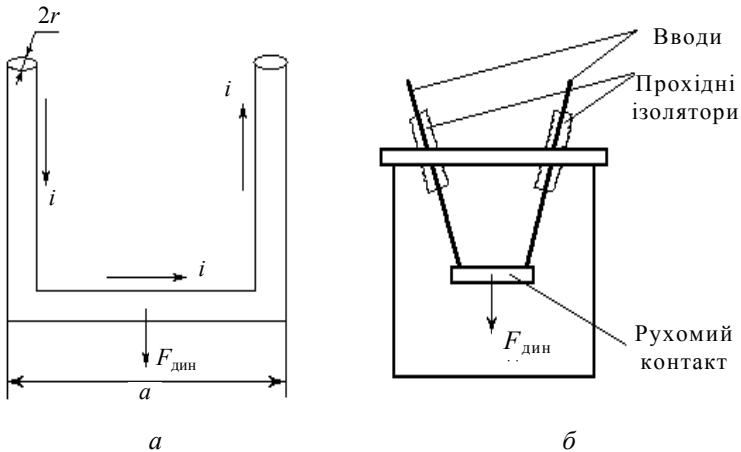


Рис. 2.6

Електродинамічна сила, що діє на перемичку, буде складатися із сил від лівого та правого вертикальних провідників, тобто, буде вдвічі більшою порівняно з першим випадком:

$$F_{\text{дин}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{a}{r}.$$

**Приклад.** У баковому вимикачі (рис. 2.6, б) струмоведучі елементи розміщені на відстані 200 мм і виконані у вигляді круглих стрижнів діаметром 20 мм. Визначити силу дії на рухомий контакт, якщо через вимикач тече наскрізний струм КЗ  $i_{\text{КЗ}} = 50 \text{ кА}$ .

$$F_{\text{дин}} = 2 \cdot 10^{-7} (50 \cdot 10^3)^2 \ln \frac{0,2}{0,01} = 1500 \text{ Н} \approx 150 \text{ кг}.$$

#### 2.4. Електродинамічні сили кільцевого витка та між витками

У кільцевому витку (рис. 2.7, а) діаметром  $2R$ , виконаному провідником радіуса  $r$ , виникають погонні радіальні сили  $f_{\text{дин}}$ , які прагнуть збільшити радіус витка. У поперечному перерізі витка виникає сила  $F_{\text{дин}}$ , яка прагне розірвати виток. Ця сила складається з геометричної суми сил  $f_{\text{дин}}$ , що діють на чверть витка.

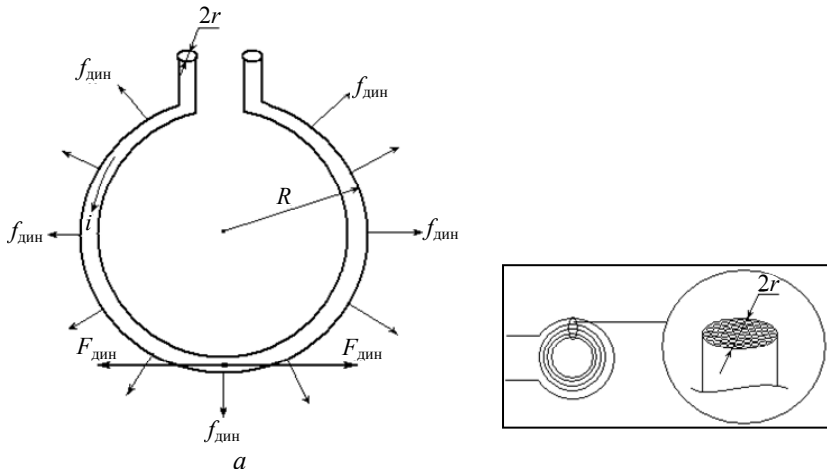


Рис. 2.7

Якщо  $R \gg r$ , то силу  $F_{\text{дин}}$  розраховують за формулою

$$F_{\text{дин}} = 10^{-7} \cdot i^2 \left( \ln \frac{8 \cdot R}{r} - 0,75 \right). \quad (2.2)$$

Якщо поперечний переріз провідника прямокутний, то у формулу (2.2) замість останньої складової  $-0,75$  підставляють  $+0,5$ .

У разі, коли загальний виток (рис. 2.7, б) складається з  $W$  витків дроту, які складають даний переріз з радіусом  $r$ , у формулі (2.2) необхідно взяти  $i = i' \cdot W$ , де  $i'$  – струм в одному дроті.

У котушках електричних апаратів, окрім сил усередині витка, існують і електродинамічні сили між витками (рис. 2.8). Причому, якщо струми у витках течуть в одному напрямку, то витки прагнуть наблизитися один до одного.

За рівних радіусів обох витків  $R$ , віддалених на відстань  $h$  один від одного, силу зближення можна визначити за формулою

$$F_{\text{дин}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \frac{R}{h}.$$

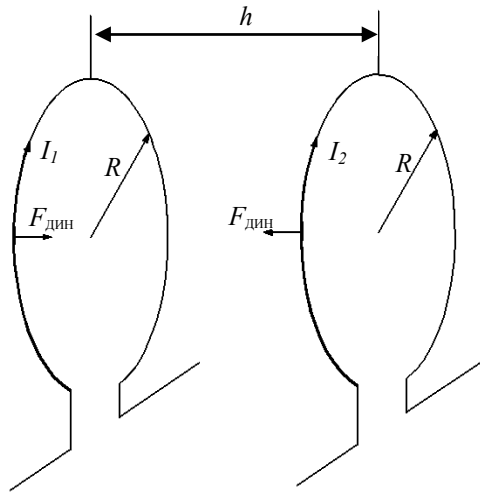


Рис. 2.8

**Приклад.** Знайти силу взаємодії між двома витками з рівними радіусами  $R = 25$  см, віддаленими один від одного на відстань  $h = 2$  см, якщо через них тече струм  $12$  кА.

$$F_{\text{дин}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^3 \frac{0,25}{0,02} = 2200 \text{ Н} \approx 220 \text{ кг}.$$

Можна зробити висновок, що електродинамічні сили в котушці спрямовані так, щоб стиснути котушку уздовж довжини і збільшити її діаметр (рис. 2.9).

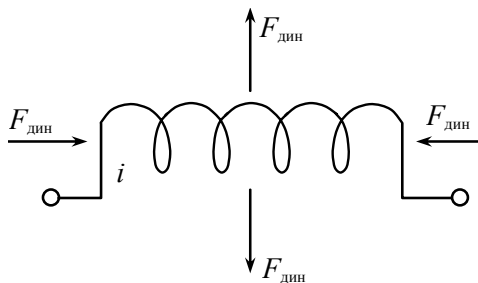


Рис. 2.9

### ■ Розділ 3

## ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

### 3.1. Проблема нагрівання електричних апаратів

Як тільки через електричний апарат починає текти струм, у той самий час певна частина електричної енергії, яка проходить через апарат, перетворюється на теплову, унаслідок чого апарат нагрівається. У загальному випадку одна частина теплової енергії витрачається на нагрівання окремих частин та всього апарата, інша – розсіюється у навколишнє середовище. Нагрівання електричних апаратів є актуальною і досить складною проблемою з наступних причин.

*По-перше*, у міру підвищення температури струмоведучих частин також нагрівається і поруч розміщена ізоляція. Висока температура є однією з головних причин старіння електричної ізоляції, тобто незворотного погіршення її властивостей у процесі роботи. У разі старіння ізоляція стає крихкою, і в ній з'являються тріщини та пори, які приводять до зниження її електричної міцності. Окрім того, на старіння ізоляції впливають перепади температури по товщині ізоляції. Значні перепади температури викликають надмірні механічні напруження в ізоляції, унаслідок вона тріскається. Наприклад, за тривалого перевищення температури ізоляції лише на  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (вище за номінальну) термін придатності її використання скорочується вдвічі.

*По-друге*, з підвищенням температури підсилюється хімічна взаємодія матеріалу контакту з газами, парами води та іншими речовинами, які є в атмосфері. Унаслідок цього на поверхнях контакту швидко утворюються різні плівки, які суттєво збільшують перехідний опір контактів. Це, своєю чергою, призводить до ще більшого їх нагрівання.

*По-третє*, унаслідок значного нагрівання помітно знижується механічна міцність металів, використаних у конструкції апарата. Наприклад, за підвищення температури від 100 до 250 °С механічна міцність міді знижується на 40 %. Як відомо (див. підрозд. 2.1), за КЗ в електричних апаратах виникають значні електродинамічні зусилля. У результаті одночасної втрати механічної міцності внаслідок швидкого прогрівання до 200–300 °С ці зусилля можуть призвести до руйнування апарата.

Таким чином, нагрівання електричних апаратів значною мірою визначає його надійність. Для тривалої безвідмовної роботи електричний апарат не повинен нагріватися вище за ті температури, які були прийняті при його проектуванні, на які їх проектували.

Значення граничнодопустимої температури для різних класів ізоляції за тривалої роботи подані у табл. 3.1 [15].

Таблиця 3.1

Клас нагріво-стійкості	Температура, °С	Характеристика основних груп електроізоляційних матеріалів, відповідно до даного класу нагріво-стійкості
Y	90	Непросочені і не занурені у рідкий електроізоляційний матеріал волокнисті матеріали із целюлози, бавовни та шовку, а також інші матеріали даного класу та інші з'єднувальні матеріали
A	105	Просочені або занурені у рідкий електроізоляційний матеріал волокнисті матеріали із целюлози, бавовни та шовку, а також відповідні інші з'єднувальні матеріали
E	120	Деякі синтетичні та органічні плівки, а також інші матеріали даного класу та інші поєднання матеріалів
B	130	Матеріали на основі слюди (зокрема на органічних підкладках), азбесту та скловолокна, використовувані з органічними зв'язувачами та просочуваними сполуками

Закінчення табл. 3.1

Клас нагріво-стійкості	Температура, °С	Характеристика основних груп електроізоляційних матеріалів, відповідно до даного класу нагріво-стійкості
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту чи скловолокна, використовувані у поєднанні з <i>синтетичними</i> зв'язувачами та просочуваними сполуками, а також інші матеріали даного класу та інші поєднання матеріалів
H	180	Матеріали на основі слюди, азбесту чи скловолокна, використовувані у поєднанні з <i>кремнійорганічними</i> сполуками та просочуваними сполуками, кремнійорганічні еластомери, а також інші матеріали даного класу та інші поєднання матеріалів
C	180–250	Слюда, керамічні матеріали, скло, кварц, шифер, кремнійорганічні смоли, мікалекс та ін.

Частину електричної енергії, яка перетворюється на теплову, називають *втратами* – підкреслюючи цим, що дану частину енергії не використовують корисно. Тому необхідно проектувати електричні апарати так, щоб ці втрати були мінімальними.

### 3.2. Джерела тепла в електричних апаратах

В електричних апаратах є такі конструктивні елементи, які можуть бути джерелами виділення тепла, а саме:

- струмоведучі частини (провідники), в яких втрати пропорційні квадрату струму;
- магнітопроводи трансформаторів та електромагнітів, де втрати зумовлені вихровими струмами та явищем гістерезису, пропорційні квадрату частоти;
- ізоляція електроапаратів, втрати в діелектриках пропорційні квадрату напруги;
- масивні феромагнітні деталі апаратів, розміщених у сильному магнітному полі.

**Втрати у струмоведучих частинах за постійного струму.** За постійного струму нагрівання здійснюється тільки за рахунок активного опору струмопроводу. Потужність  $P_{\text{в}}$  виділена у провіднику з опором  $R_{\text{в}}$ , розраховують за відомою формулою

$$P_{\underline{}} = I^2 \cdot R_{\underline{}},$$

де  $R_{\underline{}}$  – активний опір постійному струму,  $R_{\underline{}} = \rho l / S$  ( $\rho$  – питомий опір провідника,  $l$  і  $S$  відповідно його довжина та площа перерізу).

Відомо також, що питомий опір суттєво залежить від температури. Тому в обчисленнях необхідно коригувати значення  $\rho$ . Наприклад, питомий опір міді за температури 20 °С дорівнює 0,0178 Ом·мм<sup>2</sup>/м, а за температури 100 °С він становить 0,0233 Ом·мм<sup>2</sup>/м, тобто збільшується на 30 %. Алюміній має  $\rho_{20} = 0,0283$  і  $\rho_{100} = 0,0371$  Ом·мм<sup>2</sup>/м (збільшення на 31%).

**Приклад.** Визначити потужність втрат у рухомому мідному контактні вимикача, який має форму стрижня, у якому  $l = 1$  м,  $D = 20$  мм, якщо в момент КЗ у ньому тече струм 50 кА. Температуру стрижня взяти за 100 °С.

Опір стрижня визначаємо з формули

$$R_{\underline{}} = \frac{\rho_{100} \cdot l}{\pi \cdot r^2} = \frac{2,33 \cdot 10^{-2} \cdot 1}{3,14 \cdot 10^2} = 0,74 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Потужність втрат

$$P_{\underline{}} = I^2 \cdot R_{\underline{}} = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,74 \cdot 10^{-4} = 184 \text{ кВт.}$$

**Втрати у струмоведучих частинах за змінного струму.** За змінного струму втрати у струмоведучих частинах більші, ніж за постійного струму за тих самих умов. Зростання опору відбувається за рахунок двох явищ: поверхневого ефекту та ефекту близькості.

*Поверхневий ефект* (скін-ефект) – явище витискання струму від середини провідника до поверхні, унаслідок чого найбільшу густину струму спостерігають на поверхні провідника. У міру переміщення до центру густина струму швидко спадає, тобто середина провідника ніби не проводить електричного струму. Це явище можна уявити як зменшення перерізу провідника, тобто збільшення опору, це створює додаткові втрати.

Коефіцієнт додаткових втрат, зумовлений поверхневим ефектом, визначають за формулою

$$K_{\text{п.е}} = \frac{R_{\sim}}{R_{\underline{}}}.$$

Значення коефіцієнта  $K_{\text{п.е}}$  зростає з підвищенням частоти струму та зменшенням питомого опору провідника. Значний вплив на

величину  $K_{п.е}$  має форма та розміри провідника: чим товщий провідник, тим сильніше виявлений поверхневий ефект. Залежно від частоти та розмірів провідника кількісне значення коефіцієнта лежить у межах 1...3. В інженерній практиці  $K_{п.е}$  визначають з допомогою спеціальних кривих [17].

Поверхневий ефект спостерігають у всіх металів, які використовують як провідники (мідь, алюміній, сталь та ін.), але у феромагнітних матеріалах (сталь, залізо) завдяки суттєвій їх магнітній проникності поверхневий ефект виявляється сильніше ( $K_{п.е} = 4...8$ ), тому феромагнітні матеріали нечасто використовують як струмоведучі частини електричних апаратів.

*Ефект близькості.* Розглянемо два паралельних провідники змінного струму (рис. 3.1). Провідник  $A$  зі струмом  $I_A$  знаходиться у змінному магнітному полі  $\Phi_B$  провідника  $B$  зі струмом  $I_B$ .

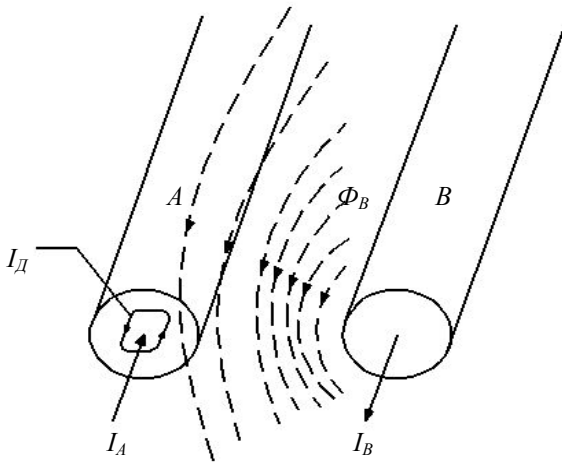


Рис. 3.1

У тілі провідника  $A$  виникає електрорушійна сила самоіндукції і утворюється струм  $I_d$ , який геометрично приплюсований до основного струму  $I_A$ . У результаті густина струму у провіднику  $A$  на його зріз неоднорова. Якщо струми у провідниках  $A$  і  $B$  спрямовані зустрічно, то їх густина у ближчих один до одного шарів провідників збільшується, а в дальших зменшується. Якщо струми  $I_A$  і  $I_B$  течуть в одному напрямку, то густина струму у віддалених шарах підвищується. Це явище викликає зміну опору провідника і,



переважно спричиняє утворення додаткових втрат, які вираховуються з допомогою коефіцієнта ефекту близькості:

$$K_{e.б} = \frac{R_{\sim}}{R_{\sim\text{од}}},$$

де  $R_{\sim}$  – активний опір провідника, що знаходиться у магнітному полі іншого провідника;  $R_{\sim\text{од}}$  – активний опір одинокого провідника.

Ефект близькості посилюється з підвищенням частоти струму та електричної провідності матеріалу. Коефіцієнт  $K_{e.б}$  також залежить від взаємного розташування провідників і їх форми. Числове значення коефіцієнта  $K_{e.б}$  знаходять за спеціальними графіками [17].

Узагальнений вплив ефекту близькості та поверхневого ефекту на зміну опору провідника, коли у них тече змінний струм, можна записати у вигляді:

$$R_{\sim} = K_{п.е} K_{e.б} R_{=} = K_{\text{дод}} R_{=},$$

де  $K_{\text{дод}} = K_{п.е} K_{e.б}$  – коефіцієнт додаткових втрат у провіднику за змінного струму.

**Втрати у магнітопроводах.** У магнітопроводах, у яких замикаються змінні магнітні потоки статорів і роторів електричних двигунів, трансформаторів, електромагнітів та інших електротехнічних пристроїв, виникають втрати, які називають *втратами у сталі*  $P_{ст}$ . Ці втрати зумовлені наявністю вихрових струмів і явищем гістерезису.

*Вихрові струми (струми Фуко).* Розглянувши рис. 3.2, можна пояснити фізику виникнення вихрових струмів. Якщо суцільний феромагнітний стрижень пронизується змінним магнітним потоком  $\Phi_{\sim}$ , то під дією цього потоку у тілі стрижня індукується електрорушійна сила, яка, своєю чергою викликає виникнення вихрових струмів  $i_v$ . Далі, вихрові струми

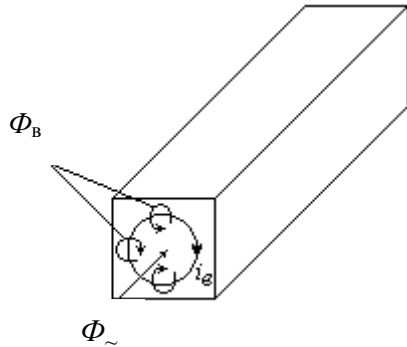


Рис. 3.2

утворюють свої магнітні потоки  $\Phi_v$ , які протидіють зміні основного магнітного потоку  $\Phi_{\sim}$ .

Вихрові струми, які циркулюють у тілі магнітопроводу, нагрівають його. Втрати від вихрових струмів  $P_v$  можна обчислити за виразом:

$$P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot G,$$

де  $k_v$  – коефіцієнт втрат від вихрових струмів;  $f$  – частота струму, Гц;  $B_m$  – максимальне значення магнітної індукції у магнітопроводі, Тл;  $G$  – маса магнітопроводу, кг.

Для трансформаторних сталей, які застосовують в електричних апаратах,  $k_v = 0,4 \dots 1,2$ .

Для зменшення втрат від вихрових струмів, магнітопроводи електричних пристроїв, які працюють на змінному струмі, виконують *шихтованими* – виготовленими з тонких пластин завтовшки 0,2–0,5 мм, або з феритів. Для ізоляції пластин однієї від іншої на них з одного боку наносять лак.

Пластини розміщують уздовж магнітних силових ліній, розрізуючи контур вихрового струму (рис. 3.3). У результаті цього в багато разів зростає опір кола вихрового струму, за рахунок чого зменшуються втрати.

*Втрати на гістерезис.* Магнітопровід з феромагнітного матеріалу пронизаного змінним магнітним потоком, безперервно перемагнічується. Під час такого процесу виникає явище магнітного гістерезису – запізнення зміни магнітної індукції  $B$  від зміни напруженості зовнішнього поля  $H$  (рис. 3.4, на лінії петлі гістерезису).

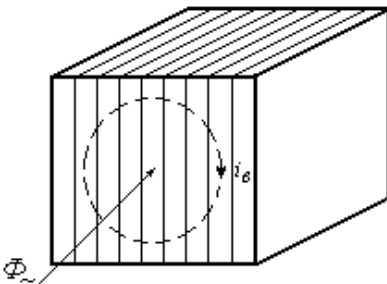


Рис. 3.3

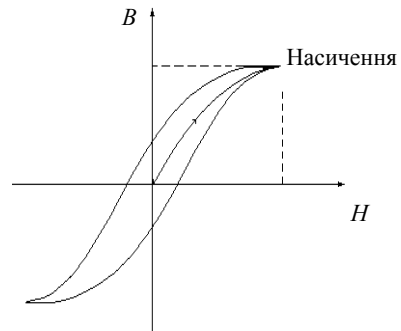


Рис. 3.4

За перемагнічування виконується робота, і частина енергії втрачається за рахунок виділеного тепла. Величина втрат на гістерезис

пропорційна площі петлі гістерезису. Для зменшення втрат від гістерезису застосовують магнітом'які сталі, які мають вузьку петлю гістерезису (електротехнічні сталі).

Втрати від гістерезису визначають за виразом:

$$P_{\Gamma} = k_{\Gamma} \cdot f \cdot B_m^{1,6} \cdot G,$$

де  $k_{\Gamma}$  – коефіцієнт втрат від гістерезису,  $k_{\Gamma} = 1,9 - 2,6$  і залежить від матеріалу;  $f$  – частота струму, Гц;  $B_m$  – максимальне значення магнітної індукції у магнітопроводі, Тл;  $G$  – маса магнітопроводу, кг.

Отже, у сталевому магнітопроводі, у якому замикається змінний магнітний потік, виникають втрати, спричинені вихровими струмами та гістерезисом, тому втрати у сталі складаються із суми цих втрат. Тобто,  $P_{\text{СТ}}$  визначається за виразом:

$$P_{\text{СТ}} = P_{\text{В}} + P_{\Gamma} = (k_{\text{В}} \cdot f \cdot B_m^2 + k_{\Gamma} \cdot B_m^{1,6}) \cdot f \cdot G.$$

**Втрати у феромагнітних конструкційних деталях.** Якщо поблизу провідника  $A$  розміщена масивна феромагнітна конструкційна деталь  $B$ , то у ній також виникають вихрові струми та явище гістерезису. Чим ближче розміщена деталь до провідника, тим більший магнітний потік пронизує її (рис. 3.5).

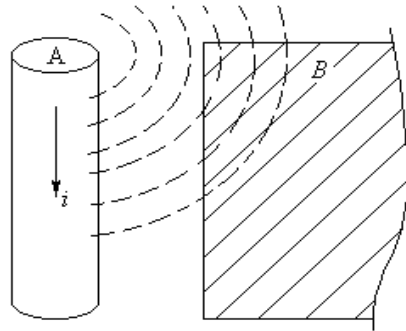


Рис. 3.5

Вихрові струми можуть нагрівати деталі до високих температур. На цьому принципі заснований метод високочастотного розігрівання та плавлення металів. Для зменшення втрат у масивних феромагнітних деталях використовують такі конструктивні рішення:

- збільшують відстань від провідника зі струмом до феромагнітної деталі (завдяки чому зменшується її магнітний потік);
- на шляху магнітного потоку ставлять немагнітні перешкоди (при цьому магнітний опір значно підвищується, а магнітний потік зменшується);
- на шляху магнітного потоку встановлюють короткозамкнений виток (утворюється додатковий магнітний опір);

– за струмів вищих ніж 1000 А масивні конструкційні деталі виготовляють з немагнітних матеріалів (немагнітного чавуну, алюмінієвих сплавів, латуні та ін.).

**Втрати в ізоляції високовольтних апаратів.** Ізоляцію електричних апаратів можна розглядати як конденсатор, одною з обкладок якого є струмоведучі частини, а іншою – заземлені елементи апарата. Між ними прикладена фазна напруга  $U_{\phi}$ . У цьому випадку втрати в ізоляції (діелектрику) можна визначити з допомогою виразу:

$$P_{iz} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U_{\phi}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

де  $f$  – частота струму, Гц;  $C$  – ємність ізоляції, Ф;  $U_{\phi}$  – діюча фазна напруга, В;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута діелектричних втрат.

Для кращих ізоляційних матеріалів, які застосовують на високій частоті та високій напрузі,  $\operatorname{tg} \delta = 10^{-3} - 10^{-4}$ . Для ізоляції середньої якості  $\operatorname{tg} \delta = 10^{-1} - 10^{-2}$ .

Діелектричні втрати пропорційні квадрату напруги, тобто різко підвищуються з підвищенням напруги. Наприклад, діелектричні втрати в кабелях 6 – 10 кВ мізерно малі, ними нехтують під час теплових розрахунків. У кабелях 35 кВ втрати в ізоляції становлять тільки 1,5 % від втрат в струмоведучій жилі, в кабелях 110 кВ втрати підвищуються до 10 %, а за 500 кВ – уже перевищують втрати в жилі.

### 3.3. Відведення тепла від нагрітого тіла

Відомо, що передавання тепла завжди відбувається від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і відбувається доти, доки температура тіл не вирівняється.

Розрізняють три види передавання тепла:

- теплопровідність;
- конвекція;
- теплове випромінювання (променеве випромінювання).

В електричних апаратах теплопередавання відбуваються усі три способи, які доповнюють один одного, тобто має місце різноскладний теплообмін. Розглянемо кожен вид теплопередавання.

**Теплопровідність.** Теплопровідністю називають явище передавання тепла від однієї, більш нагрітої частини тіла, до другої за їх безпосереднього дотику. Теплопровідність характерна для твердих тіл. У металах теплопровідність здійснюється за рахунок руху електронів.

Уведемо деякі поняття. Кількість тепла, передавана від більш нагрітої частини тіла  $A$  (рис. 3.6) до менш нагрітої  $B$  за одиницю часу, називають *тепловим потоком*  $\Phi_T$  (Вт).

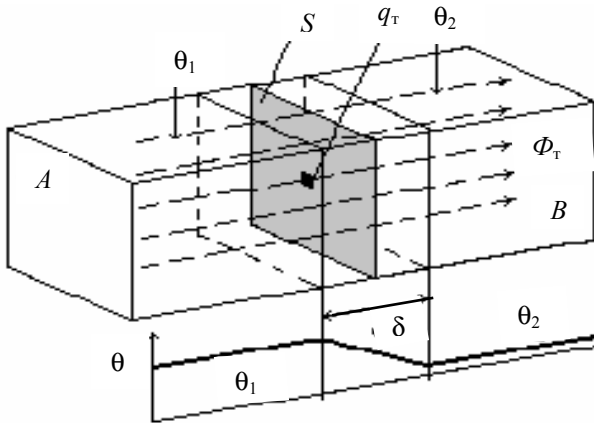


Рис. 3.6

Кількість тепла, що проходить через одиницю поверхні (перерізу) за одиницю часу, називають *густиною теплового потоку*  $q_T$  (Вт/м<sup>2</sup>).

Тепловий потік тим більший, чим більший перепад температури  $\theta_1 - \theta_2$ , чим більша площа  $S$ , через яку передається тепло, й обернено пропорційний товщині шару  $\delta$ , де спостерігають зміну температури. Він також залежить від теплопровідних властивостей середовища, які вираховують з допомогою спеціального коефіцієнта  $\lambda_T$  – *коефіцієнта теплопровідності речовини* (Вт/м<sup>2</sup> град). Значення коефіцієнта теплопровідності для деяких речовин такі: тканина бавовняно-паперова – 0,07; дуб – 0,2; бетон – 0,7; скло – 0,8; сталь – 50; алюміній – 200; мідь – 390; срібло – 430.

Тоді 
$$\Phi_T = \lambda_T \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta} S.$$

Після перетворення матимемо

$$\Phi_T = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{\delta}{\lambda_T \cdot S}} = \frac{\Delta\theta}{R_T},$$

де  $\Delta\theta$  – різниця температур;  $R_T$  – тепловий опір, який дорівнює  $\frac{\delta}{\lambda_T S}$ .

Можна помітити, що закономірність розповсюдження тепла в речовині аналогічна до закону Ома для електричних кіл.

$$\text{Для електричних кіл: } I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = \frac{U}{R}; \quad R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}.$$

$$\text{Для теплових кіл: } \Phi_T = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_T} = \frac{\Delta\theta}{R_T}; \quad R_T = \frac{\delta}{\lambda_T S}.$$

Кількість тепла  $A$  (енергії), що передається тепловим потоком за час  $t$ , дорівнюватиме:

$$A(t) = \Phi_T \cdot t \text{ (Дж)}.$$

**Конвекція.** Контактуюча поверхня нагрітого тіла  $A$  з прилеглим газом (рідиною)  $B$  змушує нагріватись близькі до поверхні тіла шари газу. Нагрітий газ стає легшим та піднімається вгору і виносить узятє у тіла  $A$  тепло (рис. 3.7). Такий процес називають *віддаванням тепла шляхом природної конвекції*.

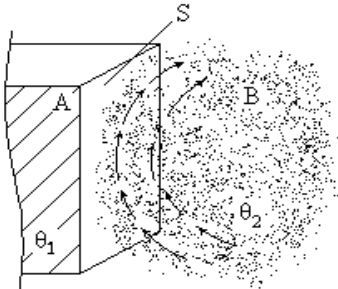


Рис. 3.7

Якщо швидкість руху газу (рідини) збільшити, наприклад, з допомогою вентиляторів (насосів), то інтенсивність забирання тепла підвищиться – такий процес називають *штучною конвекцією*.

Із фізики відомо, що рух газу (рідини) може бути як *ламінарним*, під час якого потоки газу рухаються паралельно, практично без змішування, так і *турбулентним* (вихороподібним), коли відбувається інтенсивне змішування газу (рідини). Під час турбулентного руху за рахунок перемішування з нагрітої поверхні віддається набагато більша кількість тепла.

Кількість тепла, винесеного конвекцією за одиницю часу, можна визначити за виразом:

$$\Phi_K = \alpha_K \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot S,$$

де  $\Phi_K$  – тепловий потік, винесений за рахунок конвекції з поверхні площею  $S$  ( $\text{м}^2$ ) за різниці температур нагрітого тіла  $\theta_1$  та холодного газу  $\theta_2$ , Вт;  $\alpha_K$  – коефіцієнт тепловіддачі під час конвекції,  $\text{Вт/град} \cdot \text{м}^2$ .

Значення коефіцієнта  $\alpha_k$  залежить від багатьох факторів:

- температури, в'язкості та теплоємності середовища, що оточує нагріте тіло;
- швидкості руху цього середовища;
- геометричних розмірів, форми охолоджуваної поверхні й її температури та ін.

Тому, цей коефіцієнт переважно визначають дослідним шляхом.

Наведемо значення  $\alpha_k$  для деяких конструкцій [17]:

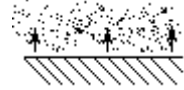
- а) для вертикальної площини в трансформаторному маслі

$$\alpha_k = 43 \cdot (\theta_1 - \theta_2)^{0,25};$$



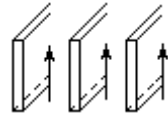
- б) для горизонтальної поверхні в повітрі

$$\alpha_k = 3,25(\theta_1 - \theta_2)^{0,25};$$



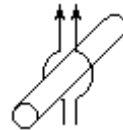
- в) для плоских шин в повітрі, установлених на ребро

$$\alpha_k = 1,5(\theta_1 - \theta_2)^{0,35};$$



- г) для горизонтальних круглих провідників діаметром  $d = 10 - 80$  мм

$$\alpha_k = 3,5(10/d)^{0,25} (\theta_1 - \theta_2)^{0,25}.$$



**Теплове випромінювання.** З фізики відомо, що нагріте тіло випромінює в навколишнє середовище електромагнітні коливання, що мають довжину хвиль від інфрачервоного до ультрафіолетового діапазонів. При цьому нагріте тіло віддає певну кількість енергії (тепла). Цей спосіб теплопередавання називають *тепловим випромінюванням* або *променевим випромінюванням* (рис. 3.8).

Кількість тепла, віддана випромінюванням за одиницю часу, називають *променевим потоком*  $\Phi_{пр}$  (Вт) і визначають за законом Стефана-Больцмана

$$\Phi_{пр} = K_b \left[ \left( \frac{\theta_1}{1000} \right)^4 - \left( \frac{\theta_2}{1000} \right)^4 \right] S,$$

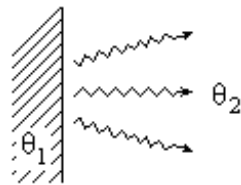


Рис. 3.8

де  $K_v$  – коефіцієнт теплового випромінювання, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) (значення якого наводять у довідниках);  $\theta_1$  – температура тіла, К;  $\theta_2$  – температура навколишнього середовища, К;  $S$  – площа поверхні випромінювання, м<sup>2</sup>.

Для того щоб інтенсифікувати віддання тепла випромінюванням, необхідно підсилити чорноту поверхні та збільшити розміри тіла випромінювання. Щоб зменшити тепловіддачі випромінюванням застосовують спеціальні екрани, наприклад, з тонкої пластини білого кольору. Такі екрани приблизно вдвічі зменшують передавання тепла випромінюванням.

**Узагальнення процесів теплопередавання.** У загальному випадку тепловіддача з нагрітої частини обладнання відбувається всіма трьома розглянутими вище способами. Проте для конкретних конструкцій електротехнічних пристроїв це один чи два види теплопередавання.

У середині електричних апаратів та у їх твердих елементах (магнітопроводу, обмотках, ізоляції і деталях конструкції) передавання тепла відбувається шляхом теплопровідності.

Передавання тепла з поверхні різних апаратів і пристроїв здійснюється за рахунок випромінювання та конвекції. Наприклад, під час розрахунків нагрівання довгих струмоведучих шин теплопровідністю можна знехтувати.

У випадку провідників, занурених у масло, беруть у розрахунок тільки конвекційний процес.

Для спрощення розрахунків тепловіддачі конкретних конструкцій вводять узагальнюючий коефіцієнт  $K_T$  – *коефіцієнт теплообміну* (Вт/град·м<sup>2</sup>), що враховує переважний різновид теплопередавання конкретної конструкції, різницю температур і тип охолодження середовища.

Тоді кількість тепла, що віддає нагріте тіло в навколишнє середовище за одиницю часу (тобто потужність), можна виразити простим співвідношенням

$$\Phi = K_T \cdot S \cdot \tau, \quad (3.1)$$

де  $\Phi$  – узагальнений тепловий потік;  $S$  – площа поверхні тіла;  $\tau$  – різниця температур, що дорівнює  $\theta_1 - \theta_2$ .

У табл. 3.2 наведені числові значення  $K_T$  за природної конвекції.



Таблиця 3.2

Елементи електрообладнання	Коефіцієнт теплообміну, Вт/град·м <sup>2</sup>	
	у повітрі	у маслі
Пакет листової сталі	10–12,5	70–90
Обмотка з паперовою ізоляцією	10–12,5	25–35
Порцеляновий ізолятор у маслі	–	50–150
Лакована поверхня	12–16	–
Мідні прямокутні шини	6–9	–
Горизонтальні круглі мідні стрижні	8,5–13	–

### 3.4. Нагрівання та охолодження апаратів у різних режимах роботи

**Рівняння теплового балансу.** Виділена в електричному апараті енергія частково йде на підвищення його температури, а іншу частину відводять у навколишнє середовище, тобто має місце рівняння теплового балансу

$$P \cdot dt = C \cdot d\tau + \Phi \cdot dt,$$

де  $P$  – потужність теплових втрат в апараті (складові цих втрат розглянуті в п. 3.2), Вт. Перший доданок враховує кількість енергії, поглинутої апаратом, за підвищення його температури на  $d\tau$ . Він залежить від теплоємності тіла  $C$ , яка дорівнює  $C = c \cdot M$ , де  $c$  – питома теплоємність матеріалу, Вт·с/кг·град;  $M$  – маса тіла, кг. Другий доданок враховує кількість тепла, що віддає у навколишнє середовище загальний тепловий потік  $\Phi$  за час  $dt$  (див. формулу (3.1)). Тоді

$$P \cdot dt = c \cdot M \cdot d\tau + K_{\tau} \cdot S \cdot \tau \cdot dt. \quad (3.2)$$

Якщо взяти, що потужність в апараті стала  $P = \text{const}$ , то розв'язок рівняння (3.2) відносно  $\tau$  набуде такого вигляду:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} + \tau_y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

де  $\tau_0$  – перевищення температури на початку процесу ( $t = 0$ );  $\tau_y$  – усталене перевищення температури;  $T$  – стала часу нагрівання, дорівнює

$$T = \frac{c \cdot M}{K_{\tau} \cdot S}.$$

Фізично  $T$  являє собою час, за який тіло нагріється до усталеної температури, якщо не буде віддання температури в навколишнє середовище (рис. 3.9).

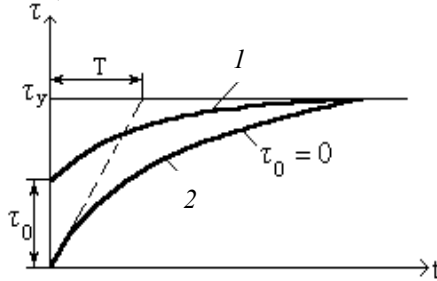


Рис. 3.9

**Нагрівання з холодного стану.** Якщо процес нагрівання розпочинається коли апарат у холодному стані, коли він має однакову з навколишнім середовищем температуру ( $\tau_0 = 0$ ), нагрівання відбувається за експонентою (рис. 3.9, крива 2) відповідно до виразу

$$\tau = \tau_y \cdot (1 - e^{-t/T}).$$

**Усталений режим нагрівання.** Якщо протягом тривалого часу температура апарата не змінюється, то вважають, що настав усталений тепловий режим. В усталеному режимі тіло апарата уже підігріте і все виділене в ньому тепло він віддає у навколишнє середовище, тобто перший доданок виразу (3.2) вирахає теплоємність і дорівнює нулю. Тому рівняння (3.2) набуде вигляду:

$$Pdt = K_T \cdot S \cdot \tau \cdot dt.$$

Звідки

$$\tau_y = \frac{P}{K_T \cdot S}.$$

Теоретично, температура сягає усталеного режиму за значний термін часу. Але практично вважають, що  $\tau = \tau_y$  (сягає 0,98...993  $\tau_y$ ) уже через 4...5  $T$ .

**Процес охолодження.** Якщо після усталеного режиму, коли температура апарата досягла  $\tau_y$ , припинити пропускання через нього струму, то припиниться виділення тепла  $Pdt = 0$ , тіло почне охолоджуватися і рівняння (3.2) набуде вигляду:

$$0 = c \cdot M \cdot d\tau + K_T \cdot S \cdot \tau \cdot dt,$$

розв'язком якого щодо  $\tau$  є:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-t/T}.$$

Крива охолодження є дзеркальним відображенням кривої нагрівання, що також відбувається за експоненційним законом (рис. 3.10).

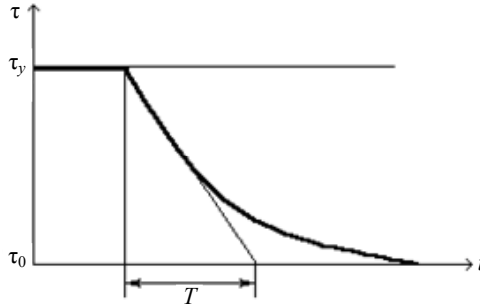


Рис. 3.10

**Нагрівання за короткотривалого режиму.** За режиму короткотривалого  $t_{\text{кор}}$  пропускання через апарат допустимого струму  $I_{\text{доп}}$  температура апарата не встигає досягти усталеного значення. Потім апарат вимикається й охолоджується до температури навколишнього середовища (перевищення температури  $\tau_0 = 0$ ).

Графічно цей процес відображає крива 1 (рис. 3.11). Тобто за струму  $I_{\text{доп}}$  апарат не досягає допустимої температури  $\tau_{\text{доп}}$ , а отже, неефективно використовується за нагрівання.

За тривалого режиму, тривалий допустимий струм  $I_{\text{тр.доп}}$  через апарат вибирають таким чином, щоб усталена температура апарата не перевищувала допустимої  $\tau_y \leq \tau_{\text{доп}}$  для даного типу електричного обладнання.

Очевидно, що за короткотривалого режиму можна пропускати більший струм  $I_{\text{кор}}$ , за проходження якого за час  $t_{\text{кор}}$  температура апарата не перевищує  $\tau_{\text{доп}}$  (рис. 3.11, крива 2). Для характеристики короткотривалого режиму вводять поняття *коефіцієнта перевантаження*

$K_{\text{п}} = \frac{I_{\text{кор}}}{I_{\text{доп}}}$ , який показує, у скільки разів можна збіль-

шити струм за короткотривалого режиму порівняно з тривалим. Величину  $K_{\Pi}$  можна розрахувати за формулою

$$K_{\Pi} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{\text{кор}}/T}}}$$

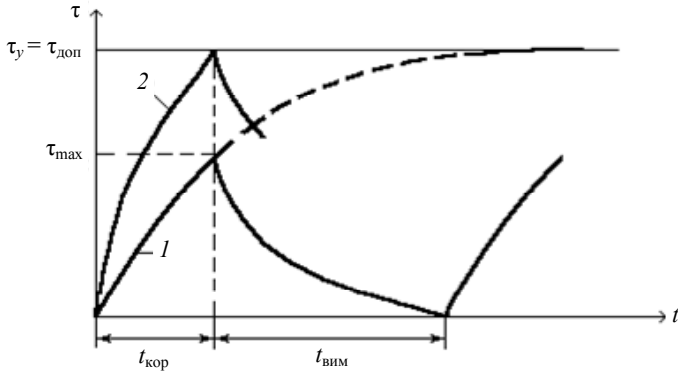


Рис. 3.11

**Нагрівання за повторного короткотривалого режиму.** Повторним короткотривалим називають режим роботи, за якого через апарат тече робочий струм  $I_p$  за час роботи  $t_p$ , і апарат не встигає нагрітися до усталеної температури. Потім на термін паузи  $t_{\Pi}$  струм вимикається, але апарат не встигає охолотитися, і т. ін.

Час  $t_{\Pi} = t_p + t_{\Pi}$  називають *циклом* (рис. 3.12). Повторний короткотривалий режим характеризується показником ПВ  $\% = t_p/t_{\Pi} \cdot 100 \%$ . Поширені значення ПВ 15, 25, 40 та 60 %.

З кожним циклом температура апарата підвищується, однак через кілька циклів процес стабілізується крива 1 (рис. 3.12), але нижче за допустиму температуру  $\tau_{\text{доп}}$ , до якої апарат нагрівся би у разі безперервного пропускання струму  $I_p$ . Тому струм за повторного короткотривалого режиму можна підвищити до значення  $I_{\text{пк}}$ , за якого процес піде за кривою 2 (рис. 3.12).

Якщо ввести аналогічно до короткотривалого режиму коефіцієнт перевантаження

$$K_{\Pi} = \frac{I_{\text{пк}}}{I_{\text{доп}}}, \text{ де } K_{\Pi} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_{\Pi}/T}}{1 - e^{-t_p/T}}}$$

то можна визначити допустимий струм за повторного короткотривалого режиму за формулою

$$I_{пк} = K_{п} \cdot I_{доп} .$$

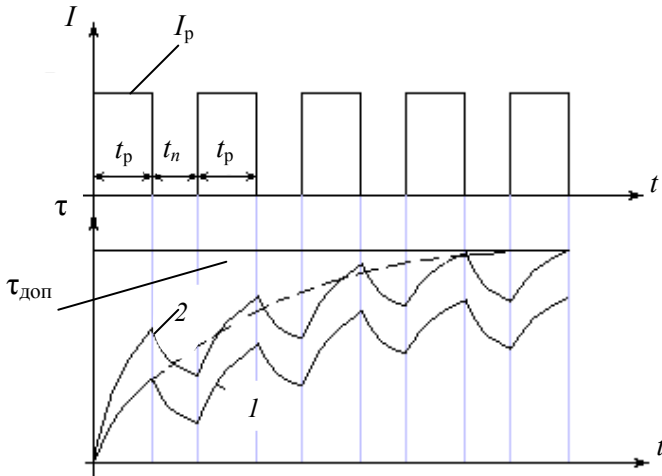


Рис. 3.12

Для різних ПВ коефіцієнт допустимого перевантаження за струмом залежить від відношення часу роботи  $t_p$  до сталої часу  $T$ .

### 3.5. Нагрівання у разі короткого замикання. Термічна стійкість електричних апаратів

Струми КЗ можуть у десятки, а в деяких випадках і в сотні разів перевищувати струми довготривалого режиму, і тільки наявність захисних пристроїв, що обмежують тривалість пропускання струмів КЗ кількома секундами, рятує апарати від неприпустимого перегрівання. За надмірного перевищення температури провідників та частин апаратів можливе розм'якшення і плавлення металу, випалювання ізоляції, руйнування контактів і інші пошкодження.

Для того, щоб система електропостачання працювала надійно, необхідно виключити такі пошкодження. Способи вирішення цієї проблеми можна визначити із рівняння теплового балансу, враховуючи при цьому короткотривалість режиму КЗ. За кілька секунд дії струму КЗ  $I_{кз}$  енергія, яка виділяється в апараті, практично вся йде на його нагрівання, отже тепловіддачею у рівнянні (3.2) можна знехтувати. Тоді маємо:

$$I_{\text{КЗ}}^2 \cdot R \cdot dt = c \cdot M \cdot d\tau. \quad (3.3)$$

Із рівняння (3.3) видно, що зменшити нагрівання апаратів за КЗ можна:

- зменшивши тривалість цього режиму, тобто застосувати швидкодійний захист;

- обмежуючи максимальні величини струмів КЗ в енергосистемах, використовуючи спеціальні *струмообмежувальні реактори* (див підрозд. 12.4);

- збільшуючи масу апарата (небажане рішення, оскільки потребує збільшення металоємності апарата).

Здатність апарата протистояти тепловій дії струму КЗ називають *термічною стійкістю*.

В інженерній практиці електричні апарати перевіряють на термічну стійкість за таким виразом

$$I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{T}} \geq I_{\text{КЗ}}^2 \cdot t_{\text{ВИМ}},$$

де  $I_{\text{T}}$  і  $t_{\text{T}}$  – значення струму та часу термічної стійкості, які подають у довідковій літературі для конкретного типу апарата (величини  $t_{\text{T}}$  бувають 1; 3; 5; та 10 с);  $I_{\text{КЗ}}$  – значення можливого струму КЗ у схемі застосування апарата;  $t_{\text{ВИМ}}$  – час вимкнення струму КЗ.

## ■ Розділ 4

### ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ

#### 4.1. Визначення та класифікація контактів

*Два провідники, які торкаються один одного і призначені для пропускання електричного струму, називають **контактами**. Місце переходу струму з одного провідника в інший називають **електричним контактом**.*

Поверхня твердого тіла, навіть ретельно оброблена, усе ж таки має певні нерівності. Тому за відсутності зусилля, яке буде притискати контакти, вони торкатимуться лише у кількох точках, що призведе до викривлення ліній струму (рис. 4.1, а). Зі збільшенням сили притискання горбки на поверхні контактів деформуються

(частково пружно, частково пластично), та утворюють більшу поверхню, що сприймає тиск, і з'являються нові точки контактування.

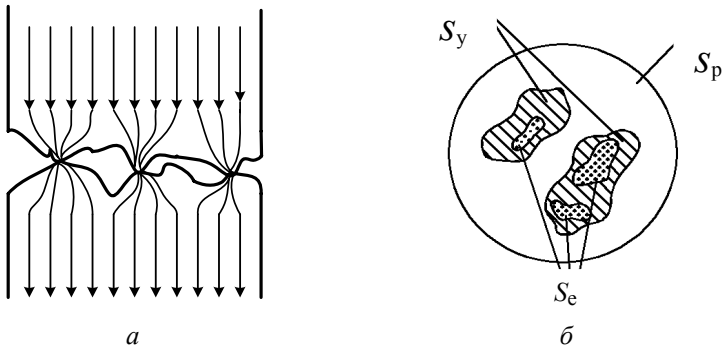


Рис. 4.1

Відомо також, що поверхня металів завжди вкрита окисною плівкою, яка переважно погано проводить електричний струм. Унаслідок стискування частина окисною плівки руйнується, а частина залишається і сприймає тиск. Поверхню контакту згідно зі стандартом [12] поділяють на такі ділянки (рис. 4.1, б):

- *робоча поверхня контакту*  $S_p$ , яка дорівнює геометричній площі поверхні контакту;
- *умовна поверхня контактування*  $S_y$ , яка дорівнює площі поверхні, що сприймає тиск;
- *ефективна поверхня контактування*  $S_e$ , яка дорівнює площі поверхні контакту, що проводить електричний струм.

У загальному випадку  $S_e < S_y < S_p$ , в окремих випадках можна досягти  $S_e = S_y = S_p$ . Однак точно розмежувати ці ділянки важко.

**Класифікація.** Класифікувати різноманітні конструкції контактів можна за такими ознаками:

а) за умовами роботи контакти можна поділити на нерухомі, ковзні (струмознімні) і комутувальні.

*Нерухомі розбірні контакти* в процесі роботи не переміщуються один відносно одного (з'єднання шин, дротів і шин до апаратів тощо). У разі необхідності ці контакти можна роз'єднати для здійснення профілактичних та ремонтних робіт.

*Ковзні контакти* забезпечують струмовідведення від нерухомих до рухомих частин електричних апаратів без порушення кола струму (струмопідвід силових вимикачів, контакти реостатів, щітковий контакт в електродвигунах тощо).

Слід зауважити, що в електричних апаратах для підведення струму до рухомих частин на незначну відстань також використовують гнучкий зв'язок певного перетину (залежно від струму) сплетені з окремих мідних провідників діаметром 0,1 мм у джгути, або складені з мідної фольги товщиною 0,1 мм у гнучкі пакети.

*Комутувальні контакти* забезпечують замикання та розмикання електричного кола (контакти вимикачів, рубильників, автоматів тощо);

б) за формою поверхні контактування контакти поділяють на точкові, лінійні та площинні.

*Точкові контакти* забезпечують контактування на малій поверхні за торкання контактів типу «конус» і «напівсфера» з подібними контактами або площиною. За точкового контактування легко отримати необхідний тиск у місці контактування та зруйнувати окисну плівку. Такий контакт добре фіксується, що забезпечує постійність перехідного опору. Однак завдяки малій площі контактування та важкості відведення тепла при незначній масі, точкові контакти можна використовувати лише за незначних струмів (до одиниць амперів).

*Лінійні контакти* забезпечують контактування вздовж лінії торкання контактів типу «циліндр» та «клин» з подібними контактами або з площиною. У лінійному контакті неважко досягти необхідного тиску в місці контактування й організувати самоочищення за незначного проковзування однієї деталі відносно іншої. Лінійні контакти легко регулювати, вони є основним видом контактів у середньо- та сильнострумових комутаційних апаратах.

*Площинні контакти* забезпечують контактування з багатьма точками поверхні. У площинному контакті, щоб отримати необхідне притискання, потрібно прикласти значно більше зусилля, важко забезпечити самозачищення контактних площин. У зв'язку із цим площинні контакти використовують переважно в нерухомих контактних пристроях;

в) за функціональним призначенням комутувальні контакти можна поділити на основні, дугогасні та допоміжні.



*Основні (робочі) контакти* призначені для тривалого пропускання через них різних робочих струмів і номінального струму і повинні мати невеликий перехідний опір, який буде не набагато змінюватись за окиснення контактів. Номінальні струми основних контактів різних апаратів складають від одиниць до кількох тисяч амперів.

*Дугогасні контакти* призначені для вимкнення значних струмів і струмів КЗ і повинні мати високу дугостійкість. У багатьох типах комутаційних апаратів вдається сумістити функції основних і дугогасних контактів у одному контактному вузлі. Також поширені конструкції, у яких основні та дугогасні контакти виконані окремо.

*Допоміжні контакти* (блок-контакти) слугують для синхронної з основними контактами комутації допоміжних (вторинних) кіл керування та сигналізації. Вони механічно пов'язані з основними контактами. Існують допоміжні контакти на струми від 4 до 63 А.

#### 4.2. Опір контактів

Розглянемо докладніше один із виступів контактів (рис. 4.2, а). У збільшеному вигляді його форма буде приблизно такою, як показано на рис. 4.2, б.

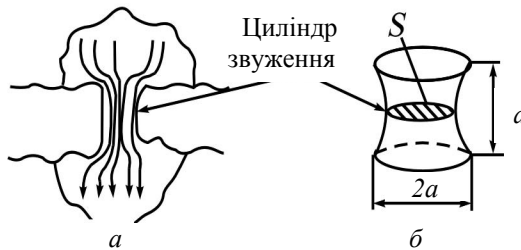


Рис. 4.2

Електричний (перехідний) опір *неокисненого* контакту такої форми визначатимуть, по-перше, наявність сильного звуження шляху струму, по-друге, наявність між комутувальними поверхнями шару плівки, що містить молекули газів та водяної пари, завжди присутніх у повітрі, тобто

$$r_k = r_3 + r_{\text{п}},$$

де  $r_k$  – опір контакту;  $r_3$  – опір звуження;  $r_{\text{п}}$  – опір шару плівки.

**Опір точкового контакту.** За сильного стискання в точковому контакті товщина плівки сягає до молекулярного рівня (20...30 Å) і вже не спричиняє значного опору. Тому для точкового контакту можна взяти

$$r_k \approx r_3.$$

Для з'ясування факторів, що впливають на опір звуження, розглянемо так званий «циліндр звуження» (рис. 4.2, б), який являє собою спрощену модель точкового контакту. Опір циліндра звуження буде залежати від питомого опору матеріалу контактів  $\rho$  і об'єму циліндра звуження. Площа перерізу цього об'єму  $S$  пропорційна квадрату радіуса звуження  $a_3^2$ , а висота (тобто довжина циліндра, що проводить струм) дорівнює приблизно  $a_3$ . Тому опір циліндра звуження буде пропорційний величині  $a_3/a_3^2 = 1/a_3$ .

Дослідним шляхом встановлено, що

$$r_3 = \rho / 2 \cdot a_3. \quad (4.1)$$

З достатньою точністю формула справедлива, якщо діаметр контакту (робоча поверхня  $S_p$ ) перевищує в 15 і більше разів діаметр площі торкання (ефективну поверхню  $S_e$ ). На практиці здебільшого останньої умови дотримуються, тому що розміри площ торкання звичайно не перевершують частки міліметра.

Площа контактування  $S = \pi \cdot a_3^2$  залежить від сили стискання  $F_{ст}$  і твердості матеріалу контакту, яку характеризує коефіцієнт твердості за Брінелем  $\sigma_T$ :

$$S = \pi \cdot a_3^2 = F_{ст} / \sigma_T.$$

Виразимо з останньої формули величину  $a_3$  і підставимо її у вираз (4.1) та отримаємо

$$r_3 = \rho / 2 \sqrt{\frac{F_{ст}}{\sigma_T \cdot \pi}} = \frac{1}{\sqrt{F_{ст}}} \frac{\rho \sqrt{\pi \cdot \sigma_T}}{2} = \frac{K}{F_{ст}^{1/2}}.$$

У загальному вигляді перехідний опір контактів дорівнює

$$r_k \approx r_3 = \frac{K}{F_{\text{ст}}^m},$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу, з якого виготовлені контакти ( $\rho$  та  $\sigma_T$ ) і приблизно дорівнює для свіжозачищеного контакту із : срібла  $0,5 \times 10^{-3}$ , міді  $1 \times 10^{-3}$ , алюмінію  $1,6 \times 10^{-3}$ , латуні  $6,7 \times 10^{-3}$  та заліза  $7,6 \times 10^{-3}$  Ом·Н<sup>0,5</sup>;  $F_{\text{ст}}$  – сила стискання контактів, Н;  $m$  – показник степеня, що залежить від кількості точок дотику і дорівнює для точкового контакту – 0,5; для лінійного – 0,7...0,8; для площинного – 1.

Слід зазначити, що за однакової сили стискання одного і того самого контакту перехідний опір для різних спроб буде змінюватися в широких межах. Це зумовлено індивідуальним, неповторним за кожного стискання рельєфом контактної поверхні. Відхилення (розкид) значень перехідного опору зменшується у міру зростання сили стискання. У загальному випадку у міру зростання контактного стискання  $F_{\text{ст}}$  перехідний опір зменшується (рис. 4.3).

**Опір окисненого контакту.** Опір окиснених контактів може бути в десятки тисяч разів більшим, ніж у свіжозачищених, оскільки у багатьох металів оксидна плівка погано проводить електричний струм; в таких контактах кількість контактних точок (ефективна поверхня контакту) набагато менша. Однак провідність окиснених контактів може виявитись достатньою:

- у разі механічного руйнування оксидів у момент стискання контактів, опір значно зменшиться за взаємного проковзування деталей (самозачищення контактів);

- за електричного пробую крізь тріщини в шарі оксиду.

Останнє явище спостерігають у високовольтних апаратах, де в зоні місцевих електричних розрядів утворюються найтонші ниточки з розплавленого металу.

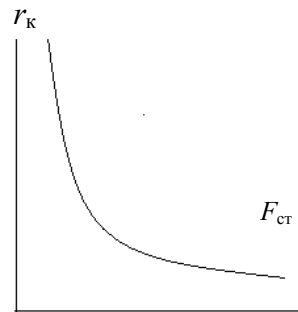


Рис. 4.3

### 4.3. Матеріали, з яких виготовляють контакти

Матеріалам для контактів сучасних електричних апаратів ставлять такі вимоги:

- висока електрична провідність і теплопровідність;
- висока стійкість до корозії у повітряному або іншому середовищах;
- висока дугостійкість (висока температура плавлення та низька ерозостійкість);
- струмопровідність оксидної плівки або стійкість до утворення плівок з високим електричним опором;
- мала твердість оксидної плівки для зменшення необхідної сили стискання;
- висока твердість і механічна міцність для зменшення механічного зношення за частих комутацій;
- легкість механічного оброблення, невисока вартість.

Знайти природний матеріал, що задовольняє такі різні вимоги водночас, практично неможливо.

У контактних пристроях застосовують такі матеріали:

– *срібло*. Завдяки своїй високій електро- та теплопровідності, легкому руйнуванню оксидної плівки за незначних механічних зусиль, срібло могло б широко використовуватись в контактних пристроях. Однак його недостатня дугостійкість (невисока температура плавлення та випаровування) під час пропускання значних струмів і висока вартість значно звужують використання срібла. Срібні (посріблені) контакти використовують у відповідальних колах керування з незначними струмами. В апаратах зі значними струмами використовують срібні накладки на основних контактах, виконаних з міді;

– *мідь*. Задовольняє майже всі зазначені вище вимоги за винятком антикорозійності, низької провідності міцної оксидної плівки та низької температури плавлення. Але створення в контактах тиску вищого за 3 Н і взаємного проковзування дозволяє зруйнувати плівку оксиду міді. Ці якості разом із невисокою вартістю міді зробили її найпоширенішим матеріалом для контактів *комутаційних* пристроїв. Для захисту міді від окиснювання поверхню *ковзних* та *нерухомих* контактів вкривають тонким шаром срібла (20–30 мкм);

– *алюміній*. Через невисоку механічну міцність, низьку дугостійкість та міцну окисну плівку з високим опором, яку практично

неможливо прибрати, алюміній як конструкційний матеріал у *комутувальних* контактах не використовують. Його застосовують у *розбірних нерухомих* контактних з'єднаннях силових дротів, шин та шинопроводах. Алюміній в контакті з міддю утворює гальванічний елемент, що призводить до електрохімічного руйнування контакту;

– *вольфрам*. Висока електрична зносостійкість (дугостійкість), висока ерозостійкість до ерозії та зварювання зумовили широке використання вольфраму в дугогасних контактах за комутації великих струмів (більших за 10 кА). До недоліків вольфраму слід віднести: високий питомий опір, малу теплопровідність, утворення міцних оксидних і сульфідних плівок. Сплави вольфраму з молібденом, платиною та іридієм усувають його головний недолік – високий електричний опір, підвищують його електропровідність вольфраму. Ці сплави широко використовують у контактах на невеликі струми, але з високою частотою вимкнення;

– *металокераміка*. Сплави деяких металів отримати практично неможливо. Тому використовують *металокераміку* – матеріал, отриманий механічним змішуванням порошків двох металів (одного з високою провідністю, іншого – з високою дугостійкістю) та витриманих за високої температури до спікання (метод порошкової металургії).

Композиції з подрібнених порошків (діаметр зерна менший ніж 10 мкм) мають дрібнодисперсну структуру і значну механічну міцність, яка в 1,5–2 рази вища за традиційно застосовувані для цього матеріали.

Найбільш розповсюджені композиції металокераміки: срібло-молібден, срібло-нікель, мідь-вольфрам, мідь-молібден тощо. Металокераміку використовують у *головних* контактах на струми до 600 А, а в *дугогасних* контактах – і на більші струми.

#### 4.4. Нагрівання контактів

Підвищений опір електричного контакту зумовлює його нагрівання під час пропускання струму. Враховуючи рельєфні зміни поверхні контакту за нагрівання (поступове зминання горбків за наявності зусилля стиснення), збільшення опору контактів за підвищення температури можна визначити за формулою

$$r_{\theta} = r_{\text{хол}} \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \Delta\theta \right), \quad (4.2)$$

де  $r_{\theta}$  – опір контакту за температури  $\theta$ ;  $r_{\text{хол}}$  – опір холодного контакту ( $\theta_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );  $\alpha$  – температурний коефіцієнт питомого опору;  $\Delta\theta = \theta - \theta_0$  – перевищення температури контакту над  $\theta_0$ . Коефіцієнт  $2/3$  враховує зниження твердості матеріалу під час нагрівання.

Залежність зміни перехідного опору контакту від температури показана на рис. 4.4. Спочатку, за підвищення температури, опір контактів зростає згідно з виразом (4.2). За температури  $\theta_1$  відбувається розм'якшення металу (для міді  $\theta_1 \approx 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), різко збільшується ефективна площа контактування й опір контакту значно знижується. Подальше нагрівання продовжує збільшувати опір контакту. За температури  $\theta_2$  (для міді близько  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) відбувається розплавлення металу, контакти зварюються, та їх перехідний опір різко знижується.

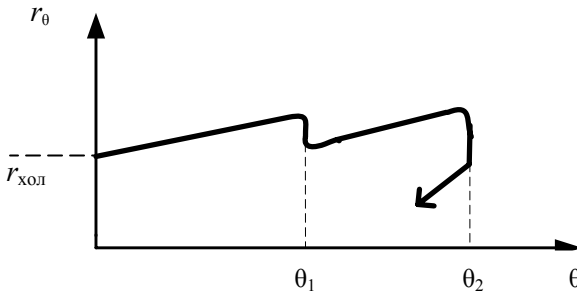


Рис. 4.4

У правильно спроектованих контактах та за дотримання правил їх експлуатації температура поверхонь контактування не повинна перевищувати середньої температури тіла контакту більше ніж на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.5. Електродинамічні сили в контактах

Викривлення ліній струму в місцях звуження (див. рис. 4.1, а) спричиняє появу поздовжньої складової електродинамічного зу-

силля, яке намагається розімкнути контакти. У разі точкового контакту значення електродинамічної сили розімкнення  $F_d$  знаходимо за виразом

$$F_d = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{S_p}{S_e},$$

де  $i$  – миттєве значення струму, який тече через контакти;  $S_p$  – робоча поверхня контактування;  $S_e$  – ефективна площа контактування.

За робочих струмів (до сотень амперів) дія електродинамічних сил розімкнення контактів практично непомітна. Зовсім іншу картину спостерігаємо у разі проходження наскрізних струмів КЗ. Зусилля відштовхування можуть сягати сотень ньютонів і, у разі розімкнення контактів, спричинити між ними електричну дугу струму КЗ, що може вивести апарат із ладу.

Щоб компенсувати електродинамічні зусилля, застосовують різноманітні технічні рішення. На рис. 4.5 зображений приклад компенсації динамічних зусиль  $F_{д2}$  у контактах з допомогою рухомої частини 1. Струми КЗ, що проходять через вигнуте тіло контактування 2, намагаються розімкнути частини 1 та 2, створюючи силу  $F_{д1}$ , спрямовану зустрічно до сили  $F_{д2}$ .

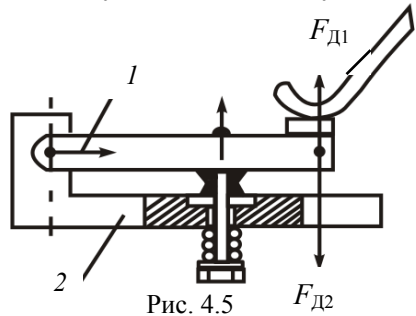


Рис. 4.5

#### 4.6. Конструкції комутаційних контактів

Перш ніж перейти до розгляду високовольтних і низьковольтних контактів зупинимося на двох важливих поняттях, пов'язаних із конструкціями контактів: проміжок між контактами і провал контактів.

*Проміжок між контактами* – відстань між рухомими нерухомими контактами у стані вимкнення комутаційного апарату. У вимкненому стані апарату на контакти припадає *вся напруга* мережі і міжконтактний проміжок повинен витримувати цю напругу не пробиваючись. Величина проміжку безпосередньо залежить від номінальної напруги апарату і використовуваного середовища гасіння

дуги (див. розділ. 5). Низьковольтним повітряним комутаційним апаратам, в яких електрична дуга гаситься безпосередньо в повітрі, досить мати зазор у кілька міліметрів, а високовольтним апаратам – кількадесят сантиметрів. У вакуумних вимикачах 6–10 кВ контакти досить розвести на кілька міліметрів (див. підрозд. 5.5).

*Провал контактів – відстань, на яку переміщуються рухомий нерухомий контакти після моменту замикання.* Наявність провалу контактів дозволяє підвищити надійність контактування особливо в умовах вібрації.

**Конструкції контактів апаратів до 1000 В.** Конструкції комутаційних контактів низьковольтних апаратів різноманітні. Широко розповсюджені *врубні контакти*. Найпростіший із них (рис. 4.6, *а*) складається з нерухомих ламелів 2, виконаних з пружного матеріалу (твердотягнутої міді, латуні тощо). Рухомий ніж 1 на вході в контакт розсуває ламелі. Така конструкція має суттєві недоліки: змінний і значний перехідний опір, неможливість регулювання притискального зусилля, мала стійкість за КЗ і можливість втрати пружності ламелей 2 під час пропускання струму КЗ або у разі поганого контактування (відпалення матеріалу ламелей).

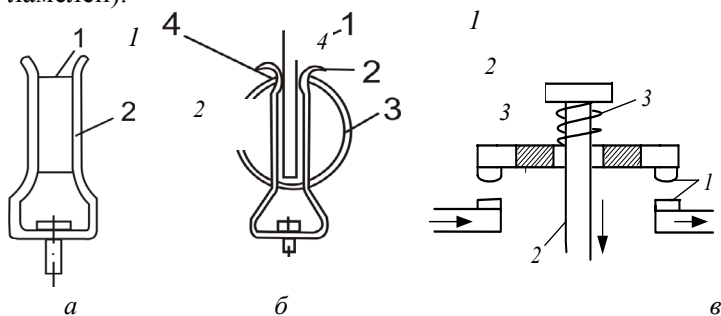


Рис. 4.6

Значно краща конструкція врубних контактів з кільцевою пружиною 3 (рис. 4.6, *б*), де ламелі 2 виконані з контактними виступами 4, які забезпечують лінійне контактування. Врубні контакти використовують у рубильниках, запобіжниках і роз'єднувачах для внутрішнього встановлення.



*Місткові контакти* (рис. 4.6, в) широко використовують у контакторах на середні струми та на магнітних пускачах. Необхідний тиск у контактах забезпечує пружина 3. У них відсутнє проковзування, тому виконувати їх лише з міді не можна. Контактні горбки 1 часто виконують з металокераміки на основі срібла. Головними перевагами місткових контактів є: подвійне розривання, тобто утворення двох електричних дуг в одній фазі, і малий хід штока 2, що дозволяє конструювати малогабаритні контактні пристрої.

*Важільні (плечові) контакти* (рис. 4.7), завдяки тому, що вісі обертання рухомої частини  $Q_1$  і самого контакту  $Q_2$  не збігаються, забезпечують перекошування та проковзування площі контактування. При цьому лінія початкового контактування 1 (або заключного за розімкнення), на якій утворюється дуга, виявляється зміщеною відносно лінії тривалого контактування 2.

Це забезпечує значно краще збереження контактів і уможливує виготовлення їх із міді. Важільні контакти широко використовують у контакторах і автоматах, розрахованих на середні струми.

*Двоступеневі (дворівневі) контакти* (рис. 4.8) виконують із метою запобігання підгоряння основних контактів за розімкнення і виникнення сильної дуги. Такі контакти складаються з паралельно ввімкнених основних 1 та дугогасних 2 контактів.

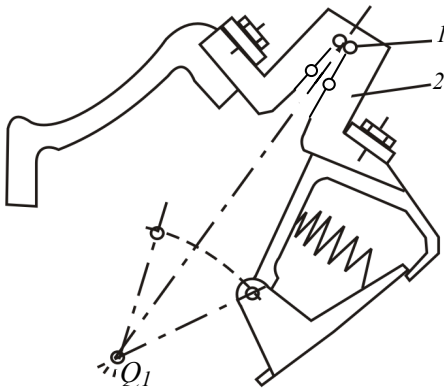


Рис. 4.7

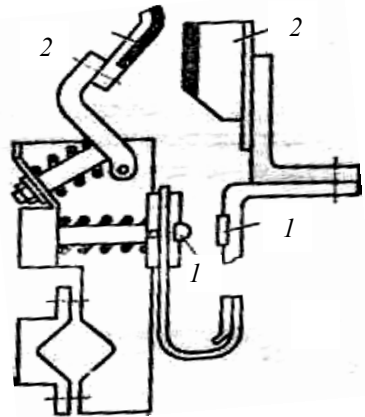


Рис. 4.8

Основні контакти виконують із міді, на їх поверхню припаюють срібні пластини. Дугогасильні контакти також виконують із

міді, але вони мають накладки з дугостійкого матеріалу – вольфраму або металокераміки.

Під час вимкнення електричного кола спочатку розмикаються основні контакти 1. Дуг між ними не виникає, оскільки весь струм починає текти через дугогасні контакти 2. Потім розмикаються дугогасні контакти і дуга, що виникає між ними, гаситься в дугогасній камері. Така конструкція контактів забезпечує збереження основних контактів, призначених для довготривалого пропускання робочих струмів, від руйнівної дії електричної дуги.

Двоступеневі контакти мають доволі складну конструкцію, їх використовують в автоматичних вимикачах і вимикачах високої напруги за струмів більших ніж 1500 А.

**Конструкції контактів апаратів напругою, вищою 1000 В.** Конструкції комутаційних контактів високовольтних апаратів також різноманітні. На рис. 4.9 наведені варіанти найпростіших *торцевих контактів*. У торцевому контакті (рис. 4.9, а) поверхня контактування незначна, самозачищення відсутнє, усе це разом зі значними електродинамічними зусиллями відштовхування, викликаними малою кількістю точок контактування, потребує великих зусиль стискання. Щоб зменшити інтенсивність руйнування поверхні контактів і уникнути їх швидкої заміни, використовують змінні наконечники 1, виконані з тугоплавких матеріалів.

На рис. 4.9, б зображений торцевий трубчастий контакт, який широко використовують у повітряних вимикачах. Дуга 1 дуттям стисненого повітря, втягується всередину контакту, зменшуючи тим самим оплавлення робочих країв контактів.

У вимикачах та роз'єднувачах як основні часто використовують різновид врубних контактів – *пальцеві контакти* (рис. 4.10). У положенні «Увімкнено» рухомий контакт 5 входить у проміжок (щілину) між пальцями 2, притискаючи другий бік пальців до контактної пластини 3. Необхідне зусилля притискання забезпечують пружини 1 та 4.

Кількість пар пальців (1, 2 чи 3) обирають залежно від величини номінального струму.

Недолік такого пристрою – практично відсутнє самозачищення в місці контактування пальців з пластиною 3.

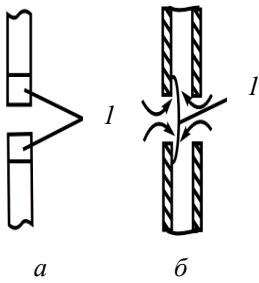


Рис. 4.9

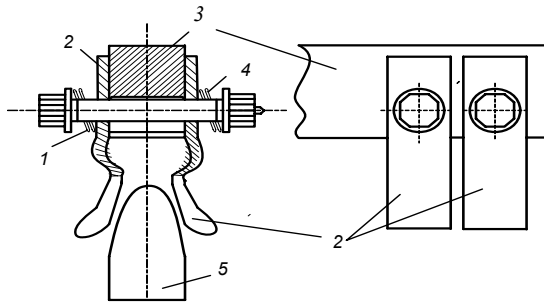


Рис. 4.10

*Резеткові контакти* (рис. 4.11), завдяки їх надійності, широко використовують у високовольних вимикачах. Вони складаються з кількох (на рис. 4.11 – із шести) мідних контактних сегментів 2 з вольфрамовими вставками. Кожний сегмент власною пружиною 4 упирається в кільце 3.

Гнучкі підводи 5 з'єднують сегменти 2 з основою контакту 6. Циліндричний рухомий контакт 1 також виконаний із міді з вольфрамовим наконечником. При вході в резетку він розсуває сегменти, виконує їх самозачищення та забезпечує лінійне контактування з кожним сегментом лінійне контактування.

*Ковзні контакти* замінили менш надійні, використовувані за значних струмів та значних переміщень гнучкі струмопідводи. На рис. 4.12 наведена конструкція такого контакту з використанням роликів.

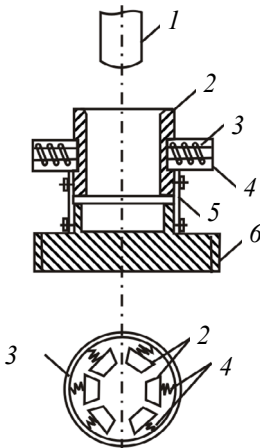


Рис. 4.11

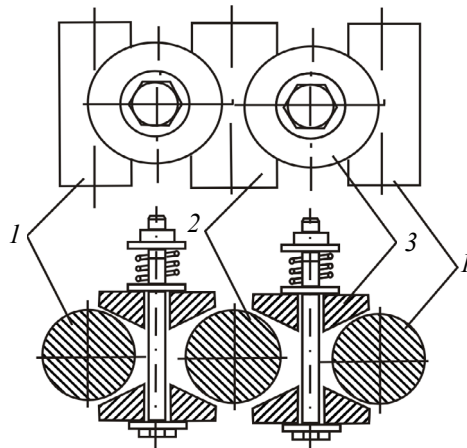


Рис. 4.12

Між двома нерухомими напрямними стрижнями 1 кінчними підпружиненими роликками 3 переміщується рухомий контакт – стрижень 2.

Для захисту міді від окиснювання поверхню стрижнів вкривають тонким шаром срібла.

Кількість пар роликів обирають залежно від номінального струму. Наприклад, вимикач типу ВМП –10 за номінального струму 630 А має шість пар роликів.

## ■ Розділ 5

### ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА ТА МЕТОДИ ЇЇ ГАСІННЯ

#### 5.1. Електрична дуга в комутаційних апаратах

Електрична дуга як фізичне явище було вперше відкрите й описане випускником Харківського Колегіуму видатним російським ученим В. Петровим. Результати своїх дослідів він оприлюднив у 1802 р. У сучасних технологіях електричну дугу широко застосовують у світлотехніці, як могутнє джерело світла, для електродугового зварювання і різання металів, у металургії в електродугових печах для переплавлення металів. Електричну дугу використовують у МГД-генераторах – нових джерелах електричної енергії, розробляються проекти електродугових двигунів, для космічних апаратів. Електрична дуга є основою новітніх плазмово-хімічних технологій. Її застосовують і для вирішення екологічних проблем (очищення вод, отримання озону та ін.).

У комутаційних апаратах електрична дуга виявляє себе двояко. З одного боку дуга є позитивним явищем, оскільки в ній розсіюється електромагнітна енергія ланцюга зі струмом за його розмикавання (вимкнення).

З іншого – оскільки електрична дуга має дуже високу температуру (тисячі К), то вона надає шкідливу термічну дію на конструктивні елементи електричних апаратів і перш за все на контакти, між якими вона виникає і які можуть руйнуватися (оплавитися). Тому необхідно перевіряти електричні апарати, призначені для вимикання струмів КЗ, за вимикальною здатністю (див. п. 5.6) з метою забезпечення їх тривалої і надійної роботи.

## 5.2. Фізичні процеси в дуговому проміжку

У звичайних умовах повітря – це досить добрий ізолятор. Для пробивання 1 см повітря в рівномірному електричному полі необхідно близько 20–30 кВ. У разі пробою в повітрі концентрується певна кількість заряджених частинок – вільних електронів і позитивних іонів.

*Фізичний процес перетворення нейтральних атомів і молекул газів у разі відщеплювання від них електронів на позитивні іони називають іонізацією.* Атоми газу можуть бути іонізовані шляхом впливу на них високої напруги електричного поля, світлових і рентгенівських випромінювань, високої температури, космічних випромінювань і низкою інших фізичних впливів. Вплив космічних випромінювань призводить до того, що в повітрі за звичайних умов завжди є незначна кількість іонізованих атомів і вільних електронів.

### **Фізичні процеси в початковій стадії розходження контактів.**

Для дугових процесів, що перебігають в електричних апаратах, найбільше значення мають термоелектронна та автоелектронна емісії, що виникають на *початку* розходження контактів (електродів), а також термічна й ударна іонізації, які спостерігають у стовбурі *стійко* палаючої дуги.

*Термоелектронною емісією називають явище випускання електронів розпеченими твердими або рідкими тілами.* У початковий момент розімкнення контактів швидко зменшується ефективна площа контактування (див. підрозд. 4.1), у результаті чого густина струму в останніх площах контактування стрімко зростає. Це призводить до їх розігрівання та розплавлення. Між контактами створюються містки із розплавленого металу, які розриваються за подальшого розходження контактів. Відбувається випаровування металу, і на від'ємному електроді виникає катодна пляма – розпечена площа, що випромінює електрони в міжконтактний простір.

*Автоелектронною емісією називають явище виривання електронів із катода під дією сильного електричного поля.* У момент розриву містків із розплавленого металу відстань між контактами, що розходяться, ще дуже мала. Прикладена до них напруга зумовлює значну напруженість електричного поля (більше 100 МВ/см), під дією якого електрони вириваються з холодних ділянок поверхні катода.

Таким чином, до вільних електронів і іонів повітря, що знаходяться в проміжку між контактами, додаються ще й розпечені пари

металу та електрони, що виділяє катод у результаті спільної дії термоелектронної й автоелектронної емісії. За достатньої концентрації заряджених частинок між контактами виникає дуговий розряд. Залежно від величини струму і напруги в електричному колі, матеріалу і чистоти поверхні контактів, швидкості їх розходження й інших факторів дуговий розряд може згаснути або під дією ударної чи термічної іонізацій перетворитися на стійко палаючу електричну дугу.

**Фізичні процеси в палаючій електричній дузі.** У стійко палаючій електричній дузі переважають термічна й ударна іонізації.

**Ударною іонізацією** називають явище вибивання електронів із нейтрального атома (молекули) швидколетючим електроном. Вільні електрони, що з'явилися в міжконтактному проміжку в результаті раніше розглянутих процесів, розганяються під дією прикладеної до контактів напруги. Швидкість електрона залежить від довжини його вільного пробігу і різниці потенціалів між контактами. Для характеристики здатності електрона іонізувати атом зручно користуватися не його швидкістю, а тою мінімальною різницею потенціалів, яку йому необхідно пройти вздовж вільного пробігу, щоб до його кінця мати необхідну енергію. Цю різницю потенціалів називають **потенціалом іонізації**.

Потенціал іонізації атомів азоту, водню, кисню – 13...16 В, гелію – до 25 В, а парів металів значно нижчий (у міді – 8 В). Потенціал іонізації суміші газів і парів металу, характерний для короткої дуги, визначають як найнижчий із потенціалів іонізації її компонентів. Тобто, ударній іонізації в початковий момент горіння дуги більшою мірою підлягають пари металу, що з'явилися в міжконтактному проміжку, а у міру розходження контактів – і атоми газів повітря.

Щойно отримані електрони, своєю чергою, розганяються й іонізують наступні атоми, і в результаті виникають нові заряджені частинки в дуговому проміжку. При цьому підвищується температура дуги.

**Термічною іонізацією** називають іонізацію під дією високої температури. У стовбурі палаючої дуги температура сягає 15000 К. За такої температури стрімко зростає швидкість руху молекул і атомів газів. У разі їх зіткнення у великій кількості створюються заряджені частинки, тобто відбувається іонізація газу. Термічна

іонізація газів починається за температури близько 10000 К, а парів металу – 4000 К. Вона є основним видом іонізації газу в стійко і вільно палаючій електричній дузі. Високу температуру дуги підтримує теплова енергія, яку виділяє в ній електричний струм.

**Деіонізаційні процеси.** У вільно палаючій дузі одночасно з процесами іонізації безперервно відбуваються і зворотні процеси – деіонізації.

*Деіонізація* – це процес взаємної нейтралізації заряджених частинок або їх видалення з дугового простору. Деіонізація дугового проміжку відбувається головним чином за рахунок рекомбінації та дифузії заряджених частинок.

*Рекомбінацією* називають явище дотикання протилежно заряджених частинок і утворення нейтральних частинок. Розрізняють рекомбінацію в об'ємі і на поверхні.

*Рекомбінація в об'ємі* стовбура дуги відбувається за участю нейтральної частинки. Електрон спочатку ніби прилипає до неї, а потім утворені негативний і позитивний іони, що мають приблизно рівні швидкості і вагу, взаємно притягуються. Безпосереднє з'єднання електронів і позитивних іонів малоімовірно через значну різницю їх швидкостей.

Інтенсивність рекомбінації в об'ємі суттєво залежить від напруженості електричного поля. Так, за малих напруженостей швидкості заряджених частинок незначні, і ймовірність їх рекомбінації значно зростає (що суттєво для гасіння дуги змінного струму).

*Рекомбінація на поверхні* твердого діелектрика відбувається у такому порядку: рухоміше електрони утворюють на діелектрику поверхневий заряд, від якого негативні іони й електрони відштовхуються, а позитивні іони – притягуються й рекомбінують.

*Дифузією* називають явище винесення заряджених частинок із стовбура дуги в навколишнє середовище. Дифузія призводить до зменшення концентрації позитивних іонів у стовбурі дуги. Явище дифузії зумовлене значною різницею густини іонів в центрі дуги і в середовищі навколо дуги, а також температур (до 15000 К в центрі і 3000...4000 К біля поверхні). Різниця густини позитивних іонів створює електричне поле, що змушує іони рухатися від центру дуги до периферії. Туди ж спрямоване теплове переміщення частинок. Виходячи за межі стовбура дуги, заряджені частинки рекомбінують уже в навколишньому середовищі.

Якщо гази навколо дуги нерухомі, то дифундуючі іони нагромаджуються навколо стовбура дуги та утворюють своєрідну позитивно заряджену оболонку, що перешкоджає подальшій дифузії. У цьому разі роль дифузії в загальному процесі деіонізації вкрай незначна. Значно зростає ефективність дифузії, якщо дугу обдувати холодним повітрям чи швидко переміщувати сам стовбур дуги.

У стаціонарно палаючій дузі процеси іонізації в міжконтактному просторі врівноважуються процесами деіонізації. Для успішного гасіння дуги необхідно інтенсивність іонізації максимально *послабити*, а деіонізацію – *підсилити*. Для цього в електричних апаратах передбачене спеціальне обладнання – *дугогасильні камери* (див. підрозд. 5.5).

### 5.3. Електрична дуга постійного струму

**Вольт-амперні характеристики дуги.** На рис. 5.1 показані вольт-амперні характеристики електричної дуги (залежність напруги на дузі від струму в ній  $U_d = f(I_d)$ ). Характеристики спадні за характером, тобто зі збільшенням струму в дузі напруга, необхідна для підтримання її горіння, зменшиться. Пояснюють це тим, що електричний опір дугового проміжку у міру зростання струму зменшується швидше, ніж збільшується струм.

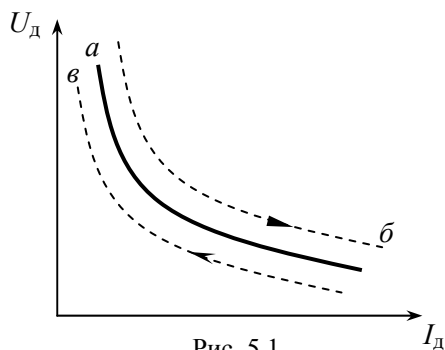


Рис. 5.1

За повільної зміни струму в дузі для кожного його значення встигає встановлюватися рівноважний стан, коли процеси іонізації врівноважуються процесами деіонізації, тобто коли кількість заряджених частинок у стовбурі дуги за заданого струму залишається приблизно однаковою. Стабілізуються електричний опір і падіння



напруги на дузі. Такий режим горіння дуги називають **статичним**, а залежність  $U_d = f(I_d)$ , отриману за повільної зміни струму, – **статичною характеристикою дуги** (рис. 5.1, крива *a*). Статична характеристика дуги залежить від відстані між електродами, матеріалу електродів та параметрів середовища, у якому горить дуга. Зі збільшенням довжини дуги її вольт-амперна характеристика буде пролягати вище.

За достатньо швидкої зміни струму в дузі (наприклад, у мережі з частотою 50 Гц) іонізаційні процеси не встигають перебудовуватися. Так, за швидкого зменшення струму додаткова деіонізація дугового проміжку потребує певного часу. Тому провідність дугового проміжку в перший момент залишається тою самою, відповідаючи великому струму, а, відповідно, і падіння напруги на дузі буде меншим, ніж за статичного режиму (рис. 5.1, крива *в*). У разі швидкого зростання струму вольт-амперна характеристика буде розміщуватися вище за статичну (рис. 5.1, крива *б*). Ці вольт-амперні характеристики за швидкої зміни струму в дузі називають **динамічними**.

**Розподіл напруги в стовбурі дуги.** Прикладена до дуги напруга розподіляється вздовж її стовбура нерівномірно. Можна виділити три характерні зони: зона *катодного спаду напруги* (катодна зона), сам *стовбур дуги* і зона *анодного спаду напруги* (анодна зона) (рис. 5.2).

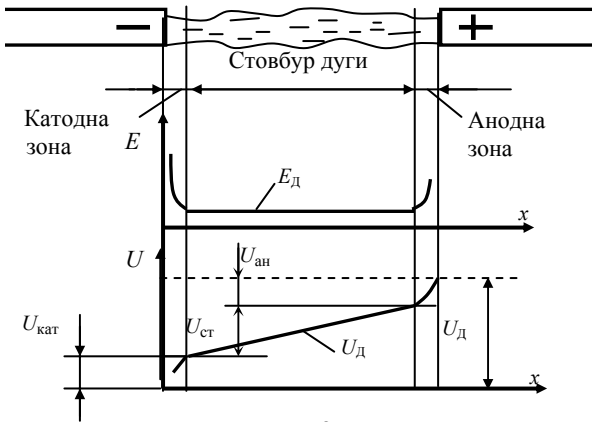


Рис. 5.2

Близько до електродів у катодній і анодній зонах спостерігають раптові зміни напруги, викликані такими причинами. Створені в стовбурі дуги позитивні іони під дією прикладеної напруги зміщу-

ються у напрямку до катода. На дуже малій відстані ( $10^{-4} \dots 10^{-5}$  см) від поверхні катода відбувається концентрація іонів і утворюється об'ємний позитивний заряд, який створює близько до поверхні катода електричне поле дуже значної напруженості (рис. 5.2, ліва частина кривої  $E_d$ ). Це поле сильно розганяє важкі позитивні іони, що рухаються у напрямку до катода, і бомбардуючи його поверхню, вибивають із катода електрони, водночас сильно його нагріваючи. Утворюється *катодна пляма*, що випромінює електрони. Частина електронів, що вилетіли з катода, рекомбінує із зустрічними позитивними іонами, інші – під дією електричного поля дуги – рухаються до анода.

Таким чином, в катодній зоні відбувається безперервне зникнення позитивних іонів, унаслідок чого електрична провідність на одиницю довжини в катодній зоні значно менша, ніж у стовбурі дуги, що спричиняє значний спад напруги (рис. 5.2, ліва частина кривої  $U_d$ ), що називається *катодним*  $U_{\text{кат}}$ . Аналогічне зниження густини заряджених частинок спостерігають і в анодній зоні, викликаючи появу *анодного спаду напруги*  $U_{\text{ан}}$ .

Величина катодного спаду напруги не перевищує 10...20 В і залежить від матеріалу та середовища, у якому горить дуга. Анодний спад напруги менший за 5...10 В, а за великих струмів – близький до нуля.

У стовбурі дуги концентрація заряджених частинок практично однакова, тому напруженість електричного поля на цій ділянці постійна (середня частина кривої  $E_d$ ), а падіння напруги  $U_{\text{ст}}$  пропорційне довжині дуги (див. рис. 5.2).

В апаратах низької напруги довжина дуги незначна, а спад напруги в стовбурі незначний порівняно із загальною напругою. Такі дуги називають *короткими*. Значну роль в них відіграє *відведення тепла електродами*.

В апаратах високої напруги спад напруги на стовбурі дуги значно перевищує напруги біля електродів, якими можна знехтувати. Такі дуги називають *довгими*.

**Умови гасіння дуги постійного струму.** Для успішного гасіння дуги постійного струму необхідно створити такі умови, щоб інтенсивність деіонізації в дуговому проміжку перевищувала інтенсивність іонізації.

Для з'ясування умов розглянемо електричне коло постійного струму з опором  $R$ , індуктивністю  $L$  і дуговим проміжком  $D$

(рис. 5.3, а), до якого приклали напругу джерела  $U_{дж}$ . У будь-який момент часу для цього кола буде справедлива рівність

$$U_{дж} = iR + L \frac{di}{dt} + U_d,$$

де  $iR$  – спад напруги на активному опорі;  $L \frac{di}{dt}$  – спад напруги на індуктивності за зміни струму;  $U_d$  – спад напруги на дуговому проміжку.

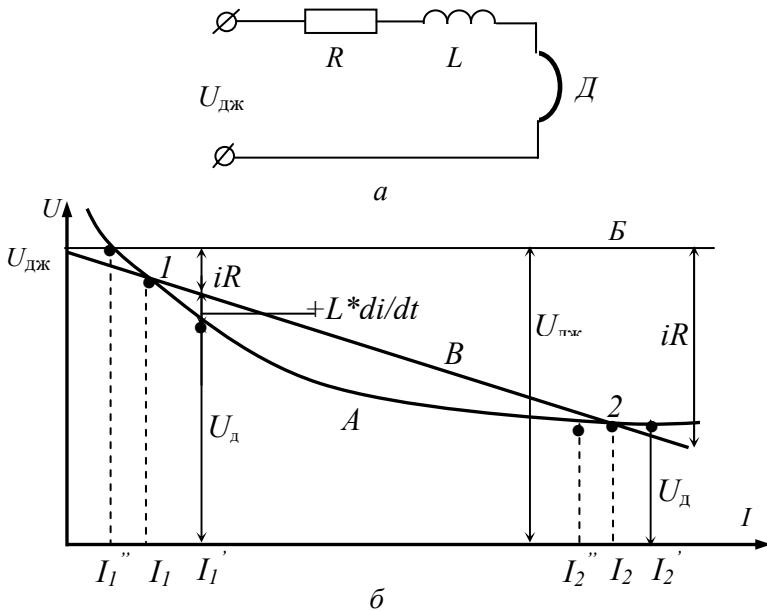


Рис. 5.3

Дуга погасне, якщо струм у ній буде зменшуватися, тобто якщо  $di/dt < 0$ , а напруга, необхідна для підтримання її горіння  $U_d$ , буде перевищувати різницю між напругою джерела  $U_{дж}$  та спадом напруги на опорі  $R$ .

$$U_d > U_{дж} - iR. \quad (5.1)$$

Ця нерівність являє собою умову, за якої дуга гасне.

Рівняння (5.1) зручно розв'язати графічно. На рис. 5.3, б крива  $A$  – це вольт-амперна характеристика дуги, пряма  $B$  – напруга джерела  $U_{дж}$ , пряма  $B$  – спад напруги на опорі  $R$ , що відраховують від значення  $U_{дж}$ .

У точках перетину кривої  $A$  з прямою  $B$  (точки 1 і 2) виконуються умови  $L \frac{di}{dt} = 0$  і  $U_d = U_{дж} - iR$ , тобто зміна струму за відсутнос-

ті зовнішніх впливів не повинна відбуватись. Але в точці 1 цей стан *нестійкий*, а в точці 2 – *стійкий*. Дійсно, якщо з певної причини струм у точці 1 стане трохи більшим ( $I_1'$ ), то буде справедлива нерівність  $U_d < U_{дж} - iR$ . У колі з'явиться «надлишок» напруги на

значення  $L \frac{di}{dt}$ , який призведе до подальшого зростання струму аж

до нового рівноважного стану за величини  $I_2$ . Якщо ж струм  $I_1$  зменшиться до значення  $I_1''$ , напруга для підтримання дуги знадобиться більша, ніж  $\epsilon$ :  $U_d > U_{дж} - iR$ , що призведе до подальшого зменшення струму та загасання дуги.

За величини струму  $I_2$  (точка 2) дуга буде горіти стійко, оскільки у разі збільшення струму до величини  $I_2'$  необхідна напруга для горіння дуги  $U_d$  потрібна буде більша ніж  $U_{дж} - iR$ , а тому струм зменшиться до значення  $I_2$ . За зменшення струму до значення  $I_2''$  з'явиться певний «надлишок» напруги, і струм зросте до значення  $I_2$ . Як видно з рис. 5.3, б, доки лінії  $A$  і  $B$  мають хоч би одну точку перетину, буде виконуватись умова стійкого горіння дуги. Щоб уникнути цього необхідно підняти вольт-амперну характеристику дуги (криву  $A$ ) вище за пряму  $B$ , або збільшити опір кола  $R$  (пряма  $B$  піде крутіше вниз). Підняти вольт-амперну характеристику найпростіше шляхом збільшення довжини дуги або охолодження.

**Вимкнення кола постійного струму.** У момент вимкнення електричного кола за рахунок енергії електромагнітного поля в усіх провідниках і зосереджених індуктивностях виникає ЕРС самоіндукції, яка в сумі з основною напругою мережі викликає в ній *комутаційні перенапруги*. Величина цієї ЕРС, як відомо, пропорційна швидкості зменшення струму в колі ( $di/dt$ ), яка своєю чергою залежить від використаного способу гасіння дуги (див. п.5.4), тобто від конструкції дугогасної камери.

У колах постійного струму використовують комутаційні апарати, що мають різні конструкції дугогасних камер, але в усіх апаратах дуга гаситься у повітрі. Це забезпечує прийнятний рівень комутаційних перенапруг (до 3...4  $U_{мер}$ ), який витримує ізоляцію апаратів постійного струму. На рис. 5.4 показаний приклад осцилограм

струму та напруги на контактах повітряного вимикача постійного струму в момент вимкнення мережі  $U_{\text{мер}} = 220 \text{ В}$ .

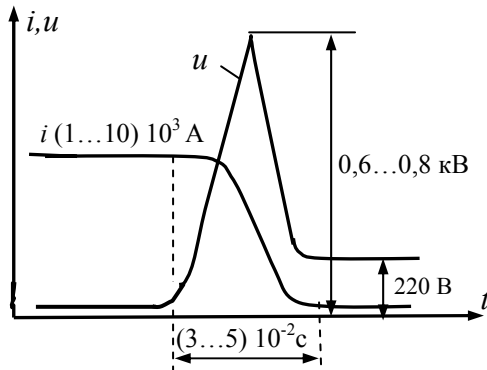


Рис. 5.4

Використання масла та інших спеціальних засобів у дугогасних камерах апаратів постійного струму призвело б до суттєвого зменшення часу вимкнення, що викликало б значніші комутаційні перенапруги, небезпечні для ізоляції.

#### 5.4. Електрична дуга змінного струму

У колах змінної напруги значення струму періодично зменшуються до нуля, що суттєво полегшує гасіння дуги.

**Електрична міцність дугового проміжку.** У момент зменшення струму в колах до нуля дуга гасне. Інтенсивні деіонізаційні процеси відновлюють електричну міцність (ізоляційні властивості) дугового проміжку. Найшвидше (частки мікросекунд) деіонізується катодна зона, у якій відбувається інтенсивна рекомбінація позитивних іонів із електронами, які вилітають з катодної плями (див. підрозділ 5.1). Електрична міцність катодної зони збільшується до  $150 \dots 250 \text{ В}$  (рис. 5.5,  $a$ , ділянка кривої  $oa$ ). Повільніше відновлюється електрична міцність основної частини дугового проміжку – стовбура (ділянка  $ab$ ).

Конкретна величина відрізка  $oa$  і нахил кривої  $ab$  залежать від конструкції дугогасної камери. Чим досконаліша камера, тим більше відрізок  $oa$ , і крутіше піднімається крива  $ab$ , тобто швидше збільшується електрична міцність  $U_{\text{міц}}$  дугового проміжку.

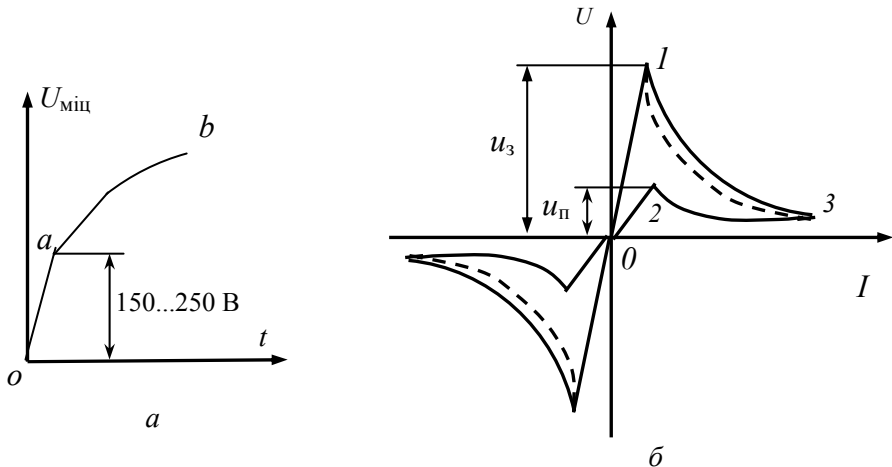


Рис. 5.5

**Вольт-амперна характеристика дуги змінного струму.** За змінної напруги величина електричного струму в колі безперервно змінюється за величиною та знаком. Це викликає необхідність використання не статичних, а динамічних вольт-амперних характеристик дугового розряду (див. рис. 5.1).

Розглянемо детальніше процес загоряння та гасіння дуги за змінного струму  $U$  міру зростання напруги в дуговому проміжку спочатку виникає тлійний розряд, який характеризують малі струми (рис. 5.5, б, відрізок  $0 - 1$ ). У точці  $1$  напруга, прикладена до контактів, сягає величини пробою, що називають *напругою запалення*  $u_з$ . Тлійний розряд переходить в дуговий, і в колі починає текти струм, змінний за часом залежно від зміни напруги джерела. За збільшення струму динамічна вольт-амперна характеристика (відрізок  $1 - 3$ ) пройде трохи вище за статичну (пунктирна лінія). У наступній чверті періоду струм зменшується і динамічна характеристика піде нижче за статичну (відрізок  $3 - 2$ ). Зменшуючись, струм за відповідного значення вже не зможе підтримувати горіння дуги і вона гасне (точка  $2$ ). Цей момент характеризує *напруга згасання*  $u_п$ . Дуговий розряд переходить у тлійний (відрізок  $2 - 0$ ). Якщо відстань між контактами залишається незмінною, процес повторюється і за від'ємної напівхвилі струму та повторюється необмежений час.

**Умови гасіння дуги змінного струму.** Розглянемо осцилограму процесу вимкнення кола змінного струму за *активного навантаження* ( $\cos \varphi = 1$ ), показано на рис. 5.6, *a*. За відсутності струму міжконтактний проміжок відновлює свою електричну міцність за кривою *oab*. Напруга на контактах, що розходяться, зростає за синусоїдною напругою джерела  $u_{дж}$ , показаною на рис. 5.6 пунктирною лінією. У момент  $t_1$ , коли напруга на контактах перевищить електричну міцність проміжку (точка 1), відбувається запалювання дуги, і в колі з'являється струм  $i$ . Зростання струму в колі, викликане подальшим збільшенням напруги джерела, призводить до зменшення напруги на дузі  $u_d$  (контактах). Далі, у міру зменшення напруги джерела, також зменшується і струм у колі, що викликає певне підвищення напруги  $u_d$ . У момент  $t_2$  (точка 2) дуга гасне, величина струму  $i$  прямує до нуля.

Протягом наступного напівперіоду процес повторюється з тією різницею, що до моменту  $t_1'$  *контакти вже розходяться на більшу відстань*, а тому електрична міцність дугового проміжку зростає інтенсивніше (відрізок  $o'a'$  більший за відрізок  $oa$ , і лінія  $a'b'$  піднімається крутіше за лінію  $ab$ ). Загорання дуги (момент  $t_1'$ ) відбувається трохи пізніше, за більшого значення  $u_3'$ .

В один із наступних напівперіодів контакти вже розійдуться на таку відстань, за якої електрична міцність проміжку буде зростати швидше (крива  $o''a''b''$ ), ніж зростатиме напруга джерела  $u_{дж}$ . Тоді пробою проміжку не відбудеться, і дуга згасне остаточно.

Таким чином, *умовою гасіння дуги змінного струму є випереджаюче зростання електричної міцності дугового проміжку над напругою джерела.*

Варто звернути увагу на присутні в осцилограмі струму так звані «*безструмові паузи*». За відрізки часу  $t_0 \dots t_1$  і  $t_2 \dots t_1'$  струму у колі немає. Тривалість безструмових пауз на рис. 5.6, *a* із графічних міркувань значно збільшена.

Насправді їх тривалість за активного навантаження становить 10...100 мкс, а за індуктивного – на порядок менша. З використанням безструмових пауз пов'язаний один із напрямків вдосконалення високовольтних вимикачів, – розроблення синхронізованих вимикачів (див. підрозд. 8.10).

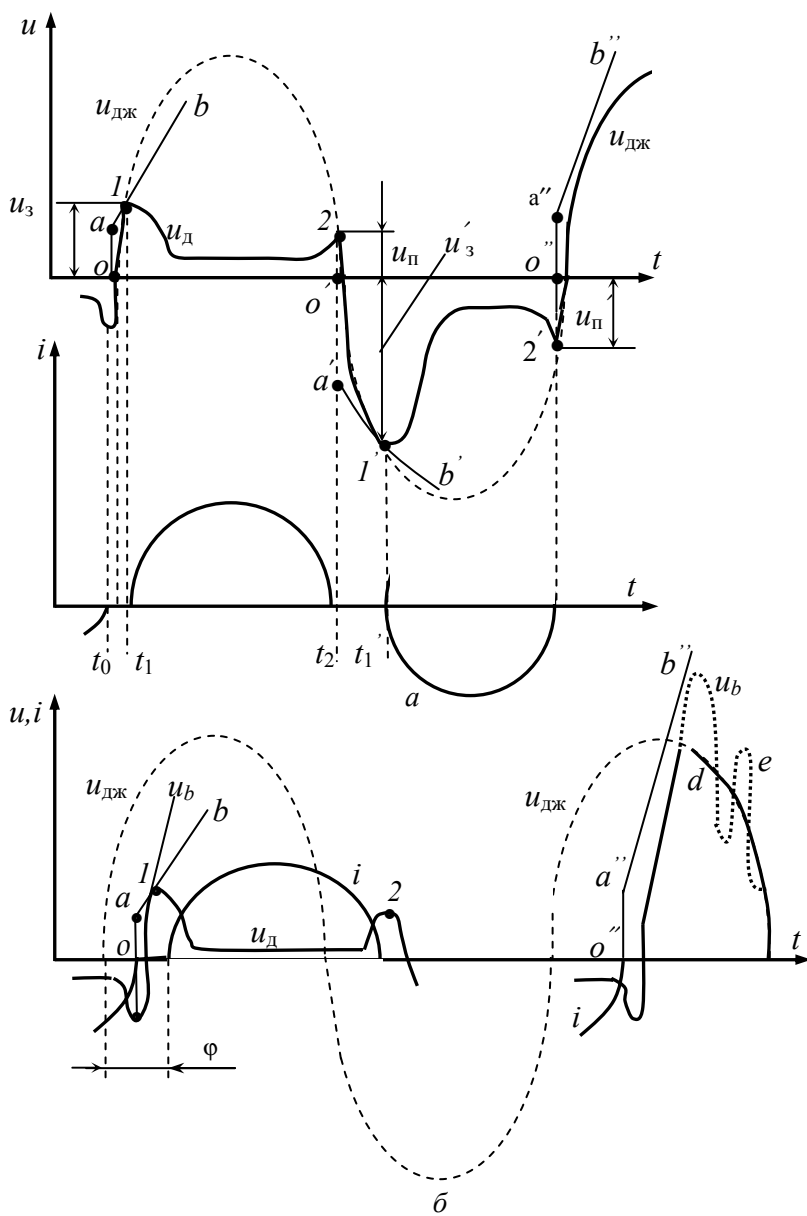


Рис. 5.6



Після вимкнення індуктивного навантаження ( $\cos\varphi < 1$ ), наприклад, струмів КЗ, процес підвищення напруги на контактах відбувається інакше. Якщо в момент проходження струму через нуль за вимкненого активного навантаження (рис. 5.6, *a*) на контактах спостерігають незначну напругу згасання  $u_{\text{п}}$ , яка дорівнює напрузі джерела  $u_{\text{дж}}$  у цей момент, то після вимкнення індуктивного навантаження, коли струм проходить через нуль, напруга джерела  $u_{\text{дж}}$  значно перевищує напругу згасання (рис. 5.6, *б*). Тому процес відновлення напруги на контактах вимикача відбувається значно швидше за певною кривою  $u_b$ . У момент перетину кривою  $u_b$  кривої електричної міцності  $oab$  (рис. 5.6, *б*, точка *l*) відбувається запалювання дуги. Такі процеси аналогічні до вже розглянутого.

Швидкість відновлення напруги на контактах (нахил кривої  $u_b$ ) залежить від індуктивності  $L$  і ємності  $C$  кола. Зі зростанням  $L$  і  $C$  кола швидкість відновлення напруги зменшується.

Залежно від співвідношення параметрів кола відновлення напруги на дуговому проміжку може бути аперіодичним (рис. 5.6, *б*, крива *d*) або періодичним (коливальним) (крива *e*). В останньому разі максимальна напруга на контактах може сягати подвійної ЕРС генератора і призвести до повторного запалювання дуги. Таким чином, для успішного гасіння дуги з індуктивним навантаженням, а тим більше за значних струмів КЗ індуктивного характеру, потрібні складні дугогасні пристрої, що забезпечують швидке зростання електричної міцності дугових проміжків.

### 5.5. Основні методи гасіння електричної дуги

У стаціонарно палаючій дузі процеси іонізації в міжконтактному просторі врівноважуються процесами деіонізації. Для гасіння дуги необхідно інтенсивність іонізації максимально ослабити, а деіонізацію – підсилити. Нині відомі такі методи впливу на електричну дугу для її гасіння.

**Розтягнення дуги.** Розтягнення стовбура дуги шляхом швидкого збільшення відстані між контактами – найпростіший, але малоефективний як такий метод. За розтягнення дуги відбувається зменшення напруженості електричного поля, що призводить до сповільнення процесу ударної іонізації. Більша поверхня дуги підсилює процес дифузії. Але, як показано в п.5.1, у вільно палаючій стаціонарній дузі ці процеси не є основними. Тому, щоб вони вплинули

на гасіння дуги, її необхідно розтягнути на значну довжину. Так, вимкнення струму більшого як 100 А змінної напруги 220 В потребує розтягнення стовбура дуги на 25...30 см, що неприйнятно через зростання габаритів комутаційних апаратів.

Цей метод як такий використовують тільки в низьковольтних комутаційних апаратах зі струмами до десятків амперів (у перемикачах, рубильниках, реле та ін.).

**Охолодження дуги.** Термічна іонізація є основним процесом, що підтримує горіння дуги. Тому зниження температури стовбура дуги – це один з ефективних способів її гасіння. Існує кілька способів охолодження дуги.

*Переміщення дуги в нерухомому середовищі* з нижчою температурою викликає інтенсивне охолодження стовбура дуги, а також сприяє значному збільшенню дифузії заряджених частинок, оскільки навколо дуги не встигає утворюватися оболонка з позитивних іонів (див. підрозділ 5.1). Переміщувати дугу можна у кілька способів:

– під дією електродинамічних сил  $F_e$ , що виникають у самій дузі унаслідок викривлення лінії струму (рис. 5.7, а);

– унаслідок взаємодії струму дуги із сусідньою масою з магнітного матеріалу відбувається зміщення магнітосилових ліній дуги (рис. 5.7, б). Дуга прагне зайняти таке положення, щоб опір для її магнітного потоку був мінімальним, тобто переміщуватись до магнітного матеріалу;

– з допомогою зовнішнього магнітного поля, утвореного одним або кількома витками провідника, що підводять струм до контактів (рис. 5.7, в). Котушку електромагніта за «магнітного дуття» (так називають цей метод) розміщена так, щоб її магнітний потік  $H$  був перпендикулярний до дуги і створював зусилля  $F_e$ , що зміщує дугу за правилом лівої руки. Зовнішнє магнітне поле може також створювати котушка, увімкнена паралельно на напругу мережі, або з допомогою постійних магнітів;

– з допомогою радіального магнітного поля, утвореного кільцевим постійним магнітом  $S$  і магнітом  $N$  (рис. 5.7, г). На дугу  $D$  при цьому буде діяти сила  $F_e$ , що змушуватиме її переміщуватися за колом трубчастого контакту  $K$ .

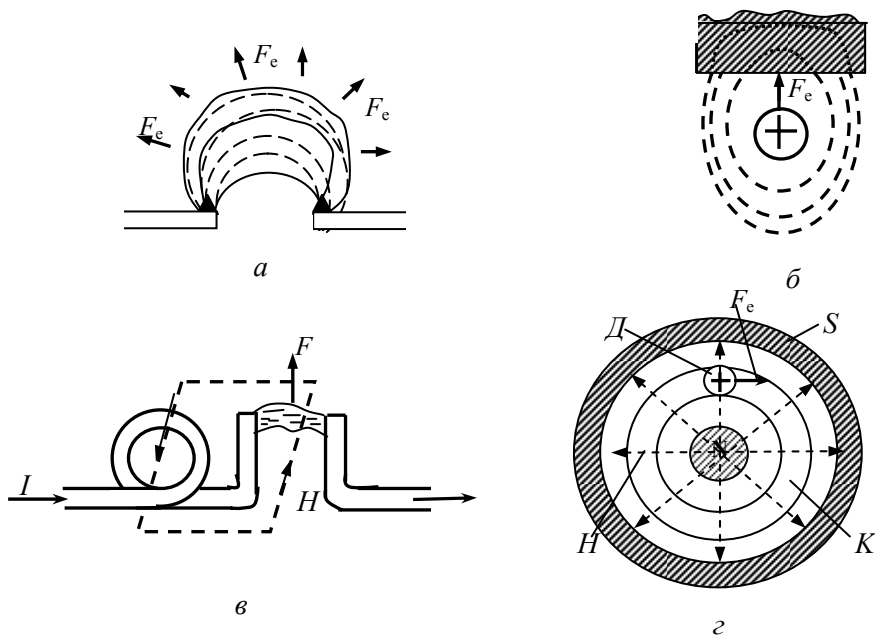


Рис. 5.7

Використання «магнітного дуття» і радіального магнітного поля забезпечує високу швидкість переміщення дуги в розглянутому методі. Ефективність методу переміщення дуги підтверджує такий приклад: для успішного гасіння відкритої дуги зі струмом більше 100 А при змінній напрузі 220 В і швидкості руху дуги 100 м/с її досить розтягти на 5 см. Метод переміщення дуги отримав широке застосування в комутаційних апаратах високої напруги, а в низьковольтних апаратах він є основним.

Обдування дуги відносно холодними газами або рідинами також викликає її інтенсивне охолодження та підсилення процесів дифузії. Особливо інтенсивно відбувається деіонізація за турбулентного потоку, коли частинки холодного газу, що рухаються вихороподібно, потрапляють у стовбур дуги. Обдування можна виконати у кілька способів:

– поздовжнє обдування – найпростіший спосіб за конструктивним рішенням дугогасильної камери (рис. 5.8, а);

– поздовжнє двостороннє обдування через трубчасті контакти (рис. 5.8, б) значно підсилює процес охолодження завдяки збільшенню швидкості потоку газу у вузькому каналі в тілі контакту;

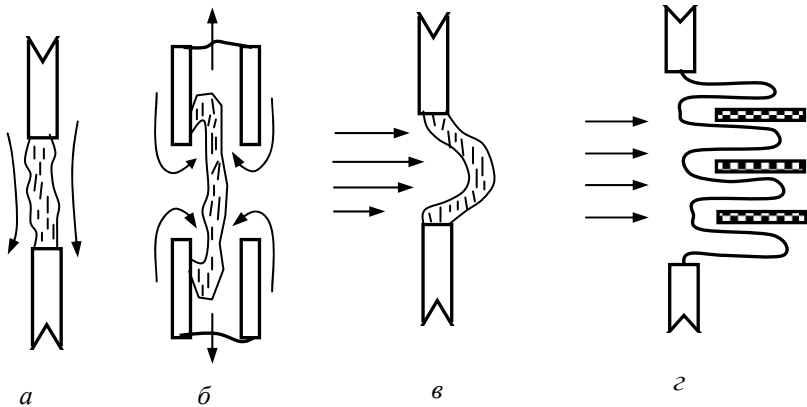


Рис. 5.8

– поперечне обдування (рис. 5.8, в) досить ефективне, оскільки викликає одночасно і видовження стовбура дуги;

– поперечне обдування з використанням поперечних перегородок з *ізоляційного матеріалу* (рис. 5.8, г) дозволяє досягати значної довжини та поверхні дуги за незначного її переміщення. Перегородки забезпечують більш тісніше дотикання дуги до потоку газу, сприяють потраплянню газу всередину стовбура дуги, інтенсифікуючи деіонізаційні процеси.

Обдування дуги для її гасіння застосовують головним чином у високовольтних апаратах, бо реалізація цих способів потребує досить складних пневматичних пристроїв та ємностей із газами під тиском.

**Гасіння дуги в елєгазі.** Використання спеціального газоподібного або рідкого середовища дозволяє підвищити інтенсивність деіонізаційних процесів у дузі. Чим вище теплопровідність і електрична міцність середовища, його теплоємність і температура термічної іонізації, тим легше гасити в ньому дугу. Щодо повітря, ефективність гасіння дуги в середовищі вуглекислого газу, водяної пари, водню й елєгазу більші в 2,5; 3,5; 7 і 100 разів відповідно.

Синтезований суто для електричних цілей (звідси його назва – *елєгаз*) стійкий інертний газ  $SF_6$  (шестифторна сірка) має чудові

дугогасильні властивості. Він у п'ять разів густіший за повітря, його електрична міцність у 2,5 рази, а теплоємність – у чотири рази більша ніж у повітря. Недолік елегазу – його висока температура зрідження. Він переходить у рідкий стан за тиску 1,3 МПа (приблизно 13 атм) уже за температури 0 °С. Це зумовлює необхідність або підігрівати його, або зменшувати тиск, що знижує ефективність використання газу. Слід також зауважити, що результативним є використання лише газу високої хімічної чистоти, що потребує значних матеріальних витрат. Поступове дешевшання елегазу дозволяє все ширше використовувати його у високовольтних комутаційних апаратах, що поступово витісняє гасіння в маслі або повітрі.

Значного підвищення ефективності гасіння дуги можна досягти, виконуючи переміщення або обдування дуги в середовищі вже зазначених газів.

**Гасіння дуги в маслі.** Гасіння дуги в маслі є одним із уже зазначених поширених нині способів гасіння, що використовують у високовольтних комутаційних апаратах змінного струму (рис. 5.9). Нерухомий 2 і рухомий 6 контакти розміщують у баку 1 наповненому маслом 3. Електрична дуга 4, що виникає між контактами, завдяки високій температурі своєї поверхні (5000–6000 °С), розкладає та випаровує масло. Навколо дуги утворюється газова оболонка – газовий міхур 5. Із 1 г масла виділяється близько 1500 см<sup>3</sup> газу, який складається за об'ємом із 70 % – водню, 22 % – ацетилену, 5 % – метану і 3 % – етилену.

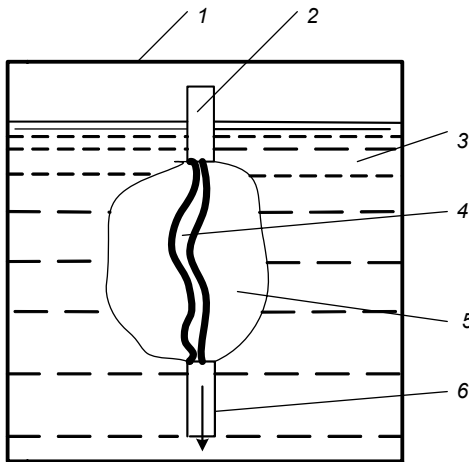


Рис. 5.9

Утворення газу відбувається дуже швидко, за соті частки секунди, і дуга горить уже не в маслі, а в газовому міхурі, тиск усередині якого сягає 1,5 МПа, що також сприяє її гасінню. Підвищений тиск можна використати для різних видів обдування. Прикладом такого використання масла може слугувати високоефективна дугогасильна камера вимикача ВМП – 10 (див. розд. 8, рис. 8.8).

**Гасіння дуги у вакуумі.** За високого вакууму ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па) середня довжина вільного пробігу молекули газу значно перевищує розміри дугогасильної камери. Тому ударної іонізації не виникає. Практична відсутність молекул речовини є причиною високої електричної міцності міжконтактного проміжку, що в багато разів вища за міцність повітря нормального тиску. Пробивна напруга проміжку довжиною 1 мм у вакуумі сягає 30 кВ.

Фактично єдиною речовиною, іонізовані частинки якої можуть викликати появу електричної дуги у вакуумі, є пари металу контактів, що утворюються в початковий момент їх розходження. Зменшити кількість парів металу можна, використовуючи на контактних поверхнях тугоплавкі метали, наприклад, вольфрам.

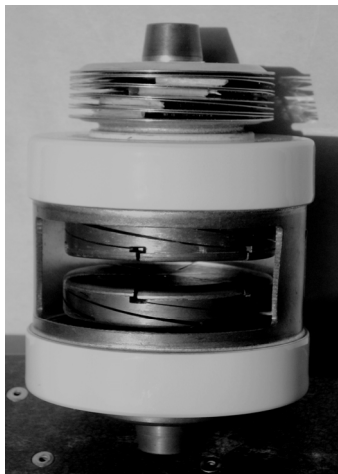


Рис. 5.10

На рис. 5.10 наведений зразок вакуумної дугогасильної камери севастопольського підприємства «Таврида-Електрик».

Камера складається з керамічних фланців та металевго корпуса. Усередині камери знаходяться мідні нерухомі і рухомі контакти. На робочу поверхню контактів нанесений тонкий шар вольфраму. Для збереження вакууму за руху контакту останній зв'язаний з корпусом камери ребристим сильфоном.

Загалом гасіння дуги у вакуумі високоефективне та дозволяє розмикати електричне коло протягом одного або двох півперіодів. У підрозд. 8.6 розглянуто конструкцію вакуумного вимикача. Використання вакууму, а також елегазу є найбільш прогресивними методами гасіння дуги.

**Гасіння дуги за високого тиску.** Інтенсивність процесів іонізації та деіонізації газу залежить від його тиску: чим вищий тиск газу, тим ближче розташовуються його молекули. Це утруднює процес термічної й ударної іонізації. Одночасно з підвищенням тиску зростає і теплопровідність газу, що підсилює охолодження дуги.

В окремих апаратах стінки дугогасильної камери роблять із газогенерувального матеріалу – *фібри*. За високої температури дуги фібра виділяє газ, і в замкненому об'ємі за частки півперіоду тиск зростає до 10–15 МПа. Так гасять дугу в запобіжниках (див. підрозд. 12.1) і в пакетних вимикачах.

**Гасіння дуги в дугогасильній решітці.** Якщо над палаючою дугою встановити кілька поперечних *металевих пластин* (рис. 5.11) і одним із раніше описаних способів перемістити її в решітку, дуга розіб'ється на кілька послідовних дуг, і біля кожної металевої пластини утвориться своя катодна зона.

Як уже йшлося у підрозд. 5.3, за змінного струму (у момент його проходження через нуль) у катодній зоні практично миттєво відновлюється електрична міцність 150...250 В (див. рис. 5.5, *а*). За наявності  $m$  пластин, з'являється  $m + 1$  катодна зона – відповідно електрична міцність дугового проміжку зростає в  $m + 1$  разів і буде дорівнювати  $(150...250) \times (m + 1)$  В.

За постійного струму в кожній зоні буде спостерігатись падіння напруги всього на 10...20 В. Тому цей метод практично не використовують в апаратах постійного струму.

Для прискорення затягування дуги в решітку її пластини виконують із магнітного матеріалу – сталі та надають їм спеціальної форми з вирізом (як на рис. 5.11). У апаратах на великі струми, для збільшення швидкості руху дуги, розглянутий метод доповнюють «магнітним обдуванням» (див. рис. 5.7, *в*). Дугогасильні решітки дозволили значно зменшити розміри дугогасильних камер. Їх широко застосовують у низьковольтних апаратах і вимикачах 6...10 кВ змінного струму.

**Гасіння дуги у вузьких щілинах.** Прагнення зменшити габарити дугогасильних камер, знизити звуковий і світловий ефекти під час гасіння дуги спричинило використання різних щілин із *твердих дугостійких ізоляційних матеріалів* (рис. 5.12).

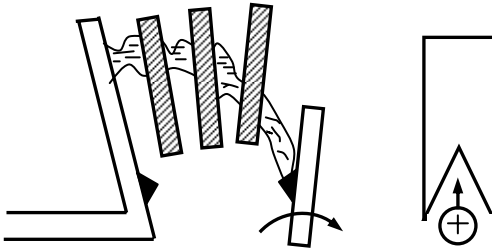


Рис. 5.11



Рис. 5.12

Ідея цього методу базується:

- по-перше, на видовженні дуги за її «переміщення» у дугогасильній камері та охолодження у разі дотикання до холодної поверхні камери;
- по-друге, на стимулюванні процесів рекомбінації на поверхні діелектрика (див. підрозд. 5.2);
- по-третє, на підвищенні тиску у вузькій щілині.

У сучасних вимикачах, використовують щілинні дугогасильні камери, куди дугу заганяють з допомогою «магнітного обдування».

В окремих конструкціях камер стінки щілини чи каналу виготовляють із твердих газогенерувальних матеріалів (органічне скло, фібра та ін.), які під дією високої температури дуги виділяють газ, що збільшує тиск у щілині. Гасіння дуги в щілинах широко використовують у комутаційних апаратах постійного струму.

**Використання безструмової паузи.** Як уже йшлося (див. рис. 5.6), у разі гасіння дуги змінного струму в його графіку виникають безструмові паузи тривалістю 10...100 мкс. Якщо за цей час розвести контакти на достатню відстань, щоб електрична міцність дугового проміжку зросла до величини, що перевищує ЕРС генератора, дуга більше не загориться. До недавня реалізація цього методу затримувалась суто технічними труднощами. Необхідно, по-перше, дуже точно визначити момент проходження струму через нуль, по-друге, – мати достатньо потужний привод, що дозволяє за одиниці мікросекунд перемістити контакти вимикача (маса контакту високовольтового вимикача – кілька кілограмів) на відстані десятків сантиметрів. Нині це технічне завдання вирішене, і створені так звані *синхронізовані вимикачі*.



**Бездугова комутація.** Створення силових напівпровідникових приладів (тиристорів), здатних працювати в колах зі струмом до сотень амперів і напругою у сотні вольтів, дозволило розробити пристрої бездугової комутації, тобто здійснити розділення кола без виникнення електричної дуги. Найбільш ефективно використовують тиристорні вимикачі у колах з високою частотою комутації, тоді як у традиційних апаратів швидко зношуються контактні пристрої. Промислово налагоджений випуск тиристорних контакторів (див. розд. 7, рис. 7.12), розробляють високовольтні тиристорні вимикачі.

### 5.6. Вимикальна здатність електричних апаратів

Найбільш важким режимом для комутаційних апаратів є режим увімкнення і вимикнення струмів КЗ, величина яких може сягати десятків і сотень кілоамперів. Збереження електроенергетичного обладнання і стійкості паралельної роботи електричних систем потребують, щоб тривалість режиму КЗ була якомога меншою і обмежувалась часом 0,05...2 с (залежно від напруги мережі). Тому всі вимикачі обладнують дугогасильною камерою, що забезпечує гасіння електричної дуги в обмеженому об'ємі за досить малий час.

Залежно від використаного способу гасіння дуги (див. підрозд. 5.4) і конструкції конкретна дугогасильна камера може багаторазово вимикати лише значення струму КЗ до певної межової величини. Для характеристики цієї здатності електричного апарата використовують спеціальну величину – *номінальний струм вимкнення*.

*Номінальний струм вимкнення*  $I_{\text{вим. ном}}$  – це найбільший струм, який вимикач здатний надійно вимкнути без будь-яких пошкоджень, що заважають його подальшому використанню.

Найбільший струм звичайно розуміють як дійсне значення періодичної складової струму КЗ у момент розходження контактів. Значення  $I_{\text{вим. ном}}$  вказують у таблиці вимикачів і наводять у довідниках [19]. Так, низьковольтні автоматичні повітряні вимикачі залежно від величини номінального струму мають  $I_{\text{вим. ном}} = 1...150$  кА, а високовольтні вимикачі на 6 – 35 кВ –  $I_{\text{вим. ном}} = 30...50$  кА.

Для надійного вимкнення максимальних струмів КЗ, можливих у певному місці схеми електропостачання, обираючи вимикач, необхідно дотримуватись умови

$$I_{\text{вим. ном}} > I_{\text{кз}}(\tau),$$

де  $I_{\text{КЗ}}(\tau)$  – значення струму КЗ у момент вимкнення  $\tau = t_3 + t_b$ ;  $t_3$  – час дії захисту;  $t_b$  – власний час вимкнення вимикача, що являє собою час від моменту отримання команди на вимкнення до початку розходження контактів (наводять у довідниках). Розрахунок величини  $I_{\text{КЗ}}(\tau)$  можна знайти в праці [27].

## ■ Розділ 6

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

#### 6.1. Основні терміни та співвідношення

**Елементи магнітних систем.** Магнітні системи електричних апаратів, у яких магнітний потік збуджує обмотка, якою тече електричний струм, називають електромагнітами. Електромагніти слугують для електромагнітного підсилення, переміщення дуги та виконання механічної роботи. Наприклад, у електромагнітних приводах різних комутаційних апаратів (реле, контактора, силового вимикача та ін.) електромагнітна енергія перетворюється на механічну для переміщення (увімкнення та вимкнення) рухомих контактів апарата.

Для утворення магнітного кола потрібної інтенсивності, необхідного для отримання потрібного механічного зусилля, магнітні системи додають одну або кілька обмоток  $1$  та магнітопровід  $3$

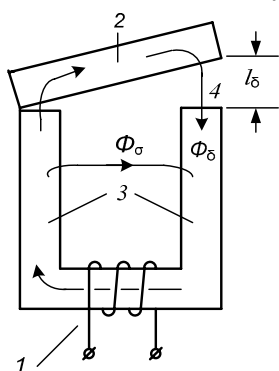


Рис. 6.1

(рис. 6.1). Магнітопровід виготовляють із феромагнітних матеріалів (заліза, електротехнічної сталі, пермалою), які мають високу магнітну проникність. Висока магнітна проникність таких матеріалів дозволяє концентрувати магнітне поле у заданому місці простору.

Рухому частину магнітопроводу  $2$ , що здійснює механічне зусилля, називають *якорем*. Частина магнітопроводу, на якому розміщена котушка, називають *осердя*.

Для забезпечення поступального чи обертового руху якоря магнітне коло повинно мати повітряний проміжок  $l_0$  певної довжини, який називають *робочим проміжком*. Магнітний потік, що проходить через робочий проміжок, називають *робочим потоком*  $\Phi_0$ .

Магнітні потоки, які не проходять через робочий проміжок і тому не виконують корисну роботу, називають *потоками розсіювання*  $\Phi_\sigma$ .

**Основні характеристики магнітного поля.** Нехай у просторі проходить *магнітний потік*  $\Phi$  (Вб). Величину магнітного потоку, що проходить через одиницю площі  $S$  (м<sup>2</sup>), називають *магнітною індукцією*  $B$  (Тл).

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Магнітна індукція є силовою характеристикою магнітного поля.

Якщо магнітний потік пронизує феромагнітне тіло (рис. 6.2), то для визначення його інтенсивності використовують іншу фізичну величину – *напруженість магнітного поля*  $H$  (А/м), пов'язану з магнітною індукцією таким співвідношенням

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0},$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність, що характеризує магнітну провідність середовища (тіла);  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала;  $\mu$  – відносна магнітна проникність.

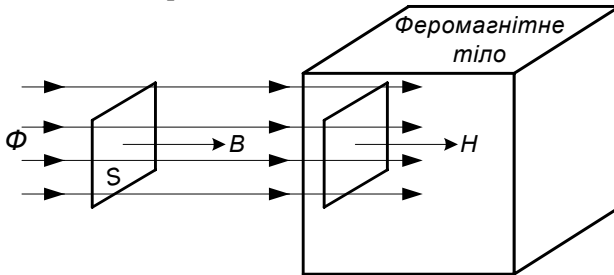


Рис. 6.2

Для повітря  $\mu = 1$  (тоді  $\mu_a = \mu_0$ ), для електротехнічних сталей  $\mu = (35 \dots 100) \cdot 10^3$ .

**Закон Ома для магнітного кола.** Джерелом магнітного поля є постійний магніт або електромагніт. У електромагніті електричний

струм тече обмоткою, що має  $w$  витків та створює *магніторушійну силу* (МРС)  $F_M$ , яку вимірюють в ампер-витках.

$$F_M = I \cdot w.$$

Під дією МРС у магнітопроводі створюється магнітний потік  $\Phi$ . Чим краще матеріал магнітопроводу проводить магнітний потік, тим більший магнітний потік одержують за тієї самої МРС.

Величину опору проходження магнітного потоку оцінюють за величиною магнітного опору  $R_M$ .

Тоді

$$\Phi = \frac{F_M}{R_M}.$$

Останній вираз називають *законом Ома для магнітного кола*. Значення магнітного опору пропорційне довжині магнітопроводу  $l_M$  і обернено пропорційне абсолютній магнітній проникності матеріалу та перерізу магнітопроводу  $S_M$ :

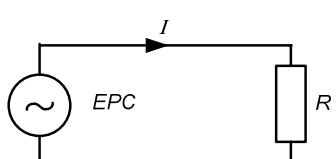
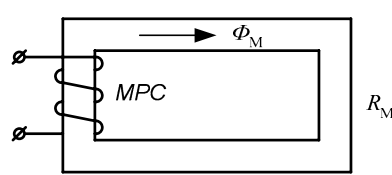
$$R_M = \frac{l_M}{\mu_a \cdot S_M}.$$

У розрахунках краще користуватися величиною, зворотною  $R_M$  – *магнітною провідністю*  $\Lambda_M$ :

$$\Lambda_M = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu_a \cdot S_M}{l_M}. \quad (6.1)$$

Для кращого запам'ятовування співвідношень між магнітними величинами рекомендують здійснити формальну аналогію з електричними величинами (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Електричне коло	Магнітне коло
	
Електрорушійна сила ЕРС [В]	Магніторушійна сила $F_M = I \cdot w$ [А·вит]
Електричний струм $I = U / R$ [А]	Магнітний потік $\Phi = F_M / R_M$ [Вб]

Електричне коло	Магнітне коло
Щільність струму $j = I/S$ [А/мм <sup>2</sup> ]	Магнітна індукція $B = \Phi/S_M$ [Вб/м <sup>2</sup> = Тл]
Електричний опір $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ [Ом]	Магнітний опір $R_M = \rho_M \cdot \frac{l_M}{S_M} = \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{l_M}{S_M}$ [Гн <sup>-1</sup> ]
Електрична провідність $\Lambda = 1/R$ [1/Ом]	Магнітна провідність $\Lambda_M = 1/R_M$ [Гн]
Питомий електричний опір $\rho$ [Ом/м]	Питомий магнітний опір $\rho_M$ [м/Гн]

**Закон повного струму.** Закон, пов'язуючий значення напруженості магнітного поля з МРС, яка викликає це поле, називають *законом повного струму*. Його описує такий вираз:

$$\oint H dl = \sum i_n w_n = \sum F_M,$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля;  $dl$  – ділянка контура;

$\sum i_n w_n$  – сума МРС утворених  $n$ -катушками вздовж замкненого контура.

Якщо магнітний контур має, наприклад, дві ділянки  $l_1$  і  $l_2$  (рис. 6.3) із різною магнітною проникністю  $\mu_{a1}$  та  $\mu_{a2}$  і напруженістю магнітного поля  $H_1$  та  $H_2$ , дві обмотки з кількістю витків  $w_1$  та  $w_2$ , якими течуть струми  $I_1$  і  $I_2$ , то закон повного струму у такому разі можна записати так

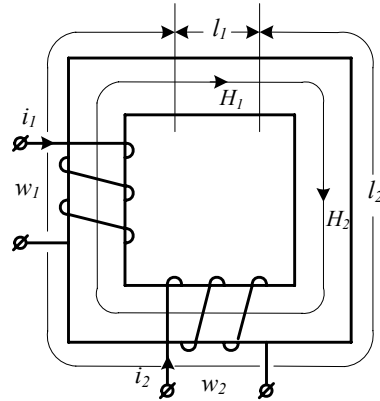


Рис. 6.3

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = H_1 l_1 + H_2 l_2.$$

**Перший закон Кірхгофа для магнітного кола.** Перший закон Кірхгофа стверджує, що сума магнітних потоків у будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0,$$

**Другий закон Кірхгофа для магнітного кола.** Другий закон Кірхгофа стверджує, що сума добутків магнітного потоку  $\Phi$  на магнітний опір  $R_{Mj}$   $j$ -ї ділянки замкненим контуром дорівнює сумі МРС  $F_{Mi}$ , що діють у цьому контурі:

$$\sum_{j=1}^K \Phi \cdot R_{Mj} = \sum_{i=1}^n F_{Mi} . \quad (6.2)$$

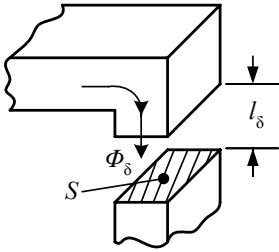


Рис. 6.4

**Магнітна провідність повітряного проміжку.** У робочому проміжку  $l_\delta$  магнітний потік проходить у повітрі (рис. 6.4). Оскільки відносна проникність повітря  $\mu = 1$ , то її абсолютна проникність дорівнюватиме магнітній сталій  $\mu_a = \mu_0$ . Користуючись співвідношенням (6.1) для магнітної провідності проміжку, можна записати

$$\Lambda_{\mu\delta} = \frac{\mu_a \cdot S}{l_\delta} = \frac{\mu_0 \cdot S}{l_\delta} .$$

Враховуючи, що у багатьох випадках магнітна провідність повітряного проміжку значно менша за провідності інших ділянок магнітного кола, у першому наближенні можна вважати, що вся МРС контура прикладена до повітряного проміжку:

$$F_M \approx \Phi_\delta \cdot R_{M\delta} = \frac{\Phi_\delta}{\Lambda_{\mu\delta}} .$$

За відомими значеннями МРС контура та магнітної провідності повітряного проміжку можна визначити величину магнітного потоку, утвореного у проміжку:

$$\Phi_\delta \approx F_M \cdot \Lambda_{\mu\delta} = F_M \cdot \frac{\mu_0 \cdot S}{l_\delta} \quad (6.3)$$

## 6.2. Магнітні кола постійного струму

**Стальний тороїд із розподіленою обмоткою і повітряним проміжком.** Розглянемо просте магнітне коло (рис. 6.5) – сталевий тороїд із магнітопроводом середньої довжини  $l_{ст}$  і перерізом  $S$ . Магнітопровід має повітряний проміжок  $l_\delta$ . Уздовж усього магнітопроводу намотана обмотка.

Якщо  $l_{ст} \gg l_{\delta}$ , що має місце у більшості електромагнітних систем, то потоками розсіювання можна знехтувати. Для магнітного кола застосовується другий закон Кірхгофа (6.2):

$$F_M = \Phi \cdot R_{ст} + \Phi \cdot R_{\delta} = \frac{\Phi \cdot l_{ст}}{\mu_a \cdot S} + \frac{\Phi \cdot l_{\delta}}{\mu_0 \cdot S}. \quad (6.4)$$

Рівняння (6.4) є початковим для розрахунку двох типових задач.

**Задача перша.** Необхідно визначити МРС для отримання у повітряному проміжку заданого магнітного потоку  $\Phi$ . Матеріал магнітопроводу та його розміри задані.

За законом повного струму, маємо

$$F_M = H_{ст} \cdot l_{ст} + H_{\delta} \cdot l_{\delta}. \quad (6.5)$$

Змінюючи другий доданок у виразі (6.5) на другий доданок у виразі (6.4), маємо:

$$F_M = H_{ст} \cdot l_{ст} + \frac{\Phi \cdot l_{\delta}}{\mu_0 \cdot S}.$$

У цьому виразі  $\Phi$  – задана величина;  $l_{ст}$ ,  $l_{\delta}$ ,  $S$  – відомі розміри магнітопроводу. Невідоме тільки значення  $H_{ст}$ . Цю величину знаходимо так.

За заданою величиною потоку  $\Phi$  і перерізом  $S$  визначаємо необхідну індукцію для сталі:  $B_{ст} = \frac{\Phi}{S}$ . Далі, користуючись кривою намагнічування для заданого матеріалу осердя (рис. 6.6), визначаємо напруженість магнітного поля в осерді  $H_{ст}$ . Отже, у виразі (6.2) відомі всі величини для визначення необхідної МРС.

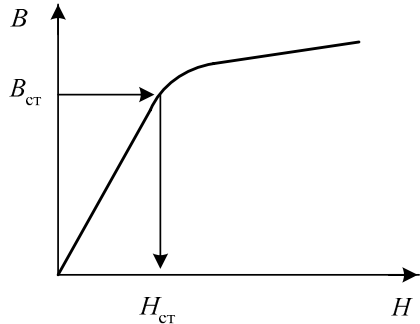


Рис. 6.5

Рис. 6.6

**Задача друга** (зворотна до першої). Треба визначити магнітний потік  $\Phi$  у проміжку, якщо відома МРС котушки:  $F_M = I \cdot w$ , розмі-

ри і матеріал магнітного кола. Цю задачу потрібно вирішувати, застосовуючи метод послідовного наближення та графоаналітичний метод, використовуючи криву намагнічування конкретної магнітної системи. Останню будують з допомогою відомої кривої намагнічування матеріалу  $B_{ст} = f(H_{ст})$  та заданої довжини. Приклади розв'язання таких задач можна знайти у праці [21].

**Розрахунок обмотки електромагніту постійного струму.** Даними для розрахунку обмотки електромагніту постійного струму є потрібна чи необхідна МРС. Температура обмотки не повинна перевищувати допустимої. У результаті розрахунку повинні бути отримані: діаметр дроту обраної марки  $d$ ; кількість витків  $w$ ; опір котушки  $R$ .

Якщо розраховують обмотку *напруги*, то необхідно задати ще й напругу живлення  $U$ .

Оскільки  $R = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{l_{сеп} \cdot w}{q}$ , де  $q$  – переріз дроту;  $l_{сеп}$  – середня довжина витка обмотки (рис. 6.7).

$$\text{Маємо} \quad F_M = I \cdot w = \frac{U}{R} \cdot w = \frac{U \cdot w}{\rho \frac{l_{сеп} \cdot w}{q}} = \frac{U \cdot q}{\rho \cdot l_{сеп}}. \quad (6.6)$$

Із виразу (6.6) видно, що за заданих  $\rho$  та  $l_{сеп}$  МРС  $F_M$  залежить від напруги і перерізу провідника.

Якщо за заданої напруги і середньої довжини витка потрібно отримати велику МРС  $F_M$ , то слід збільшити переріз дроту, при цьому обмотка буде мати меншу кількість витків та загальну довжину, і

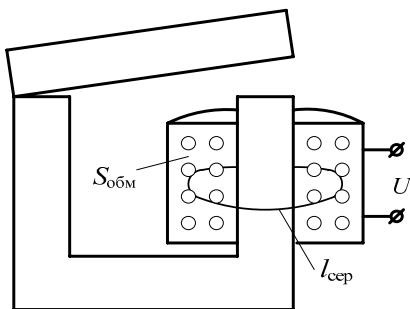


Рис. 6.7

таким чином зменшиться її опір, що спричинить зростання струму, що тече крізь неї та МРС. Отримавши розрахунковий переріз проводу  $q$ , з асортименту, який виробляє промисловість, обирають найближчий більший стандартний діаметр, що задовольняє цей переріз.

Кількість витків за заданого перерізу обмотки  $S_{обм}$  (рис. 6.7) визначають за виразом



$$W = \frac{S_{\text{обм}}}{q} \cdot \kappa_M,$$

де  $\kappa_M$  – коефіцієнт заповнення обмотки для міді [17].

**Сила тяги електромагніта постійного струму.** У рівномірному магнітному полі у повітряному проміжку ненасиченої магнітної системи сила тяги, що розвиває електромагніт, можна бути розрахувати за формулою

$$P_{\text{ем}} = \frac{1}{2} \frac{B_{\delta}^2 \cdot S}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\delta}^2}{\mu_0 \cdot S},$$

де  $B_{\delta}$  – індукція у проміжку;  $\Phi_{\delta}$  – магнітний потік у проміжку;  $S$  – площа проміжку;  $\mu_0$  – магнітна стала.

У звичайних конструкціях електромагнітів магнітний потік у проміжку  $\Phi_{\delta}$  залежить від довжини проміжку  $l_{\delta}$  (6.3):

$$\Phi_{\delta} \approx \mu_0 \frac{S}{l_{\delta}} F_M.$$

Інакше кажучи, сила тяги електромагніту зворотно пропорційна квадрату величини проміжку. Тому спочатку, коли проміжок максимальний, сила тяги невелика. Унаслідок наближення якоря до нерухомого осердя сила тяги  $P_{\text{ем}}$  зростає. Залежність  $P_{\text{ем}} = f(l_{\delta})$ , якщо  $I = \text{const}$ , називають *статичною тяговою характеристикою електромагніту*.

Для магнітної системи, зображеної на рис. 6.8, а (таку конструкцію називають *клапанною*), тягова характеристика буде падаючою (рис. 6.8, б). Для цієї системи електромагнітну силу можна бути розрахувати за виразом:

$$P_{\text{ем}} = \frac{1}{2} F_M^2 \frac{\mu_0 \cdot S}{l_{\delta}^2}.$$

Для *мостової* магнітної системи (рис. 6.9) сила тяги вдвічі менша, ніж у клапанній (повний проміжок удвічі більший).

Для *броньової* магнітної системи (соленоїд) сила тяги після втягування якоря спочатку зростає, а потім зменшується (рис. 6.10).

Клапанні та мостові магнітні системи використовують за малого ходу якоря (не більш як десять міліметрів). Броньові системи використовують для ходу якоря не більш як сто міліметрів.

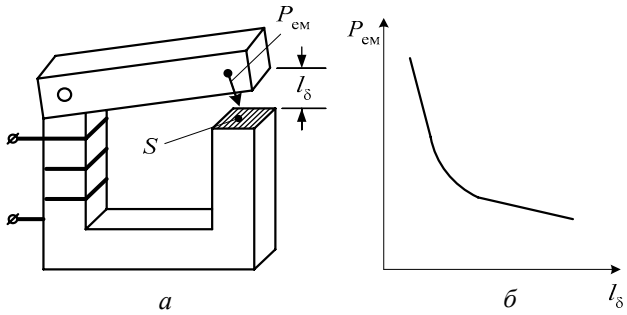


Рис. 6.8

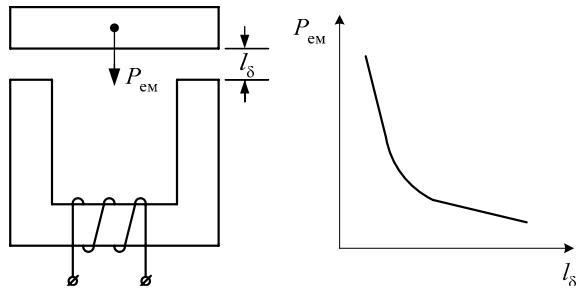


Рис. 6.9

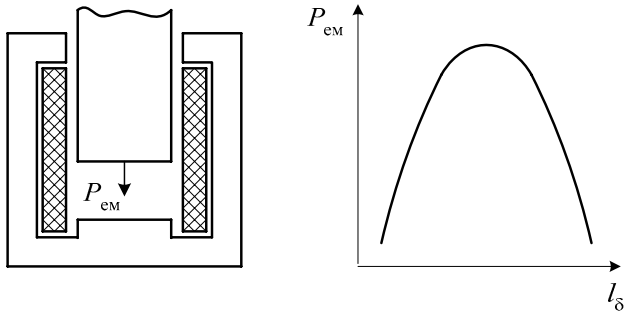


Рис. 6.10

При обертальному русі якоря використовують систему, зображену на рис. 6.11.

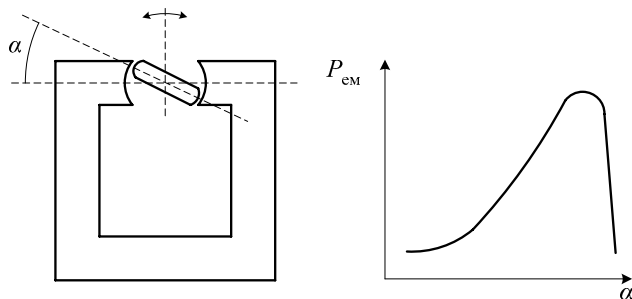


Рис. 6.11

### 6.3. Магнітні кола змінного струму

Магнітні кола змінного струму мають важливі відмінності від магнітних кіл постійного струму.

*По-перше*, за змінного магнітного потоку у магнітопроводі відбуваються втрати енергії на гістерезис та вихрові струми (див. підрозд. 3.2), тому тільки частина струму, що тече котушкою, є намагнічуваним, а частина струму йде на покриття зазначених втрат. Для зменшення цих втрат магнітопровід роблять шихтованим.

*По-друге*, напруга мережі  $U$ , підведена до обмотки, врівноважується не тільки активним, а й реактивним спадом напруги:

$$U^2 = (I \cdot R)^2 + (I \cdot X)^2, \quad (6.7)$$

де  $I$  та  $U$  – діючі значення струму та напруги в мережі. На постійному струмі і в статичному режимі, коли якір не рухається, прикладена напруга врівноважується тільки активним спадом напруги  $U = I \cdot R$ .

Для обмотки, яка має феромагнітне осердя, активний опір, звичай, значно менший за реактивний:  $R \ll X$  ( $X = \omega L$ ), тому за замкнутого магнітопроводу першим доданком у виразі (6.7) можна знехтувати. Тоді

$$U = I \cdot X = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m,$$

де  $f$  – частота змінного струму;  $w$  – кількість витків;  $\Phi_m$  – амплітуда магнітного потоку.

Отже, магнітний потік у зазорі дорівнює:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w}.$$

За  $U = \text{const}$  потік  $\Phi_m$  майже сталий (не залежить від довжини проміжку  $l_\delta$ ). Це пояснюють тим, що зі зростанням довжини проміжку зменшується індуктивний опір котушки, що підвищує струм в обмотці і сприяє зростанню магніторушійної сили  $F_M$ , оскільки  $U = \text{const}$ . Але зі зростанням проміжку зростає й магнітний опір  $R_M$ .

У електромагнітв постійного струму зі зростанням проміжку магнітний потік помітно зменшується, оскільки магнітний опір  $R_M$  зростає, а МРС залишається незмінною ( $U = \text{const}$ ).

**Розрахунок обмотки електромагніту змінного струму.** Початковими даними для розрахунку обмотки є потрібні амплітуди МРС  $F_m$  та магнітного потоку  $\Phi_m$  за заданої напруги мережі  $U$ .

На початку підрозділу вже йшлося про те, що напругу мережі прикладену до обмотки змінного струму, врівноважують активним та реактивним спадом напруги:

$$U^2 = (I \cdot R)^2 + (4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m)^2. \quad (6.8)$$

У рівнянні (6.8) три невідомі величини: струм в обмотці  $I$ , активний опір обмотки  $R$ , кількість витків  $w$ . Тому одразу задачу не можна розв'язати. Її розв'язують, застосовуючи метод послідовних наближень.

У першому наближенні активним спадом напруги можна знехтувати. Якщо на початку розрахунків узяти  $R = 0$ , тоді  $U = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m$ , і можна визначити кількість витків для отримання потрібної величини магнітного потоку  $\Phi_m$ :

$$w = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m}.$$

Знайдену кількість витків необхідно трохи зменшити, оскільки знехтували активним спадом напруги. Звичайно розрахункове значення  $w_{\text{роз}} = (0,7 - 0,8)w$ .

Отже, використовуючи значення МРС та  $w_{\text{роз}}$ , визначаємо струм у обмотці:

$$I = \frac{F_m}{\sqrt{2} \cdot w_{\text{роз}}}.$$

Далі задають густину струму  $j$  та визначають необхідний переріз дроту  $S_{\text{др}} = I/j$ . Рекомендують таку густину струму:

2 ... 4 А/мм<sup>2</sup> – для тривалого ввімкнення обмотки;

5 ... 12 А/мм<sup>2</sup> – для повторного короткотривалого режиму;  
 13 ... 30 А/мм<sup>2</sup> – для короткотривалого режиму.

Отриманий переріз округлюють до стандартного.

Обравши спосіб укладання, можна визначити середню довжину витка обмотки  $l_{\text{сер}}$  (див. рис. 6.5). Знаючи величини  $l_{\text{сер}}$  та  $w$ , визначаємо активний опір обмотки  $R$ :

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\text{сер}} \cdot w_{\text{роз}}}{S_{\text{др}}}$$

Отже, маємо всі величини, щоб підставити у формулу (6.8). Якщо після цього права та ліва частини рівняння відрізняються більше ніж на 10 %, то необхідно змінити кількість витків для отримання балансу.

У кінці розрахунку виконують перевірку обмотки на нагрівання. При цьому необхідно врахувати додаткове нагрівання магнітопроводу за рахунок втрат від вихрових струмів та гістерезису.

**Сила тяги електромагніту змінного струму.** В електромагнітах постійного струму за фіксованого положення якоря магнітний потік  $\Phi$  постійний у часі, оскільки обмоткою тече постійний струм.

В електромагнітах змінного струму обмоткою тече струм, що змінюється за відомим синусоїдальним законом:  $i = I_m \cdot \sin \omega \cdot t$ . Також змінюється і магнітний потік у проміжку  $\Phi_\delta$ :  $\Phi_\delta = \Phi_m \cdot \sin \omega \cdot t$ .

Сила тяги електромагніту змінного струму так само, як і електромагніту постійного струму, визначають за формулою Максвелла:

$$P_{\text{см}} = \frac{(\Phi_m \cdot \sin \omega \cdot t)^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{\Phi_m^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S} \sin^2 \omega \cdot t = P_m \cdot \sin^2 \omega \cdot t, \quad (6.9)$$

де  $P_m = \frac{\Phi_m^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S}$  – амплітуда сили тяги електромагніту. Використовуючи

знайоме з тригонометрії співвідношення  $\sin^2 \omega \cdot t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2 \cdot \omega \cdot t)$ ,

вираз (6.9) можна записати:

$$P_{\text{см}} = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t}{2} = P_{\text{сер}} - P_{\text{сер}} \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t, \quad (6.10)$$

де  $P_{\text{сер}}$  – середнє значення сили тяги за період (рис. 6.12).

Із виразу (6.10) маємо три важливі висновки.

*По-перше*, електромагнітна сила змінюється від нуля до максимуму і ніколи не набуває негативного значення – електромагніт

завжди тільки притягує яркір зі змінною силою і ніколи його не відштовхує.

*По-друге*, електромагнітна сила змінюється з подвійною частотою електромережі (рис. 6.12).

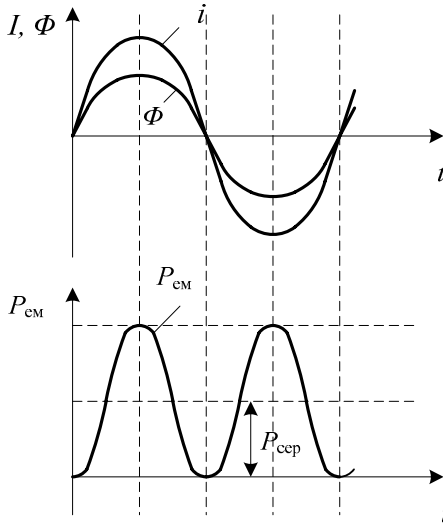


Рис. 6.12

з подвійною частотою; друга – механічна сила зворотної пружини  $P_{пр}$ , що тягне яркір назад.

*По-третє*, за інших рівних умов середнє значення електромагнітної сили  $P_{ср}$ , що діє на яркір у електромагніті змінного струму, удвічі менша ніж у електромагніту постійного струму. Тому ефективність використання феромагнітних матеріалів за змінного струму вдвічі менша ніж за постійного струму.

Якщо яркір електромагніту має зворотну пружину  $l$  (рис. 6.13), то на нього діє одночасно дві сили: перша – електромагнітна сила  $P_{ем}$ , яка притягує яркір до магнітопроводу, змінюючись від 0 до  $P_m$

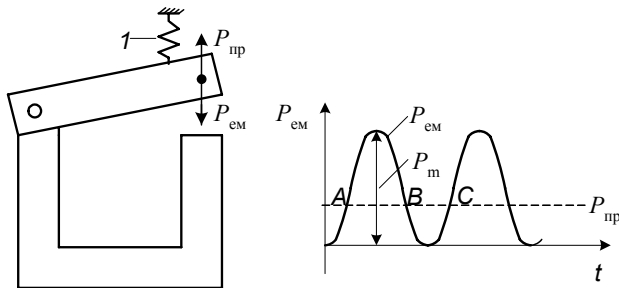


Рис. 6.13

Коли сила  $P_{ем} > P_{пр}$  (ділянка від А до В), яркір притягнеться. На ділянці від В до С  $P_{ем} < P_{пр}$ , яркір почне відтягувати пружина і він вібруватиме. Вібрування ярка небажане з трьох причин:

- 1) призводить до швидкого зношування магнітної системи у місці кріплення якоря;
- 2) передається на контакти, що призводить до швидкого їх зношування (підгоряння через іскри);
- 3) супроводжується шумом.

Для нейтралізації вібування в електромагнітах змінного струму знайшли просте рішення – *короткозамкнений виток* (рис. 6.14).

У магнітопроводі  $l$  роблять паз  $2$  і у нього вкладають короткозамкнений виток міді чи латуні. Виток охоплює 70–80 % перерізу магнітопроводу. Ідея полягає в тому, що у проміжку створюються два магнітних потоки  $\Phi'_1$  та  $\Phi'_2$ , зміщені за фазою один відносно одного і рознесені у просторі.

Принцип роботи витка такий (рис. 6.14, 6.15). Загальний магнітний потік  $\Phi$  у повітряному проміжку поділяється на два потоки:  $\Phi_1$  – пронизує неохоплену витком частину магнітопроводу,  $\Phi_2$  – охоплену. При цьому у витку індукується ЕРС, і виникає струм  $i_k$  короткозамкненого витка. Цей струм збуджує магнітний потік  $\Phi_k$ , який замикається через короткозамкнений виток та ліву частину магнітопроводу. У лівій частині проміжку потік  $\Phi_k$  спрямований згідно з  $\Phi_1$ , тому результуючий потік дорівнює  $\Phi'_1 = \Phi_1 + \Phi_k$ ; у правій частині – зустрічно, тому  $\Phi'_2 = \Phi_1 - \Phi_k$ . Отже, між двома результуючими потоками  $\Phi'_1$  та  $\Phi'_2$  утворюється кут  $\psi$  (рис. 6.15).

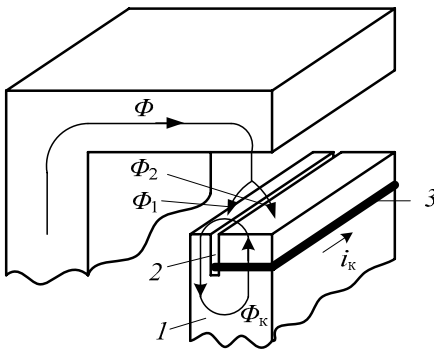


Рис. 6.14

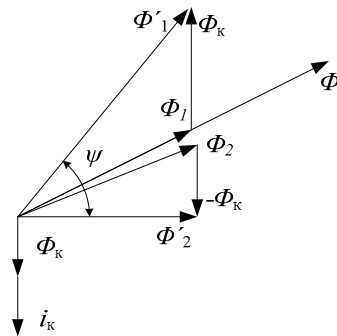


Рис. 6.15

Кожний потік ініціює свою силу тяги  $P_{ем1}$  та  $P_{ем2}$ , зсунутих у часі (рис. 6.16). Завдяки цьому зсуву, результуюча сила  $P_{ем}$  пульсує менше і ніколи не зменшується до нуля. Можна так добрати кут  $\psi$

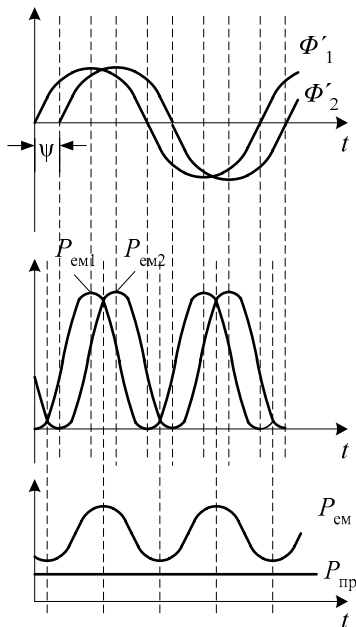


Рис. 6.16

(50–80°) та силу пружини  $P_{пр}$ , щоб  $P_{ем}$  була завжди більшою ніж  $P_{пр}$ , тим самим уникнути вібрації.

**Порівняння тягових характеристик електромагнітів постійного та змінного струмів.** Електромагніти постійного струму забезпечують велику силу тяги за менших проміжків (за малого ходу якоря), оскільки сила тяги зворотно пропорційна квадрату величини проміжку. В електромагнітах змінного струму середнє значення сили тяги вдвічі менше, ніж у електромагнітів постійного струму за тієї самої магнітної індукції, але зі збільшенням проміжку магнітний потік зменшується незначно. Тому електромагніти змінного струму краще працюють за відносно великого ходу якоря.



### Запитання та завдання до модуля I

1. Наведіть класифікацію ЕА.
2. Якими є кліматичне виконання та категорії розміщення ЕА?
3. Схарактеризуйте захисні оболонки ЕА (наведіть класифікацію рівнів захисту за ІР).
4. Якими є номінальні параметри ЕА (визначення, значення)?
5. Які основні вимоги до ЕА вам відомі?
6. Схарактеризуйте електричні контакти (визначення), ділянки контактних поверхонь.
7. Наведіть класифікації електричних контактів (за умовами роботи, функціональним призначенням, видом поверхні контактування).
8. Які матеріали використовують для виготовлення електричних контактів (вимоги, порівняння властивостей, область застосування)?
9. Опишіть процес нагрівання електричних контактів (графік, характерні зони).
10. Які електродинамічні сили діють в електричних контактах і їх компенсація?
11. Які основні конструкції низьковольтних контактів вам відомі?
12. Які основні конструкції високовольтних контактів вам відомі?



13. Схарактеризуйте іонізаційні процеси в міжконтактному проміжку в початковій стадії розімкнення контактів.
14. Які іонізаційні процеси відбуваються в дузі, що стійко горить?
15. Які деіонізаційні процеси, що відбуваються в дузі, що стійко горить, вам відомі?
16. Яка вольт-амперна характеристика дуги постійного струму?
17. Який розподіл напруги уздовж стовбура дуги?
18. У чому особливості вимкнення дуги постійного струму?
19. Що таке електрична міцність дугового проміжку?
20. Що таке вольт-амперна характеристика електричної дуги змінного струму?
21. Схарактеризуйте процес гасіння дуги змінного струму і умову її гасіння.
22. Які методи гасіння дуги шляхом її розтягування і охолодження вам відомі?
23. У чому особливість гасіння дуги в спеціальних середовищах?
24. У чому особливість гасіння дуги за високого тиску і у вакуумі?
25. У чому особливість гасіння дуги в дугогасильній решітці та вузьких щілинах?
26. Схарактеризуйте здатність вимкнення ЕА, номінальний струм вимкнення.
27. Схарактеризуйте електродинамічні сили в паралельних та взаємно перпендикулярних провідниках.
28. Схарактеризуйте електродинамічні сили в кільцевому витку та між витками.
29. Що таке електродинамічна стійкість ЕА?
30. Що таке термічна стійкість ЕА?
31. Які основні співвідношення в магнітних колах?
32. Схарактеризуйте магнітні кола змінного струму.
33. Який принцип роботи короткозамкнутого витка?

■ Розділ 7

КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ  
НАПРУГОЮ МЕНШЕ НІЖ 1000 В

7.1. Класифікація комутаційних апаратів  
та категорії застосування

До силових комутаційних апаратів напругою меншою ніж 1000 В (низьковольтних) відносять рубильники (рис. 7.1, *а*), перемикачі (рис. 7.1, *б*), контактори (рис. 7.1, *в*), пускачі (рис. 7.1, *г*) та автоматичні повітряні вимикачі (рис. 7.1, *д*). Визначення та призначення кожного виду апаратів містяться у відповідному підрозділі.

Графічні зображення зазначених апаратів наведені на рис. 7.1.

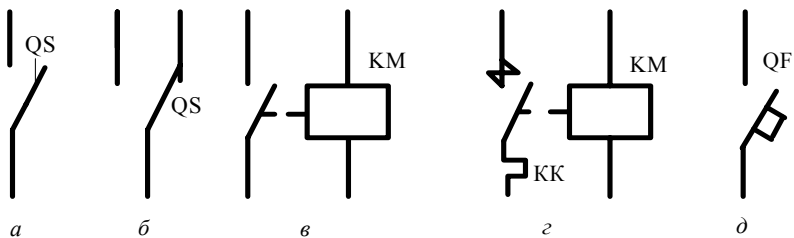


Рис. 7.1

Усі низьковольтні комутаційні апарати в процесі експлуатації комутують електричні кола з певними параметрами, зумовленими особливостями навантаження. Так, у момент запускання електродвигуна чи гальмування противмиканням в мережі спостерігають струми, які багаторазово перевищують струми номінальних режимів. Комутувати кола з індуктивним навантаженням значно важче, ніж з активним. Промислово випускати комутаційні апарати лише для найважчих умов роботи економічно недоцільно, оскільки в багатьох випадках передбачені для них електрична і механічна

міцності ніколи не будуть затребувані, що може спричинити невинуваті витрати матеріальних та трудових ресурсів. Через це промисловість випускає різні серії комутаційних апаратів одного функціонального призначення, які використовують у різних категоріях застосування.

ГОСТ 12434-83 класифікує всі можливі галузі використання комутаційних низьковольтних апаратів на такі *категорії застосування* (для змінного струму): АС-1 – активне або малоіндуктивне навантаження, електропечі опору; АС-2 – запускання і вимкнення електродвигунів із фазним ротором, гальмування противмиканням; АС-3 – пряме запускання електродвигунів з короткозамкнутим ротором, вимкнення двигунів, що обертаються; АС-4 – запускання двигунів з короткозамкненим ротором, вимкнення нерухомих двигунів, або двигунів, що обертаються повільно, гальмування противмиканням; АС-11 – керування електромагнітами змінного струму; АС-20 – комутація кіл активних навантажень, включно з помірним перевантаженням; АС-22 – комутація змінних активних та індуктивних навантажень, включно з помірним перевантаженням; АС-23 – комутація навантажених двигунів чи інших високоіндуктивних навантажень. У ГОСТі 12434-83 наведені конкретні умови комутації кіл із визначеними параметрами для кожної категорії застосування, а також наведені категорії застосування комутаційних апаратів для кіл постійного струму, позначених літерами ДС та відповідними цифрами.

У технічних даних низьковольтних комутаційних апаратів, зазвичай зазначають рекомендовану категорію їх застосування.

## 7.2. Рубильники та перемикачі

*Рубильником називають неавтоматичний вимикач на два положення («Увімкнено», «Вимкнено») з ручним керуванням.* Використовують їх в колах змінної (до 660 В) та постійної (менш як 440 В) напруги. Рубильники без дугогасильних камер призначені для вимкнення кіл зі струмом до  $0,2...0,3 I_{\text{ном}}$  та для створення помітного розриву кола за ремонтних робіт. Апарати, оснащені дугогасильними пристроями – поперечними решітками зі сталевих пластин, допускають вимкнення більших струмів  $(0,5...1,0)I_{\text{ном}}$ . Номінальні струми рубильників мають широкий діапазон (25– 1000 А і більше).

У конструкції контактів сучасних рубильників частіше використовують лінійний врубний контакт зі сталеву пружиною. Рубильники змінного струму виготовляють дво- та триполюсними, постійного струму – одно- та двополюсними.

Промислово випускають кілька серій рубильників, які комплектують різними видами приводів. До найпоширеніших належать серії Р, П, В, РБ, РП, РВ та ін. Перша літера характеризує функціональну особливість: Р – рубильник, П – перемикач, В – вимикач. Сполучення другої та третьої – вид приводу: Б – боковий, П – привод, ПЦ – привод центральний, Ш – керування штангою, О – однополюсний.

З міркувань безпеки рубильники з відкритими ножами та центральним чи бічним рукоятками можна застосовувати в обладнанні до 220 В. Конструкція рубильника серії Р із центральною рукояткою наведена на рис. 7.2, а.

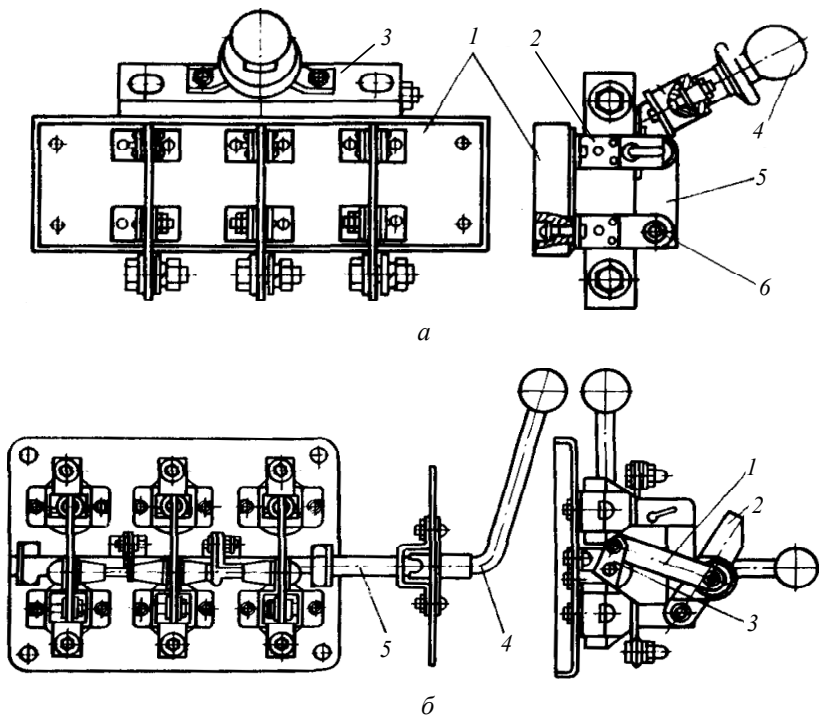


Рис. 7.2

На ізоляційній основі 1 закріплені контактні стояки нерухомого контакту 2 та шарніра б рухомого контакту (ножа) 5. На ізоляційній планці 3, яка пов'язує всі три полюси між собою, закріплена рукоятка 4 ручного керування.

В обладнанні на 380 В і вище обов'язково використовують рубильники із закритими струмопровідними частинами. Керування положенням ножів такого рубильника здійснюють нескладним приводом, що пов'язує рукоятку, яка знаходиться поза захисним кожухом, з рухомими контактами.

Залежно від конструкції, приводи бувають бічними виносними, важільними центральними та бічними, а також із маховиком (у важких рубильниках на великі струми). На рис. 7.2, б наведена конструкція рубильника з бічним важільним приводом. У ньому зусилля від рукоятки 4 через вал 5 передається на важелі 3, які пов'язані ізоляційними тягами 1 із рухомими контактами 2.

У конструкції рубильника із центральним приводом (рис. 7.3) саме рукоятка 1 виконує роль важеля і передає зусилля через тягу 2 на рухомі контакти 4. Рубильник оснащений дугогасильною камерою 3, змонтованою на нерухомих контактах.

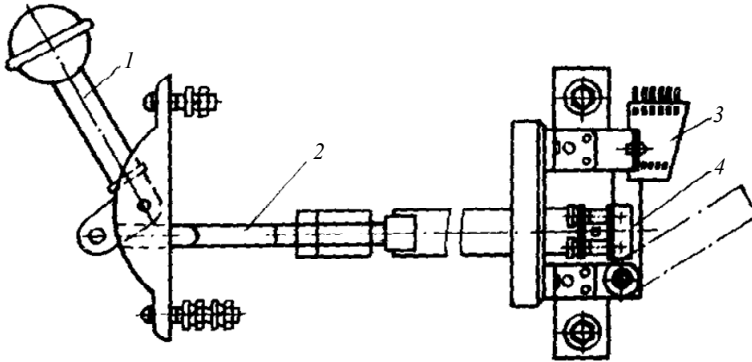


Рис. 7.3

Прагнення зменшити розміри низьковольтних розподільчих пристроїв, у яких, окрім рубильників, використовують запобіжники, спричинило розроблення блоків «вимикач – запобіжник» серії БВП та «рубильник – запобіжник» – БРП з використанням запобіжників ПН, високої механічної міцності. У них запобіжник, окрім своєї основної функції – захисту мереж, – виконує роль ру-

хомого ножа рубильника. Блоки виготовляють на номінальні струми 100, 250 та 400 А. На рис. 7.4 наведена конструкція блока БВП із горизонтальним переміщенням запобіжника.

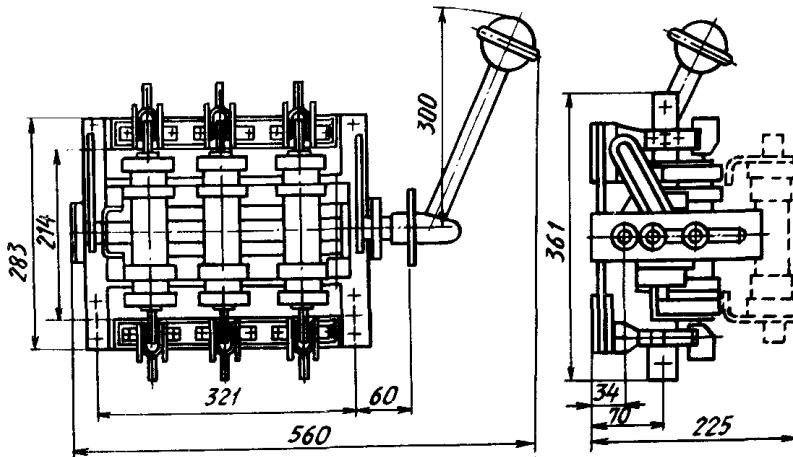


Рис. 7.4

На несій конструкції розміщений важільний привод для переміщення патронів запобіжників з положення «Увімкнено» в положення «Вимкнено» (зображений штриховими лініями на рис. 7.4, праворуч) і навпаки. Механічне блокування унеможливує відкриття захисних дверцят, що закривають запобіжники, за увімкненого положення апарата і його вимкнення за відчинених дверцят.

**Перемикачі** призначені для комутації кількох електричних кіл. Перемикач на значні струми (більші за 100 А) являє собою рубильник з трьома положеннями. У першому положенні він подає напругу на одну лінію, у другому – обидві лінії вимкнені, у третьому – підімкнена друга лінія (див. рис. 7.1, б).

*Пакетні вимикачі та перемикачі* випускають на номінальні струми від 10 до 400 А за напруги змінного струму 220 В і меншого як 250 А за напруги 380 В. Пакетні вимикачі складаються з набору однотипних елементів (пакетів), пов'язаних загальним центральним стрижнем із поворотною рукояткою. Випускають пакетні перемикачі двох типів: *із ковзними ламелями та кулачковим механізмом.*

На рис. 7.5 наведений загальний вигляд пакетного вимикача з ковзними ламелями типу ПВ і конструкція одного пакета. Неру-

хомі клиновидні контакти 8 розміщені парами за колом та закріплені на ізоляційній основі 6. Рухомі контакти 7 кожного пакета, виготовлені у вигляді частини кільця чи ножа, закріплені на ізоляційній шайбі 5, яка має квадратний отвір для спільного центрального стрижня. Пакети з допомогою шпильок 2 прикріплені до основи 1 та кришки 3. У кришці є так званий моментний механізм, який забезпечує постійну швидкість руху контактів незалежно від швидкості обертання рукоятки 4.

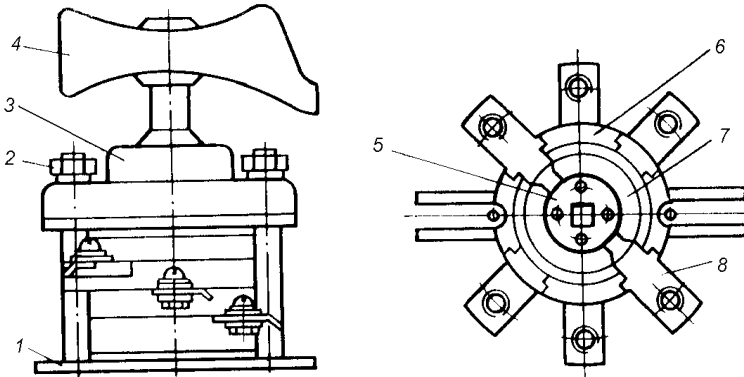


Рис. 7.5

Механізм виконаний на основі пружини, яка закручується внаслідок повороту центрального стрижня і пружинної шайби. Досить високу комутаційну здатність пакетного вимикача забезпечує подвійний розрив на фазу та виконання шайб із газогенерувального матеріалу. В одному вимикачі можуть бути зібрані від двох до семи пакетів із різною кількістю полюсів, комутаційних положень та з рухомими контактами різної конфігурації, що дозволяє одержувати різноманітні схеми увімкнення.

Кулачкові пакетні перемикачі мають надійнішу контактну систему. Перемикач серії ПК показаний на рис. 7.6. У кожному пакеті є фігурний кулачок 1, який обертається центральним стрижнем. Унаслідок повороту кулачка один зі штоків 2 потрапляє в його западину, пружина 3 переміщує містковий рухомий контакт 4 та забезпечує потрібне притискання його до нерухомих контактів 5. Подальший поворот кулачка відпускає шток, і рухомі контакти розмикають коло.

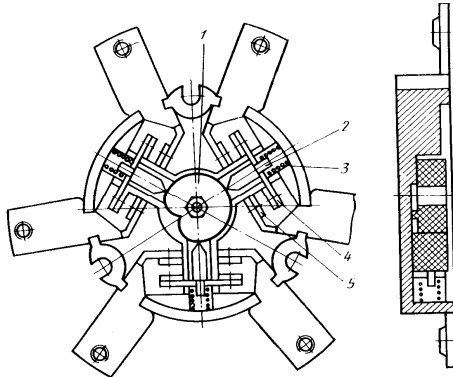


Рис. 7.6

Пакетні та кулачкові перемикачі призначені для складних перемикань одночасно в кількох електричних колах (колах керування, вимірювання, сигналізації та ін.). Випускають модифікації з фіксованими одним або кількома положеннями, із самоповертанням у нульове положення та ін. Кількість контактів може бути від 2 до 32.

Для комутації в складних схемах керування зі значеннями струмів, меншими за 16 А використовують перемикачі, які отримали назву *ключі керування*. Опис конструкції і схем комутації ключів керування можна знайти у посібнику [20].

### 7.3. Контактори

**Контактори.** *Контактор – електричний апарат, призначений для частих дистанційних увімкнень та вимкнень електричного кола за нормальних режимів роботи. Контактори не обладнані якимись захисними пристроями, але дозволяють здійснювати близько кількох тисяч комутацій за годину. Вони мають високу механічну (до  $10 \dots 20 \times 10^6$  циклів) та електричну (до  $3 \times 10^6$  циклів) зносостійкість. Контактори випускають для різних кліматичних факторів зовнішнього середовища, категорій розміщення, різних класів, що відповідають найбільшій частоті ввімкнення за 1 годину в повторному короткотривалому режимі та ін.*

Увімкнення контактора здійснює електромагніт. Контактори мають головні та допоміжні контакти. Вони повинні витримувати



напругу на головних контактах  $1,1 U_{\text{ном}}$ , на котушці від 0,85 до  $1,1 U_{\text{ном}}$ . Контактори виготовляють для комутації силових кіл постійного та змінного струмів.

Електромагніти контакторів можуть виготовляти для підімкнення катушок до кіл керування як постійного, так і змінного струму. За кількістю головних полюсів контактори бувають від однополюсних до п'ятиполюсних. За номінальним струмом головного кола від 4 до 630 А та на більші струми для відповідних технічних умов. За наявністю допоміжних контактів – з допоміжними і без них. Номінальні струми тривалого режиму роботи допоміжних контактів: 4; 6,3; 10 А.

**Конструкція.** Практично, найпоширенішими є два конструктивні типи виконання контакторів: *прямоходовий* та *важільно-поворотний*. На рис. 7.7, а наведена спрощена схема конструкції контактора прямоходового типу. Після підімкнення електромагніту  $I$  до джерела змінного струму його яркір  $8$  втягується. Переміщення яркоря передається штоком  $2$  основним рухомих контактам  $5$  місткового типу, які замикають коло нерухомих контактів  $4$ . Необхідний тиск контактів забезпечує пружина  $7$ .

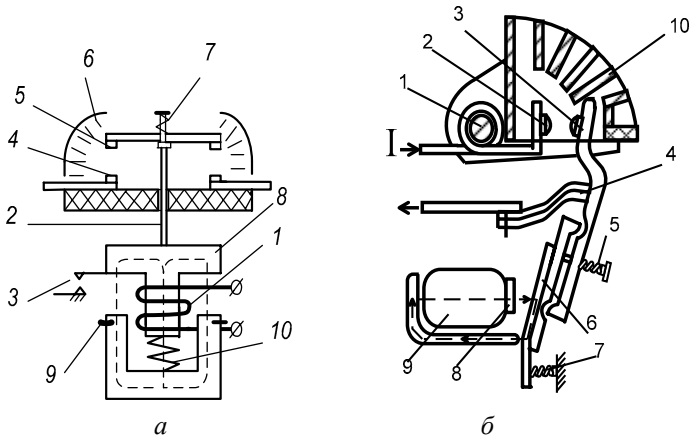


Рис. 7.7

Після відімкнення електромагніту зворотна пружина  $10$  піднімає містковий контакт угору. Дуга, яка утворилась між контактами, втягується у металеву решітку  $6$  і гасне. Поздовжнє вібрування електромагніту змінного струму усувають короткозамкнені витки  $9$ ,

охоплюючи частину полюсів магнітопроводу, набраного з тонких, ізольованих одна від одної пластин (див. рис. 6.14). Одночасно з основними контактами вмикаються (вимикаються) допоміжні контакти 3.

Основним недоліком прямоходової схеми є дрижання контактів у момент втягування та удару якоря об магнітопровід, що за великих пускових струмів, наприклад, потужних асинхронних двигунів, може викликати швидке зношування (підгоряння) контактів. Тому контактори прямоходової схеми використовуються для комутації струмів менших за 630 А.

Для важких режимів роботи, які характеризує значна частота ввімкнення та категоріями застосування АС-4, АС-11 та АС-23 (див. підрозділ 7.1), використовують контактори важільно-поворотного типу (рис. 7.7, б). Після підімкнення котушки електромагніту постійного струму 9 (на змінному струмі він має Ш-подібну конструкцію) до джерела, яркір 6 притягується до осердя 8, зворотна пружина 7 стискається, і рухомий контакт 3, закріплений на складовому важелі, замикається з нерухомим контактом 2. Пружина 5 забезпечує амортизацію під час ударів якоря об осердя та необхідне притискання контактів. Така конструкція дозволяє отримати більшу механічну зносостійкість. Струмопідвід до рухомих контактів здійснюють мідні сплетені дроти або набір з мідної фольги 4 (гнучкий зв'язок). Для покращення гасіння дуги разом з металевими пластинами 10 використовують «магнітне обдування» за допомогою спеціального електромагніту з осердям 1.

В аеропортах та на промислових підприємствах найбільш поширені контактори змінного струму серії КТ (керування на змінному струмі) та КТП (керування на постійному струмі). Їх випускають на струми 63...630 А та напругу до 660 В і вони мають два – п'ять допоміжних контактів. Наступні, після літер, дві цифри (60 чи 70) позначають номер серії. Серія 60 передбачає частоту вмикань близько 1200 вк/год, серія 70 – близько 600 вк/год. Третя цифра (від 1 до 6) шифрує величину контактора, яка зумовлює його номінальний струм. Четверта цифра позначає кількість полюсів (фаз) контактора.

**Електрична схема підімкнення.** Схема підімкнення трифазного контактора змінного струму наведена на рис. 7.8. Контактор вмикають натисканням кнопки SB1 «Увімкнути». При цьому фазна

(чи міжфазна) напруга подається на котушку КМ електромагніту, він замикає основні контакти, що підмикають навантаження, та одночасно допоміжні контакти SKM1 і SKM2. Контакти SKM1 шунтують пускову кнопку SB1 та утримують контактор у ввімкненому положенні після відпускання кнопки SB1, контакти SKM2 замикають коло сигнальної лампи HL.

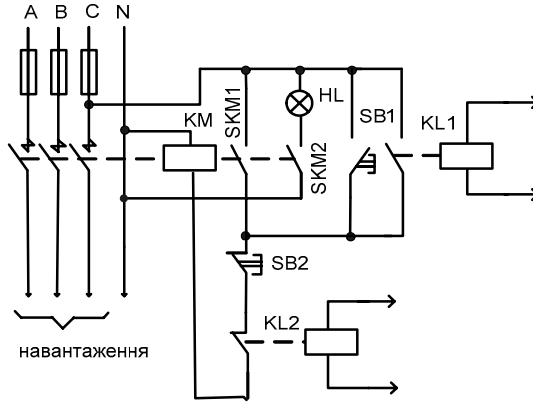


Рис. 7.8

Для вимикання контактора необхідно натиснути кнопку SB2 «Вимкнути», при цьому розмикається живлення електромагніту, і під дією зворотної пружини відбувається вимикання основних і допоміжних контактів. Контактор можна також увімкнути за сигналом якогось пристрою автоматики, який має вихід на реле KL1, і вимкнути з допомогою реле KL2.

У ввімкненому стані обмотка контактора постійно перебуває під струмом, що являє собою основну причину його відмови. У колах, де контактори тривалий час увімкнені, доцільно використовувати контактори з клямкою, яка дозволяє вимикати основну обмотку після його ввімкнення. Вимикання такого контактора відбувається з допомогою спеціального електромагніту вимикання, який вибиває клямку.

**Вакуумні контактори.** Опанований промисловий випуск вакуумних контакторів серії КТ 13 для важких умов роботи з номінальними струмами 250, 400 та 630 А. Основу контактора складає вакуумна камера КДВ-12, яка являє собою порожнистий циліндричний ізолятор (80×45 мм), герметично закритий металевими

фланцями. Рухомий контакт з'єднаний із фланцем з допомогою сільфона, який забезпечує його хід у межах 1,5 мм, чого цілком досить для гасіння дуги у вакуумі. Переміщення рухомого контакту здійснює електромагніт постійного чи змінного струмів.

Вакуумна дугогасильна камера (рис. 7.9) містить рухомий 1 і нерухомий 3 силові контакти, робоча поверхня яких виконана з тугоплавкого матеріалу 4. Керамічна стінка циліндричної форми 6 спільно з фланцем 7 утворюють жорсткий корпус, усередині якого розташована гофрована перегородка 2 (сільфон). Така конструкція дозволяє забезпечити рух контакту 1 і зберігати усередині камери глибокий вакуум.

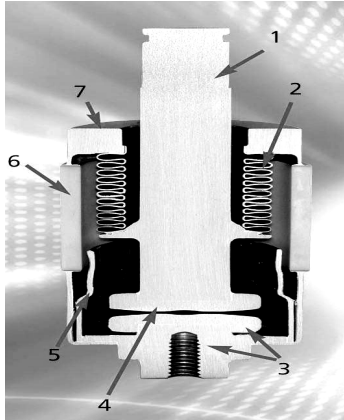


Рис. 7.9

## 7.4. Пускачі

**Магнітні пускачі.** *Магнітний пускач призначений для дистанційного ввімкнення та захисту від перевантажень асинхронних електродвигунів. Він складається з трифазного контактора і теплового реле.*

Через інерційність теплового реле магнітні пускачі не захищають мережу від можливих КЗ в електродвигунах. Для цих цілей необхідно передбачити встановлення *плавких запобіжників чи автоматів.*

Магнітні пускачі серії ПА, що випускали раніше, мали у своєму складі контактор важільно-поворотного типу (див. рис. 7.7, б) із Ш-подібним електромагнітом. У пускачах нової серії ПМ використовують прямоходовий контактор (див. рис. 7.7, а) та двоелементне теплове реле ТРН з термокомпенсацією.

**Теплові реле** *призначені для захисту електрообладнання від перевантаження.* На рис. 7.10, а наведено спрощене зображення такого реле. Працює це реле так. Коли підвищений струм тече пластинчастим нагрівачем 9, що ввімкнений послідовно в коло

електродвигуна, нагрівається біметалева пластина 8. Вона згинається ліворуч та повертає ізоляційну рамку 10 і, натискаючи на засочку 6, закріплену на штоці 3, стискає пружину 4. Засочка виходить із виступу регулятора струму спрацювання 5, і пружина 1 виштовхує шток 3 угору та розмикає контакти 2 у колі електромагнітні пускача (рис. 7. 11). Пускач вимикається.

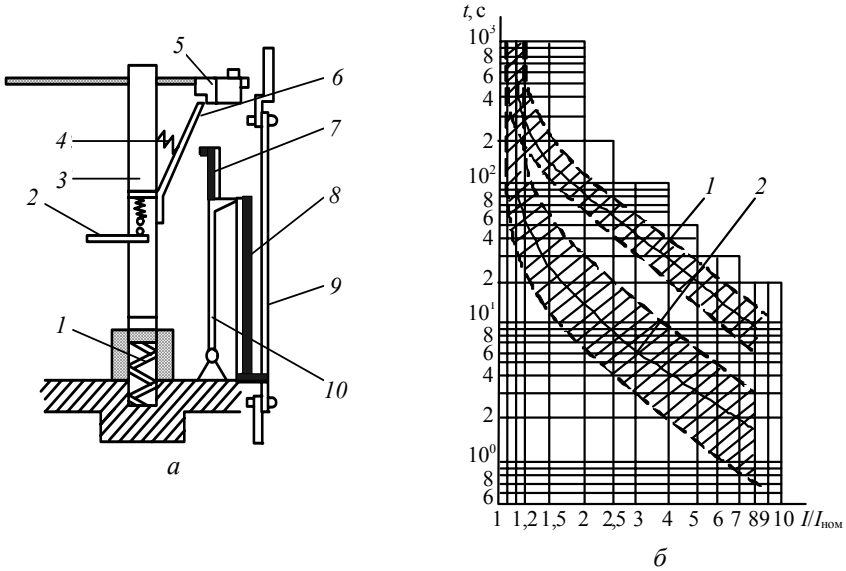


Рис. 7.10

Біметалева пластина 8 згинається і через зміну температури довкілля. Щоб це не впливало на характеристику (див. рис. 7.10, б) теплового реле, у верхній частині рамки 10 закріплений термокомпенсатор 7. Термокомпенсатор у міру підвищення температури довкілля вигинається праворуч (у бік, протилежний від переміщення біметалевої пластини 8).

Регулятор 5 струму спрацювання теплового реле виконаний у вигляді ексцентрика, який змінює відстань

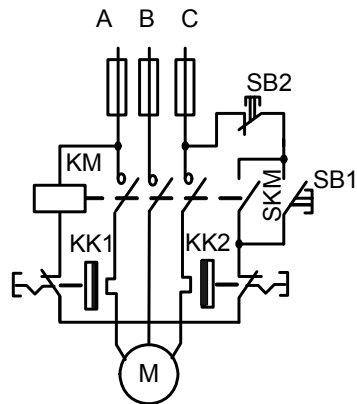


Рис. 7. 11

між заскочкою 6 і термокомпенсатором 7. Межі регулювання струму спрацювання –  $(0,75...1,25) I_{ном}$ . Значення  $I_{ном}$  вибиті на кожному елементі теплового реле. На рис. 7.10, б наведені захисні характеристики реле ТРН-25 у холодному 1 і нагрітому 2 станах.

Після спрацювання теплового реле повторне ввімкнення магнітного пускача можливе тільки через певний час, необхідний для охолодження біметалевої пластини 8 і вирівнювання її праворуч. Після того потрібно натиснути на кінець штока 3 (див. рис. 7.10, а), який виступає. При цьому заскочка опуститься вниз і впреться у виступ регулятора 5, а контакти 2 замкнуться коло електромагніту, який можна знову ввімкнути натисканням кнопки SB1 *Пуск*.

**Електрична схема підімкнення пускача.** Схема підімкнення трифазного контактора змінного струму з двоелементним тепловим реле наведена на рис. 7.11. Пускач вмикають натисканням кнопки SB1 *Ввім*. При цьому міжфазна (чи фазна) напруга подається на електромагніт КМ. Електромагніт КМ притягне якір з основними контактами та підімкне електродвигун М до мережі, а допоміжний контакт SKM зашунтує коло кнопки SB1.

Вимкнення електродвигуна з мережі здійснюють натисканням на кнопку SB2 *Стоп*, при цьому розривається коло живлення електромагніту КМ і під дією зворотної пружини контактор вимикає коло живлення електродвигуна.

Унаслідок зниження напруги електромережі на 40...50 % від номінальної сила зворотної пружини пускача перевищує електромагнітну силу котушки вмикання, що призводить до самовільного вимкнення пускача.

Тривале перевантаження електродвигуна в результаті збільшення навантаження на валу або його робота на двох фазах викликає спрацювання одного або двох теплових елементів КК1 та (або) КК2 теплового реле ТРН і автоматичне вимикання пускача.

Достатність двох теплових елементів, установлених у фазах А і С двигуна, пояснюють тим, що струм перевантаження у трифазній мережі не може відбуватися тільки в одній із фаз.

Промислово випускають одноелементні теплові реле РТП (для пускачів ПА 4, 5 і 6-ї величин), а також триполюсні теплові реле нових серій РТТ і РТЛ. Триполюсне виготовлення теплових реле РТТ і РТЛ, окрім захисту електродвигунів з короткозамкненим ротором від тривалих перевантажень, дозволяє отримувати при-

скорене вимкнення у разі обривання однієї з фаз. Реле РТТ виготовляють п'яти величин: 0, 1, 2, 3, 4 на струми 10, 25, 63, 160, 630 А відповідно. Для кожної величини реле існують теплові елементи з номінальними струмами в діапазоні від 0,2 до 1 зазначених вище струмів реле з можливістю регулювання  $\pm 15\% I_{\text{ном}}$ .

У двигунах важливих механізмів для захисту від неприпустимого підвищення температури обмоток статора використовують апарат **позисторного** захисту (АПЗ), яким можуть комплектувати магнітні пускачі. Основою АПЗ є **позистор** – *нелінійний резистор з великим позитивним температурним коефіцієнтом питомого опору, який наклеюють на лобову частину обмотки*, та реагує безпосередньо на її температуру. Конструктивно позистор – це диск діаметром 3,5 мм та товщиною 1 мм, вкритий кремнійорганічною емаллю для підвищення його вологостійкості та ізоляційних властивостей. Гарантійний термін служби – 20000 год. У разі нагрівання статора вище номінальної температури позистор, значно змінюючи свій опір, зумовлює спрацювання АПЗ. Вихідні контакти АПЗ розмикають коло живлення електромагніту пускача і вимикають його. Залежно від класу ізоляції обмоток беруть позистори на температуру спрацювання  $\theta = 105, 115, 130, 145$  або  $160\text{ }^\circ\text{C}$ . Позистор раптово змінює опір за температури  $\theta - 20\text{ }^\circ\text{C}$  за час не більший як 12 с.

Розшифрування цифр, зазначених після літерних позначень серії в пускачах ПМА, ПМЕ, ПМЛ: перша цифра (від 0 до 6), що позначає величину пускача, вказує на значення його номінального струму (від 10 до 200 А) або допустимої потужності електродвигуна; друга цифра (від 0 до 9) шифрує наявність теплових реле, режиму реверсивності, АПЗ та механічного або електричного блокування (наприклад, цифра 2 означає нереверсивний пускач з тепловим реле, цифра 8 – реверсивний пускач з АПЗ та механічним блокуванням); третя цифра (від 0 до 6) шифрує виконання пускача за рівнем захисту від навколишніх впливів та наявність у комплекті різних кнопок керування.

**Тиристорні пускачі.** Поява потужних тиристорів дозволила створити на їх основі безконтактні пускачі. Промисловість випускає для керування електродвигунами тиристорні пускачі типу ПТ-16-380 та ПТ-40-380 (де 16 та 40 – значення номінальних струмів, А; 380 – номінальна напруга, В). На рис. 7.12 показана силова частина схеми тиристорного пускача (одна фаза).

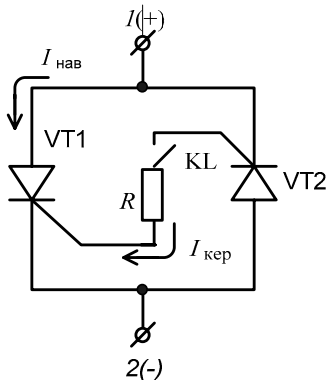


Рис. 7.12

на  $I_{\text{нав}}$ . Тиристор VT2 у цей півперіод закритий, тому що ввімкнений зустрічно прикладеній напрузі. У момент проходження струму навантаження через нуль тиристор VT1 закривається. Наступного півперіоду напрям струму  $I_{\text{кер}}$  протилежний і відкриває тиристор VT2. Отже, доки контакти KL замкнені, через навантаження тече змінний струм. Захист двигуна від перевантаження контролює спеціальна схема величини вторинних струмів вимірювальних трансформаторів струму кожної фази і у разі перевищення заданої величини припиняється подавання сигналів відкривання тиристорів. Захист двигуна і силових тиристорів від струмів КЗ здійснюють швидкодіючі запобіжники. У безконтактному тиристорному пускачі відсутня дуга за комутацій, він має високу зносостійкість та досконалий захист від перевантажень, високу допустиму кількість увімкнень (близько 2000 на годину), швидке вимкнення (не більш як за 0,02 с), але тиристорні пускачі мають складну схему, високу вартість, більші габарити та значну вагу.

Пускачі зазначених типів передбачають комутацію струмів під час увімкнення відповідно 560 і 1650 А (за  $\cos \phi$  навантаження не менший як 0,6), а під час вимкання – 400 і 900 А та мають високу стійкість до зношення (не меншу як  $5 \times 10^6$  циклів). Однак тиристорні пускачі мають значну вагу – 14 і 16 кг відповідно.

«М'які» пускачі. Увімкнення електродвигуна звичайним електромагнітним контактором – найдешевший варіант. Але це вирішує тільки одне завдання – комутацію (увімкнення і вимкнення) двигуна.



Використання кількох контакторів із тепловим реле, окрім комутації електродвигуна, дозволить здійснювати його реверсування та захист від перевантажень.

У могутніх приводах з високою частотою комутації і з обмеженням за рівнем шуму (електромагнітні контактори подають сильний звук під час ввімкнення і «гудуть» в разі поганого налаштування рухомої частини) будуть незамінними безшумні напівпровідникові (тиристорні) контактори. Проте коштувати вони будуть дорожче за традиційні контактори.

Якщо за технологічними умовами привід повинен *плавно змінювати швидкість* за певним законом або навпаки підтримувати її постійною за раптових змін навантаження, мати режим реверсування та декілька типів захисту, мати можливість накопичувати і передавати інформацію на верхній рівень керування, то доведеться придбати дорогий частотний перетворювач.

«М'які» пускачі виконують більшість функцій частотних перетворювачів, але істотно дешевші останніх.

*Принцип «м'якого» пуску і галузь його застосування.* За «м'якого» пуску напруга, що подається на двигун, плавно збільшується від мінімального (заданого) стартового значення до номінальної напруги мережі, що дозволяє отримати такі позитивні властивості:

– задавати необхідний обертовий момент перед запусканням у діапазоні від 0,1 до номінального значення;

– забезпечувати постійність обертового моменту під час запускання, що гарантує плавність обертання (без поштовхів і великих механічних напруг);

– дозволяє регулювати (задавати й обмежувати) пусковий струм у діапазоні від 1 до 5  $I_{ном}$ .

Проте «м'яке» запускання потребує тривалішого часу розгону.

Досвід експлуатації «м'яких» пускачів показав, що такі позитивні якості їх є найбільш затребувані в зазначених нижче галузях застосування:

– *часта та безшумна комутація* (нагрівальні установки, керування освітленням, автоматизація в будівлях та ін.);

– *м'яке запускання* (керування насосами та компресорами, вентиляторами, конвеєрами, пилорамами та ін.);

– *м'яке запускання з реверсуванням* (керування дверей, воріт та ін.).

## 7.5. Автоматичні повітряні вимикачі

*Автоматичні повітряні вимикачі (автомати) призначені для автоматичного вимикання низьковольтного електричного кола у разі ненормальних і аварійних режимів, а також для нечастих оперативних комутацій цих кіл.*

**Класифікація.** Залежно від функціонального призначення та часу вимкнення автомати поділяють на чотири групи: установчі, універсальні, швидкодіючі і автомати гасіння поля.

1. *Установчі (нормальні) автомати* призначені для використання як у спеціальних електричних приміщеннях, так і в тих приміщеннях, куди має доступ некваліфікований персонал. У них закритий кожух, який унеможливує дотикання до струмопровідних частин і викид полум'я та іонізованих газів дуги. Часові межі вимкнення таких автоматів –  $t_{\text{в.в}} = 0,02 \dots 0,1$  с.

2. *Універсальні (селективні) автомати* комплектують різними видами розчіплювачів, які з допомогою спеціальних пристроїв витримки часу дозволяють змінювати час спрацювання в значних межах (до 1 с). Наявність таких пристроїв дає можливість забезпечити селективну роботу кількох послідовно ввімкнених апаратів.

3. *Швидкодіючі (струмообмежувальні) автомати* мають час вимкнення  $t_{\text{в.в.}} < 0,005$  с. Така швидкість дії дозволяє їм вимикати струм КЗ раніше, доки він не сягне свого максимального значення, таким чином вони обмежують ударний струм  $i_y$  КЗ. Струмообмежувальні автомати широко використовують в електрифікованому транспорті, а також на потужних коротких лініях електропередач 0,4 кВ.

4. *Автомати гасіння магнітного поля* використовують для комутації і вимкнення обмоток збудження великих електричних машин у разі виникнення в них КЗ. Ці автомати мають специфічну конструкцію.

Дві останні групи автоматів практично не використовують в аеропортах, і їх не розглядаємо.

**Конструкція і принцип дії.** На рис. 7.13 показана узагальнена електромеханічна схема автоматів, у яких можна виокремити основні частини: приводи, механізм вільного роз'єднання (МВР), розчіплювачі, струмопідведення, контактну систему та дугогасильний пристрій.

*У конкретних типів автоматів можуть бути відсутні певні пристрої узагальненої схеми.*

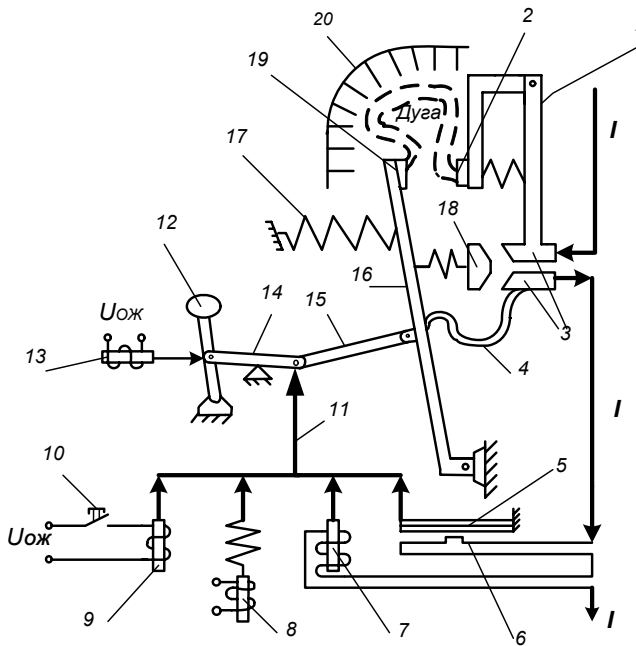


Рис. 7.13

Вмикання автомата виконують ручним *12* або електрифікованим *13* приводом. При цьому зусилля через важелі *14* та *15* механізму вільного роз'єднання передається на стоек *16* рухомих контактів *18* та *19*. Останні стикаються з нерухомими основними *3* та дугогасильним *2* контактами. Одночасно розтягується пружина вимкнення *17*.

Вимкнення автомата здійснюють або ручним способом, або відбувається автоматично після спрацювання одного з роз'єднувачів: теплового, що складається з нагрівального елемента *6* і біметалевої пластини *5*; електромагнітного роз'єднувача *7*, роз'єднувача мінімальної напруги *8*, або від незалежного роз'єднувача *9*, що викликає вимкнення автомата у разі натискання кнопки дистанційного керування *10*.

Механічне зусилля, що виникає в роз'єднувачі унаслідок його спрацювання, через тягу *11* передається на важелі *14* і *15* механізму вільного роз'єднання та викликає їх «зламу» і переміщення

стояка 16 під дією пружини вимикання 17. При цьому ручка привода 12 залишається у ввімкненому положенні.

Конструкція контактної системи така, що спочатку розмикаються основні контакти 3 та 18. При цьому дуги між ними не виникає, тому що весь струм навантаження починає текти крізь ще замкнені дугогасильні контакти 2, 19 та гнучкий струмопідвід 4. Із незначною затримкою розмикаються і дугогасильні контакти. Дуга, яка при цьому виникає між ними, гаситься в камері 20. Електродинамічні зусилля, що виникають у контактах в подання струмів КЗ, компенсують сили відштовхування в рухомій частині шини 1, зігнута петля.

Розглянемо детальніше призначення та принципи дії окремих вузлів автомата.

**Механізм вільного роз'єднання (МВР)** забезпечує вимкнення автомата за командою одного з роз'єднувачів, навіть коли привод (ручний або автоматичний) продовжує його вмикати. Необхідність такого пристрою в автоматах зумовлена трьома причинами.

По-перше, якщо б увімкнення автомата, не оснащеного МВР, відбувалося на існуюче, але невідоме обслуговуючому персоналу КЗ, автомат не зміг би вимкнутися, доки його ручку утримували б у ввімкненому положенні. Це призвело б до спрацювання автомата або запобіжника, що стоять попереду, тобто до неселективного вимкнення мережі з усіма несприятливими наслідками.

По-друге, у разі раптового вимкнення автомата відбувалося б переміщення його ручки, що могло б травмувати людину, яка знаходиться біля автомата.

По-третє, МВР забезпечує постійність та незалежність від оператора або привода швидкості розходження контактів, що важливо для успішного гасіння дуги.

Конструкції МВР різноманітні і досить складні. Принцип його дії можна пояснити на прикладі важелів, що «зламуються» (рис. 7.14). Перед увімкненням автомата його ручку 8 необхідно відвести вниз до кінця (рис. 7.14, а) для утворення жорсткого зв'язку між важелями 4 і 6. При цьому центр шарніра 5 має лежати нижче від лінії, що з'єднує шарніри 3 і 7. Рухом ручки догори відбувається ввімкнення автомата (рис. 7.14, б).

Якщо ввімкнення відбулося, наприклад, на наявне КЗ, роз'єднувач максимального струму 10 різко перемістить осердя 9 вгору, і

відбудеться «злам» важелів 4 і 6 (рис. 7.14, в). Контакти 1 і 2 автомата під дією пружини вимкнення (не показана) розімкнуться, а ручка керування автоматом залишиться у ввімкненому положенні. У сучасних автоматах для індикації автоматичного спрацювання ручка трохи переміщується вниз.

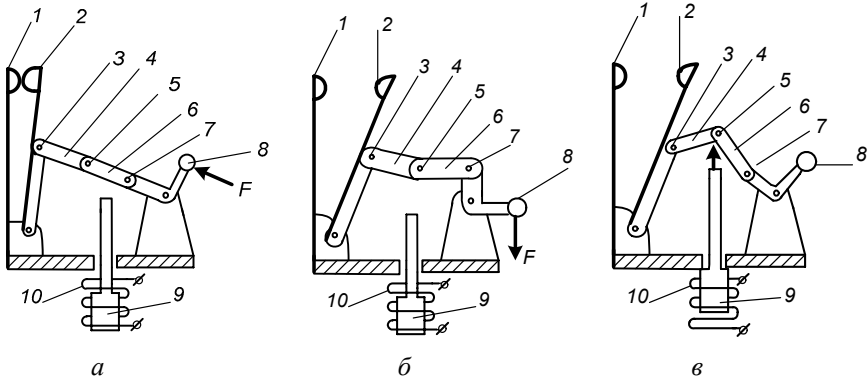


Рис. 7.14

**Контактна система** в потужних автоматах ( $I_{\text{ном.}} > 630 \text{ A}$ ) має окремі основні та дугогасильні контакти (див. рис. 7.10). В установчих автоматах обидві функції об'єднані в одному основному контакті, який часто виконують на основі металокераміки; він має дугогасильні роги, на яких збільшується довжина дуги внаслідок її переміщення вгору.

**Дугогасильні пристрої** в автоматах змінного струму виготовляють, зазвичай, на основі сталевих поперечних решіток (див. рис. 5.11) та ізолюваного об'єму для кожної фази. Застосовують також «магнітне обдування». В автоматах постійного струму широко використовують дугогасильні камери на основі поздовжніх і поперечних щілин з дугостійких ізоляційних матеріалів (див. рис. 5.12).

Здатність контактної системи автомата разом з дугогасильним пристроєм вимкати ще без пошкоджень певний максимальний струм зумовлює можливість вимкнення автомата, яку характеризує **максимальний струм вимкнення**  $I_{\text{вимк. max}}$ .

**Розчіплювачі.** Розчіплювачі – найпростіші релейні пристрої прямої дії, умонтовані в автомат. Вони контролюють заданий параметр електричного кола та, у разі його відхилення за межі

уставки, викликають вимкнення автомата безпосередньою дією на МВР.

Струмові розчіплювачі характеризують такі параметри:

– *номінальний струм розчіплювача*  $I_{\text{роз.ном}}$ , як називають максимальний струм, циркулювання якого необмежений час не викликає спрацювання розчіплювача (бувають автомати з фіксованим значенням  $I_{\text{роз.ном}}$  та з можливістю його регулювання);

– *струмом уставки розчіплювача від КЗ*  $I_{\text{уст.КЗ}}$  називають фіксоване або регульоване значення струму, перевищення якого викликає спрацювання розчіплювача фактично миттєво (*режим відсічення*) в установчих автоматах, або через заданий час  $t_{\text{КЗ}}$  у селективних автоматах.

Залежно від параметра, який контролюють, розрізняють такі види розчіплювачів.

1) *Розчіплювачі від струмів перевантаження* подають сигнал на вимкнення автомата із затримкою часу, яка залежить від кратності струму перевантаження відносно  $I_{\text{роз.ном}}$ . Типова захисна крива роз'єднувача такого виду зображена на рис. 7.15, а.

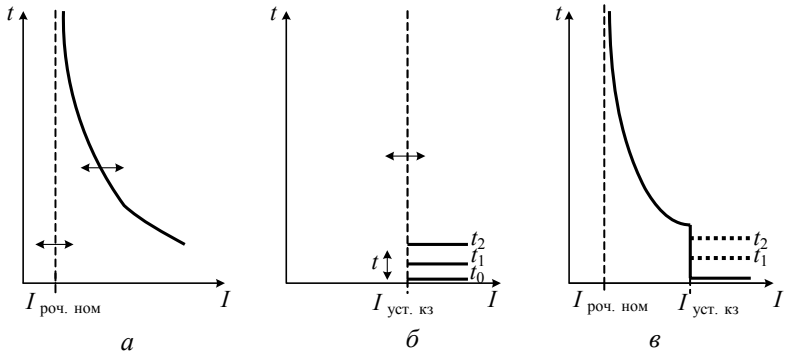


Рис. 7.15

Такі розчіплювачі можуть бути виконані на основі біметалевих елементів (див. рис. 7.13, поз. 5), електромагнітів з пристроями уповільнення або напівпровідникових пристроїв (див. рис. 7.20).

2) *Розчіплювачі від струмів КЗ* подають сигнал на вимкнення автомата без затримки часу (режим відсікання) або із затримкою (селективні автомати) за перевищення струму у колі автомата величини струму уставки розчіплювача від КЗ  $I_{\text{уст.КЗ}}$ . Цей вид розчіп-

лювача виготовляють на основі електромагніту (див. рис. 7.13, поз. 7) з пристроєм уповільнення (або без нього) або на основі напівпровідникових пристроїв (див. рис. 7.20). На рис. 7.15, б наведені захисні характеристики розчіплювача від струмів КЗ без затримки часу  $t_0$  і з різними затримками часу  $t_1, t_2$ .

3) *Комбіновані розчіплювачі* поєднують у собі розчіплювачі першого і другого видів. На рис. 7.15, в наведена захисна характеристика комбінованого роз'єднувача.

4) *Розчіплювачі мінімальної напруги* вимикають автомат у разі зниження напруги в мережі нижче від встановленої уставки. Їх виконують на основі електромагніту (див. рис. 7.13, поз. 8), який за номінальної напруги пересилює пружину та утримує якір притягненням. Якщо напруга, прикладена до обмотки, знижується нижче за певний рівень, то електромагнітна сила не може протидіяти зворотній пружині, і остання перемістить якір угору. Якір, діючи на МВР, спричиняє вимкнення автомата. Регулювання уставки спрацьовування розчіплювача здійснює зміна натягу пружини. Для відстройки від короткочасного зниження напруги розчіплювач може мати уповільнювач спрацьовування.

5) *Незалежні розчіплювачі* призначені для дистанційного вимкнення автомата за командою оператора або пристрою автоматики. Їх виконують на основі електромагніту 9 (див. рис. 7.13), який переміщує свій якір у разі прикладання напруги до обмотки. Якір, діючи на МВР, вимикає автомат.

Розглянемо конструкції автоматів, найширше використовувани в системі електропостачання.

**Автомати установчі серії АП50.** Автомати серії АП50 призначені для захисту електричних кіл від перевантажень і КЗ, оперативних вмикань (близько 30 вмикань на годину), захисту та керування асинхронними двигунами потужністю менш як 20 кВт за напруги 380 В. Виготовляють автомати на номінальні струми 1,6...63 А.

Автомат має такі елементи (рис. 7.16): нерухомі 1 і рухомі 2 основні контакти (вони ж є і дугогасильними), гнучкий струмовідвід 9, кнопки приводу «Ввім» 3 і «Вимк» 4, регулятор уставки  $I_{\text{роз. ном.}}$ , важелі 5 механізму вільного розчеплення, гвинтові контакти 6 для приєднання провідників, обмотку 7 і бойок 8 електромагнітного розчіплювача від КЗ.

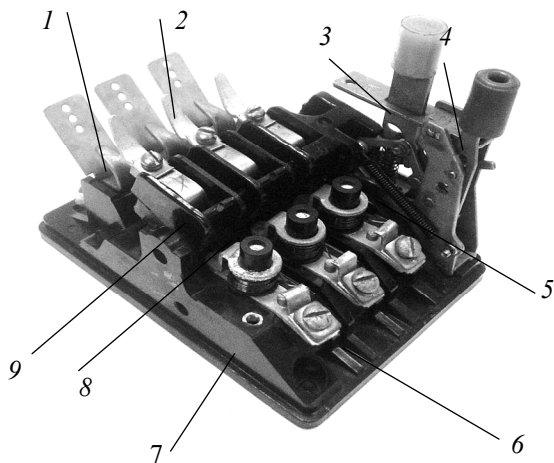


Рис. 7.16

Зі зворотного боку пластмасової основи автомата розміщуються теплові біметалеві розчіплювачі від струмів перевантаження і рейка впливу на МВР.

Головний недолік автоматів АП50 – значні похибки за струмом спрацювання. Так, похибка теплового розчіплювача становить  $\pm 20\% I_{\text{роз. ном}}$  (рис. 7.17, зона 1), а електромагнітного – 50 % (рис. 7.17, зона 2).

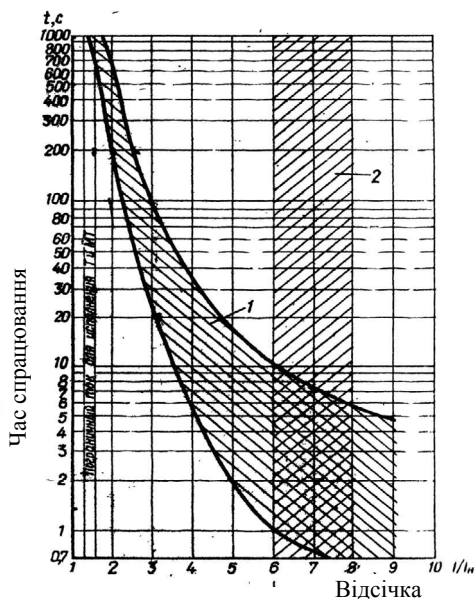


Рис. 7.17

**Автомати серії АЕ.** Установчі автомати серії АЕ2000 (рис. 7.18) змінили серію АЗ100 у діапазоні номінальних струмів 16...100 А. Вони призначені для роботи в мережах змінної 50 та 60 Гц до 660 В та постійної до 220 В напруг, захисту електричних кіл від перевантаження та струмів КЗ, захисту, запускання та зупинення асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором, оперативного ввімкнення та вимкнення кіл (близько 30 ввімк/год). Автомати комплектують тепло-



вими та електромагнітними розчіплювачами. Номінальні струми перших знаходяться в діапазоні 0,3...100 А. У конструкції автомата передбачена можливість регулювати уставку теплового розчіплювача в межах 0,9...1,1  $I_{роз. ном.}$ . Електромагнітний розчіплювач від струмів КЗ має нерегульовану уставку 12  $I_{роз. ном.}$ .

На рис. 7.18 зображено конструкцію автомата АЕ2000. Автомат має: 1 – електромагнітний розчіплювач; 2 – корпус; 3 – контактну систему; 4 – вивідні затискачі; 5 – дугогасильний пристрій; 6 – механізм вільного розчеплення; 7 – кришку; 8 – рукоятку привода; 9 – тепловий розчіплювач; 10 – регулятор номінального струму теплового розчіплювача.

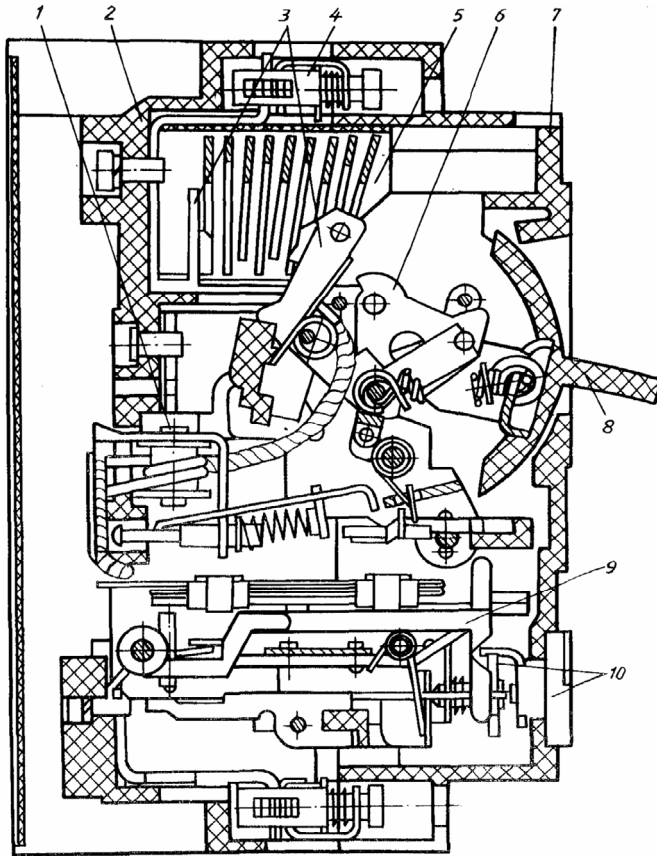


Рис. 7.18

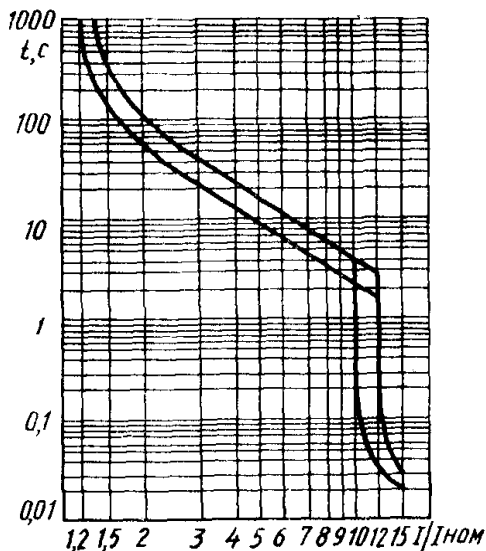


Рис. 7.19

На рис. 7.19 зображено зону, у якій знаходиться захисна характеристика автомата АЕ2000.

Розшифрування позначень автоматів серії АЕ таке: цифра 20 означає порядковий номер розробки, третя цифра (2...6) означає величину автомата та відповідний струм у діапазоні 16...100 А. Четверта цифра (2...8) шифрує кількість полюсів та використовуваний розчіплювач. Наступні цифри кодують наявність та кількість допоміжних контактів, допоміжного розчіплювача міні-мальної напруги та незалежного розчіплювача.

В освітлювальних мережах 220 В використовують автомати серії АЕ2500 з одно- та двополюсним виконанням. За конструкцією вони майже ідентичні до серії АЕ2000. Автомати серії АЕ1000 виготовляють тільки однополюсними для мереж 380 В зі струмами, меншими ніж 25 А.

На рис. 7.20 наведена блок-схема *напівпровідникового розчіплювача*, який використовують в автоматах серії АЗ700. Трансформатори струму *1*, установлені в кожен фазу, подають сигнал, пропорційний величині струму, у схему *2*, яка забезпечує подавання найбільшого сигналу. Трансформатори струму також подають енергію у блок живлення *11*, який забезпечує необхідну напругу для роботи всіх пристроїв роз'єднувача.

Блокінг-генератор *5* безперервно виробляє імпульси, які надходять на входи блока перевантаження *6* і одновібратора *7*. У разі відсутності струму перевантаження блок перевантаження пропускає імпульси від блокінг-генератора на вхід накопичувального лічильника *8* і безперервно його обнулює. Із підвищенням струму в колі вищим за уставку номінального струму роз'єднувача (регулятор уставки  $I_{\text{роз. ном}}$  впливає на блок перевантаження), блок *6* пе-

рестає пропускати імпульси, і лічильник 8 починає рахувати імпульси, що надходять з одновібратора 7 каналом «Запис». Інтервал між вихідними з одновібратора 7 імпульсами обернено пропорційний до величини сигналу, який надходить на одновібратор від схеми 2 (величині струму в силовому колі).

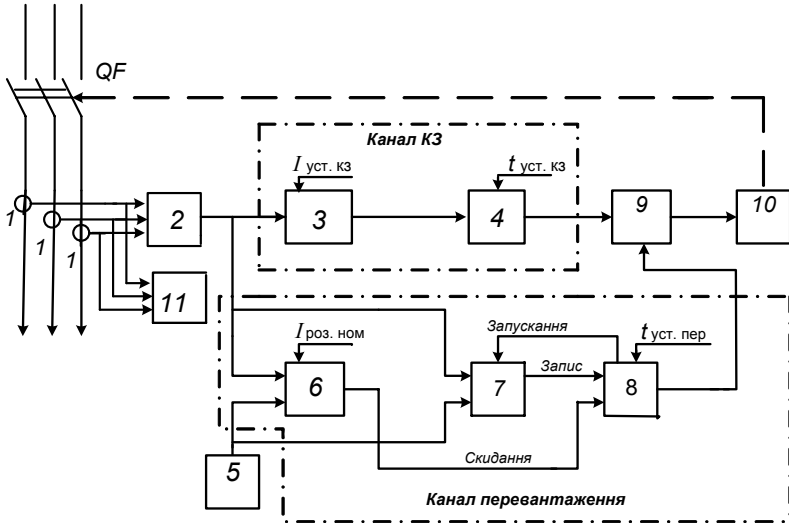


Рис. 7.20

У момент переповнення лічильника 8 (рівень задає регулятор часу перевантаження  $t_{уст. пер}$ ) вихідне реле 9 подає команду на незалежний розчіплювач 10, і автомат вимикається. Так у каналі перевантаження встановлюється залежність, яка забезпечує швидше вимкнення автомата за більших струмів перевантаження (див. рис. 7.17).

У разі появи в силовому колі струму, який перевищує уставку струму КЗ  $I_{уст. КЗ}$  блока 3, останній виробляє імпульс, що запускає блок затримки часу 4, який забезпечує затримку імпульсу, що надходить на вихідне реле 9, на час, уведений з допомогою регулятора  $t_{уст. КЗ}$ .

Наявність у напівпровідниковому розчіплювачі чотирьох регуляторів:  $I_{роз. ном}$ ,  $I_{уст. КЗ}$ ,  $t_{уст. пер}$  та  $t_{уст. КЗ}$  дозволяє значно змінювати вид та місце розташування захисної кривої автомата для його селективної роботи (рис. 7.21).

Так напівпровідникові розчіплювачі автоматів серії А3700 дозволяють змінювати уставку номінального струму розчіплювача у межах  $I_{уст.роз. ном} = 1...1,5 I_{роз. ном}$ , уставку струму від КЗ  $I_{уст. КЗ} = (3...10) I_{роз. ном}$ , уставку часу від перевантаження  $t_{уст. пер} = 4...16$  с (за струму, що дорівнює  $6 I_{роз. ном}$ ), та уставку часу за КЗ  $t_{уст. КЗ} = 0,1...0,4$  с.

Мінімальний розчіплювач напруги забезпечує вимикання автомата А3700 без витримки часу за напруги на котушці не вищій ніж 0,3 від номінальної для змінного струму та не вищій за 0,2 від номінальної для постійного. Номінальний режим роботи мінімального розчіплювача напруги тривалий.

У сучасних автоматах закордонного виробництва на номінальні струми вищі за 400 А, а електронні (напівпровідникові) розчіплювачі мають до шести регуляторів уставок (рис. 7.22).

Технічні дані автоматичних повітряних вимикачів наведені у дод. 4.

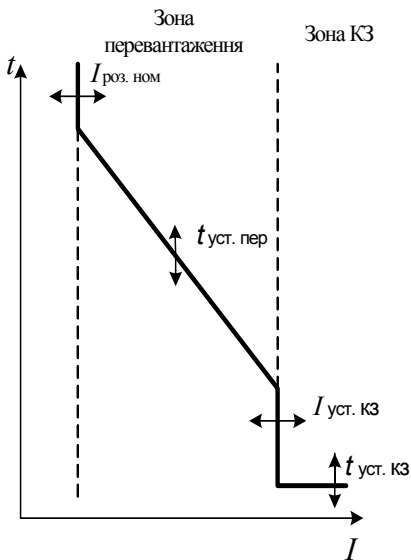


Рис. 7.21

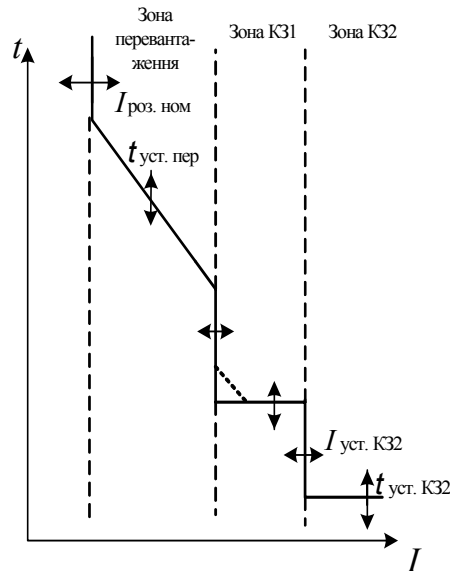


Рис. 7.22

## ■ Розділ 8

### КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ НАПРУГОЮ ВИЩОЮ ЗА 1000 В

#### 8.1. Класифікація комутаційних апаратів вищих за 1000 В

Усі комутаційні апарати для напруг вищих за 1000 В залежно від функціонального призначення поділяють на три групи: роз'єднувачі (включно з відокремлювачами та короткозамикачами), вимикачі навантаження та силові вимикачі.

На рис. 8.1 показані графічні зображення та позначення зазначених апаратів: роз'єднувач (а), роз'єднувач із ножами заземлення (б), короткозамикач (в), відокремлювач (г), вимикач навантаження (д) та силовий вимикач (е). У наступних підрозділах кожна група буде докладно розглянута в діапазоні напруг 6...35 кВ.

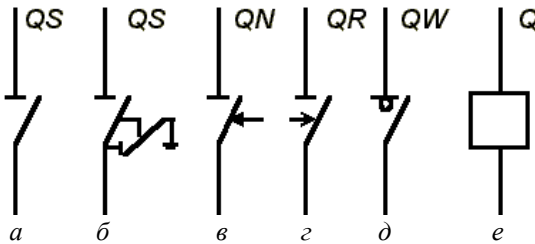


Рис. 8.1

#### 8.2. Роз'єднувачі, короткозамикачі та відокремлювачі

**Роз'єднувач** – це високовольтний апарат, призначений для ізолювання попередньо вимкнених елементів електроустаткування шляхом створення видного розриву електричного кола з метою підвищення безпеки ремонтних робіт. Роз'єднувачі, оснащені ножами заземлення, використовують для заземлювання електроустаткування під час ремонтних та профілактичних робіт.

Роз'єднувачі не мають жодних дугогасильних пристроїв, **тому вмикати та вимикати електричні кола роз'єднувачами необхідно у знеструмленому стані**. Однак багаторічний досвід експлуатації показав, що безпосередньо роз'єднувачами можна комутувати незначні струми, які не викликають появу дуги або викликають слабку електричну дугу, що швидко згасає на відкритому повітрі.

Згідно з Правилами [11] з допомогою роз'єднувачів дозволяють здійснювати такі операції за напруги, меншої ніж 10 кВ:

- вимикати струм навантаження, менший ніж 15 А;
- комутувати струм марного ходу силових трансформаторів потужністю, меншою ніж 750 кВА;
- комутувати кола трансформаторів напруги;
- комутувати зарядний струм збірних шин, повітряних ліній будь-якої довжини та кабельних ліній довжиною, меншою ніж 10 км;
- комутувати нейтралі силових трансформаторів та дугогасильних реакторів.

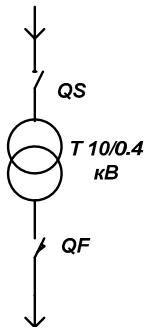


Рис. 8.2

Використання цих можливостей роз'єднувачів дозволяє за таких умов (а в мережах електропостачання аеропортів досить часто) суттєво спростити та здешевити конструкції трансформаторної підстанції.

На рис. 8.2 наведена можлива схема тупикової ТП, вона виконана без високовольтних вимикачів та збірних шин. Вимкнення силового трансформатора  $T$  з боку високої напруги в цій схемі виконують роз'єднувачем  $QS$  після зняття навантаження автоматом  $QF$ , тобто після переведення трансформатора в режим холостого ходу.

Залежно від місця встановлення розрізняють роз'єднувачі для внутрішніх та зовнішніх електроустановок.

За конструкцією їх поділяють на такі різновиди: врубний, котковий, горизонтально-поворотний та пантографічний. Роз'єднувачі підвісного типу використовують для напруги 220 кВ та вищої. Пантографічний тип роз'єднувача (аналогічні використовують на електровозах) у системі вітчизняного електропостачання не розповсюджений, – його використовують, але за кордоном.

**Роз'єднувачі врубного типу.** Роз'єднувачі цього типу для внутрішнього встановлення найбільш широко використовують у мережах електропостачання підприємств завдяки простоті конструкції та надійності роботи. Промислово випускають триполюсні роз'єднувачі серії РВ (роз'єднувач для внутрішнього встановлення) та однополюсні серії РВО з номінальним струмом 400...2000 А на напругу 6...10 кВ. Різні модифікації цих серій позначають відпо-

відними літерами в маркуванні роз'єднувача: Л – лінійний, Р – рубаючий, З – із ножами заземлення, Ф – фігурний (з прохідними ізоляторами). Наступні за літерним скороченням дві групи цифр означають номінальну напругу в кіловольтах та номінальний струм в амперах. Наприклад, роз'єднувач РВЗ-10/1000 обладнаний ножами заземлення, має  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ та  $I_{\text{ном}} = 1000$  А і призначений для внутрішнього встановлення.

Конструкція роз'єднувача типу РВ-10 показана на рис.8.3, а. На рамі 10, звареній зі сталевих кутиків, закріплені шість опорних ізоляторів 9. На трьох передніх ізоляторах закріплені мідні нерухомі контакти 7, що мають циліндричну контактну поверхню. На трьох задніх – встановлені рухомі контакти 5, виконані з двох смуг-ножів, які обертаються навколо осі 1. З допомогою фарфорових тяг 6, пов'язаних із валом роз'єднувача 11, рухомі контакти повертаються навколо осі на  $60^\circ$ . Керування роз'єднувачем здійснюють поворотом вала 11. Вал через важіль 12 керує приводом. Будова приводу наведена на рис. 9.2.

Необхідного натиску в контактах досягають з допомогою циліндричних пружин 2, насаджених на стрижні 4 із зовнішніх боків рухомих ножів. Тиск від пружин 2 передається на ножі через плоскі сталеві пластини 3, що мають виступ та збільшують зусилля (за принципом важеля). Під час проходження струму КЗ у паралельних мідних ножах виникають зусилля, що притягують їх один до одного, збільшуючи натиск у місцях контактування. Однак у місцях контактування протягом проходження струмів КЗ виникають також значні зусилля, що діють у напрямку роз'єднання контактів. Компенсують ці зусилля сталеві пластини 3, які намагнічуються від струмів КЗ та притягуються одна до одної, тим самим збільшуючи тиск контакту. Такий пристрій називають *магнітним замком*. Для приєднання рами заземлювача до контура заземлення передбачений спеціальний болт 8.

Роз'єднувачами типу РВ та РВО керують ручні приводи типу ПР, черв'ячні приводи типу ПЧ і електрорушійні приводи, розглянуті в підрозд. 9.3. Технічні характеристики роз'єднувачів наведені в дод. 5.

**Роз'єднувачі коткові.** Серію роз'єднувачів типу РВК використовують для струмів 3000 А та більших, наприклад, у цехових струмопроводах. Нерухомий контакт роз'єднувачів цього типу

виконаний у вигляді прямокутного короба, куди вкочуються і притискаються до внутрішньої поверхні рухомі контакти. Така конструкція забезпечує достатню площу контактування за номінальних струмів, менших ніж 14 кА.

**Роз'єднувачі горизонтально-поворотного типу.** Роз'єднувачі цього типу випускаються на напругу 10...750 кВ. Вони надійніші в умовах зовнішнього використання (з них легше сколюється крига), мають малий габарит та простіший механізм керування.

На рис. 8.3, б наведена конструкція одного полюса (однієї фази) роз'єднувача серії РНД (роз'єднувач для зовнішнього встановлення двоколонковий). Зусилля від привода передається на вал керування роз'єднувачем 7 і викликає обертання ізоляторів (колонків) 6 на 90°. У верхній частині ізоляторів закріплені контактні ножі, один з яких 1 обладнаний ламельною вилкою 2 із ножом 3. Ламелі закриває кригозахисний кожух.

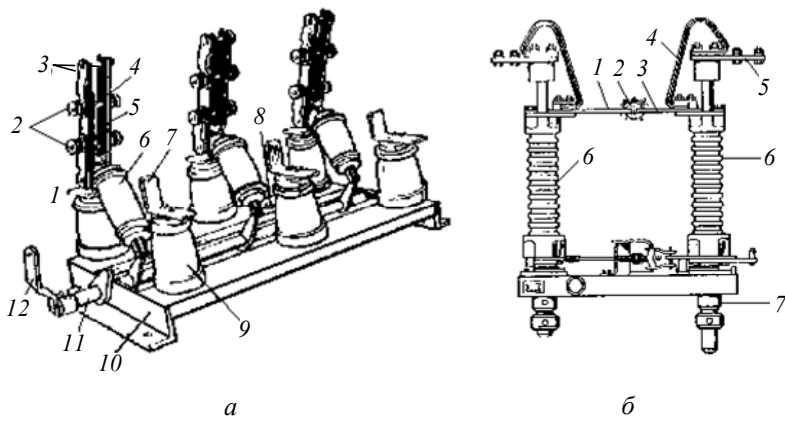


Рис. 8.3

Після вимкнення обидві колонки 6 повертаються, спричиняючи «зламування» ножів та їх розведення на відстань, яка дорівнює відстані між осями колонків. Рухомі ножі з'єднані з контактними шинами 5 з допомогою набору гнучких смужок 4 з мідної фольги.

**Короткозамикачі та відокремлювачі.** Призначення короткозамикачів та відокремлювачів проілюструємо схемою рис. 8.4, а. У магістральних лініях 35...220 кВ (з метою економії) тільки початок магістралі оснащують дорогими силовими вимикачами (вим-



кач  $Q$ ), де також розташовують комплект релейного захисту (PЗ) магістралі та обладнання автоматичного повторного ввімкнення (АПВ).

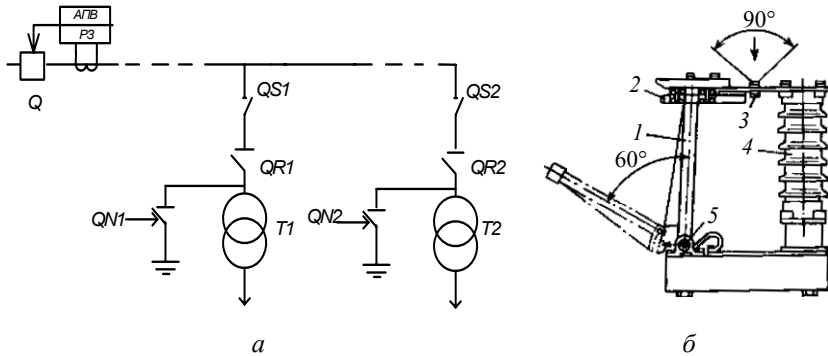


Рис. 8.4

Під час експлуатації силових трансформаторів трапляються такі їх внутрішні пошкодження, які PЗ магістралі не відчуває. У цьому разі, спрацьовує чутливіший диференційний (або газовий) захист самого трансформатора, наприклад, трансформатора  $T1$ . Його захист подає сигнал на ввімкнення короткозамикача  $QN1$ . Його вмикання створює штучне КЗ, яке викликає значне підвищення струму в магістралі і спрацьовування PЗ. Силовий вимикач  $Q$  вимикає всю магістраль. Далі спрацьовує відокремлювач  $QR1$ , від'єднуючи пошкоджений трансформатор  $T1$ . Через деякий час сигналом обладнання АПВ вимикач  $Q$  вмикається і відновлює електропостачання споживачів магістралі, приєднаних до силових трансформаторів, що продовжують працювати.

Отже, **короткозамикач** – це високовольтний апарат, призначений для створення штучного КЗ. Короткозамикачі для мереж на 35 кВ (серії КЗ-35) виготовляють двофазними, а в мережах на 110 кВ і вище – однофазними. На рис. 8.4, б зображена конструкція однієї фази короткозамикача відкритого типу на 35 кВ, який складається з опорного ізолятора 4, у верхній частині якого закріплено нерухомий контакт 2 і болт 3 для приєднання підвідного дроту. Заземлений ніж 1 закріплено на валу 5, який вмикає короткозамикач з допомогою пружинного привода. Відключення здійснюється вручну.

**Відокремлювач** – це триполюсний роз'єднувач, що за командою від автоматичного обладнання від'єднує ділянку мережі в знеструмленому стані. Конструкція відокремлювачів аналогічна до конструкції роз'єднувачів. Так, двоколонковий відокремлювач типу ОД-35 аналогічний до роз'єднувача РНД (див. рис. 8.3, б), укомплектованого пружинним приводом, який діє на вимкнення.

Подальше удосконалення короткозамикачів і відокремлювачів пов'язане з використанням закритих камер, наповнених елегазом.

### 8.3. Вимикачі навантаження

**Вимикач навантаження** – це високовольтний комутаційний апарат, призначений для вимкнення робочих струмів (у межах номінального струму або трохи вище за нього). Вимикачі навантаження (ВН) не призначені для вимкнення струмів КЗ, але вони здатні вмикати струми, відповідно до їх електродинамічної стійкості за прохідних струмів КЗ (дод. 6).

Використання ВН разом із високовольтними запобіжниками дозволяє значно скоротити вартість електроустановок, відмовитися від дорогих і трудомісткіших в експлуатації силових вимикачів, оснащених пристроями релейного захисту. Нині найбільш розповсюджені автогазові вимикачі навантаження. Випускають вакуумні вимикачі навантаження на напругу 10 кВ та елегазові на напругу 35 кВ і вищу.

**Автогазові вимикачі навантаження.** Вимикачі навантаження цього різновиду широко застосовують у мережах електропостачання підприємств. На рис. 8.5, а зображена проекція сучасного автогазового вимикача навантаження серії ВН-10, який незначно відрізняється від серії ВН-16 (ВН-17), яку випускали раніше. Третя літера в маркуванні вимикача навантаження шифрує використаний привід: Р – ручний, П – пружинний. Вимикачі ВН-10 випускають на напругу 6; 10 кВ та номінальний струм, менший ніж 630 А.

Вимикач ВН-10 змонтований на сталевій рамі 5 та шести опорних ізоляторах 3. На трьох верхніх закріплені нерухомі основні контакти 9 та дугогасильні 1 (розташовані всередині камери 2). Рухомі контакти монтують на нижніх контактних стояках 6. Основний рухомий контакт 8 виконаний у вигляді двох мідних смуг, стягнених пружинами, надітими на розпірки. На основних контактах з допомогою сталевих смуг 10 кріплять дугогасильні рухомі контакти 1.

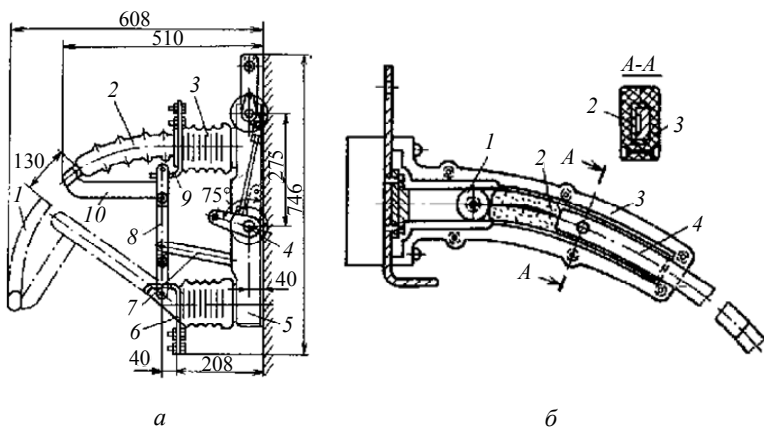


Рис. 8.5

Рухомі контакти обертаються з допомогою ізоляційних тяг 7, що з'єднують вал вимикача 4 з контактами 8. У разі ввімкнення вимикача з допомогою ручного або автоматичного приводу (див. підрозділ 9.3) рухомі дугогасні контакти входять у щілину дугогасильної камери і там замикаються з нерухомими дугогасильними контактами 1 (рис. 8.5, б) раніше, ніж замкнуться робочі контакти. Одночасно стискаються пружини вимкнення, які розташовані з двох боків рами, а вал фіксується приводом.

Дугогасильна камера являє собою пластмасовий радіальний кожух, зібраний з двох половинок. У середині знаходяться вкладні пластини 2 з органічного скла, що утворюють вузьку прямокутну в перетині щілину. В основі камери розташовані нерухомі дугогасильні контакти 1, виконані у вигляді пружистих мідних ламелей з приклепаними до них напівсферами, у контакт з якими і входить рухомий дугогасильний контакт 4.

У момент вимкнення привід звільняє вал 4 і пружини вимкнення зі швидкістю близько 4 м/с переміщують рухомі контакти. Робочі контакти 8, 9 розмикаються, коли електричне коло ще замкнене дугогасильними контактами, тому дуги на робочих контактах не утворюються. Потім розмикаються дугогасильні контакти і запалена дуга руйнує вкладні з органічного скла. Виділяється велика кількість газу, тиск у камері зростає, що сприяє згасанню дуги. Під час виходу дугогасильного ножа з камери з неї з великою швидкістю витікає газ (поздовжнє обдування) і дуга гасне остаточно.

Без заміни вкладок вимикач навантаження ВН-10 допускає 75 вимкнень струму, меншого за 200 А (за  $U_{ном} = 10$  кВ). У вимкненому стані вимикач забезпечує видимий розрив кола.

Вимикачі ВН-10, доповнені кварцовими запобіжниками ВН<sub>П</sub>-10, (раніше ВН<sub>П</sub>-16), їх широко використовують для захисту від КЗ ліній і силових трансформаторів з робочими струмами, які не перевищують 160 А.

Вимикачі ВН<sub>П</sub>-10 з автоматизованим приводом можуть бути укомплектовані пристроєм автоматичного вимкнення у разі перегорання плавкої вставки запобіжника будь-якої фази, що запобігає роботі електроприймачів в неповнофазному режимі.

Перспективним є використання елегазових та вакуумних вимикачів навантаження. Технічні характеристики вимикачів навантаження наведені у дод. 6.

#### 8.4. Силові вимикачі. Класифікація, технічні параметри

*Силовий вимикач – це високовольтний комутаційний апарат, призначений для ввімкнення та вимкнення електричного кола у всіх режимах його роботи, навіть КЗ.*

Вимкнення струму КЗ та ввімкнення комутаційного апарата на існуюче КЗ є найважливішою операцією, яку виконують **тільки силові вимикачі**. Через серйозні наслідки, до яких може призвести несвочасне вимкнення струмів КЗ, до силових вимикачів, окрім вимог, зазначених в підрозділі 1.2, додатково ставляться такі: надійне вимкнення струмів КЗ у межах технічних можливостей; мінімальний час вимкнення; можливість швидкого автоматичного повторного ввімкнення, тобто готовність вимикача до вмикання відразу після вимкнення; вибухо- і пожежобезпечність.

**Класифікація.** За конструктивними особливостями та способом гасіння дуги силові вимикачі поділяють на типи:

- |                    |              |                   |
|--------------------|--------------|-------------------|
| – масляні;         | – повітряні; | – елегазові;      |
| – електромагнітні; | – вакуумні;  | – синхронізовані. |

Дотепер в Україні РУ середньої напруги 6, 10 та 35 кВ оснащені масляними силовими вимикачами. Однак провідні світові фірми-виробники електричних комутаційних апаратів з початку 1980-х років поступово скорочують випуск масляних вимикачів і надають перевагу новішим технологіям гасіння електричної дуги з використанням вакууму та елегазу. Так, у країнах Європейського Союзу

(ЄС) частка виготовлених і придбаних силових вимикачів середньої напруги, що використовують елегаз, зростає з 15,7 % до 35–40 % одночасно зі стрімким скороченням виробництва масляних вимикачів (рис. 8.6)

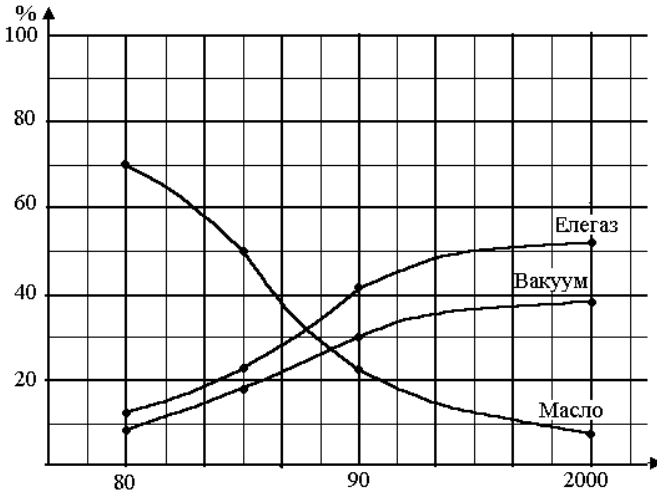


Рис. 8.6

**Технічні параметри вимикачів.** Електротехнічні можливості силових вимикачів характеризують такі параметри:

- номінальна напруга  $U_{\text{ном}}$  ;
- номінальний струм  $I_{\text{ном}}$  ;
- струм динамічної стійкості  $i_{\text{д}}$ ,  $I_{\text{д}}$  ;
- струм термічної стійкості  $I_{\text{т}}$  та час  $t_{\text{т}}$  ;
- номінальний струм вимкнення  $I_{\text{вим. ном}}$  ;
- повний час вимкнення вимикача  $t_{\text{вим. в}}$  ;
- час увімкнення вимикача  $t_{\text{увім. в}}$  .

Перші чотири параметри розглянуті в підрозд. 1.3. На інших зупинимось детальніше.

*Номінальний струм вимкнення вимикача  $I_{\text{вим. ном}}$  – це найбільше діюче значення періодичної складової струму КЗ, який вимикач здатний вимкати без пошкодження.* Номінальний струм вимкнення вимикача – одна з важливих його характеристик, яку визначають конструкція та розміри його дугогасильного пристрою.

Струм КЗ, окрім періодичної складової, може мати й аперіодичну. Допустима величина аперіодичної складової у вимкнено-

го струму КЗ визначає нормований процентний вміст аперіодичної складової  $\beta_{\text{нор}}$ , який визначають за графіком, наведеним на рис. 8.7,

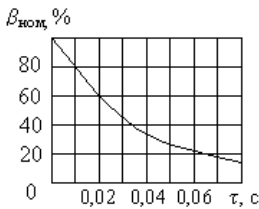


Рис. 8.7

як функція часу  $\tau$  від моменту виникнення КЗ до моменту розмикання дугогасильних контактів:

$$\tau = t_{3. \text{ min}} + t_{\text{вим. в}} = 0,01 + t_{\text{вим. в}}, \quad (8.1)$$

де  $t_{3. \text{ min}}$  – мінімальний час дії захисту, який дорівнює 0,01 с;  $t_{\text{вим. в}}$  – власний час вимкнення вимикача (див. далі). У разі, коли за формулою (8.1) час  $\tau > 0,07$  с, процентний вміст  $\beta$  уже менший ніж 20 %, тобто

аперіодичну складову можна не враховувати.

*Повний час вимкнення вимикача  $t_{\text{вим. в}}$  – це проміжок часу від моменту подавання приладом захисту команди на вимкнення до моменту згасання дуги на всіх полюсах вимикача.*

Повний час вимкнення складається з власного часу вимикача  $t_{\text{в. в}}$  (який дорівнює часу від моменту подавання команди вимкнення до моменту припинення дотикання контактів вимикача) та часу згасання дуги  $t_{\text{д}}$ , тобто

$$t_{\text{вим. в}} = t_{\text{в. в}} + t_{\text{д}}. \quad (8.2)$$

Значення часу  $t_{\text{вим. в}}$  за формулою (8.2) і  $t_{\text{в. в}}$  вимикачів наводяться у каталогах та довідниках.

*Час увімкнення вимикача  $t_{\text{увім. в}}$  – це проміжок від моменту подавання команди увімкнення приладом автоматики до появи струму на всіх полюсах вимикача. Зазвичай  $t_{\text{увім. в}} = 2 \dots 3 t_{\text{вим. в}}$  і залежить від приводу.*

## 8.5. Маломасляні вимикачі

Вимикачі з малою масою масла (до 5 кг на полюс) використовують переважно у закритих РУ 6...10 кВ. У маломасляних вимикачах контактна система кожної фази (полюса) змонтована в окремому металевому бачку (горщику) циліндричної форми. Основне призначення масла в цих вимикачах – гасіння електричної дуги та охолодження місця контактування.

Вимикач має три полюси, закріплені з допомогою фарфорових ізоляторів на спільній сталевій рамі. У рамі розміщений привідний важільний механізм, пружини вимкнення, пружинні буфери увімкнення та масляні буфери відключення. Привідний механізм

приводить у рух пружинний або електромагнітний привод (див. підрозділ 9.3).

Вимикачі ВМП-10 випускають у трьох варіантах компонування: ВМП-10К (для КРП) завдяки використанню міжполюсних ізоляційних перегородок мають меншу ширину за фронтом (660 мм); ВМП-10 із вбудованим пружинним приводом; ВМПЕ-10 з вбудованим електромагнітним приводом. Вимикачі ВМП-10 виготовляють на номінальні струми 630, 1000, 1600 та 3150 А за номінальних струмів вимкнення 20 або 31,5 кА. Повний час вимкнення (8.2) вимикача за номінального струму, вимкнення становить 0,12 – 0,13 с. Маса масла в ньому (на всі три фази) становить 4,5 кг.

Вимикач ВМП-10 на струм  $I_{\text{ном}}=3150$  А додатково має основний робочий контакт, закріплений ззаду корпусу полюса вимикача. Контакти, які розташовані всередині полюса, виконують при цьому функцію дугогасильних, що розходяться після бездугового розімкнення основних контактів. Внутрішня будова полюсів усієї серії вимикачів ВМП-10 однакова.

На рис. 8.8, *a* зображений переріз полюса вимикача ВМП-10 з  $I_{\text{ном}} = 1000$  А, виготовленого з міцного вологостійкого ізоляційного циліндра 3, виконаного зі склопоксидного пластика. Кінці циліндра армовані металевими фланцями 2 та 4. Усередині алюмінієвого корпусу 6, закріпленого на верхньому фланці, розміщений випрямний механізм 12, що перетворює поворотний рух важеля на вертикально-поступальний рух рухомого контактної стрижня 14, роликів пристрій струмопідводу 5, нерухомі напрямні стрижні 13 та масловіддільник 10 з отворами 11, через які масло потрапляє у внутрішню порожнину вимикача.

Нижній фланець 2 унизу закритий мідною кришкою 17, усередині якої знаходиться нерухомий розетковий контакт 16, а ззовні – масловипускний корок 18. До кришки болтами кріплять струмопровідну жилу.

У нижньому фланці передбачена порожнина 1, де під час заливання масла утворюється повітряна подушка, яка виконує роль амортизатора у разі стрімкого підвищення тиску в нижній частині циліндра під час загорання електричної дуги. Для контролю за рівнем масла слугує скляний маслопоказчик 15.

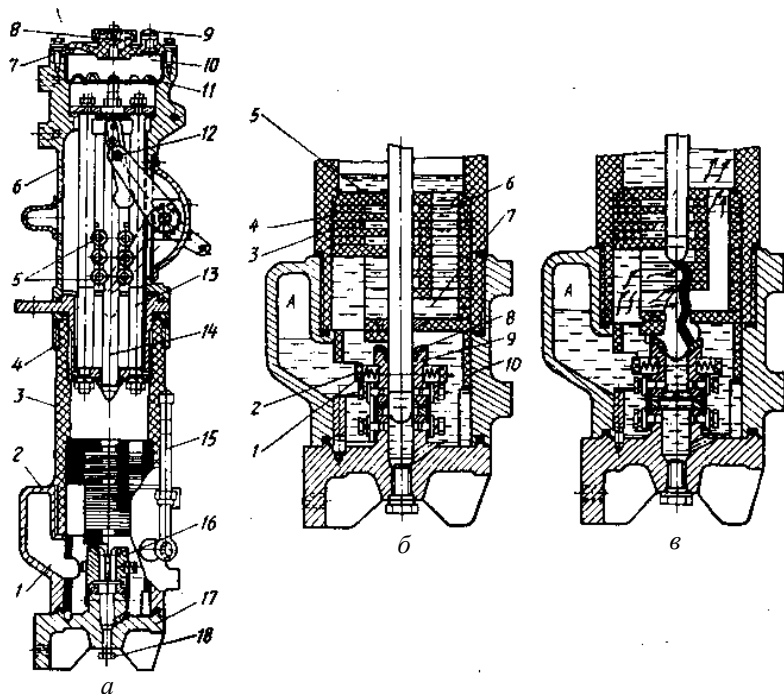


Рис. 8.8

Конструкція дугогасильної камери та нерухомого розеткового контакту зображена на рис. 8.8, б. Дугогасильна камера розміщена в ізоляційному склооксидному циліндрі й являє собою чергування наборів гетинаксових 3 та фібрових 4 пластин. Пластини нижньої частини камери круглі і мають центральний отвір для контактної стрижня. Діаметр отворів у гетинаксових пластин більший ніж у фібрових (не враховуючи першої частини), і вони мають довгасту форму. У камері вони створюють невеликі западини (кишені) 5. Окрім центрального отвору, верхня половина пластин має ще по два або три отвори (залежно від будови), які створюють у зібраному стані вертикальні канали 6, які переходять у нижній частині в горизонтальні 7. Останні одержують під час збирання камери завдяки вирізам у пластинах нижньої половини. Горизонтальні канали розміщені на різних рівнях у напрямку руху контактної стрижня.



Для запобігання створенню дуги між контактними стрижнями та стінками нижнього фланця, між ними розміщений ізоляційний циліндр 10, який одночасно фіксує дугогасильну камеру.

Розетковий контакт складається з п'яти (у вимикачах із  $I_{\text{ном}} = 630, 1000$  А) або шести ( $I_{\text{ном}} = 1600$  А) рухомих сегментів 9, армованих металокерамічними накладками 8 для підвищення дугостійкості. Пружини 1 впираються в сегменти та упорне кільце 2 і забезпечують необхідний тиск контактів. Струмопідведення до рухомих сегментів здійснює гнучкий набір з тонких мідних пластин.

У момент вимкнення вимикача контактний стрижень виходить із розеткового контакту, і між ними загоряється електрична дуга. Масло біля дуги розкладається та утворює значну кількість газу (з 1 г масла утворюється близько  $1500 \text{ см}^3$  газу). Оскільки в початковий період руху контактного стрижня поперечні канали 7 дугогасильної камери ще перекриті контактним стрижнем, тиск у нижній частині камери стрімко підвищується, повітря в порожнині А (рис. 8.8, в) стискається. Потім стрижень, який рухається вгору, відкриває по чергово горизонтальні канали, куди прямують під тиском масло та газу. Так здійснюється дво- або триразове поперечне обдування, яке видовжує дугу і спричиняє її інтенсивну деіонізацію.

Газу, які утворилися, з краплями масла піднімаються в масловіддільник 10 (рис. 8.8, а), де масло, яке охолело, збирається і стікає в отвір 11 масловіддільника всередину вимикача. Газу виходять в атмосферу через канал 8. До наступної операції ввімкнення вимикач готовий через 0,5 с.

У разі вимкнення невеликих струмів тиск у камері може бути недостатнім для здійснення ефективного поперечного обдування та швидкого гасіння дуги. У такому разі дуга розтягується та входить у центральний отвір камери. Фіброві пластини під час контактування з дугою генерують газу, що збираються в бічних кишнях камери. У момент безструмової паузи вони прямують у простір, де горіла дуга, і здійснюють інтенсивну деіонізацію та швидко підвищують електричну міцність міжконтактного проміжку.

Комплексне використання кількох методів гасіння дуги дозволило помітно зменшити розміри вимикача за значної здатності вимикання. Номінальний струм вимикання вимикача ВМП-10 дорівнює 20...31,5 кА. Час згасання дуги  $t_{\text{д}} = 0,015...0,025$  с, власний час вимикання  $t_{\text{вл. в}} = 0,1...0,12$  с.

У вимкненому стані нижній кінець контактного стрижня має знаходитися над поверхнею масла на відстані не меншій ніж 15 мм, що забезпечує надійну ізоляцію в разі погіршення ізоляційних властивостей масла після кількох вимкнень. Під час експлуатації слід регулярно контролювати наявність у полюсах вимикача необхідного рівня масла, який показаний на маслопоказниках.

Для відкритих РУ випускають малооб'ємні масляні вимикачі МГ-35 на напругу 35 кВ та колонкові вимикачі серії ВМК на напругу 110 та 220 кВ.

### 8.6. Вакуумні вимикачі

Принцип згасання електричної дуги у вакуумі та схематичну конструкцію вакуумної дугогасильної камери розглянутий у першій частині посібника (див. підрозд. 5.5) У вакуумі з тиском  $10^{-4}$  Па електрична міцність проміжку сягає 30–40 кВ/мм. На змінному струмі після струму через нуль відбувається швидке зниження концентрації зарядів унаслідок дифузії і через 10 мкс між контактами відновлюється електрична міцність вакууму. Швидке зростання електричної міцності проміжку після переходу струму через нуль є значною перевагою вакуумних вимикачів.

Принципові переваги вакуумних вимикачів:

- швидкодія завдяки малому ходу (кілька міліметрів) та незначній вазі рухомих контактів;
- малі габарити дугогасильної камери, які дозволяють створювати дуже компактні розподільні пристрої невисокої вартості;
- повна вибухо- та пожегобезпечність;
- швидке відключення кола практично під час першого переходу струму через нуль;
- ізоляція контактів від несприятливого впливу навколишнього середовища;
- відсутність необхідності обслуговування контактної системи протягом усього часу експлуатації. Ці переваги роблять вакуумні вимикачі одним із перспективних видів силових вимикачів.

Як зразок розглянемо вакуумний вимикач серії ВВ/TEL Сімферопольського заводу «Таврида-електрик». На рис. 8.9 зображений загальний вигляд вимикача, а на рис. 8.10 – розріз полюса.

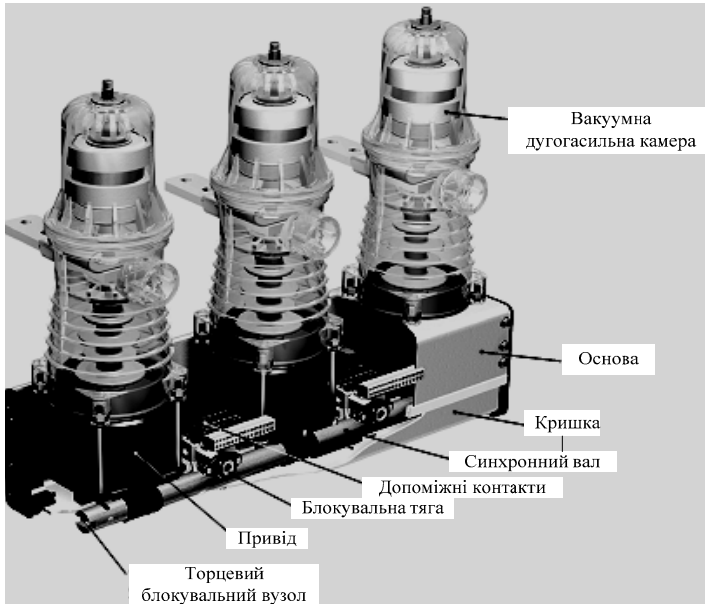


Рис. 8.9

Поліус складається з верхнього нерухомого контакту 1, вакуумної дугогасильної камери 2, допоміжних контактів 3, нижнього контакту 10, натискної пружини 5 та ізоляційної тяги 8. Остання зв'язує рухомий контакт дугогасильної камери з електромагнітним приводом 4, розміщеним у нижньому кожусі вимикача. Привід складається із якоря 6 та котушки 7. Поліус приміщується в прозорому корпусі 9. Технічні характеристики силових вакуумних вимикачів наведені в дод. 7.

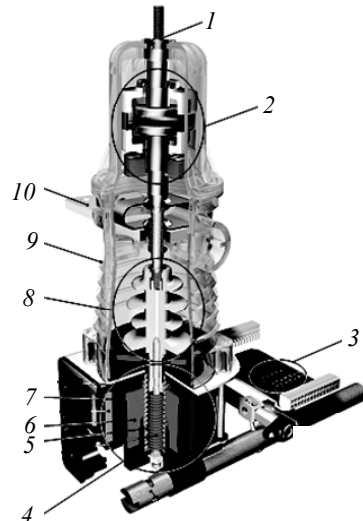


Рис. 8.10

### 8.7. Елегазові вимикачі

Унікальною властивістю елегазу є здатність ефективно гасити електричну дугу, яку використовують в елегазових силових вими-

качах. Елегаз – шестифториста сірка  $\text{SF}_6$  – штучно створений інертний газ, який має в 2,5 рази вищу (порівняно з повітрям) електричну міцність, майже в 4 рази вищу питому об’ємну теплоємність, що уможливорює збільшення навантаження на струмопровідні частини та зменшення маси міді у вимикачі.

Камери поздовжнього обдування з елегазом мають номінальний струм вимкнення в 5 разів вищий, ніж у повітря. Нетоксичний газ не вступає в реакцію з киснем та воднем, слабо розкладається дугою. В електричних апаратах застосовують лише газ з високим рівнем очищення від домішок. Дугогасильна властивість елегазу найбільш ефективна за високої швидкості його струменя відносно палаючої дуги, що частіше створюється внаслідок автопневматичного обдування. При цьому необхідний для обдування перепад тиску створює енергія приводу.

Розглянемо конструкцію елегазового вимикача французької фірми Merlin Gerin. На рис. 8.11, *a* зображений переріз полюса вимикача типу FG1 на напругу до 15 кВ, номінальний струм, менший ніж 1250 А та номінальний струм вимкнення 20 кА. Згори герметичного корпусу 2, виконаного з пластмаси, умонтований струмопровід 1, який закінчується нерухомим дугогасним контактом 3. Основні нерухомі контакти 4 являють собою набір ламелей. Рухомий основний 6 та дугогасильний 5 контакти змонтовані на рухомому струмопровідному штоці 11.

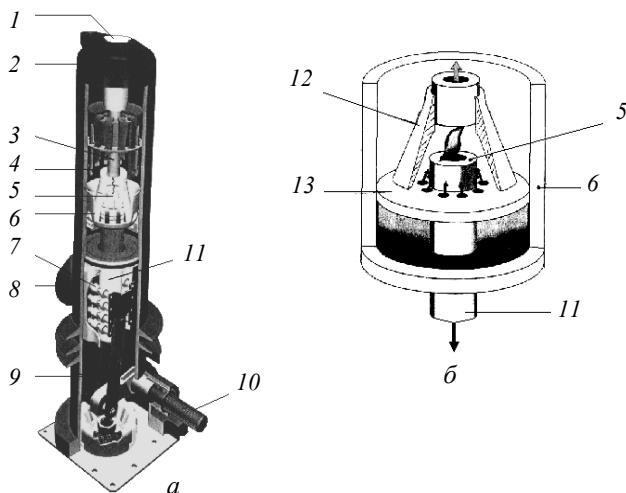


Рис. 8.11

Електричний зв'язок рухомого штока з нижнім струмопроводом 8 здійснюється через роликіві контакти 7. Шток 11 переміщується з допомогою вала 10, з яким він зв'язаний ізольційними тягами 9. Вал 10 обертається спеціальним приводом.

Процес гасіння дуги пояснює рис. 8.11, б. Під час руху штока 11 донизу, спочатку розімкнуться основні контакти 4 та 6. Дуга між ними не загоряється, оскільки дугогасильні контакти 3 та 5 ще замкнені (у тілі штока 11 є спеціальна натискна пружина). Подальше переміщення штока донизу спричиняє розмикання дугогасильних контактів 3 та 5, і між ними загоряється дуга. Нижня половина полюса заповнена елегазом. На рухомому дугогасильному контакті 5 закріплена переділка 13 з отворами. Коли рухомий контакт з переділкою переміщується донизу, елегаз під перегородкою стискається і через отвори надходить вгору та обдуває дугу. Для підвищення ефективності обдування слугує сопло 12, яке звужується догори, що забезпечує збільшення швидкості руху елегазу.

### 8.8. Повітряні вимикачі

У повітряних вимикачах згасання електричної дуги відбувається в струмені повітря, яке надходить з ємності під тиском. Стиснене повітря має високі дугогасильні властивості, які поліпшуються зі зростанням тиску. Так, за тиску (0,4...1,2) МПа (4...12 атм), що підтримується в дугогасильній камері, електрична міцність повітря підвищується в 2...4 рази порівняно з міцністю при атмосферному тиску.

У повітряних вимикачах застосовують камери з подовжнім та поперечним обдуванням. Потік повітря з дугового проміжку виносить продукти горіння, які являють собою високопровідне середовище. Замість них надходить чисте неіонізоване повітря.

На рис. 8.12 наведена схематична конструкція повітряного вимикача для зовнішньої установки типу ВВМ-35 на напругу 35 кВ. Один полюс вимикача складається з двох опорних фарфорових ізоляторів 2 та 3, що утворюють колону, закріплену на візку 1. У середині візка розміщена система керування вимикача, яка вклю-

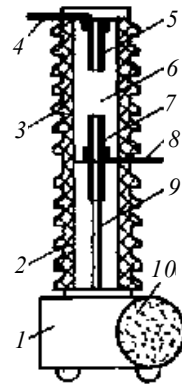


Рис. 8.12

чає пневматичний привід, обдувний та допоміжні клапани, електромагніти вмикання та вимикання, допоміжні контакти та інше.

Верхній ізолятор 3 утворює дугогасильну камеру 6, у якій знаходяться верхній 5 та нижній 7 рухомі контакти. Верхній рухомий контакт, виготовлений у вигляді труби з пружиною, що дозволяє йому підніматися вгору під дією тиску повітря в камері. Нижній контакт, виконаний у вигляді полої труби, з допомогою ізоляційної штанги 9 може переміщуватися вниз. Отже, кожна фаза вимикача має два порожнисті трубчасті торцеві контакти, які створюють після вимикання один розрив фази. Струмопідведення здійснюється через контактні наконечники 4 та 8.

Для вимкнення вимикача на електромагнітний клапан подається напруга, він відчиняється, і стиснене повітря з ємності 10 надходить у внутрішню порожнину вимикача. Під дією підвищеного тиску верхній контакт, долаючи опір власної пружини, відходить на необхідну відстань від нижнього контакту. Дугу, що виникає між ними, захоплює потік повітря всередину порожнистих контактів, що захищає їх робочі торцеві поверхні від дії електричної дуги. Сильний потік стисненого повітря інтенсивно охолоджує, розтягує та гасить дугу.

Через 0,04...0,05 с після згасання дуги пневматичний поршневий привід з допомогою ізоляційної штанги 9 переміщує контакт 7 донизу, створюючи необхідний ізоляційний повітряний проміжок між контактами вимикача. Подавання стиснутого повітря у вимикач припиняється, і верхній контакт повертається у своє початкове положення.

Слід зазначити, що, на відміну від маломасляних вимикачів, інтенсивність обдування стисненим повітрям не залежить від потужності дуги. Повітряні вимикачі мають високу швидкість: час згасання дуги не перевищує 0,02 с, повний час вимкнення  $t_{\text{вим.в}} = 0,06$  с. Повторне ввімкнення повітряного вимикача можливе після втручання тиску у внутрішній порожнині, на це необхідно 0,3...0,45 с.

Завдяки своїм перевагам (вибухо- та пожежебезпечності, високій швидкодії, значним можливостям вимикання, малому зношенню контактної системи та ін.) повітряні вимикачі широко застосовують у розподільних пристроях відкритого типу на напруги 35, 110, 220 кВ та вищі.

До недоліків повітряних вимикачів слід віднести: необхідність компресорної установки, відносно значна вартість, значна вага конструкції низки вузлів та деталей.

### 8.9. Електромагнітні вимикачі

В електромагнітних силових вимикачах використано принцип «магнітного обдування» із згасання електричної дуги в повітрі у вузьких щілинах дугогасильної решітки, виконаної з ізоляційного жаростійкого матеріалу.

Промислово випускають електромагнітні вимикачі серії ВЕМ на напругу 6 та 10 кВ. На рис. 8.13 зображена схематична конструкція одного полюса вимикача ВЕМ. Рухомі основний контакт 7 врубного типу та дугогасильний 4, закріплені на спільному важелі 6, приводить у рух електромагнітний привід. Нерухомі основний контакт 8 та дугогасильний контакт 9 розміщені ліворуч.

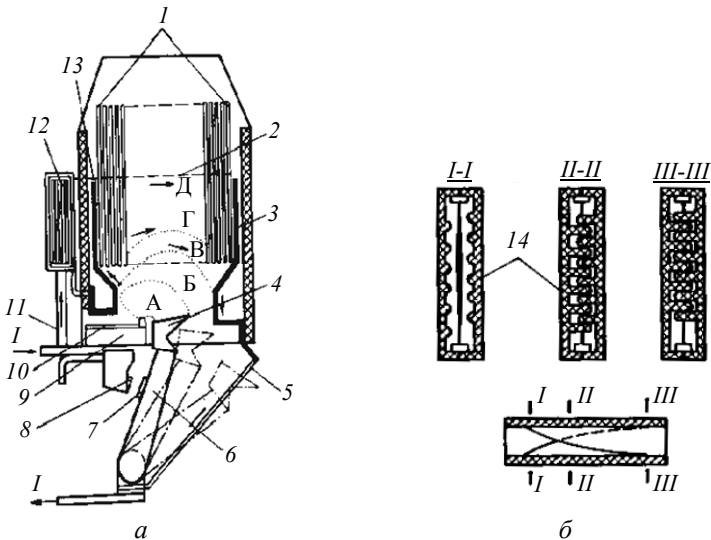


Рис. 8.13

Дугогасильна камера 1 над контактами являє собою або набір керамічних пластин з вузькими щілинами, або лабіринтно-щілинну камеру, утворену двома плитами 14 із дугостійкої кераміки з перегородками. У зібраному вигляді, у міру руху вгору, перегородки однієї плити все більше входять у простір між перегородками дру-

гої плити, створюючи вузьку зигзагоподібну щілину. Поверхня перегородок для поліпшення відведення тепла вкрита склом.

Для створення «магнітного обдування» використовують електромагніт, осердя якого 12 та бокові накладки 2 зовні камери 1 утворюють П-подібної форми, що охоплює дугогасильну камеру з трьох боків та формує магнітне поле, перпендикулярне до площини (рис. 8.13, а). Обмотка електромагніту виконана з кількох витків шинної міді і вмикається послідовно в силове коло під час перекидання дуги на дугогасильні роги 13 та 3. Струмопідвід до контактів, дугогасильних рогів та електромагніту виконують з допомогою шинок 5, 10 та 11.

Процес вимкнення відбувається так. Першими (без виникнення електричної дуги) розмикаються основні контакти, потім – дугогасильні. Дуга, що виникла між ними, перекидається під дією електродинамічних сил та конвекційного потоку повітря на дугогасильні роги 13 та 3. При цьому котушкою електромагніту починає текти струм, у дугогасильній камері створюється потужне поперечне поле, під дією якого електрична дуга з великою швидкістю (близько 30 м/с) втягується всередину камери. Послідовні положення дуги А, Б, В, Г та Д показані на рис. 8.13, а. При цьому дуга розтягується й інтенсивно охолоджується об стінки камери та гасне через 0,01...0,02 с.

Три полюси вимикача встановлюють на викотному візку, там також монтується привід. Загальна маса візка зі встановленими полюсами – близько 600 кг. Вимикач ВЕМ-10Е з електромагнітним приводом випускається на  $I_{\text{ном}} = 1000$  та 1250 А, вимикач ВЕМ-6 має  $I_{\text{ном}} = 2000$  та 3150 А. Номінальний струм вимкнення дорівнює відповідно 20 та 40 кА. Вимикач є швидкодіючим з часом відключення 0,07 с.

Перевагами електромагнітних вимикачів є: повна пожежо- та вибухобезпечність, мале зношування дугогасильних контактів (оскільки значний час дуга горить між дугогасильними рогами), можливість використання їх в колах із частими комутаціями.

Однак широке їх використання обмежує значна складність конструкції і виробництва та обмеження верхньої межі номінальних напруг (не більше ніж 20 кВ).



## 8.10. Синхронізовані вимикачі

Ідея реалізації синхронізованих вимикачів базується на використанні безструмової паузи електричної дуги змінного струму. Якщо розімкнути контакти безпосередньо перед проходженням струму через нуль і дуже швидко розвести їх на відстань, що забезпечує достатню електричну міцність, то дуга більше не загориться.

Створення синхронізованих вимикачів стримувалося двома технічними труднощами. По-перше, необхідний дуже точно синхронізований пристрій, який подає імпульс керування на вимкнення вимикача за  $0,001 \dots 0,002$  с до переходу струму через нуль. По-друге, потрібен достатньо потужний швидкісний привід, який може перемістити рухомий контакт масою в кілька кілограмів на відстань кількох десятків сантиметрів за приблизно такий самий інтервал.

Запропонована велика кількість можливих способів та конструктивних рішень синхронізованих вимикачів. Наприклад, використання порохових зарядів, сполучення синхронізованого пристрою з вакуумним вимикачем та деякі інші рішення.

На рис. 8.14, *a* зображена функціональна схема синхронізованого вимикача, розробленого в Японії, який випробовують в експлуатації.

Вимикач обладнаний індукційно-динамічним приводом, який складається з металевого диска *b*, жорстко з'єданого з рухомим контактом *δ*, та нерухомої котушки *7*. Під час надходження розряду конденсатора *10* на обмотку котушки в металевому диску індукується струм. Взаємодія струму, індукованого в диску, зі струмом у котушці дозволяє одержати короткочасно силу величиною до  $10^4 \dots 10^5$  Н, що відштовхує диск.

Інформацію про величину струму в лінії пристрій синхронізації одержує від трансформатора струму *1*. Якщо поточне значення струму перевищує задану величину, генератор у складі пристрою синхронізації, починає виробляти синхроімпульси *11* (рис. 8.14, *б*), які випереджають на фіксовані інтервали  $\Delta t_2$  моменти переходу струму через нуль.

Після подавання на дозвільний вхід пристрою синхронізації команди РЗ ближчий наступний синхроімпульс надходить на фотоімпульсне реле *3*. Вироблений ним світловий імпульс прямує світловодом *4* на перетворювальний пристрій *5*, який виробляє високовольтний імпульс, прикладений до електрода керування іскрового

розрядника 9. Розряд, який виникає, утворює електричне коло для розряду конденсатора 10 на котушку 7. Контакти вимикача розмикаються, і дуга гасне під час найближчого переходу струму через нуль. У трифазних синхронізованих вимикачах кожен полюс має свій привід.

Загалом проблема створення надійних в експлуатації та економічних синхронізованих вимикачів ще не вирішена.

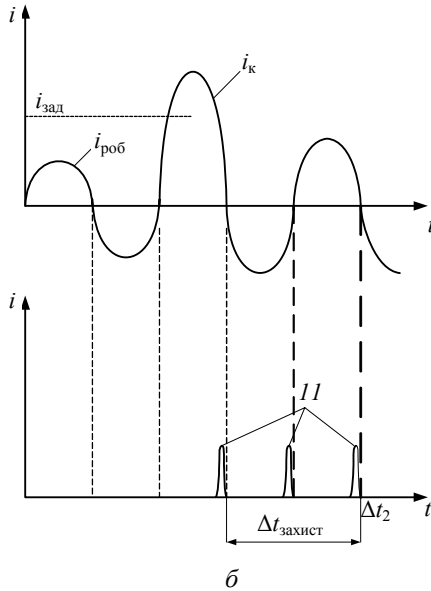
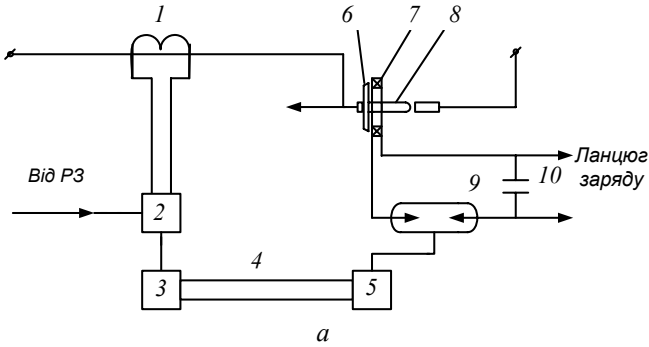


Рис. 8.14

## ■ Розділ 9

### ПРИВОДИ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

#### 9.1. Призначення та класифікація приводів

*Приводом* називають спеціальний пристрій, який здійснює вмикання та вимикання комутаційного апарата. Приводи, зазвичай, входять до комплекту комутаційного апарата, але можуть постачатися окремо і кріпитися на апарат (наприклад, на автоматичні повітряні вимикачі).

У більшості сучасних вимикачів привід виконує такі дії:

- увімкнення комутаційного апарата з одночасним стиском (розтягом) пружини вимикання, яка є у вимикачі (див. рис. 9.4);
- утримання апарата у увімкненому стані;
- розчеплення пристрою утримання після вимкнення апарата.

Привід має розвивати найбільше зусилля під час виконання вмикання, оскільки при цьому долає опір пружини вимкнення, тертя та сили інерції рухомих частин. Окрім того, під час роботи в режимі автоматичного повторного вмикання (АПВ) вимикач може увімкнутись на неліквідоване КЗ. При цьому привід має подолати значне електродинамічне зусилля відштовхування, що виникає в контактах.

**Класифікація.** Робота приводу може базуватись на використанні різної енергії: мускульної сили людини, електричної, пневматичної, потенційної та інших. Приводи, у яких використовують силу людини, називають *ручними*. Решту приводів відносять до класу *двигунних*.

*Ручні приводи* мають просту будову, не потребують додаткового джерела енергії, дешеві та надійні у використанні. Суттєвий недолік ручних приводів – неможливість автоматизації процесу вмикання й обмежені отримувані зусилля. Зусилля на ручку ручного приводу не може перевищувати 245 Н (25 кг) на одну ручку.

Серед *двигунних приводів* у різний час використовували такі: електромагнітні та електродвигунні, які приводить у дію електрична енергія; пружинні, які приводить у дію енергія, накопичена у пружині під час її початкової деформації; вантажні, які приводить у дію енергія, збережена у вантажі під час його початкового підйому; пневматичні, які приводить у дію енергія попередньо стисненого

повітря; піротехнічні, які приводить у дію енергія, що виникає під час вибуху патрона з вибуховою речовиною.

Енергія, потрібна приводу від зовнішнього джерела для виконання операцій, може споживатися у процесі його роботи та безпосередньо перетворюватися на механічний рух рухомих частин вимикача. У таких приводах, які мають назву *приводи прямої дії*, використання зовнішньої енергії відбувається безпосередньо під час увімкнення (вимкнення). Тому приводи прямої дії потребують *значної потужності зовнішнього джерела*.

У приводах *побічної дії* необхідна енергія поступово накопичується в пружині, вантажі та ін., а в момент вмикання віддається приводу. Тому в приводах побічної дії потужність зовнішнього джерела може бути *незначною*.

За рівнем автоматизованості виконуваних операцій приводи поділяють на *неавтоматичні*, що виконують оперативне ввімкнення та вимкнення тільки з допомогою мускульної сили людини (ручні приводи); *напівавтоматичні*, які оперативно вмикаються з допомогою мускульної сили людини, а вимикаються як автоматично (за командою дистанційного керування), так і ручним способом, безпосередньою механічною дією; *автоматичні*, що виконують ввімкнення та вимкнення автоматично (дистанційно) за сигналом реле (ключа керування). В автоматичних приводах є також і місцеве ручне керування для ввімкнення та вимкнення.

## **9.2. Приводи комутаційних апаратів напругою меншою ніж 1000 В**

Приводи низьковольтних апаратів бувають ручного та електрифікованого керування. Керування однофазними роз'єднувачами здійснюють ручним способом з допомогою оперативної штанги. У ручному приводі апаратів людина прикладає силу до рукоятки (див. розд. 7, рис. 7.2 та 7.3). У потужних апаратах пружина вимкнення, тертя в шарнірах та вага рухомих частин створюють значний опір, для подолання якого сили оператора вже недостатньо. Окрім того у схемах автоматики керування апаратом здійснюють автоматично та дистанційно. Це можна виконати з використанням одного з різновидів електрифікованого приводу: електромагнітного, електромашинного або електромеханічного.

В електромагнітному приводі використовують силу тяжіння, що виникає в якорі електромагніту. Такий тип приводу широко застосовують для керування на постійному оперативному струмі. На змінному струмі він менш ефективний і тому більший за розміром. Електромагнітні приводи дуже широко застосовують для керування контакторами, пускачами та окремими типами автоматів.

В електромашинному приводі постійного та змінного струмів обертний рух якоря електродвигуна з допомогою шестерні та зубчастої рейки перетворюється на поступальний та передається на рукоятку автомата (наприклад, привід автомата старої серії А3100), або через черв'ячний редуктор передається одразу на вісь, на якій закріплені рухомі контакти.

Електромеханічний привід, який використовують для дистанційного керування шляхом прямої дії на рукоятку, розглянемо на прикладі приводу до автомата серії А3700. Він складається з двох електромагнітів  $YA1$  та  $YA2$  (рис. 9.1, *a*) і спеціальної муфти, яка має кільце 2, вал 3 та ролик 6, що рухаються в прорізах вала.

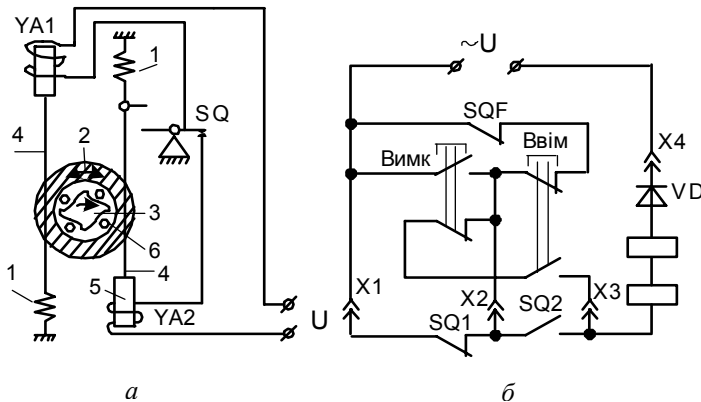


Рис. 9.1

За відсутності напруги  $U$  вимкнений автомат завжди готовий до вмикання. При наявності напруги й натисканні кнопки «Ввім» (рис. 9.1, *б*) напруга через замкнений контакт кінцевого вимикача  $SQ1$ , нормально замкнений контакт кнопки «Вимк» та нормально розімкнений контакт кнопки «Ввім» подається на котушки електромагнітів  $YA1$  та  $YA2$ . Осердя електромагнітів 5 втягнуться, перемістять тяги 4 в різні боки та повернуть кільце 2 за годинниковою

стрілкою. За такого напрямку обертання кільця ролики змістяться у вузьку частину пазів вала, що спричинить зчеплення кільця 2 з валом 3. Вал повернеться на кілька градусів. Одночасно натягнуться пружини 1. У крайньому положенні тяга 4 спеціальним упором розмикає контакти  $SQ$  та вимикає електромагніти. Під дією розтягнених пружин 1 кільце 2 починає повертатись у протилежний бік та переміщувати ролики в широку частину паза, де вони вільно рухаються, і зчеплення з валом 3 втрачається. Повороту вала проти годинникової стрілки заважає гальмівний пристрій з нерухомого кільця та стопорних роликів, а тому вал лишається на місці. Контакти  $SQ$  замикаються, і весь цикл повторюється. Таким чином коливий рух кільця 2 перетворюється на обертовий рух вала 3, який своєю чергою, з допомогою ексцентрика перетворюється на поступальний рух каретки, закріпленої на ручці автомата, угору до його увімкнення. Увімкнення автомата розмикає кінцеві контакти  $SQ1$ ,  $SQF$  і вимикає живлення електромагнітів, а також замикає кінцевий контакт  $SQ2$  (рис. 9.1, б).

У разі натискання кнопки «Вимк» через її нормально розімкнений контакт та контакт  $SQ2$  подається напруга на котушки електромагнітів  $YA1$  та  $YA2$ , які працюють як і під час увімкнення, але каретка ексцентриком переміщується у зворотному напрямку та рухає рукоятку вимикача в положення «Вимк».

### 9.3. Приводи роз'єднувачів та вимикачів навантаження

Високовольтні комутаційні апарати та їх основні функції були докладно розглянуті у розд. 8. Залежно від функціонального призначення апарата його комплектують і відповідним приводом.

**Ручні приводи роз'єднувачів.** Для керування триполюсними роз'єднувачами внутрішньої установки на 6...10 кВ з номінальним струмом до 1000 А широко застосовують ручні важільні приводи типу ПР-2 та ПР-3.

На рис. 9.2 зображена конструкція ручного приводу ПР-2. Він має ручку 3, приварену між стальними пластинами 4. Увесь вузол обертається на осі 5, закріпленій у щоках 2 переднього корпусу приводу. Кінець рукоятки має щілину 6 для приєднання тяги, яка йде до роз'єднувача. Для вимикання роз'єднувача рукоятку приводу необхідно повернути вниз приблизно на  $150^\circ$ . Фіксатор 1 утримує привід в крайніх положеннях. Він складається зі сталевих

пальця та пружини, яка знаходиться всередині корпуса. У пластині 4 є отвори, куди потрапляє палець фіксатора. Один з них сходиться з пальцем у ввімкненому положенні роз'єднувача, другий – у вимкненому.

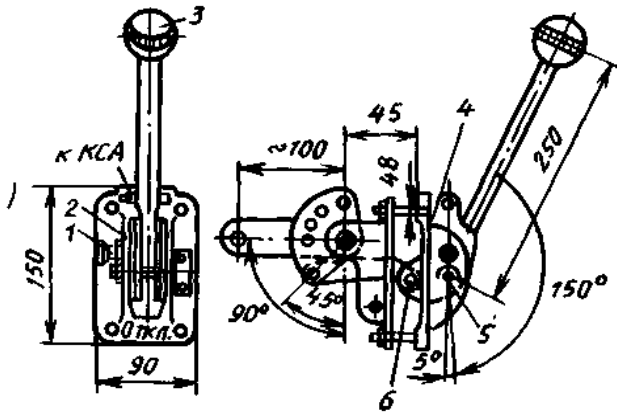


Рис. 9.2

Для зміни положення роз'єднувача необхідно витягнути палець з отвору, потягнувши за головку фіксатора 1. Перед фіксатором може бути встановлена пластина, яка замикається на замок, для унеможливлення несанкціонованих перемикачів. **Потрібно пам'ятати, що роз'єднувачем вимикати робочі струми більші ніж 15 А категорично заборонено.**

**Ручні приводи вимикачів навантаження (ВН).** Керування вимикачами навантаження можна виконувати напівавтоматичним приводом прямої дії ПРА-17 (привід ручний автоматизований), в якому *ввімкнення* відбувається ручним способом, а *вимикання* – дистанційно (автоматично) або так само ручним способом.

Привід (рис. 9.3) складається із чавунного литого корпуса 1, ручки з двома плечима 2, електромагніту вимикання 8, тяги 5, системи механічних важелів та клямки. Для ввімкнення вимикача навантаження необхідно натиснути на важіль 3 ручного вимикання. При цьому піднімається клямка 9, і звільнюється ручка 2. Поворотом ручки знизу вгору навколо головної осі 6 зусилля передається через утворений жорсткий кінематичний зв'язок на секторний ва-

жіль 11 та через нього – на тягу 5, а далі – на вал вимикача. Увімкнене положення фіксує клямка 9, яка своїм зубом чіпляється за стопорний палець.

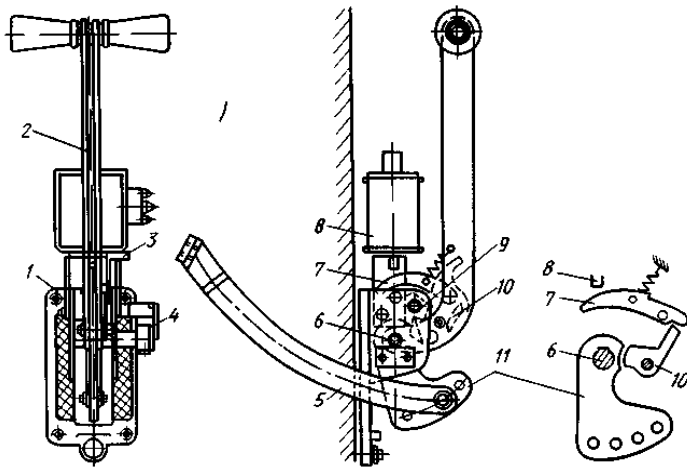


Рис. 9.3

Дистанційне вимикання виконується подаванням напруги на електромагніт вимикання 8. При цьому бойок електромагніту натискає на клямку 7, звільнює роз'єднувальну клямку 10, яка виходом із зчеплення із секторним важелем 11 дозволяє пружині вимикання, що входить у конструкцію ВН, вимкнути його. Показчик положення 4 повертається написом «Вимк».

Для ручного вимикання досить натиснути на важіль 3 і цим безпосередньо подіяти на клямку 7.

#### 9.4. Приводи силових вимикачів

До основних частин приводів силових вимикачів відносять: механізм увімкнення, запірний механізм у вигляді собачки або заціпки та механізм розчеплення, що звільняє собачку (заціпку) під час увімкнення.

**Пружинні приводи силових вимикачів.** Пружинні приводи належать до приводів непрямої дії у механізмі їх роботи застосовують властивості пружини запасати певну кількість потенційної енергії під час її заведення (розтягнення, стиснення або закручування). Заведення пружини звичайно виконують з допомогою елек-



тродвигуна, його можна виконати завчасно до операції ввімкнення. Електродвигуни потужних приводів можуть працювати від мереж постійного та змінного струмів, що є суттєвою перевагою цих приводів. Недоліком їх є низька потужність, що дозволяє використовувати їх для маломасляних вимикачів 6...10 кВ.

Пружинні приводи дозволяють цілковито автоматизувати процес увімкнення і вимикання вимикача, використовувати вимикач у режимах автоматичного ввімкнення резерву (АВР) та автоматичного повторного вимикання (АПВ), а також можливе дистанційне керування ними.

У зв'язку з автоматизацією систем електропостачання підприємств автоматичні пружинні приводи все більше використовують у системах електропостачання.

Спрощена конструкція пружинного приводу наведена на рис. 9.4. Привід складається з електродвигуна 1, який через черв'ячний та шестерінчастий редуктори 2 обертає шестірню заведення 7, яка через систему важелів 9 натягує пружину 5. У кінці операції заведення шестірня стає на упор 8.

Після подавання команди ввімкнення на упор 8 відбувається зачеплення вихідного важеля 6 із валом шестірні 7. Під дією енергії, збереженої в пружині 5, шестірня 7 обертається у протилежний бік і повертає важіль 6. Останній через тягу 4 передає зусилля на важіль 3 керування вимикачем, вмикаючи його.

Під час увімкнення розтягується також пружина вимикання вимикача (на рис. 9.4 не показана). Енергія, збережена в пружині вимкнення, використовується для виконання операції вимкнення вимикача.

**Привід ППМ-10.** Розглянемо детальніше конструкцію пружинного приводу типу ППМ-10 (привід пружинний моторний), який застосовують для керування вимикачами ВМП-10.

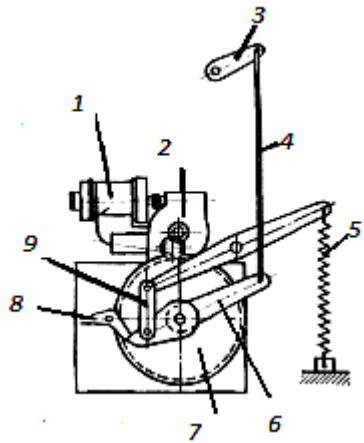


Рис. 9.4

Основною частиною приводу (рис. 9.5) є плоска спіральна пружина 9, розміщена в ободі штурвалу 11. Заведення пружини виконує електродвигун 3, розміщений у верхній частині приводу.

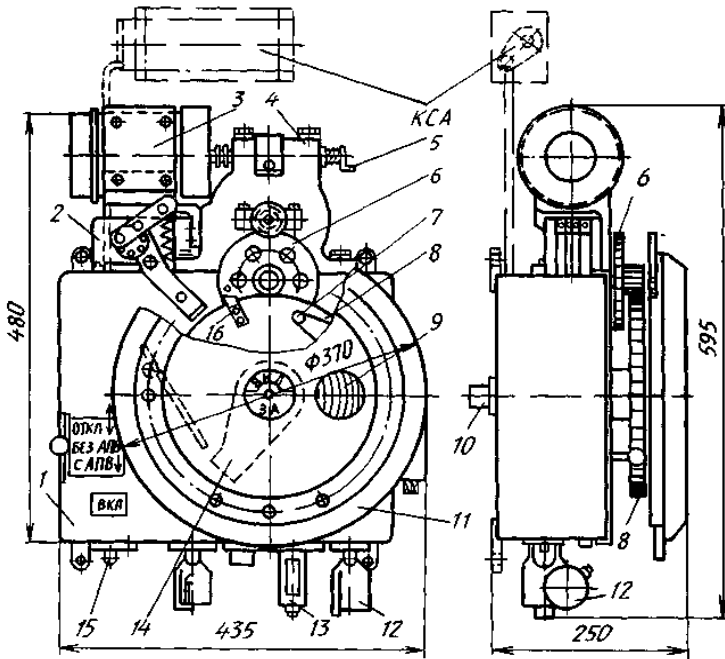


Рис. 9.5

Електродвигун потужністю 350 ВА типу МУН (промислово випускають на номінальну напругу 110 та 127 В постійного та 110, 127 та 220 В змінного струмів). Обертання якоря електродвигуна через черв'ячний 4 і зубчатий 6 редуктори передається на завідну шестірню 8, яка вільно обертається на передньому підшипнику. Зчеплений із нею важіль 14 із зубом поворотом шестірні впирається в ролик собачки 7 і заводить пружину 9. Після закінчення заведення пружини виступ 16, закріплений на шестірні 8, переміщує важелі керування кінцевого вимикача 2 і двигун вимикається від мережі. Запірно-пусковий механізм, розташований усередині корпусу 1 приводу, утримує пружину в заведеному положенні.

Вимикач вмикають натисканням кнопки *Вімк* на передній стіnce корпусу або дистанційно (автоматично) шляхом подавання

напруги на електромагніт вмикання 15. При цьому звільнюється заведена пружина та повертається вал приводу 10, який через систему тяг вмикає вимикач.

Наприкінці вмикання від приводу потрібне максимальне зусилля, оскільки рухомі контакти вмикача в цей момент дотикаються до нерухомих і розводять їх, а в разі вмикання на КЗ необхідно ще додатково подолати електродинамічну силу, що розводить контакти. Пружина приводу в кінці операції ввімкнення розвиває значно менше зусилля, ніж на початку операції. Для компенсації зменшення тягового зусилля пружини привід має маховик – масивне чавунне кільце, закріплене на штурвалі 11. Маховик вбирає зайву енергію пружини на початку ввімкнення і віддає накопичену кінетичну енергію в кінці операції ввімкнення.

Вимкнення вмикача відбувається або натисканням кнопки *Вимкн* на передній стінці приводу, або дистанційно, шляхом подавання напруги на електромагніт вимкнення, або з допомогою реле струму прямої дії типу РТМ 13 та РТВ 12, установлених внизу приводу. Зусилля від механічної кнопки, електромагніту або реле через кнопку вимкнення діє на механізм вільного розчеплення МВР. Останній звільняє вал приводу 10, і вимикач під дією своєї пружини вимикання вмикається.

Привід ППМ-10 уможливорює механічне АПВ. Для використання цього режиму необхідно ручкою на передній панелі ввімкнути спеціальний пристрій, розташований усередині приводу.

**Електромагнітні приводи.** Принцип роботи електромагнітного приводу базується на дії струму, який обтікає котушку, з рухомим сталевим осердям. Коли струм тече котушкою, осердя втягуються в неї і з допомогою штока – штовхача та важелів вмикає вимикач.

Електромагнітні приводи вирізняються простотою конструкції, компактністю, високою надійністю та швидкодією. Але їх випускають тільки для роботи на постійному струмі, що є їх суттєвим недоліком, оскільки виникає необхідність в автономному джерелі – акумуляторній батареї великої ємності. Запропоновані системи живлення електромагнітних приводів від мережі змінного струму з використанням напівпровідникових випрямлячів. Електромагнітний привід, що працює на змінному струмі – найкраще вирішення, але всі спроби створити нову конструкцію такого приводу не дали ефективних результатів.

**Привід серії ПЕ** (привід електромагнітний) застосовують у пристроях внутрішньої установки для дистанційного і автоматичного керування вимикачами ВПМ-10. Привід серії ПЕ досконаліший порівняно з випущеним раніше ПС (привід соленоїдний), у ньому ретельніше відпрацьовані конструктивні вузли та магнітопровід, що зумовлює зменшення споживаного ним струму вдвічі.

На рис. 9.6 наведена конструкція приводу ПЕ-11, який випускають на номінальні напруги 110 та 220 В постійного струму та споживає відповідно струми 116 та 58 А – електромагнітом увімкнення, та 2 і 1 А – електромагнітом вимкнення.

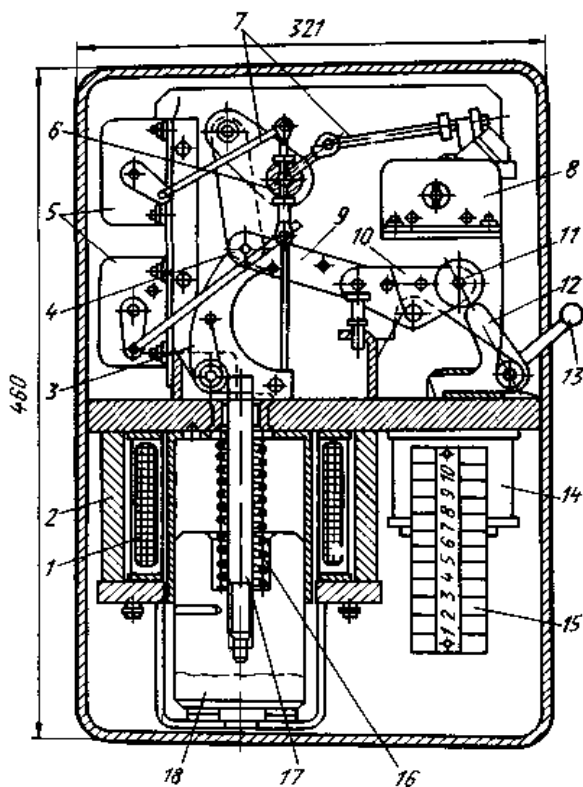


Рис. 9.6

Для увімкнення приводу на обмотку електромагніту 1, розміщену в сталевому циліндрі 2, подається напруга. Осердя 18 різко втягується в котушку електромагніту 1, стискає при цьому пружини

ну 16 та виштовхує шток 17. Шток упирається в ролик 4 важільно-го механізму і піднімає його разом із двома важелями, шарнірно з'єднаними між собою. При цьому обертається вихідний вал приводу 6, який через систему важелів і тяги з'єднаний із валом вимикача, та відбувається ввімкнення вимикача і зведення пружин вимкнення. Одночасно з підніманням штока утримувальна клямка 3 рухається ліворуч.

У верхньому положенні штока 17 клямка 3 заскакує під ролик 4 та фіксує привід, а з ним – і вимикач, у ввімкненому положенні. У цей момент через тяги 7 міняють своє положення допоміжні 8 та сигнальні 5 контакти. Допоміжні контакти 8 розмикають живлення електромагніту ввімкнення, оскільки котушка призначена лише для короткочасного режиму роботи, осердя 18 падає вниз на гумові амортизатори. Сигнальні контакти 5 відображають нове положення вимикача. У ввімкненому положенні привід утримується ланкою 9 та коромислом 10, що знаходяться в «мертвому» положенні. Коромисло роликком 11 МВР опирається на клямку 12.

Для регулювання та випробування приводу під час монтажу та ремонту в нижній частині електромагніту є вирізи для встановлення важелів ручного ввімкнення. У процесі експлуатації ввімкнення приводу ПЕ-11 ручним способом заборонене.

Вимкнення вимикача може бути дистанційним (автоматичним) або ручним. За дистанційного ввімкнення на електромагніт вимикання 14 подається напруга, його бойок ударяє по утримувальній клямці 12 та повертає її за годинниковою стрілкою. Ролик 11 коромисла 10 зісковзує з клямки 12 та виводить ланку 9 з «мертвого» положення. Коромисло 10 під дією пружини повертається навколо осі за годинниковою стрілкою і тягне за собою ланку 9. Ролик 4 зісковзує з упора 3 й звільняє вал приводу і під дією пружин вимкнення вимикача його силові контакти швидко розходяться. Вихідний вал 6 приводу повертається в початкове положення. У цей момент змінюють положення сигнальні контакти 5, що відображають нове положення вимикача, та допоміжні контакти 8, які розмикають коло живлення електромагніту вимкнення. Для зручності здійснення електричного монтажу є клемна рейка 15 (збірка). Ручним способом вимкнути привід можна рукояткою вимкнення 13 безпосередньою дією на утримувальну клямку 12.

**Електромагнітний привід вакуумних вимикачів.** Незначний хід рухомих контактів у вакуумних вимикачах дозволив зробити в

них простіші електромагнітні приводи. На рис. 9.7 зображений розріз універсального електромагнітного приводу для керування вакуумним вимикачем.

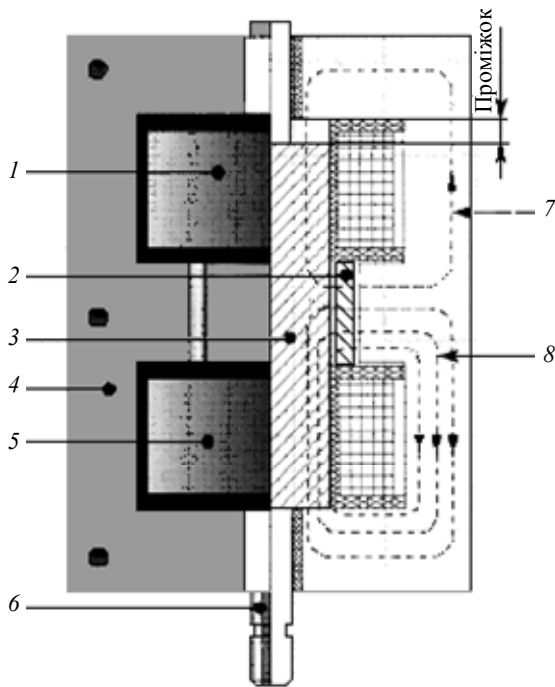


Рис. 9.7

Для утримання вимикача у вимкненому або ввімкненому положенні використовують енергію потужного постійного магніту 2. Фіксування відбувається за рахунок використання принципу «магнітної клямки» – замкнення магнітного кола вимкнення 8 або ввімкнення 7 якорем 3. У разі вмикання на котушку вмикання 1 подається оперативна напруга, якорь 3 переміщується вгору на довжину проміжку та фіксується в цьому положенні постійним магнітом. Це переміщення передається штоком 6 далі на рухомі контакти вимикача.

Вимкнення відбувається за рахунок енергії попередньо зарядженого конденсатора, що розряджається на котушку вимкнення 5. Використання конденсатора сприяє найкращій часовій характеристиці приводу, а також забезпечує можливість вимкнення вимикача

у разі припинення подавання напруги в колі оперативного керування. У приводі передбачене ручне керування з допомогою спеціальної ручки.

Конструкція приводу вигідно відрізняється від розглянутих меншою масою та габаритами, відсутністю буферів та необхідності регулювання, тобто обслуговуванням за увесь час експлуатації.

## ■ Розділ 10

### ВИБІР КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

#### 10.1. Загальні умови вибору електротехнічних пристроїв

Вибір будь-якого електротехнічного пристрою починають з номінальної напруги та врахування умов експлуатації пристрою (кліматична зона, категорія розміщення, тип атмосфери та ін.). Обов'язковим є виконання простої умови:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мер}}, \quad (10.1)$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга пристрою (апарата);  $U_{\text{мер}}$  – робоча напруга мережі, у якій буде встановлений апарат. Доцільно надавати перевагу рівності в умові (10.1). Надмірний «запас» на напругу спричинить неефективне використання дорожчого апарата, який має більше значення  $U_{\text{ном}}$ .

Другою обов'язковою умовою вибору є:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роб.макс}}, \quad (10.2)$$

де  $I_{\text{ном}}$  – номінальний струм пристрою;  $I_{\text{роб.макс}}$  – максимально можливий робочий струм, який тече через пристрій досить довгий час (зазвичай це струм післяаварійного режиму).

Під час вибору пристрою за струмом немає необхідності прагнути в умові (10.2) до рівності. Навпаки, «запас» на 10–20 % виявиться дуже доречним, коли зростуть робочі струми у разі ввімкнення нового навантаження. Різниця цін апаратів, які відрізняються номінальними струмами на 10–20 % суттєво менша, ніж тоді, коли вони відрізняються за напругою.

Більшість комутаційних апаратів слід перевірити на термічну та динамічну стійкість до КЗ.

Перевірка на термічну стійкість полягає у виконанні однієї з умов:

$$I_T^2 t_T \geq I_\infty^2 t_{\text{вимк}}; \quad (10.3)$$

$$I_T^2 t_T \geq B_K,$$

де  $I_T$  та  $t_T$  – струм та час термічної стійкості апарата (паспортні величини, наводять у довідниках [6,7,19] та додатках);  $I_\infty$  – сталий струм КЗ;  $t_{\text{вимк}}$  – час вимкнення струму КЗ пристроєм захисту;  $B_K$  – тепловий імпульс, який характеризує кількість тепла, що виділяється в пристрої за час дії струму КЗ [17].

Перевірка на електродинамічну стійкість полягає у виконанні однієї з умов:

$$i_{\text{дин}} \geq i_y; \quad (10.4)$$

$$I_{\text{дин}} \geq I_y,$$

де  $i_{\text{дин}}$  й  $I_{\text{дин}}$  – миттєве та діюче значення струму електродинамічної стійкості апарата (наводять у довідниках [6,7], раніше називали граничним наскрізним струмом);  $i_y$  й  $I_y$  – миттєве та діюче значення розрахункового ударного струму КЗ.

## 10.2. Вибір рубильників, перемикачів, контакторів та магнітних пускачів

Вибір рубильників та перемикачів нескладний і полягає у дотриманні вимог умов (10.1) та (10.2). Для ввідних рубильників силових щитів доцільно здійснити перевірку їх на термічну та електродинамічну стійкість за виразами (10.3) та (10.4).

Обираючи рубильник (перемикач), враховують місце його розташування та тип приводу. Якщо разом із рубильником передбачене встановлення запобіжника, то доцільно замість двох апаратів використовувати блоки «вимикач-запобіжник».

**Приклад.** Необхідно обрати ввідний рубильник *QS* силового щита для таких умов:  $U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{\text{роб.мах}} = 450 \text{ А}$ ;  $I_\infty = 7,5 \text{ кА}$ ;  $i_{y(K1)} = 18,5 \text{ кА}$ ;  $t_{\text{вимк}} = 0,15 \text{ с}$  (рис. 10.1).

Використовуючи технічні дані рубильників, наведені в праці [6], зупинимось на трифазному рубильнику типу *В1116* із центральною ручкою, який має такі характеристики:  $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{\text{ном}} = 800 \text{ А}$ ;  $i_{\text{дин}} = 35 \text{ кА}$ ;  $I_T^2 t_T = 500 \text{ кА}^2 \text{ с}$ .



Тоді:  $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В} \geq U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}$ . Умова (10.1) виконана.  
 $I_{\text{ном}} = 800 \text{ А} \geq I_{\text{роб.мах}} = 450 \text{ А}$ . Умова (10.2) виконана.  
 $I_{\text{T}}^2 t_{\text{T}} = 500 \text{ кА}^2 \text{с} \geq I_{\text{с}}^2 t_{\text{вимк}} = 7,5^2 \cdot 0,15 = 8,5 \text{ кА}^2 \text{с}$ . Умова (10.3) виконана.  
 $i_{\text{дин}} = 35 \text{ кА} \geq i_{\text{у(К1)}} = 18,5 \text{ кА}$ . Умова (10.4) виконана.

Отже, рубильник типу В1116 відповідає всім умовам вибору.

### Вибір контакторів та пускачів.

Контактори та пускачі обирають:

– за умовами, що враховують категорію їх застосування (див. підрозд. 7.1);

– за номінальною напругою [умова (10.1)];

– за номінальним струмом [умова (10.2)] чи потужністю електродвигунів, які підключають.

На термічну та динамічну стійкість контактори та пускачі не перевіряють.

**Приклад.** Необхідно обрати контактор для комутації електричного навантаження категорії застосування АС-3, (пряме запускання електродвигунів) для таких умов:  $U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}$ , потужність навантаження  $S_{\text{нав}} = 50 \text{ кВт}$ , частота комутації навантаження 50 ввім/год, оперативне живлення на напрузі 220 В змінного струму.

Використовуючи характеристики контакторів змінного струму [6] оберемо контактор серії КТ6000Б, який має допустиму частоту ввімкнень до 600 ввім/год. Він може оснащуватися коштушкою керування на 220 В змінного струму та допускає використання за категорією АС-3.

Номінальна напруга контактора КТ 6000Б – 380 В, тобто виконується умова (10.1):

$$U_{\text{ном}} = 380 \text{ В} \geq U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}.$$

Максимальний робочий струм, який тече через контактор, визначають за потужністю навантаження і він дорівнюватиме:

$$I_{\text{роб.мах}} = S_{\text{нав}} / (\sqrt{3} U_{\text{мер}}) = 50 / (1,73 \cdot 0,38) = 76 \text{ А}.$$

Для проходження такого струму досить обрати контактор першої величини з  $I_{\text{ном}} = 100 \text{ А}$  (умова (10.2) буде виконана). Уточнений тип контактора з обраної серії буде КТ-6013Б.

**Приклад.** Необхідно обрати магнітний пускач для керування та захисту асинхронного двигуна (категорія використання АС-3) потужністю 5 кВт, номінальною напругою  $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ .

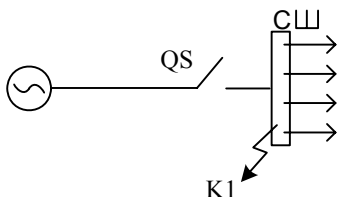


Рис. 10.1

Використовуючи технічні дані пускачів, наведені в праці [6], оберемо пускач серії ПМЛ, призначений для роботи в мережі з напругою меншою за 660 В і умова (10.1) виконується. Оскільки робочий струм дорівнює 7,6 А, то оберемо пускач першої величини з  $I_{\text{ном}} = 10 \text{ А}$ , при цьому умова (10.2) виконується. Для захисту електродвигуна від перевантаження необхідно обирати пускач з тепловим реле, та кнопкою ручного керування двигуном. Таким типом магнітного пускача буде ПМЛ-1220.

### 10.3. Вибір автоматичних повітряних вимикачів

Автоматичні повітряні вимикачі обирають:

- за конструктивним виконанням;
- за номінальною напругою (умова (10.1));
- за номінальним струмом автомата ( умова (10.2));
- за граничною здатністю вимкнення.

$$I_{\text{вимк.гр}} \geq I_{\text{к max}}, \quad (10.5)$$

де  $I_{\text{вимк.гр}}$  – граничний струм вимкнення автомата;  $I_{\text{к max}}$  – максимально можливий струм КЗ у колі автомата.

Далі обирають номінальний струм розчіплювача  $I_{\text{роз. ном}}$ , а для регульованих розчіплювачів розраховують їх струми уставки  $I_{\text{роз. ном}}$ , та вибір величини  $I_{\text{уст. к}}$  відсічки. Потім обраний автомат перевіряють на чутливість та селективність спрацювання.

*Вибір уставок розчіплювачів.* Номінальний струм розчіплювача автомата  $I_{\text{роз. ном}}$  регульованої величини обирають не меншим за максимальний робочий струм  $I_{\text{роб. max}}$ , що досить довго тече у автоматі:

$$I_{\text{роз. ном}} \geq I_{\text{роб. max}}. \quad (10.6)$$

Для автоматів з регулюванням струму розчіплювача від перевантаження, щоб розчіплювач автомата не спрацював за незначних підвищень робочих струмів, його значення  $I_{\text{роз. ном}}$  також має перевищувати значення  $I_{\text{роб. max}}$  з певним запасом:

$$I_{\text{роз. ном}} \geq (1,1 \dots 1,3) I_{\text{роб. max}}. \quad (10.7)$$

Для двигунів з повторним короткочасним режимом роботи  $I_{\text{роз. ном}} \geq 1,5 I_{\text{ном. дв}}$ .

Розчіплювач миттєвого спрацювання (відсічка), який має уставку від КЗ  $I_{\text{уст. к}}$ , не повинен реагувати на короткочасні перевантаження мережі, викликані, наприклад, запусканням електродвигуна. Для цього необхідно, щоб:

$$I_{\text{уст. к}} \geq (1,5 \dots 1,8) I_{\text{пер}}, \quad (10.8)$$

де  $I_{\text{пер}}$  – струм перевантаження.

Величина струму перевантаження  $I_{\text{пер}}$  залежить від режиму запускання двигунів мережі і його визначають:

– для режиму одночасного самозапускання  $m$  двигунів, які постійно працюють і не вимикаються:

$$I_{\text{пер}} = \sum_1^m I_{\text{пуск}}, \quad (10.9)$$

де  $\sum_1^m I_{\text{пуск}}$  – сума пускових струмів  $m$  двигунів;

– для режиму послідовного запускання враховують, що останнім запускається найбільш потужний електродвигун, а інші вже працюють у нормальному режимі:

$$I_{\text{пер}} = I_{\text{пуск. max}} + \sum_1^{m-1} I_{\text{роб}}. \quad (10.10)$$

*Перевірка на чутливість.* У мережах, де обов'язковим є захист тільки від струмів КЗ, потрібно щоб автоматичні вимикачі з обернено залежною захисною характеристикою (з тепловим, напівпровідниковим або іншим розчіплювачем, що формує таку характеристику) забезпечували коефіцієнт чутливості не менший як три, тобто:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{к. min}} / I_{\text{роз. ном}} \geq 3, \quad (10.11)$$

де  $I_{\text{к. min}}$  – мінімальний струм КЗ у колі автомата.

Потрібна чутливість автоматичних вимикачів, оснащених тільки миттєвими розчіплювачами, залежить від номінального струму автомата  $I_{\text{ав. ном}}$  і має задовольняти умову:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{к. min}} / I_{\text{уст. к}} \geq 1,4, \quad \text{якщо } I_{\text{ав. ном}} \leq 100 \text{ А,}$$

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{к. min}} / I_{\text{уст. к}} \geq 1,25, \quad \text{якщо } I_{\text{ав. ном}} > 100 \text{ А.}$$

У мережах, що захищені також від струмів перевантаження, чутливість автоматичних вимикачів вважають достатньою, якщо:

$I_{\text{роз. ном}} \leq I_{\text{тр. доп}}$  – за використання автоматів з нерегульованим розчіплювачем від струмів перевантаження;

$I_{\text{уст. пер}} \leq 1 \dots 1,25 I_{\text{тр. доп}}$  – для розчіплювачів з регульованою уставкою від струмів перевантаження;

$I_{\text{уст. к}} \leq I_{\text{тр. доп}}$  – для автоматів, оснащених тільки миттєвим розчіплювачем від струмів КЗ, де  $I_{\text{тр. доп}}$  – тривало допустимий струм провідника захищеної лінії.

**Приклад.** Потрібно захистити автоматичними вимикачами ділянку мережі. Потужності навантажень та розрахункові значення струмів КЗ наведені на рис. 10.2. Коефіцієнт кратності пускового струму електродвигунів  $k_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 5$ , ККД  $\eta = 0,8$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ , режим запускання – послідовний. Освітлювальне навантаження вважаємо активним.

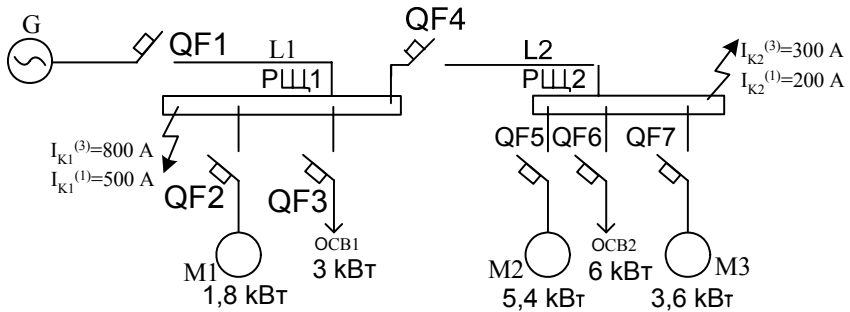


Рис. 10.2

Наведемо етапи вибору автоматів для захисту мережі (рис. 10.2).

1. Визначимо повні струми від розподільних щитів (РЩ) у фідерах та в лініях L1, L2 у нормальному режимі роботи. Струм, яким живляться електродвигуни за номінального навантаження, визначають:

$$I_{M, \text{ном}} = P_{M, \text{ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi),$$

звідки  $I_{M1 \text{ ном}} = 1,8 / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,8 \cdot 0,8) = 4,2 \text{ A}$ ;  $I_{M2 \text{ ном}} = 12,6 \text{ A}$ ;  $I_{M3 \text{ ном}} = 8,4 \text{ A}$ .

Струми у фідерах освітлювальних навантажень з лампами розжарювання ( $\cos \varphi = 1$ ) дорівнюють:

$$I_{\text{осв}1} = S_{\text{осв}1} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}}) = 3 / (\sqrt{3} \cdot 0,38) = 4,6 \text{ A}; \quad I_{\text{осв}2} = 9,2 \text{ A}.$$

Використовуючи отримані дані, визначимо максимальні робочі струми в лініях L1 та L2 (нехтуючи відмінностями значень  $\cos \varphi$  окремих споживачів):

$$I_{\text{роб. max} L2} = I_{M2 \text{ ном}} + I_{\text{осв}2} + I_{M3 \text{ ном}} = 12,6 + 9,2 + 8,4 = 30,3 \text{ A};$$

$$I_{\text{роб. max} L1} = I_{M1 \text{ ном}} + I_{\text{осв}1} + I_{\text{роб. max} L2} = 4,2 + 4,6 + 30,3 = 39,1 \text{ A}.$$

2. Оскільки струми на всіх ділянках мережі не перевищують 100 А, попередньо оберемо автомати серії АЕ20, які випускають на напругу до 660 В та які мають граничну здатність вимкнення 1...9 кА. При цьому будуть виконуватись умови (10.1) та (10.5).

Максимальні робочі струми у фідерах навантаження не перевищують 16 А, а в лініях L1 та L2 становлять 63 А. Тому для захисту перших використовуємо автомати АЕ2020 з номінальним струмом 16 А, для других – АЕ2040 з номінальним струмом 63 А за умовою (10.2).

3. Переходимо до вибору номінальних струмів розчіплювачів за умовами (10.6) і (10.7).

Для освітлювальних фідерів:

$$I_{\text{роз. ном QF 3}} = 6,3 \text{ А} > I_{\text{осв 1}} = 4,6 \text{ А};$$

$$I_{\text{роз. ном QF 6}} = 10 \text{ А} > I_{\text{осв 2}} = 9,2 \text{ А}.$$

Для фідерів з двигунами:

$$I_{\text{роз. ном QF 2}} = 5 \text{ А} > I_{\text{M1 ном}} = 4,2 \text{ А};$$

$$I_{\text{роз. ном QF 5}} = 16 \text{ А} > I_{\text{M2 ном}} = 12,6 \text{ А};$$

$$I_{\text{роз. ном QF 7}} = 10 \text{ А} > I_{\text{M3 ном}} = 8,4 \text{ А}.$$

Відомо, що автомати серії АЕ20 можуть мати регулятор уставки номінального струму розчіплювача від перевантаження, який дозволяє змінювати уставку в межах 0,9...1,15  $I_{\text{роз. ном}}$ . Якщо для всіх автоматів поставити регулятор в положення 1, то умова (10.7) буде виконана.

Оберемо номінальні струми розчіплювачів автоматів QF1 та QF4 за формулою (10.6):

$$I_{\text{роз. ном QF 1}} = 40 \text{ А} > I_{\text{роб. max L.1}} = 39,1 \text{ А};$$

$$I_{\text{роз. ном QF 4}} = 31,5 \text{ А} > I_{\text{роб. max L.2}} = 30,9 \text{ А}.$$

Враховуючи, що ці автомати встановлені в лініях живлення, а їх значення  $I_{\text{роз. ном}}$  перевищують значення  $I_{\text{роб. max}}$  ліній незначно, візьмемо їх регулятори як  $I_{\text{рч ном}}$  в максимальне положення. Тоді:

$$I_{\text{роз. ном QF 1}} = 1,15 \cdot 40 = 46 \text{ А};$$

$$I_{\text{роз. ном QF 4}} = 1,15 \cdot 31,5 = 36 \text{ А},$$

умова (10.7) витримана.

4. Для автоматів, які захищають фідери з двигунами, необхідно перевірити відлагодження їх електромагнітних розчіплювачів від пускових струмів за умовою (10.8) для запобігання спрацюванню автоматів під час запускань. Для цього визначимо струми перевантаження у фідерах та в лініях L1 і L2 під час запускання електродвигунів:

$$I_{\text{M1 пуск}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{M1 ном}} = 5 \cdot 4,2 = 21 \text{ А};$$

$$I_{\text{M2 пуск}} = 63 \text{ А}; \quad I_{\text{M3 пуск}} = 42 \text{ А}.$$

Струм перевантаження в лініях L1 та L2 залежить від прийнятого режиму запускання (див. пояснення до виразів (10.9) та (10.10)). Враховуючи, що режим запускання послідовний, струм перевантаження в лінії L2 визначимо за формулою (10.10) за умови, що останнім запускається електродвигун M2, який має більший пусковий струм, ніж електродвигун M3:

$$I_{\text{пер } L2} = I_{M2 \text{ пуск}} + I_{\text{осв } 2} + I_{M3 \text{ ном}} = 63 + 9,2 + 8,4 = 80,6 \text{ А.}$$

Струм перевантаження в лінії L1 за тих самих умов дорівнює

$$I_{\text{пер } L1} = I_{\text{пер } L2} + I_{M1 \text{ ном}} + I_{\text{осв } 1} = 80,6 + 4,2 + 4,6 = 89,4 \text{ А.}$$

За паспортними даними та захисною характеристикою (рис. 10.3) електромагнітний розчіплювач автоматів AE20 починає спрацьовувати за струмів  $10 \dots 12 I_{\text{роз. ном}}$ , тобто:

$$I_{\text{уст. к } QF2} = 5 \cdot 10 = 50 \text{ А} > I_{M1 \text{ пуск}} = 21 \text{ А};$$

$$I_{\text{уст. к } QF5} = 160 \text{ А} > I_{M2 \text{ пуск}} = 63 \text{ А};$$

$$I_{\text{уст. к } QF7} = 100 \text{ А} > I_{M3 \text{ пуск}} = 42 \text{ А.}$$

Отже, умова (10.8) дотримана. Цікаво зазначити, що, як впливає із захисних характеристик, пусковий струм двигуна M2 викликає би вимкнення автомата QF5 через 8...10 с. Однак за цей час двигун встигне набрати номінальних обертів, і споживаний струм знизиться до значень  $I_{\text{ном}}$ , тобто вимкнення не відбудеться.

Струми спрацьовування електромагнітних розчіплювачів автоматів QF1 та QF4 за обраного їх налаштування будуть відповідно дорівнювати

$I_{\text{уст. к } QF1} = 10 \cdot I_{\text{роз. ном}} = 10 \cdot 46 = 460 \text{ А}$  та  $I_{\text{уст. к } QF4} = 10 \cdot 36 = 315 \text{ А}$ . Ці струми суттєво перевищують струми перевантажень ліній L1 та L2 ( $I_{\text{пер } L1} = 89,4 \text{ А}$ ,  $I_{\text{пер } L2} = 80,6 \text{ А}$ ), тобто умова (10.8) виконана зі значним запасом.

5. Перевіримо обрані автомати на чутливість за виразом (10.11). При цьому вважатимемо, що лінії, які відходять від РЩ1 та РЩ2 короткі, тобто струми однофазних КЗ в їх кінці можна вважати такими, що дорівнюють струмам однофазних КЗ на відповідних щитах. Тоді:

$$K_{\text{ч } QF2} = I_{\text{кл}}^{(1)} / I_{\text{рч. ном } QF2} = 500 : 5 = 100 > 3;$$

$$K_{\text{ч } QF3} = 500 : 6,3 = 79 > 3; \quad K_{\text{ч } QF5} = 200 : 16 = 12,5 > 3;$$

$$K_{\text{ч } QF6} = 200 : 10 = 20 > 3; \quad K_{\text{ч } QF7} = 200 : 10 = 20 > 3.$$

Перевіримо автомати QF1 та QF4 на чутливість за виразом (10.11):

$$K_{\text{ч } QF1} = 500 : 46 \approx 11 > 3; \quad K_{\text{ч } QF4} = 200 : 36 \approx 5,5 > 3.$$

Як бачимо, всі автомати забезпечують потрібну чутливість.

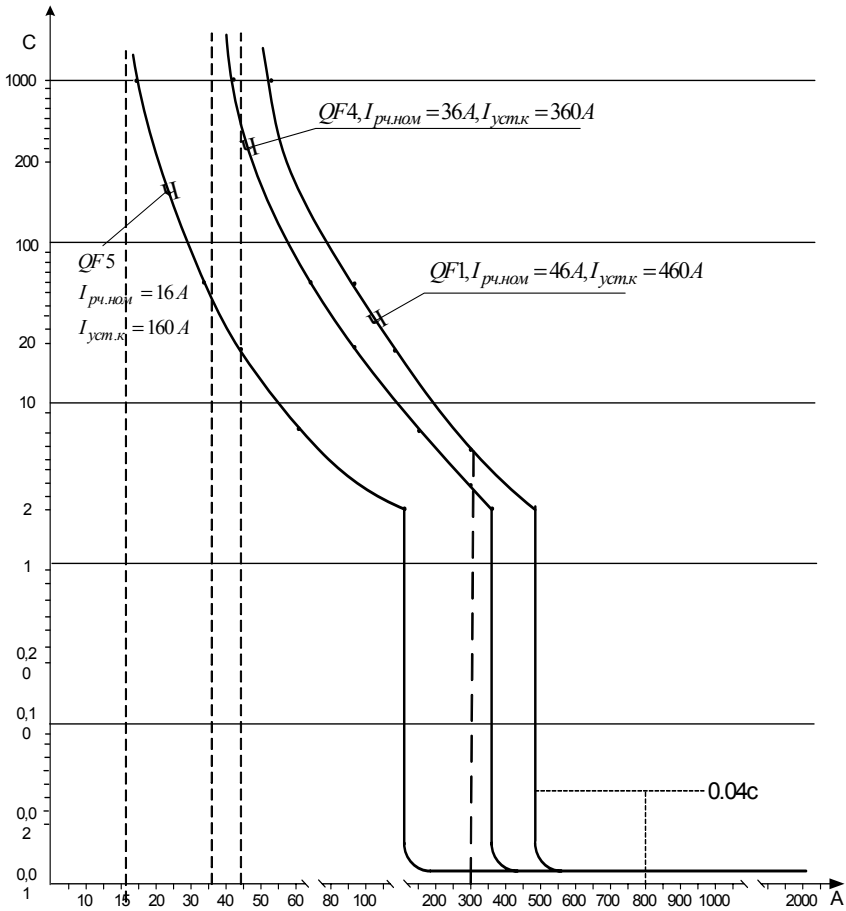


Рис. 10.3

6. Перевіримо автомати на селективність спрацювання. Для цього необхідно побудувати карту селективності, використовуючи захисні характеристики автоматів.

На селективність перевіряють тільки послідовно ввімкнені автомати, наприклад, автомат QF4 з автоматами QF5, QF6 та QF7. Однак якщо забезпечується селективність автомата QF4 з автоматом, який має найбільше значення  $I_{ном}$  із автоматів, які захищають лінії від РЩ2, то для автоматів з меншим значенням  $I_{рч. ном}$  селективність буде тим більш забезпеченою.

З автоматів QF5, QF6 та QF7 найбільше значення  $I_{рч. ном}$  має автомат QF5  $I_{роз. ном QF5} = 16 \text{ А}$ . Отже, його і будемо перевіряти на селективність з автоматом QF4, який має  $I_{роз. ном} = 36 \text{ А}$ .

Карта селективності (див. рис. 10.3) являє собою побудовані в одних координатах захисні характеристики послідовно ввімкнених автоматів, тобто залежності часу спрацювання автоматів від величини струму, який тече через них:  $t = f(I)$ . Вона дозволяє визначити порядок спрацювання автоматів за КЗ. Карти селективності будують в абсолютних величинах струмів (амперах) з використанням типових захисних характеристик автоматів, наведених, зазвичай, у відносних одиницях  $I/I_{роз. ном}$ .

Для переходу від відносних одиниць до абсолютних необхідно всі значення осі абсцис типового графіка помножити на значення  $I_{рч. ном}$  та перенести одержану криву на спільний графік. Наприклад, для автомата QF5 з номінальним струмом 16 А значення кратності струму 2 на типовій характеристиці буде відповідати  $2 \cdot 16 = 32 \text{ А}$ . За кратності струму 2 автомат відповідно до типової характеристики має вимкнутись через 60 с, тому відкладемо цей час для струму 32 А на спільному графіку та матимемо одне значення характеристики QF5. Потім перенесемо інші та побудуємо всю захисну характеристику. Аналогічно будують захисну характеристику для автомата з  $I_{роз. ном} = 36 \text{ А}$  та з  $I_{роз. ном} = 46 \text{ А}$  (див. рис. 10.3).

Після побудови графіків проаналізуємо роботу автоматів за КЗ. У разі трифазного КЗ, розташованого просто за автоматом QF5 через нього і автомати QF4 та QF1 тектиме струм  $I_{к2}^{(3)} = 300 \text{ А}$ . Відклавши величину цього струму на осі абсцис та провівши вертикальну лінію, побачимо, що за такого струму автомат QF5 вимкнеться через 0,01...0,02 с, QF4 приблизно через 4 с, якщо не вимкнеться QF5, а автомат QF1 приблизно через 6 с, якщо не спрацюють QF5 та QF4. Отже, за КЗ у лінії до двигуна M2 автомати будуть працювати селективно.

У разі КЗ в лінії, наприклад, просто за автоматом QF4 через нього та автомат QF1 проходитиме струм  $I_{к1}^{(3)} = 800 \text{ А}$ . Відклавши величину струму та провівши вертикальну лінію, побачимо, що електромагнітні розчіплювачі обох автоматів спрацюють за час 0,01...0,02 с. Спрацювання першим автомата QF4 не гарантоване. Тому для забезпечення селективності між автоматами QF4



та *QF1* необхідно, щоб в останньому розчіплювач від струмів *K3* мав витримку часу, наприклад, 0,04 с.

Оскільки в автоматах серії *AE20* не передбачена можливість зміни часу затримки спрацьовування, слід розглянути можливість заміни цієї серії на серію автоматів *A37* з напівпровідниковими розчіплювачами, які мають цю можливість (дод. 3).

#### 10.4. Вибір роз'єднувачів та вимикачів навантаження

Вибір високовольтних комутаційних апаратів полягає у виконанні як загальних вимог (10.1) – (10.4), так і низки додаткових вимог, які можна продемонструвати за зразком.

**Приклад.** Необхідно обрати роз'єднувачі та вимикачі навантаження для високовольтного РП-10 кВ (рис. 10.4). Максимальні робочі струми в лініях, які прямують від РП і до силового трансформатора, дорівнюють відповідно  $I_{роб.махЛ1} = 300$  А,  $I_{роб.махЛ2} = 200$  А та  $I_{роб.мах Т} = 150$  А. Значення сталого та ударного струмів *K3* у точці *K1*  $I_{\infty} = 10$  кА,  $i_y = 35$  кА. Час спрацьовування захисту вимикача лінії живлення  $t_z = 1,5$  с.

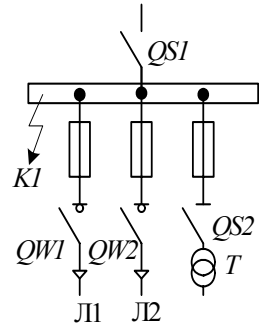


Рис. 10.4

**Вибір роз'єднувачів.** Через роз'єднувач *QW1*, тече максимальний робочий струм  $I_{роб.мах}$ , що дорівнює сумі струмів у лініях:  $300+200+150=650$  А (для спрощення припустимо, що фази струмів однакові).

Використовуючи дані [7], оберемо трифазний роз'єднувач із заземлювальними ножами типу *PB3-10/1000* з  $I_{ном} = 1000$  А та занесемо його основні технічні дані до табл. 10.1. Як видно з табл. 10.1, умови (10.1), (10.2), (10.3) та (10.4) виконуються. Отже, обраний роз'єднувач типу *PB3-10* відповідає всім обов'язковим параметрам, і його можна використати як *QW1*.

Таблиця 10.1

№ з/п	Параметр, що перевіряють	Необхідна умова	Паспортна величина параметра	Розрахункове значення параметра	Висновок
1	Номінальна напруга	$U_{ном} \geq U_{мер}$	$U_{ном} = 10$ кВ	$U_{мер} = 10$ кВ	Умова виконується

Закінчення табл. 10.1

№ з/п	Параметр, що перевіряють	Необхідна умова	Паспортна величина параметра	Розрахункове значення параметра	Висновок
2	Номінальний струм	$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роб.мах}}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ A}$	$I_{\text{роб. мах}} = 650 \text{ A}$	Так само
3	Електродинамічна стійкість	$i_{\theta} \geq i_y$	$i_{\theta} = 81 \text{ кА}$	$i_y = 35 \text{ кА}$	Так само
4	Термічна стійкість	$I_T^2 t_T \geq I_{\infty}^2 t_3$	$(31,5)^2 \cdot 4 = 4000 \text{ кА}^2\text{с}$	$(10)^2 \cdot 1,5 = 150 \text{ кА}^2\text{с}$	Так само

Роз'єднувач QS2 обирають аналогічно. Трифазний роз'єднувач із заземлювальними ножами типу РВ3-10/400 з номінальним струмом  $I_{\text{ном}} = 400 \text{ A}$  задовольнятиме вимоги (максимальний робочий струм трансформатора  $I_{\text{роб.мах тр}} = 150 \text{ A}$ ). Однак, враховуючи, що він захищений запобіжником, перевірку на термічну стійкість QS2 можна не виконувати, а якщо б величина плавкої вставки запобіжника була меншою ніж 60 А, тоді можна не виконувати перевірки і на динамічну стійкість.

**Вибір вимикачів навантаження.** Вимикачі навантаження QW1 та QW2 обирають аналогічно до вибору роз'єднувачів. У табл. 10.2 наведений зразок вибору вимикача навантаження типу ВНП-10 як для установки QW1.

Таблиця 10.2

№ з/п	Параметр, що перевіряють	Необхідна умова	Паспортна величина параметра	Розрахункове значення параметра	Висновок
1	Номінальна напруга	$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мер}}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{мер}} = 10 \text{ кВ}$	Умова виконується
2	Номінальний струм	$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роб.мах}}$	$I_{\text{ном}} = 400 \text{ A}$	$I_{\text{роб. мах}} = 300 \text{ A}$	Так само
3	Електродинамічна стійкість	$i_{\text{скр гран}} \geq i_y$	$i_{\text{скр гран}} = 25 \text{ кА}$	$i_y = 35 \text{ кА}$	Умова не виконується*
4	Термічна стійкість	$I_T^2 t_T \geq I_{\infty}^2 t_3$	$(10)^2 \cdot 1 = 100 \text{ кА}^2\text{с}$	$(10)^2 \cdot 1,5 = 150 \text{ кА}^2\text{с}$	Так само*

\* Беручи до уваги те, що вимикач навантаження захищений запобіжником, перевірку на термічну стійкість можна не виконувати, а якщо величина плавкої вставки запобіжника менша ніж 60 А, тоді можна не виконувати перевірки і на динамічну стійкість.

## 10.5. Вибір силових вимикачів

Силові вимикачі призначені для оперативної комутації кіл високої напруги як у нормальних, так і в аварійних режимах (короткі замикання, перевантаження). Тому вибір силових вимикачів, окрім перевірки основних параметрів за формулами (10.1) – (10.4), включає також необхідну перевірку на здатність вимкнення за умовою

$$I_{\text{вимк. ном}} \geq I_{\text{к}(\tau)},$$

де  $I_{\text{вимк. ном}}$  – номінальний струм вимкнення вимикача,  $I_{\text{к}(\tau)}$  – значення струму КЗ у момент вимкнення  $\tau$ .

**Приклад.** Необхідно обрати силовий вимикач у лінії, яка живить високовольтний розподільний пристрій РП (див. рис. 10.4). Усі дані взяти з попереднього зразка. Використовуючи технічні характеристики силових вимикачів [7] розглянемо можливість використання маломасляного підвісного вимикача з пружинним приводом типу ВМПП-10 з  $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ . За умовою прикладу, час дії захисту силового вимикача  $t_3 = 1,5 \text{ с}$ , а власний час вимкнення  $t_{в.в}$  вимикача ВМПП-10, який пропонують використати,  $t_{в.в} = 0,1 \text{ с}$ . Тоді час розходження контактів вимикача після початку КЗ буде  $\tau = 1,5 + 0,1 = 1,6 \text{ с}$ . За такий проміжок часу струм КЗ уже набуде сталого значення  $I_{\text{к}(\tau)} = I_{\infty}$ , що відображено в п.3 табл. 10.3.

Отже, параметри вимикача типу ВМПП-10 відповідають усім вимогам, і він може бути встановлений на початку лінії живлення високовольтного РП.

Таблиця 10.3

№ з/п	Параметр, що перевіряють	Необхідна умова	Паспортна величина параметра	Розрахункове значення параметра	Висновок
1	Номінальна напруга	$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мер}}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{мер}} = 10 \text{ кВ}$	Умова виконується
2	Номінальний струм	$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роб.мах}}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{роб.мах}} = 650 \text{ А}$	Так само
3	Номінальний струм вимкнення	$I_{\text{вимк. ном}} \geq I_{\text{к}(\tau)}$	$I_{\text{вимк. ном}} = 20 \text{ кА}$	$I_{\text{к}(\tau)} = 10 \text{ кА}$	Так само
4	Електродинамічна стійкість	$i_{\text{скр гран}} \geq i_y$	$i_{\text{скр гран}} = 52 \text{ кА}$	$i_y = 35 \text{ кА}$	Так само
5	Термічна стійкість	$I_{\text{T}}^2 t_{\text{T}} \geq I_{\infty}^2 t_{\text{в}}$	$(20)^2 \cdot 4 = 1600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$(10)^2 \cdot 1,6 = 160 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	Так само



## Запитання та завдання до модуля II

1. Схарактеризуйте рубильники за їх призначенням, позначенням, конструкцією. На чому ґрунтується їх вибір?
2. Дайте характеристику перемикачів за їх призначенням, позначенням, конструкцією. Як обрати перемикач?
3. Яке призначення, позначення, конструкція, принципи роботи контакторів?
4. Схарактеризуйте контактори за їх схемами відімкнення, роботою схеми. На чому ґрунтується їх вибір?
5. Яке призначення, позначення, конструкція теплових реле? Як обирають теплові реле?
6. Дайте характеристику магнітним пускачам за призначенням, позначенням, конструкцією.
7. Якими є схема підімкнення та робота схеми магнітного пускача? Як його обрати?
8. Схарактеризуйте автоматичні вимикачі за призначенням, позначенням. Від чого залежить його вибір?
9. Які основні вузли й елементи конструкції автоматичних вимикачів?
10. Схарактеризуйте електрифіковані приводи автоматичних вимикачів за їх призначенням, конструкцією, принципом роботи.
11. Якими є призначення, конструкція, принцип роботи розчіплювачів автоматичних вимикачів?
12. Які захисні характеристики автоматичних вимикачів, можливості їх зміни вам відомі?
13. Дайте характеристику роз'єднувачів за призначенням, позначенням, конструкцією. Як їх обирають?
14. Дайте характеристику вимикачів навантаження за їх призначенням, позначенням, конструкцією, вибором.
15. Дайте характеристику маломасляним силовим вимикачам за призначенням. Назвіть основні елементи їх конструкції, принцип роботи.
16. Які вакуумні силові вимикачі за призначенням? Назвіть основні елементи їх конструкції, принцип роботи.
17. На яких формулах ґрунтується вибір силових вимикачів?
18. Які приводи комутаційних апаратів за призначенням, основними вузлами, принципами дії, виконуваними функціями?
19. Схарактеризуйте ручні приводи роз'єднувачів за призначенням, конструкцією, принципом дії.
20. Схарактеризуйте автоматизовані приводи вимикачів навантаження за призначенням, конструкцією, принципами дії.
21. Схарактеризуйте електромагнітні приводи високовольтних силових вимикачів, за призначенням, основними вузлами, принципами дії.

**■ Розділ 11**

**ВІМІРЮВАЛЬНІ АПАРАТИ**

**11.1. Прилади електровимірювань  
трансформаторних підстанцій**

Нормальна експлуатація СЕ аеропорту (промислових підприємств) неможлива без безперервного контролю за якістю електроенергії, що надходить від централізованих джерел або яку виробляють власні автономні джерела, а також без урахування споживання електроенергії. Поняття «якість електроенергії» описує кілька показників. У СЕ аеропорту доцільно контролювати величину напруги на введеннях, навантаження (струми) за окремими фазами на лініях (фідерах), що входять і відходять, вести облік спожитої активної та реактивної потужності.

На рис. 11.1 наведений приблизний перелік вимірювальних і реєструвальних приладів, що встановлюють на ЦРП аеропорту (для однієї секції шин). На тому фідері, що живить аеропорт, підімкненому через силовий вимикач  $Q1$  до секції  $B1$ , доцільно контролювати напругу з допомогою вольтметра  $V$ , струму в окремих фазах за амперметрами  $A$ , поточне значення  $\cos \varphi$  за фазометром  $\varphi$ , а також, установити лічильники активної  $Wh$  і реактивної  $Varh$  енергії. Для підімкнення цих приладів використовують трансформатори струму  $TA1$  і напруги  $TV$ .

На фідерах СЕА, що відходять від ЦРП, доцільно контролювати тільки значення струмів. У разі підімкнення до ЦРП стороннього споживача на його фідері слід передбачити лічильник активної енергії  $Wh$  і амперметр, підімкнених до трансформатора  $TA2$ .

Якщо на ЦРП установлені косинусні конденсатори  $C$ , величину реактивної потужності, що вони виробляють, контролюють за варметром  $var$ . Для контролю значення струму, що протікає через

секційний вимикач  $Q4$  (що працює зазвичай у режимі АВР) використовують амперметр, підімкнений до трансформатора струму  $TA4$ .

Появу режиму однофазного замикання на землю (ОЗЗ), що виникає внаслідок порушення ізоляції однієї з фаз у мережах 6...35 кВ, виявляють з допомогою третьої обмотки трансформатора напруги  $TV$ , увімкненої за схемою «розімкнений трикутник». Перелічені вище контрольно-вимірвальні прилади встановлюють на щиті керування СЕ аеропорту, зазвичай встановленому у будівлі ЦРП.

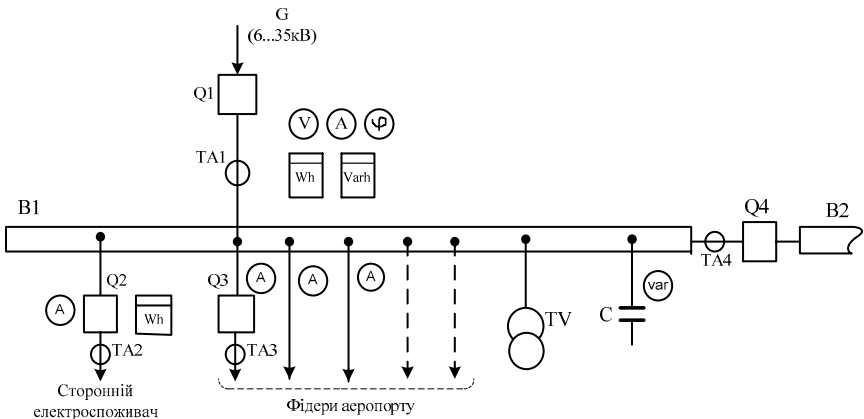


Рис. 11.1

Із 2000 року спостерігається повсюдне впровадження мікропроцесорної техніки в системи електропостачання промислових підприємств. Мікропроцесорні пристрої вимірювання, релейні пристрої захисту і пристрої автоматики мають такі важливі переваги:

- можливість вимірювання та відображення основних електричних параметрів мережі (напруги, струмів, частоти, активної та реактивної потужностей);
- універсальність (у одному пристрої реалізовані кілька видів захистів і електроавтоматики);
- фіксування в пам'яті випадків аварійних режимів (із вказівкою дати і часу), і вироблених пристроєм команд для запускання відповідного захисту або автоматики;
- простота налаштування (виконують безпосередньо на самому пристрої або з допомогою ПК);
- вбудований самоконтроль;

– можливість передавання інформації на верхній рівень керування.

У зв'язку з підвищенням вимог до регулярності та безпеки польотів актуального значення набуло документальне фіксування перерв (короткочасних і тривалих) в електропостачанні найбільш відповідальних електроприймачів аеропортів таких, як світлосигнальна і курсоглісадна системи посадки, командно-диспетчерські пункти (КДП) та ін. Тому третій пункт зазначених вище переваг мікропроцесорних пристроїв особливо цінний.

Українські підприємства опанували випуск мікропроцесорних налаштувань захисту й автоматики для використання в розподільних мережах 6...35 кВ таких серій:

– МРЗС–05, виробник ПО «Київприлад» ([kievprigor.com.ua](http://kievprigor.com.ua));

– РЗЛ–03, виробник «РЕЛСІС, ВАТ "Електротехнічний завод"», Київ ([www.relsis.ua](http://www.relsis.ua));

– ПМ РЗА «Діамант», виробник НПП ХАРТРОН-ІНКОР, Харків (<http://hartron-inkor.com>).

Вітчизняні мікропроцесорні налаштування захисту й автоматики за своїми технічними характеристиками не поступаються аналогічним виробам світових електротехнічних брендів ААВ (Швейцарія), СІМЕНС і Мюллер (Німеччина), Дженерал Електрик (США) та ін., їх широко використовують для оснащення нових трансформаторних підстанцій і модернізації раніше побудованих.

## 11.2. Вимірювальні трансформатори напруги

*Трансформатори напруги (ТН) призначені для зниження високої напруги первинного кола до стандартного значення 100 або  $100/\sqrt{3}$  В для вимірювання, підімкнення пристроїв захисту та автоматики, а також ізолювання вторинних кіл від високої напруги первинних.*

Первинну обмотку однофазного ТН вмикають на міжфазну (рис. 11.2) або фазну напруги первинного кола через клеми А, Х. До вторинної обмотки (клеми а, х) паралельно можуть вмикати вольтметри РV, обмотки напруги ватметрів РW, лічильників активної РI і реактивної РK енергії, реле напруги та ін.

Для безпечного обслуговування вторинних кіл один вивід вторинної обмотки ТН обов'язково заземлюють. З метою захисту пер-

винного кола від пошкоджень у ТН встановлюють запобіжники  $F1$  і  $F2$ . Запобіжник  $F3$  захищає ТН від перевантажень і КЗ у вторинних колах.

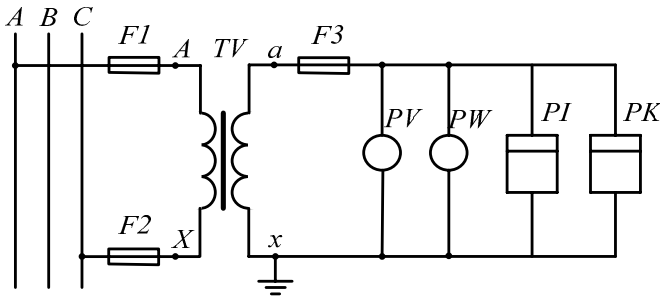


Рис. 11.2

Кратність зниження напруги в ТН характеризується *номінальним коефіцієнтом трансформації*

$$K_{U \text{ ном}} = U_{1 \text{ ном}} / U_{2 \text{ ном}}$$

Трансформатори напруги виготовляють із таким  $K_{U \text{ ном}}$ , щоб вторинна номінальна напруга дорівнювала 100 або  $100/\sqrt{3}$  В.

Трансформатори напруги, на відміну від трансформаторів струму, працюють у режимі, близькому до холостого ходу, тому що опори обмоток вольтметрів, реле напруги й інших пристроїв з паралельним увімкненням обмоток досить великі.

**Похибки ТН.** Як усякий вимірювальний пристрій ТН має похибки. Втрати в магнітопроводі та часткове розсіювання магнітного потоку зумовлюють наявність *похибки на напругу*  $\Delta U$ , котру зазвичай виражають у відсотках

$$\Delta U = \frac{K_U U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100 \%,$$

де  $U_2$  – виміряна напруга у вторинному колі;  $U_1$  – фактична напруга у первинному колі.

Для зменшення похибки в показах приладів, що враховують фазові кути між векторами струму та напруги (фазометри, ватметри, лічильники та ін.), важливим є правильне передавання ТН фази вектора напруги. Втрати в магнітопроводі, розсіювання магнітного потоку, а також наявність втрат в обмотках призводять до того, що вектор вторинної напруги  $U_2$  (рис. 11.3), повернутий на  $180^\circ$ , не



збігається за напрямком з вектором первинної напруги  $U_1$ . Утворений між ними кут  $\delta$  називають *кутовою похибкою*.

Залежно від похибок  $\Delta U$  і  $\delta$  ТН відповідно до стандарту поділяють на чотири класи 0,2; 0,5; 1 і 3. У табл. 11.1 наведені максимально припустимі похибки ТН для різних класів точності. Трансформатори напруги класу 0,2 використовують як зразкові та в точних лабораторних вимірюваннях; класу 0,5 – для приєднання розрахункових лічильників; класу 1 і 3 – для приєднання щитових вимірювальних приладів. Залежно від призначення пристроїв релейного захисту в них використовують ТН класу 0,5; 1 або 3.

Сумарна потужність обмоток вимірювальних приладів і реле, увімкнених до ТН, не повинна перевищувати його номінальної потужності  $S_{\text{ном}}$ , яка змінюється залежно від необхідної точності вимірювання. Так, трансформатор напруги типу НОЛ.08-10 працює у класі 0,2, якщо сумарна потужність його навантаження  $S_{\text{наб}}$  не перевищує 50 ВА. У разі підвищення потужності навантаження до 75 ВА трансформатор буде працювати у класі 0,5, а у випадку зростання  $S_{\text{наб}}$  до 300 ВА ТН переходить у клас 3.

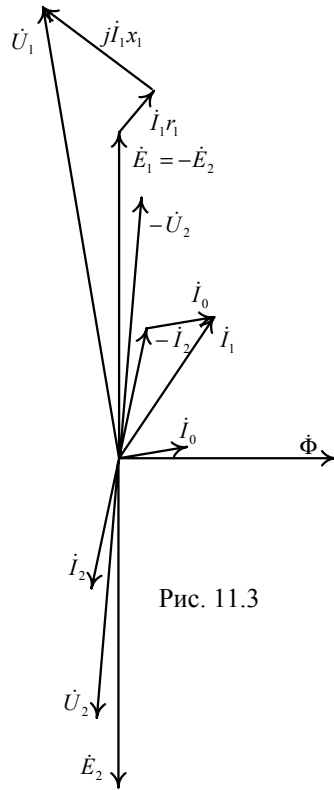


Рис. 11.3

Таблиця 11.1

Клас точності ТН	$\Delta U$ , %	$\delta$ , хв
0,2	$\pm 0,2$	10
0,5	$\pm 0,5$	20
1	$\pm 1$	40
3	$\pm 3$	Не нормується

**Примітка.** Межі похибок задані для умов:

$$U_1 = 0,8 \dots 1,2 U_{1 \text{ ном}}, z_{\text{наб}} = 0,25 \dots 1,0 z_{\text{ном}}, \cos \varphi = 0,8.$$

**Конструкція ТН.** Трансформатори напруги, залежно від застосовуваної в них ізоляції, поділяють на сухі, масляні та з литою ізоляцією. Сухі ТН випускають тільки для внутрішньої установки в РУ-6 кВ, однофазні і трифазні ТН з однією та двома вторинними обмотками. Літери, що маркують ТН, означають: Н – трансформатор напруги; З – з одним заземленим виводом первинної обмотки (у ТН, що вмикають фазну напругу); О – однофазний; Т – трифазний; С – сухий; М – масляний; Л – з литою ізоляцією (на основі епоксидної смоли); І – з додатковою обмоткою для контролю стану ізоляції; К – для комплектних РУ (у старих типах ТН – з компенсаційною обмоткою). За літерами після крапки стоїть номер розробника (у старих ТН не вказували), далі, після тире, йдуть цифри, що вказують на номінальну напругу первинної обмотки.

У системах електропостачання 6 – 10 кВ підприємств використовують ТН серій НОС, НОМ, НОЛ, ЗНОЛ і НТМІ, технічні дані яких наведені в дод. 7.

На рис. 11.4 зображена конструкція однофазного ТН серії НОЛ. Трансформатор являє собою нерозбірну литу конструкцію 1 зі стрічковим магнітопроводом. У верхній частині знаходяться виводи первинної обмотки 2, виводи вторинної обмотки 3 розміщені на передньому краї та закриті кришкою. Трансформатори цього типу менші за масою, пожегобезпечні і можуть бути закріплені в будь-якому положенні.

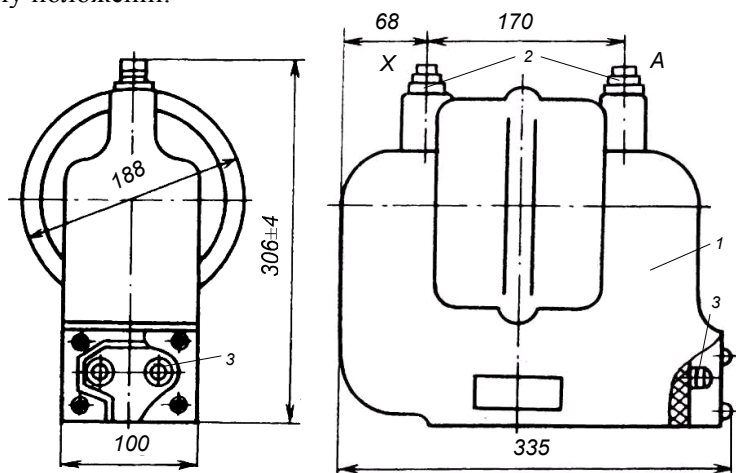


Рис. 11.4

**Схеми з'єднань ТН.** Залежно від цілей вимірювань можна використовувати різні схеми вмикання ТН. Найбільш поширеними є схема з однофазним ТН, схема з двома однофазними ТН, схема з трьома однофазними ТН.

Схему з одним однофазним ТН (див. рис. 11.2) застосовують у трифазних мережах для вимірювання однієї міжфазної напруги (використовують ТН серій НОС, НОЛ, НОМ) або напруг однієї з фаз (ТН серії ЗНОЛ).

Схема з двома однофазними ТН (рис. 11.5), з'єднаними в розімкнутий трикутник, дозволяє виміряти всі міжфазні напруги. Однак вмикати прилади на міжфазну напругу  $U_{ac}$  не рекомендують, тому що при цьому зростає значення похибок. Схему доцільно використовувати, коли основне навантаження ТН складають трифазні лічильники і ватметри, оскільки струмові обмотки цих приладів зазвичай приєднують до трансформаторів струму, увімкнених у фази  $A$  та  $C$ . При цьому обмотки напруги приладів слід приєднувати до затискачів  $ab$  і  $bc$  ТН (рис. 11.5). У такій схемі використовують ТН серій НОС, НОЛ, НОМ.

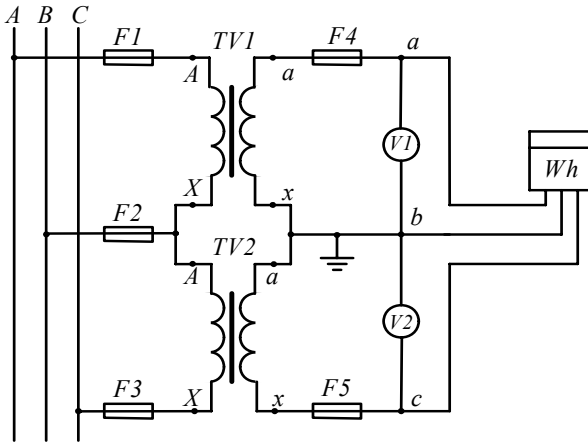


Рис. 11.5

Схему з трьома однофазними ТН, з'єднаними «зіркою» із заземленою нейтраллю (рис. 11.6), застосовують досить широко завдяки її універсальності. Вона дозволяє вимірювати всі фазні та міжфазні напруги. У цій схемі один вивід первинних обмоток усіх ТН заземлено, а тому в ній доцільно використовувати трансформатори серії

ЗНОЛ. Завдяки тому, що кожна фаза має свій окремий магнітопровід, схема дозволяє одержати високу точність вимірювань.

У трансформаторах напруги серії НТМІ-10-66 (дві останні цифри – рік розроблення) в одному корпусі (баці) розташовують три однофазні триобмоткові трансформатори напруги. Первинні та вторинні обмотки трансформаторів з'єднані в «зірку» із заземленою нейтраллю (рис. 11.6), а додаткові обмотки з'єднані у схему «розімкнутий трикутник», що дозволяє виявляти режим замикання на землю.

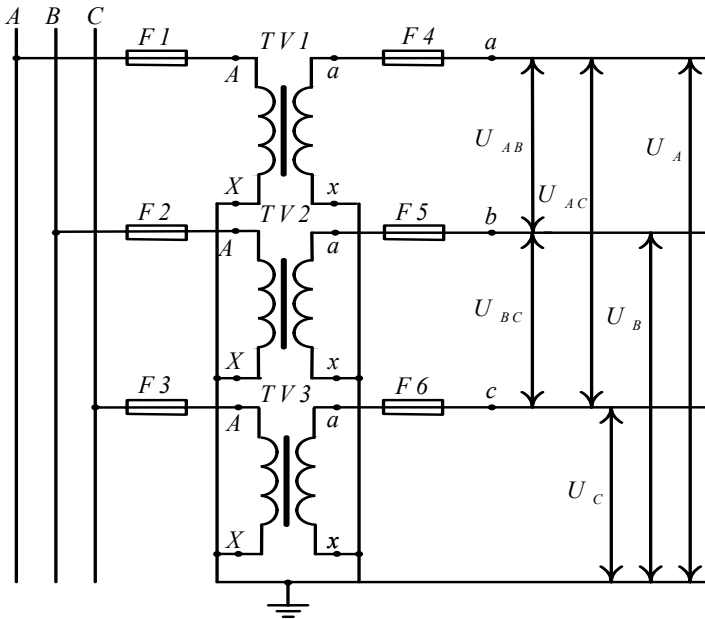


Рис. 11.6

### 11.3. Вимірювальні трансформатори струму

*Трансформатори струму (ТС) призначені для вимірювання струму в первинних колах, увімкнення пристроїв захисту, автоматики, а також ізолювання вторинних кіл від первинних. Первинну обмотку ТС (клеми Л1 і Л2, рис. 11.7) вмикають послідовно в силове коло, до вторинної обмотки (клеми И1 і И2) також послідовно приєднують амперметр Р1, струмові обмотки ватметра Р2, лічильника, реле струму та ін.*

З метою безпеки (так само, як ТН) один вивід вторинної обмотки обов'язково заземлений. Кратність зниження величини струму у вторинному колі стосовно первинного струму характеризує *номінальний коефіцієнт трансформації ТС*

$$K_{I_{\text{ном}}} = \frac{I_{1_{\text{ном}}}}{I_{2_{\text{ном}}}}$$

де  $I_{1_{\text{ном}}}$  та  $I_{2_{\text{ном}}}$  – відповідно номінальні первинний і вторинний струми. Значення номінального вторинного струму зазвичай беруть 5 А (іноді 1 А). Діапазон первинних номінальних струмів  $I_{1_{\text{ном}}}$  ТС досить широкий, так, наприклад, для електроустановок 6 – 10 кВ випускають ТС із  $I_{1_{\text{ном}}}$  від 5 до 5000 А.

**Похибки ТС.** Наявність втрат у магнітопроводі, а також часткове розсіювання магнітного потоку спричиняють появу *струмової похибки* ТС, яку розуміють як виражену у відсотках величину

$$\Delta I = \frac{KI I_2 - I_1}{I_1} 100 \%$$

*Кутовою похибкою* називають кут  $\delta$  між векторами первинного  $I_1$  і вторинного  $I_2$  струмів. Кутова похибка вносить похибки в покази приладів, критичних до правильного визначення фазового кута струму (фазометри, ватметри, лічильники та ін.).

Залежно від величин похибок  $\Delta I$  та  $\delta$  ТС поділяють на п'ять класів: 0,2; 0,5; 1; 3 і 10. Трансформатори класу 0,2 використовують як зразкові і під час точних лабораторних досліджень; класу 0,5 – для вмикання розрахункових лічильників і точних амперметрів; класу 1 і 3 – для приєднання щитових амперметрів, фазометрів та ін.; класу 10 – для підмикання пристроїв релейного захисту.

На похибки ТС істотно впливає його навантаження. Струмові обмотки вимірювальних приладів, як відомо, мають малі опори, тому номінальний режим роботи ТС близький до режиму короткого замикання.

Опір вторинного навантаження ТС  $z_{\text{нав}}$  може бути визначений за формулою

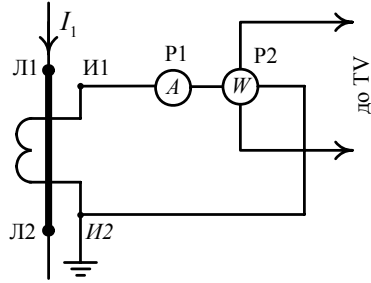


Рис. 11.7

$$z_{\text{нав}} \approx \sum r_{\text{прил}} + r_{\text{пров}} + r_{\text{конт}}, \quad (11.1)$$

де  $r_{\text{прил}}$  – сумарний активний опір усіх струмових обмоток приладів і реле, увімкнених до ТС;  $r_{\text{пров}}$  – опір з’єднувальних дротів;  $r_{\text{конт}}$  – опір контактів. Робота ТС у заданому класі гарантована, якщо його фактичне вторинне навантаження  $z_{\text{нав}}$  (або  $S_{\text{нав}}$ ) не перевищує номінального  $z_{\text{нав. ном}}$  (або  $S_{\text{нав. ном}}$ ). Значення  $z_{\text{нав. ном}}$  та  $S_{\text{нав. ном}}$  наводять у довідниках. Тобто, обираючи ТС, необхідно дотриматися умови

$$z_{\text{нав. ном}} \geq z_{\text{нав}} \quad \text{або} \quad S_{\text{нав. ном}} \geq S_{\text{нав}}. \quad (11.2)$$

**Холостий хід ТС.** Для навантаженого ТС справедливе співвідношення

$$I_0 W_1 = I_1 W_1 - I_2 W_2,$$

де  $I_0 W_1$  – ампер-витки намагнічування;  $I_1 W_1$  та  $I_2 W_2$  – ампер-витки первинної і вторинної обмоток.

У разі розімкнення вторинної обмотки  $I_2 W_2 = 0$ , а величина струму  $I_1$ , що тече первинною обмоткою, не змінюється (*вона не залежить від режиму роботи ТС і цілком зумовлена навантаженням первинного кола*), тому всі ампер-витки первинної обмотки  $I_1 W_1$  стають намагнічувальними  $I_0 W_1 = I_1 W_1$ . Це спричиняє значне, у кілька десятків разів, зростання магнітного потоку  $\Phi_m$  у магнітопроводі ТС. За цих умов величину магнітної індукції в магнітопроводі буде обмежувати фактор насичення магнітопроводу ТС.

Тому крива намагнічування буде трапецеїдальною (крива  $B$  на рис. 11.8), що своєю чергою викликає появу на кінцях розімкнутої

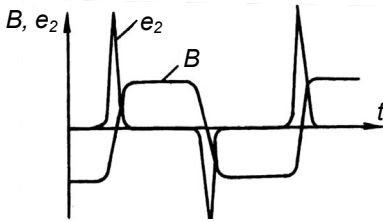


Рис. 11.8

вторинної обмотки ТС сплесків ЕРС величиною близько декількох кіловольтів (крива  $e_2$ ), які є небезпечними для персоналу та ізоляції ТС, проводів або жил контрольного кабелю та вимірювальних приладів. Окрім того, значне збільшення магнітного потоку зумовить зростання втрат енергії в магнітопроводі, значне його нагрівання і, як наслідок, погіршення властивостей прилеглої ізоляції.

Тому не дозволяють розмикати вторинної обмотки ТС під час протікання струму в його первинній обмотці. Замінюючи вимірювальний прилад або реле, необхідно **спочатку закоротити вторинну обмотку ТС.**

**Конструкції ТС.** Усі сучасні ТС до 35 кВ мають литу епоксидну ізоляцію. За конструктивним виконанням розрізняють прохідні, опорні і шинні ТС; одновиткові (стрижневі), багатовиткові (петлеві та катушкові). Літери, що маркують ТС, означають: Т – трансформатор струму, П – прохідний, Ш – шинний, Л – з литою ізоляцією, О – одновитковий, К – катушковий, В – вбудований, У – посилений, Р – з роз’ємним магнітопроводом. Далі в маркуванні вказують номінальну напругу ТС. Спеціалізовані ТС для диференціальних захистів мають у маркуванні літеру Д, для захистів від замикань на землю літеру З. Випускають ТС з однією та двома вторинними обмотками. Кожна вторинна обмотка має свій магнітопровід і певний клас точності. Наприклад, ТС типу ТПЛ-10 (рис. 11.9) має два магнітопроводи б: один класу 0,5, другий – класу 10Р.

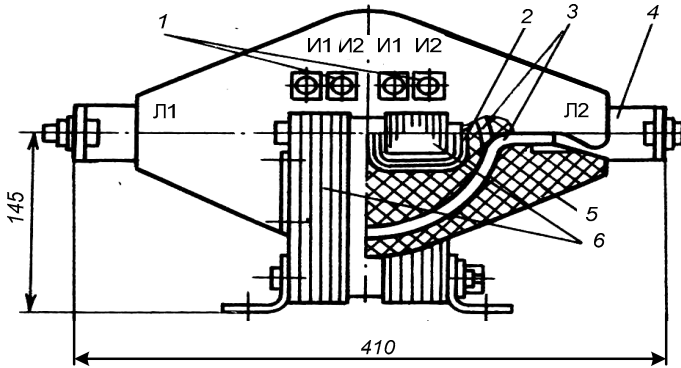


Рис. 11.9

До вихідних клем 1 обмотки магнітопроводу класу 0,5 вмикають вимірювальні прилади, а до обмотки магнітопроводу класу 10Р – пристрої РЗ. Первинна обмотка 3 виконана з плоскої мідної шини, двічі проходить крізь магнітопроводи. До виводів первинної обмотки 4 за допомогою болтового з’єднання увімкнене первинне висковольтне коло. Вторинну обмотку 2 виконують з мідного дроту, і вона має більшу кількість витків. Уся конструкція залита епоксидною смолою 5. У системах електропостачання підприємств використовують ТС типів ТПЛ, ТПОЛ, ТЛК, ТОЛК на напругу 6...10 кВ [5] і типу ТК з  $U_{\text{ном}}$  до 500 В.

**Схеми з’єднань ТС.** У мережах однофазного і трифазного змінного струму та незначних нерівномірностях навантажень в окремих

фазах доцільно використовувати найпростішу схему з одним ТС (див. рис.11.7). З'єднання трьох ТС у «зірку» (рис.11.10, а) застосовують у трифазних мережах 6...35 кВ зі значною нерівномірністю навантажень фаз, а також у мережах 0,4 кВ, а з'єднання двох ТС у «неповну зірку» (рис. 11.10, б) – у трифазних трипровідних мережах з рівномірним навантаженням фаз, а також для приєднання трифазних лічильників і пристроїв релейного захисту. Струм у фазі В цієї схеми можна виміряти, увімкнувши амперметр Р3 у нульовий провід.

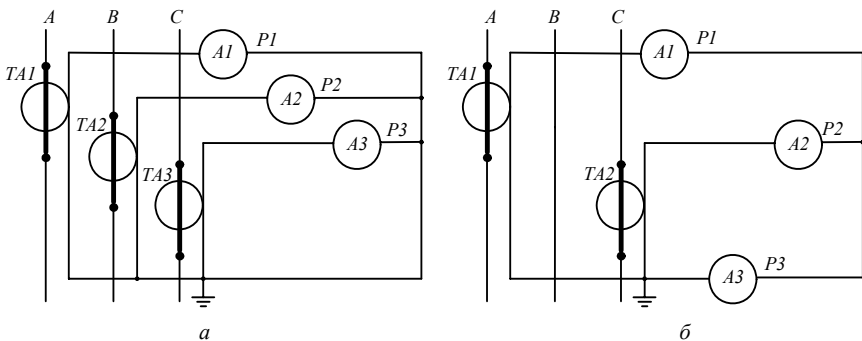


Рис. 11.10

#### 11.4. Вибір вимірювальних трансформаторів

**Вибір трансформаторів напруги.** Залежно від цілей і необхідної точності вимірювання потрібно обрати раціональну схему вимірювання (див. рис. 11.1–11.5). Використовуючи технічні дані ТН, визначають тип ТН, що підходить для обраної системи вимірювання та забезпечує виконання умов

$$U_{1 \text{ ном}} = U_{\text{мер}}, \quad (11.3)$$

$$S_{\text{ном}} \geq S_{\text{нав}}. \quad (11.4)$$

*Приклад.* Необхідно обрати ТН для вмикання трьох щитових вольтметрів, що вимірюють лінійні напруги у мережі 10 кВ.

Оскільки щитові прилади не потребують високої точності вимірювання (1 або 3 клас), використовуємо економічнішу схему з двома ТН (див. рис. 11.5). У схемі застосовуємо ТН типу НОМ-10 з  $U_{1 \text{ ном}} = 10 \text{ кВ}$  (виконується умова (11.3)).



Номинальна потужність навантаження трансформатора НОЛ.08-10 під час роботи в першому класі точності дорівнює 150 ВА (дод. 8). Споживана потужність одним щитовим вольтметром типу ЭЗ77 не перевищує 2,6 ВА. З огляду на те, що до двох трансформаторів напруги підмикають три вольтметри, навантаження на кожен ТН зростає в 1,5 рази. Тоді умова (11.4)  $S_{ном} = 150 \text{ ВА} > S_{нав} = 3,9 \text{ ВА}$  виконується.

**Вибір трансформаторів струму.** Залежно від цілей вимірювання, необхідного класу точності і конструктивних особливостей, спочатку обирають потрібну серію ТС. При цьому мають обов'язково виконуватися умови (11.3) і (11.5).

$$I_{ном} \geq I_{роб. \max} \quad (11.5)$$

В умові (11.5) номінальний струм первинної обмотки ТС має бути якнайближчим до  $I_{роб. \max}$ , тому що недовантаження ТС призводить до збільшення похибок.

Використовуючи дод. 9, необхідно перевірити обраний ТС на електродинамічну та термічну стійкість за виразами

$$i_{дин} \geq i_y; \quad (11.6)$$

$$I_T^2 t_T \geq I_{\infty}^2 t_{вимк.} \quad (11.7)$$

Потім ТС перевіряють на вторинне навантаження за формулою (11.2). Опір вторинного навантаження ТС, підімкненого до вимірювального кола, визначають за формулою (11.1).

Для ТС, що працює з релейним захистом, замість номінального вторинного навантаження у виразі (11.2) використовують величину допустимого вторинного навантаження  $z_{нав. доп}$ . Визначення допустимого вторинного навантаження  $z_{нав. доп}$  виконують за спеціальною кривою «десятивідсоткової кратності» –  $K_{10}$  (рис. 11.10), яка обмежує опір навантаження ТС залежно від очікуваної кратності струму спрацювання захисту (відносно  $I_{1ном}$ ) значенням, за якого повна похибка ТС не перевищить 10 %. Криві  $K_{10}$  для конкретних марок ТС можна знайти в довідниках.

**Приклад.** Необхідно обрати ТС для вимірювання струму в первинній мережі ( $U_{мер} = 10 \text{ кВ}$ ) і вмикання реле струму типу РТВ-V, що входить у комплект релейного захисту. Максимальний робочий струм у мережі  $I_{роб. \max} = 220 \text{ А}$ , розрахунковий ударний струм КЗ  $i_y = 4,5 \text{ кА}$ , струм КЗ у момент вимкнення  $I_k = 2 \text{ кА}$ , час вимкнення  $t_{вимк} = 2 \text{ с}$ .

1. З огляду на те, що до ТС планують увімкнути вимірювальний прилад і релейний захист, зупинимося на ТС типу ТПЛ-10 із двома магнітопроводами – сердечниками 0,5 і Р. До сердечника 0,5 (класу 0,5) підмикаємо вимірювальний прилад, а до сердечника Р – релейний захист.

2. Відповідно до технічних характеристик ТС типу ТПЛ їх випускають з  $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ , тобто умова (11.3) задовольняється.

3. Оскільки струм у первинному колі дорівнює  $220 \text{ А}$ , то, виконуючи умову (11.5), оберемо ТС із первинним номінальним струмом  $I_{1 \text{ ном}} = 300 \text{ А}$ .

4. Для перевірки ТС на електродинамічну стійкість (умова 11.6) використовуємо паспортне значення кратності електродинамічної стійкості, що для ТС типу ТПЛ-10 дорівнює  $K_{\text{дин}} = 175$ . Скориставшись співвідношенням  $i_{\text{дин}} = \sqrt{2} K_{\text{дин}} \cdot I_{1 \text{ ном}}$ , визначимо паспортне миттєве значення електродинамічної стійкості ТС  $i_{\text{дин}} = 1,42 \cdot 175 \cdot 300 = 74,5 \text{ кА}$ , що перевищує ударний струм  $i_y = 4,5 \text{ кА}$ . Умова (11.6) задовольняється.

5. Перевірку ТС на термічну стійкість виконаємо за умовою (11.7). Використовуючи технічні параметри ТПЛ-10/300: коефіцієнт термічної стійкості  $K_T = 90$  за час термічної стійкості  $t_T = 1 \text{ с}$ , визначимо значення лівої частини нерівності (11.7)

$$I_T^2 t_T = (K_T I_{1 \text{ ном}})^2 t_T = (90 \cdot 300)^2 \cdot 1 = 729 \cdot 10^8 \text{ А}^2 \text{ с}.$$

Значення правої частини нерівності (11.7) визначимо, використовуючи наші вихідні дані  $I_K^2 t_{\text{вимк}} = 2000^2 \cdot 2 = 8 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \text{ с}$ , що менше за ліву частину. Отже, умова термічної стійкості виконується.

6. Перевірку ТС за вторинним навантаженням почнемо з обмотки «0,5». Ця обмотка для роботи у класі точності 1 (для щитового амперметра, приєднаного до цієї обмотки велика точність не потрібна) повинна мати навантаження з опором не більшим за  $0,8 \text{ Ом}$  або потужністю не більше ніж  $20 \text{ ВА}$ .

Щитовий амперметр типу Э309 споживає  $5 \text{ ВА}$ . Визначимо його внутрішній опір  $r_{\text{прил}} = S_{\text{прил}} / I_{2 \text{ ном}}^2 = 5 / 5^2 = 0,2 \text{ Ом}$ . Відстань між ТС та амперметром беремо  $2,5 \text{ м}$ . Тоді опір двох сполучених алюмінієвих проводів ( $\rho_{\text{Ал}} = 0,0283 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ) перетином  $2,5 \text{ мм}^2$  та загальною довжиною  $5 \text{ м}$  дорівнює  $0,06 \text{ Ом}$ .

Беручи опір контактів під час приєднання одного приладу  $0,1 \text{ Ом}$ , визначимо за виразом (11.1) загальний опір навантаження обмотки «0,5»,  $z_{\text{нав}} = \sum r_{\text{прил}} + r_{\text{провод}} + r_{\text{конт}} = 0,2 + 0,06 + 0,1 = 0,36 \text{ Ом}$ . Отже, умова (11.3) для обмотки «0,5» виконується ( $0,8 \text{ Ом} > 0,36 \text{ Ом}$ ).

Обмотку «Р» використовують для підімкнення релейного захисту, тому визначення її допустимого навантаження проведемо за кривими  $K_{10}$ . На рис. 11.11 зображені криві  $K_{10}$  для трансформатора типу ТПЛ.

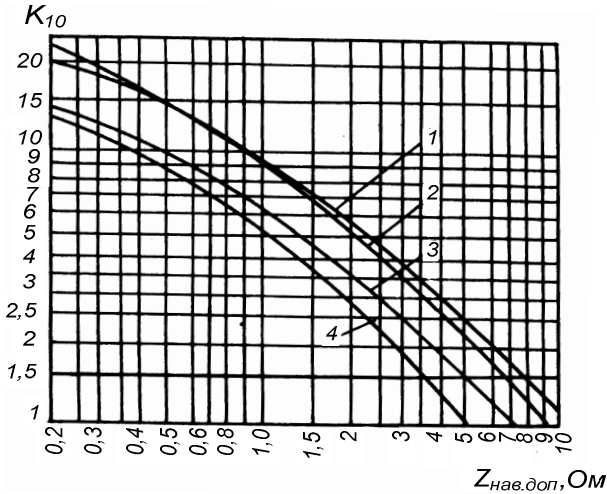


Рис. 11.11

Для їх використання необхідно визначити граничну кратність струму спрацювання захисту  $I_{с.з}$  щодо  $I_{ном}$

$$K_{10} = (1,1 \dots 1,4) I_{с.з} / I_{ном}.$$

Припустимо, що в розгляданому прикладі  $I_{с.з} = 500$  А, тоді  $K_{10} = 1,3 \cdot 500 / 300 = 2,2$ . Відкладаючи це значення на осі  $K_{10}$  (див. рис. 11.10) і використовуючи криву 2 (криві 1 і 2 для обмоток «Р» ТС з  $I_{ном} = 400$  і  $5 \dots 300$  А відповідно, криві 3 та 4 для обмоток «0,5»), одержуємо  $z_{нає. доп} \approx 5$  Ом.

Далі розраховуємо фактичне навантаження обмотки «Р» ТС, до якої підімкнене реле струму типу РТВ-V. За з'єднання ТС і реле за схемою неповної зірки опір вторинного навантаження для трифазного КЗ визначають за виразом  $z_{2 нає} = \sqrt{3} z_p + r_{пров} + r_{конт}$ .

Для визначення величини  $z_p$  використовуємо споживану реле потужність за втягнутого якоря, що дорівнює 114 ВА (струм уставки 10 А). Звідки  $z_p = 114 / 10^2 = 1,14$  Ом.

Вважаючи опори дротів і контактів такими, як і в попередньому випадку, одержуємо  $z_{2 нає} = 1,14 + 0,06 + 0,1 = 1,3$  Ом.

Як бачимо, фактичне вторинне навантаження  $z_{2 \text{ нав}} = 1,3 \text{ Ом}$  не перевищує допустимої величини  $z_{\text{нав. доп}} = 5 \text{ Ом}$ .

Отже, запропонований до використання ТС типу ТПЛ-10 задовольняє всі умови вибору.

## ■ Розділ 12

### ЗАХИСНІ АПАРАТИ

#### 12.1. Плавкі запобіжники

*Запобіжник* – це захисний апарат, призначений для одноразового автоматичного вимкнення електричного кола під час проходження через нього струмів КЗ або перевантаження.

Робота запобіжника базується на тепловій дії електричного струму, що розплавляє плавку вставку. Після спрацювання плавка вставка (або патрон) повинна бути замінена вручну.

Завдяки своїм перевагам – простій конструкції та низькій вартості, здатності вимикати значні струми КЗ, високій швидкодії та здатності обмежувати струм КЗ – запобіжники широко використовують для захисту мереж 6...35 і 0,4 кВ, а також у різноманітному електроустаткуванні. Однак значний розкид захисних характеристик, а саме: забезпечена селективна робота запобіжників тільки в лініях з однобічним живленням, неможливе дистанційне вимкнення, а також можливість неповнофазного режиму за спрацювання запобіжника в одній із фаз у деяких випадках обмежують їх використання.

*Струмообмежувального ефекту* у запобіжниках досягають за рахунок дуже швидкого (меншого за 0,01 с) перегорання плавкої вставки під час проходження струмів КЗ. Вставка перегоряє швидше (за струму обмеження  $i_{\text{обм}}$ , рис. 12.1, а), ніж струм КЗ може сягти свого ударного значення  $i_y$ . Такої швидкодії можна домогтися в разі використання спеціальної форми плавких уставок із кількома звуженням (рис. 12.1, б) та наповненні запобіжника кварцовим піском.

Завдяки струмообмежувальному ефекту електродинамічні сили в колах, захищених запобіжниками, зменшуються настільки, що в окремих випадках не потрібна перевірка апаратів на електродинамічну стійкість.

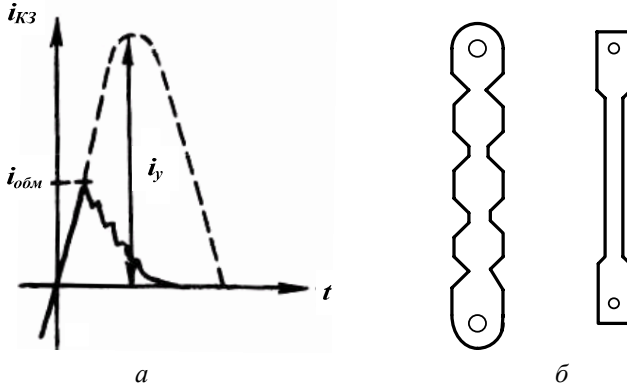


Рис. 12.1

**Технічні параметри.** Запобіжник і його плавка вставка характеризуються такими параметрами:

- номіальною напругою  $U_{ном}$  ;
- номіальним струмом  $I_{ном}$  запобіжника;
- номіальним струмом плавкої вставки  $I_{вс.ном}$  ;
- граничним струмом вимкнення  $I_{вимк.ном}$  ;
- захисною характеристикою.

Визначення понять  $U_{ном}$  і  $I_{ном}$  та шкали номіальних значень цих параметрів наведені в підрозд. 1.3. Значення  $U_{ном}$  і  $I_{ном}$  запобіжника зумовлюють його конструкцію. Перша величина визначає довжину змінної частини запобіжника – *патрона*, друга – габарити контактної системи, яка повинна протягом тривалого часу пропускати заданий струм навантаження.

*Номіальним струмом плавкої вставки називають максимальне значення струму, який уставка витримує в патроні необмежений час.* Запобіжник з номіальним струмом  $I_{ном}$  може мати патрон з плавкою вставкою  $I_{вс.ном} \leq I_{ном}$ .

За струмів КЗ запобіжник повинен надійно вимкнути пошкоджену ділянку. Захисна здатність запобіжника характеризується *граничним струмом вимкнення*  $I_{\text{вимк.ном}}$  – найбільшим струмом, який запобіжник може вимкнути без яких-небудь пошкоджень або деформацій, що перешкоджають його подальшій роботі після зміни плавкої вставки.

*Захисна характеристика* запобіжника являє собою графік залежності повного часу перегорання плавкої вставки (час плавлення і горіння дуги) від величини струму, що проходить через нього. Слід мати на увазі, що на рис. 12.3 і у довідниках наводять середні характеристики. Під час виконання розрахунків варто враховувати розкид характеристик через відхилення розмірів, склад матеріалу, стан поверхні вставки, стан контактів, температуру навколишнього середовища та низку інших факторів.

Розкид захисних характеристик запобіжників до 1000 В сягає 50 %. Тому, перевіряючи на селективність, необхідно користуватися не усередненою захисною характеристикою  $I$  (рис. 12.2, а), а можливою зоною часу спрацювання, обмеженою на рис. 12.2 пунктирними лініями. Розкид захисних характеристик запобіжників понад 1000 В визначають, враховуючи, що для будь-якого часу вимкнення відхилення значень струму не повинні перевищувати  $\pm 20\%$  (рис. 12.2, б).

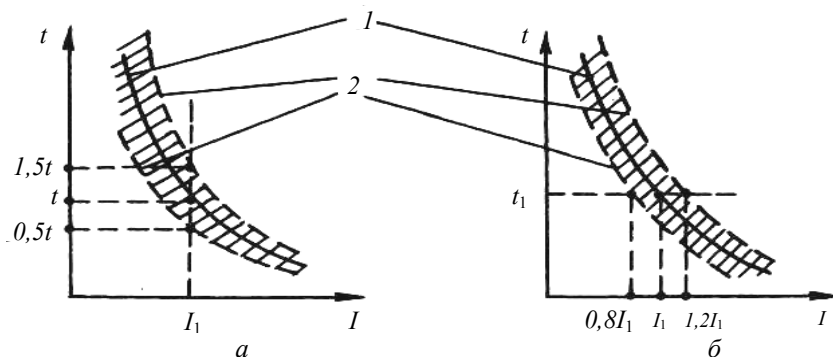


Рис. 12.2

**Конструкції запобіжників до 1000 В.** Низьковольтні запобіжники виготовляють на номінальні струми до 1000 А та напруги 36, 220, 380 і 660 В змінного і 24, 110, 220 і 440 В постійного струмів.

Запобіжник серії ПР2 (розбірний) нині широко використовують, хоча випуск цієї серії припинений. Розбірний патрон (семи габаритів) запобіжника складається із фібрового циліндра 1 (рис. 12.3), на кінцях якого закріплені латунні втулки із нарізью 2. На втулки накручують ковпачки 4 з контактними ножами 5.

У середині патрона закріплена плавка цинкова вставка 3 зі звуженням. Гази, які виділяє фібра під час горіння дуги, підвищують тиск у патроні, а це сприяє швидшому її гасінню. Плавкі вставки запобіжників серії ПР2 випускають на струми  $I_{\text{вс.ном}} = 6 \dots 1000 \text{ А}$ . Головний недолік цієї серії – незначна здатність відімкнення (до 10 кА). На рис. 12.3 зображена захисна характеристика запобіжника ПР-2 у відносних одиницях.

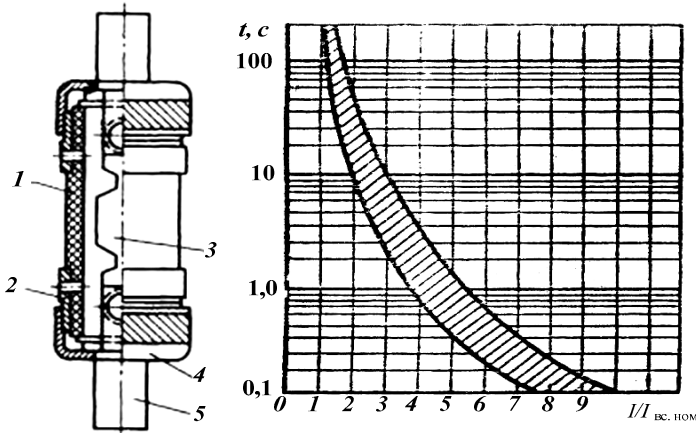


Рис. 12.3

Запобіжник серії ПН2 наповнений, випускають чотирьох габаритів з плавкими вставками на струми  $I_{\text{вс. ном}} = 31,5 \dots 630 \text{ А}$ . Конструкція запобіжника зображена на рис. 12.4. У середині фарфорового корпуса 1 розташована плавка вставка 2, що складається із кількох вузьких смуг (їх кількість залежить від номінального струму вставки). У внутрішню порожнину патрона насипаний чистий кварцовий пісок (наповнювач) 3, що прискорює деіонізаційні процеси в разі спрацювання запобіжника за рахунок інтенсивнішого охолодження і поглинання парів металу. Завдяки наявності наповнювача струм вимкнення в цих запобіжниках підвищений до 50 кА.

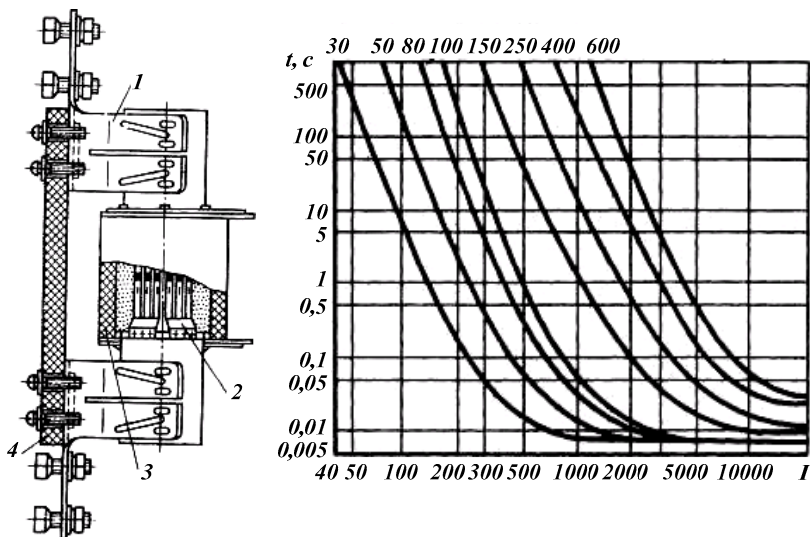


Рис. 12.4

В останніх варіантах конструкцій запобіжників серії ПН2 передбачена можливість оснащення індикатором спрацьовування, який у разі перегорання плавкої вставки звільняє зведений під час збирання бойок, що перемикає допоміжні контакти кола сигналізації або автоматики.

У запобіжниках серії ПП-31 усі струмопровідні частини, включно із плавкою вставкою, зроблені з алюмінію, що істотно здешевило їх. Запобіжники нерозбірні, тобто їх патрон – одноразової дії, що разом із використанням наповнювача дозволило збільшити значення номінального струму вимкнення до 100 кА. Плавкі вставки в цих запобіжників випускають на струми  $I_{\text{вс.ном}} = 10 \dots 1000 \text{ А}$ .

**Конструкції запобіжників вище за 1000 В.** Для захисту повітряних і кабельних ліній, силових трансформаторів 6...25 кВ широко використовують струмообмежувальні запобіжники з кварцовим наповненням серії ПКТ. На рис. 12.5 зображена конструкція патрона запобіжника ПКТ.

Він складається зі скляної або фарфорової трубки, армованої по краях латунними ковпачками  $\delta$ , прикріпленими до трубки високоякісним цементом. Застосування кількох паралельно увімкнених мідних (чи срібних) дротів  $\delta$ ,  $10$  забезпечує необхідне для нормального гасіння дуги мінімальне значення площі поперечного перерізу



провідників. У запобіжниках із  $I_{\text{вс.ном}} \leq 8 \text{ А}$  дроти намотані на ребристий керамічний стрижень.

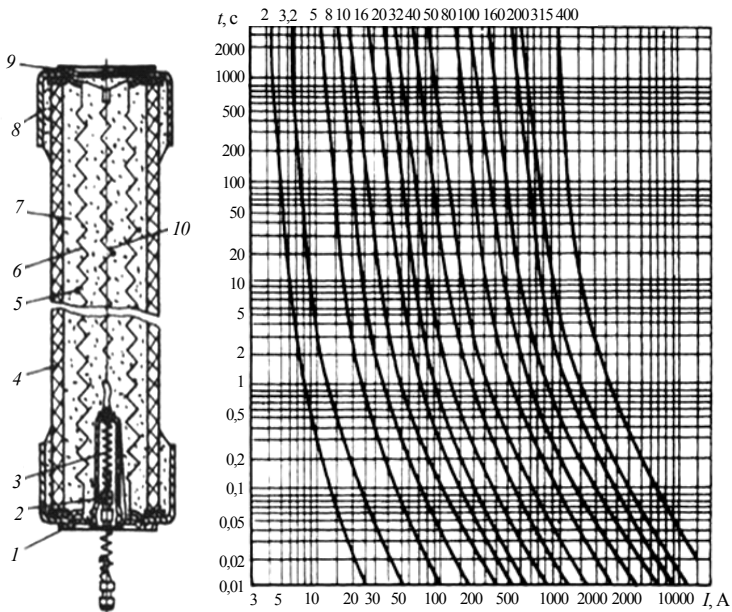


Рис. 12.5

Для зниження температури плавлення і завчасного визначення місця первинного плавлення на кожен дротик напаяють олов'яні кульки 5. У разі нагрівання дротика в цьому місці виникає *металургійний ефект* – явище розчинення більш тугоплавкої міді в розчині менш тугоплавкого олова, що значно знижує температуру плавлення мідного дроту, саме в цьому місці у патрон насипаний кварцовий пісок 7 і його торцеві отвори запаяні кришками 1 і 9.

У запобіжнику є індикатор спрацювання 2, який вискакує із запобіжника під дією пружини 3. Нормально пружина утримується в стисненому стані дротиком 10, який розплавляється в разі спрацювання запобіжника.

Для захисту вимірювальних трансформаторів напруги використовують запобіжники серії ПКН, що мають константову вставку, намотану на керамічний стрижень. Індикатор спрацювання в них відсутній.

Для екскаваторів та пересувних електростанцій на номінальні напруги 6, 10 і 35 кВ випускають запобіжники серій ПКЕН та ПКЕ.

**Перспективи вдосконалення плавких запобіжників.** Подальше вдосконалення запобіжників полягає в розширенні їх функціональних можливостей і створенні запобіжників із плавкою вставкою багаторазової дії. У праці [17] описані конструкції керованих запобіжників, виконаних на базі запобіжників серії ПН2 і ПК. Такі запобіжники дозволяють вимикати пошкоджені ділянки командами пристроїв РЗ або автоматики.

Розроблені дослідні зразки рідинно-металевих запобіжників, у яких роль плавкої вставки виконує метал у стані рідини (галій та ін.) у вузькому каналі. Під час проходження струму КЗ метал від швидкого нагрівання «вибухає» і витісняється з каналу. Після вимикання кола рідина металу охолоджується та знову заповнює канал і вмикає коло. Такий запобіжник може використовуватися повторно.

## 12.2. Вибір запобіжників

Обираючи серію запобіжників, необхідно виходити з передбачуваних умов їх роботи. При цьому запобіжник має відповідати умовам достатньої номінальної напруги, номінального струму та здатності вимкнення. Вибір плавких уставок низьковольтних і високовольтних запобіжників трохи різний, тому розглянемо їх окремо.

**Низьковольтні запобіжники.** Плавку вставку низьковольтного запобіжника обирають за такими трьома умовами:

$$I_{\text{вс.ном}} \geq k_n I_{\text{роб.мах}} ; \quad (12.1)$$

$$I_{\text{вс.ном}} \geq I_{\text{пер}} / k_{\text{пер}} ; \quad (12.2)$$

$$I_{\text{вс.ном}} < I_{K.\text{min}} / (10 \dots 15), \quad (12.3)$$

де  $I_{\text{вс.ном}}$  – номінальний струм плавкої вставки;  $I_{\text{роб.мах}}$  – максимальний робочий струм;  $k_n$  – коефіцієнт надійності, який залежно від характеру навантаження дорівнює 1,1...1,25.

Струм перевантаження  $I_{\text{пер}}$  виникає під час запускання електродвигунів, його визначають залежно від режиму їх запускання:

– для режиму одночасного запускання електродвигунів споживачів, що не вимикаються

$$I_{\text{пер}} = \sum_1^m I_{\text{пуск}} \text{ ,} \quad (12.4)$$

де  $\sum_1^m I_{\text{пуск}}$  – сума пускових струмів  $m$  двигунів, що запускають одночасно;

– для режиму почергового запускання вважають, що найбільш потужний електродвигун запускається останній, а інші працюють уже в нормальному режимі:

$$I_{\text{пер}} = I_{\text{пуск.max}} + k_{\text{поп}} \sum_1^{m-1} I_{\text{роб}} \text{ ,} \quad (12.5)$$

де  $\sum_1^{m-1} I_{\text{роб}}$  – сума максимальних робочих струмів  $m-1$  споживачів;

$I_{\text{пуск.max}}$  – струм електродвигуна з максимальним пусковим струмом;  $k_{\text{поп}}$  – коефіцієнт споживання.

Коефіцієнт перевантаження  $k_{\text{пер}}$  залежить від умов запускання електродвигуна. Для легких умов запускання (не часті запускання з тривалістю розгону до 10 с характерні для вентиляторів, насосів та ін.)  $k_{\text{пер}} = 2, 2...2, 5$ . Для важких умов запускання (часті запускання з часом розгону більшим за 10 с характерні для електродвигунів ліфтів, кранів та ін.)  $k_{\text{пер}} = 1, 6...2$ .

За більшим з отриманих за умовами (12.1) і (12.2) значенням обирають *найближчу* стандартну плавку вставку  $I_{\text{вс.ном}}$ .

Якщо в колі, захищеному запобіжником, установлені магнітні пускачі або контактори, обрану плавку вставку слід перевірити за умовою (12.3). Необхідність цього спричинена тим, що за КЗ в електродвигуні або проводі, що вмикає його до пускача (контакторів), напруга на обмотці електромагніту пускача зменшується і стає нижчою за  $0,5...0,6 U_{\text{ном}}$  (електромагніт живиться від цієї мережі). Пускач вимикається і розмикає струм КЗ своїми контактами, що при цьому, зазвичай, руйнуються. Для запобігання цьому явищу виникле КЗ повинне вимикатися запобіжниками раніше, ніж розімкнуться контакти пускача. Ця вимога виконується, якщо час ви-

микання струму КЗ запобіжником не перевищує 0,15...0,2 с. Для цього струм КЗ повинен, як впливає із захисних характеристик запобіжників 0,4 кВ, у 10...15 разів перевищувати значення  $I_{\text{вс.ном}}$ .

Обрані плавкі вставки запобіжників слід також перевіряти на селективність та чутливість.

*Селективність* гарантована, якщо час спрацювання поперед увімкненим запобіжником  $t_{\text{п}(n)}$  утричі перевищує час спрацювання наступного  $t_{\text{п}(n+1)}$  за трифазного КЗ просто за останнім (при цьому через обидва запобіжники проходить той самий максимальний струм КЗ). Уводячи коефіцієнт селективності  $K_c$ , можна записати

$$K_c = t_{\text{п}(n)} / t_{\text{п}(n+1)} \geq 3. \quad (12.6)$$

Для визначення часу спрацювання використовують захисні характеристики запобіжників. За відсутності захисних характеристик можна керуватися таким правилом, що дає задовільні результати, але найчастіше призводить до штучного завищення значень  $I_{\text{вс.ном}}$ : для забезпечення селективної роботи низьковольтні запобіжники слід вибирати через два значення  $I_{\text{вс.ном}}$ .

*Чутливість* запобіжника оцінюють за виразом.

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{к.мін}} / I_{\text{вс.ном}} \geq 3, \quad (12.7)$$

де  $K_{\text{ч}}$  – коефіцієнт чутливості; як  $I_{\text{к.мін}}$  для мереж 0,4 кВ слід узяти струм однофазного КЗ на кінці зони захисту запобіжника.

**Приклад.** Для захисту ділянки трифазної мережі з  $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ , що має освітлювальне навантаження, а також двигуни (рис. 12.6), потрібно обрати плавкі запобіжники. Потужності навантажень і розрахункові значення струмів КЗ наведені на рис. 12.6. Коефіцієнт пускового струму електромотора  $k_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 5$ , ККД  $\eta = 0,8$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Освітлювальне навантаження вважаємо активним, таким, що не має пускових струмів.

1. Визначимо робочі струми у вихідних від розподільних щитів (РЩ) фідерах і в лініях L1 і L2 за нормального режиму роботи.

Споживаний електромоторами струм за номінального навантаження розраховуємо за виразом

$$I_{\text{м.ном}} = P_{\text{м.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cos \varphi \cdot \eta),$$

звідки  $I_{\text{м1.ном}} = 1,8 / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,8 \cdot 0,8) = 4,2 \text{ А}$ ;  $I_{\text{м2.ном}} = 12,6 \text{ А}$ ;  $I_{\text{м3.ном}} = 8,4 \text{ А}$ .

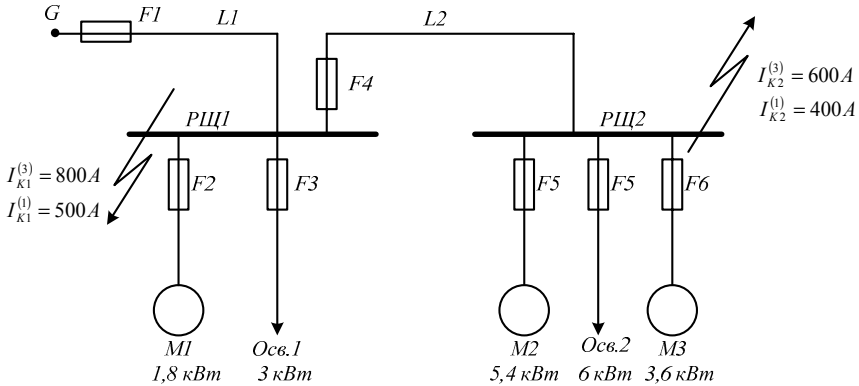


Рис. 12.6

Струм у фідерах освітлювальних навантажень дорівнює ( $\cos \varphi = 1$ ):

$$I_{\text{осв1}} = S_{\text{осв1}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 3 / (\sqrt{3} \cdot 0,38) = 4,6 \text{ A}; \quad I_{\text{осв2}} = 9,2 \text{ A}.$$

Використовуючи отримані дані, визначимо максимальні робочі струми в лініях L1 і L2 (нехтуючи відмінностями значень  $\cos \varphi$ ).

$$I_{\text{роб.maxL2}} = I_{\text{M2.ном}} + I_{\text{осв2}} + I_{\text{M3.ном}} = 12,6 + 9,2 + 8,4 = 30,2 \text{ A};$$

$$I_{\text{роб.maxL1}} = I_{\text{M1.ном}} + I_{\text{осв1}} + I_{\text{роб.maxL2}} = 4,2 + 4,6 + 30,2 = 39 \text{ A}.$$

2. Визначимо струми перевантаження у вихідних фідерах і в лініях L1 і L2 під час запускання електромоторів:

$$I_{\text{M1.пуск}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{M1.ном}} = 5 \cdot 4,2 = 21 \text{ A};$$

$$I_{\text{M2.пуск}} = 63 \text{ A}; \quad I_{\text{M3.пуск}} = 42 \text{ A}.$$

Струм перевантаження в лініях L1 і L2 буде залежати від обраного режиму запускання (див. пояснення до виразів (12.4) і (12.5)). Вважаючи, що режим пуску почерговий, струм перевантаження в лінії L2 визначимо за формулою (12.5) за умов, що останнім запускається електромотор M2, який має більший пусковий струм, ніж електромотор M3:

$$I_{\text{перL2}} = I_{\text{M2.пуск}} + I_{\text{осв2}} + I_{\text{M3.ном}} = 63 + 9,2 + 8,4 = 80,6 \text{ A}.$$

Струм перевантаження в лінії L1 за таких самих умов дорівнює

$$I_{\text{перL1}} = I_{\text{перL2}} + I_{\text{M1.ном}} + I_{\text{осв1}} = 80,6 + 4,2 + 4,6 = 89,4 \text{ A}.$$

Попередні розрахунки закінчені.

3. Переходимо до вибору серії запобіжників. Найперше розглянемо серію ПР-2 (див. дод. 9). Запобіжники цієї серії призначені для роботи за напруг, менших за 500 В та струмів, менших за 1000 А, тому задовольняються умови достатньої номінальної напруги та номінального струму. Максимальний струм КЗ у розглянутій мережі за умовами задачі дорівнює 800 А, а здатність вимкнення запобіжників ПР-2 (за  $U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}$ ) становить 0.8...11 кА (залежно від номінального струму запобіжника), отже задовольняється й умова здатності вимкнення, а тому, серію ПР-2 можна використовувати у такій мережі.

4. Обираємо плавкі вставки, пам'ятаючи, що для запобіжників ПР-2 вони випускаються на струми 2, 6, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 60, 90, 125, ... 1000 А. Почнемо із запобіжників F3 і F6, що захищають фідери освітлення. У цих фідерах відсутні струми перевантаження, тому достатньою умовою для вибору плавкої вставки є умова (12.1):

$$\text{Якщо } I_{\text{вс.номF3}} > 1,1 \cdot 4,6 = 5,06 \text{ А, то } I_{\text{вс.номF3}} = 6 \text{ А;}$$

$$\text{Якщо } I_{\text{вс.номF6}} > 1,1 \cdot 9,2 = 10,1 \text{ А, то } I_{\text{вс.номF6}} = 10 \text{ А.}$$

Під час розрахунку, з огляду на малу ймовірність значного додаткового навантаження в освітлювальній мережі, у виразі (12.1) обране найменше значення  $k_n$ , що дорівнює 1,1. Як номінальну вставку запобіжника F6 узято 10 А, менше за розрахункове значення на 0,1 А (1 % від  $I_{\text{вс.номF6}}$ ). Це допустимо, якщо розрахункове значення перевищує  $I_{\text{вс.номF6}}$  не більше ніж на 5%.

Для запобіжників F2, F5 і F1, що захищають фідери з двигунами, плавкі вставки обираємо з умов (12.1), (12.2) і перевіряємо за (12.3), тому що електродвигуни увімкнені до мережі з допомогою магнітних пускачів. Значення коефіцієнта перевантаження у виразі (12.2) беремо  $k_{\text{пер}} = 2,3$ , вважаючи умову запускання двигунів легкою. Тоді для запобіжника F2

$$I_{\text{вс.номF2}} \geq k_n I_{\text{роб.макс}} = 1,1 \cdot 4,2 = 4,6 \text{ А;}$$

$$I_{\text{вс.номF2}} \geq I_{\text{м1.пуск}} / k_{\text{пер}} = 21 / 2,3 = 9,1 \text{ А.}$$

Більше із цих значень округлюємо до стандартного найближчого значення  $I_{\text{вс.номF2}} = 10 \text{ А}$ . Обрану вставку перевіряємо за умовою (12.3):

$$I_{\text{вс.номF2}} = 10 \text{ А} < I_{\text{к.мін}} / (10 \dots 15) = 500 / 10 = 50 \text{ А.}$$

Умова задовольняється.

Аналогічно для запобіжника F5

$$I_{\text{вс.номF5}} \geq 1,1 \cdot 12,6 = 13,7 \text{ A} \quad \text{і} \quad I_{\text{вс.номF5}} \geq 63 : 2,3 = 27,4 \text{ A}, \quad \text{звідки}$$

$$I_{\text{вс.номF5}} = 35 \text{ A}.$$

Перевірка за умовою (12.3)

$$I_{\text{к.мін}} / (10 \dots 15) = 400 : 10 = 40 \text{ A} > I_{\text{вс.номF5}} = 35 \text{ A}.$$

Умова виконується.

Для запобіжника F7

$$I_{\text{вс.номF7}} \geq 1,1 \cdot 8,4 \approx 9,3 \text{ A} \quad \text{і} \quad I_{\text{вс.номF7}} \geq 42 : 2,3 = 18,3 \text{ A},$$

$$\text{звідки} \quad I_{\text{вс.номF7}} = 20 \text{ A}. \quad I_{\text{к.мін}} / (10 \dots 15) = 400 : 10 = 40 \text{ A} > 20 \text{ A}.$$

Плавкі вставки запобіжників F1 і F4, що захищають лінії L1 і L2, де течуть струми перевантажень, обираємо з умов (12.1) і (12.2). Вважатимемо, що коефіцієнт надійності у формулі (12.1), з огляду на можливість підмкнення до розподільних щитів нових електроприймачів,  $k_n = 1,25$ .

Тоді для запобіжника F4

$$I_{\text{вс.номF4}} \geq k_n I_{\text{роб.максL2}} = 1,25 \cdot 30,3 = 37,8 \text{ A};$$

$$I_{\text{вс.номF4}} \geq I_{\text{перL2}} / k_{\text{пер}} = 80,6 : 2,3 = 35 \text{ A}. \quad \text{Беремо} \quad I_{\text{вс.номF4}} = 45 \text{ A}.$$

Для запобіжника F1

$$I_{\text{вс.номF1}} \geq k_n I_{\text{роб.максL1}} = 1,25 \cdot 39,1 = 49 \text{ A};$$

$$I_{\text{вс.номF1}} \geq I_{\text{перL1}} / k_{\text{пер}} = 89,2 : 2,3 = 38,7 \text{ A}. \quad I_{\text{вс.номF1}} = 60 \text{ A}.$$

5. Перевіряємо обрані значення плавких вставок на селективність спрацювання. Уставку запобіжника F4 ( $I_{\text{вс.ном}} = 45 \text{ A}$ ) перевіряємо з найбільшою зі вставок запобіжників, що захищають вихідні фідери РЩ2, запобіжником F5 ( $I_{\text{вс.номF5}} = 35 \text{ A}$ ). Використовуючи захисні характеристики запобіжників серії ПР-2 (див. рис. 12.4), визначаємо час спрацювання запобіжників F4 і F5 за трифазного КЗ просто за запобіжником F5 ( $I_{\text{к2}}^{(3)} = 600 \text{ A}$ ).

Запобіжник F5 спрацює за 0,04 с, а запобіжник F4 – за 0,06 с. Отже, згідно з умовою (12.6)  $K_c = 0,06/0,04 = 1,5 < 3$ , що не задовольняє умову (12.6). Величину  $I_{\text{вс.номF4}}$  варто збільшити до 60 А. При цьому  $K_c = 0,12/0,04 = 3$ . Відзначимо, що ми одержали задовільний результат, незважаючи на те, що обрані вставки відрізня-

ються тільки за одним значенням  $I_{\text{вс.ном}}$ . Далі перевіряємо на селективність запобіжник F1 і найбільший з тих, що відходять від РЩІ, – F4.

6. Наприкінці необхідно виконати перевірку на чутливість. Наприклад, через запобіжник F4 буде проходити мінімальний струм КЗ за однофазного КЗ на кінці лінії L2. Цей струм дорівнює  $I_{\text{к2}}^{(1)} = 400$  А. Тоді коефіцієнт чутливості для F4 згідно з умовою (12.7) дорівнює

$$K_{\text{чF4}} = I_{\text{к.мін}} / I_{\text{вс.ном}} = 400 : 45 = 8,8 \geq 3.$$

Отже, умова (12.7) задовольняється.

**Вибір високовольтних запобіжників.** Обираючи серію високовольтних запобіжників, необхідно дотриматися умов достатньої номінальної напруги, номінального струму та здатності вимкнення. Плавкі вставки високовольтних запобіжників, на відміну від низьковольтних запобіжників, обирають тільки за однією умовою (12.1) і перевіряють на селективність (12.6) і чутливість (12.7). У разі відсутності захисних характеристик запобіжників можна керуватися таким правилом: високовольтні запобіжники, обрані через одне значення  $I_{\text{вс.ном}}$ , забезпечують селективність свого спрацювання.

Однак при цьому можливе одержання завищених значень  $I_{\text{вс.ном}}$ .

**Приклад.** Необхідно обрати запобіжники для захисту радіальної мережі аеропорту від струмів КЗ (рис. 12.7). Час вимкнення централізованого джерела G дорівнює  $t_{\text{вим}} = 1$  с, номінальна напруга мережі  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ. Інші дані наведені на рис. 12.7 (робочий струм від 2 до 130 А, максимальний струм КЗ-3 кА).

1. Розглянемо можливість використання запобіжників серії ПКТ (див. дод. 11), у яких за  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ здатність вимкнення дорівнює  $I_{\text{вимк.ном}} = 20 \dots 31,5$  кА. Як бачимо, умови достатньої номінальної напруги та здатності вимкнення виконуються.

Запобіжники цієї серії випускають на номінальні струми від 2 до 200 А (за  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ) і мають плавкі вставки 2; 3,2; 5; 8; 10; 16; 20; 31,5; 40; 50; 80; 100; 160 і 200 А. Як видно з рис.12.7, робочі струми в лініях знаходяться в цьому діапазоні, тобто виконана умова достатнього номінального струму.



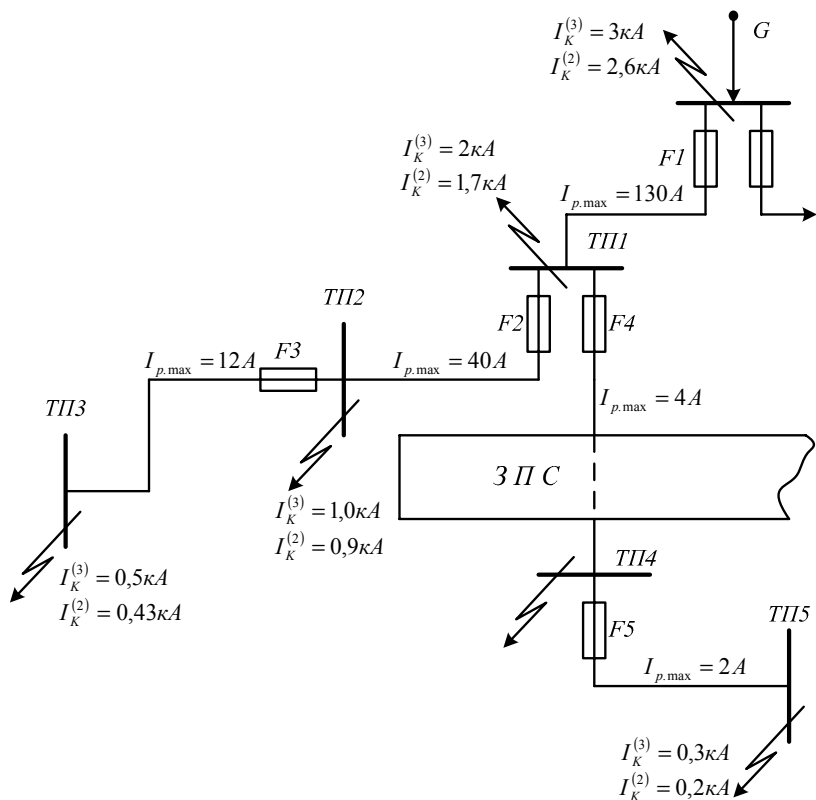


Рис. 12.7

2. Вибір величин плавких уставок доцільно починати із запобіжників  $F3$  і  $F5$ , які захищають останні ділянки мережі. Послідовність розрахунку розглянемо на прикладі двох запобіжників  $F3$  і  $F2$ , підімкнених послідовно.

За виразом (12.1) визначимо розрахункові значення струмів плавких уставок для цих запобіжників:

$$I_{\text{вс.ном}F3} \geq k_n I_{\text{роб.мах}} = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ A, звідки } I_{\text{вс.ном}F3} = 16 \text{ A;}$$

$$I_{\text{вс.ном}F2} \geq k_n I_{\text{роб.мах}} = 1,2 \cdot 40 = 48 \text{ A, звідки } I_{\text{вс.ном}F2} = 50 \text{ A.}$$

3. Перевіримо обрані запобіжники на селективність. За трифазного КЗ безпосередньо за запобіжником  $F3$  через запобіжники  $F2$  і  $F3$  буде проходити струм  $I_K^{(3)} = 1 \text{ kA}$  (як розрахунковий струм КЗ

беруть значення струму КЗ на шинах підстанції, де встановлений запобіжник F3). За такого струму запобіжник F3 спрацює за час менший ніж 0,01 с, а F2 – за 0,04 с (див. рис.12.6). Тоді згідно з виразом (12.6) коефіцієнт селективності для двох запобіжників F2 і F3 дорівнює

$$K_{c_{F2,3}} = t_{F2}/t_{F3} = 0,04/0,01 = 4. \text{ Умова (12.6) задовольняється.}$$

Плавку вставку запобіжника F1 досить перевірити на селективність з більшою зі вставок запобіжників F2 і F4.

Розглянемо випадок, коли розрахунковий коефіцієнт селективності менший ніж три. Наприклад, плавку вставку запобіжника F4 за умовою (12.1) можна обрати такою, що дорівнює  $I_{\text{вс.ном } F4} = 5 \text{ A}$ , однак за умовою селективності із запобіжником F5 ( $I_{\text{вс.ном } F5} = 3,2 \text{ A}$ ) ця плавка вставка не підійде. Тому варто збільшити плавку вставку запобіжника F4 до  $I_{\text{вс.ном } F4} = 8 \text{ A}$  і знову перевірити її за умовою (12.6).

4. Перевіряємо обрані плавкі вставки на чутливість за виразом (12.7):

$$K_{\text{ч } F3} = 430/16 = 27; K_{\text{ч } F2} = 900/50 = 18.$$

Обидва коефіцієнти більші ніж три, отже, чутливість запобіжників до струмів КЗ гарантована. Аналогічно обирають інші запобіжники.

### 12.3. Пристрій захисного вимкнення

Пристрій захисного вимкнення (ПЗВ) – спеціальний електротехнічний пристрій для підвищення електробезпеки під час експлуатації різного низьковольтного електротехнічного обладнання.

Використання ПЗВ забезпечує високий рівень захисту за відносно незначних витрат.

До безперечних переваг ПЗВ належать [24]:

– висока чутливість пристрою за непрямого дотику (за дотику до частин електрообладнання, що знаходиться під напругою через пошкодження ізоляції);

– забезпечення єдиного можливого захисту за прямого дотику зі струмопровідними частинами;

– забезпечення вимкнення у разі виникнення небезпечних струмів витоку (протипожежний захист);

– можливість запобігання викраденню електроенергії (тільки за використання деяких способів).

Підтвердженням високої ефективності використання ПЗВ може бути діаграма, наведена на рис.12.8 [24]. Значне зниження випадків смертельного ушкодження електричним струмом у Швейцарії було після прийняття в 1975 р. закону про обов'язкове використання ПЗВ.

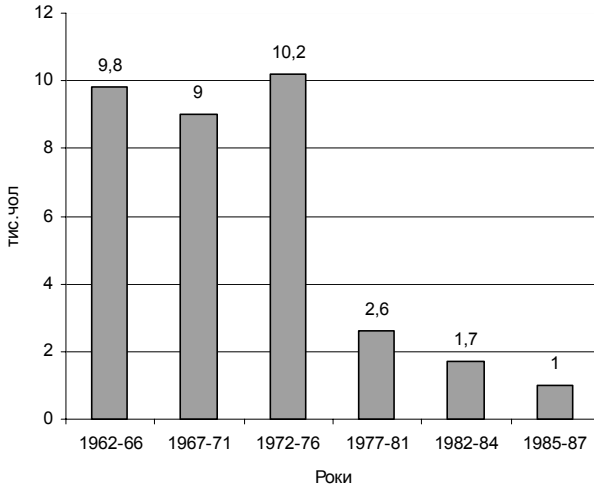


Рис. 12.8

**Принцип дії ПЗВ.** Для пояснення принципу дії ПЗВ розглянемо однофазний електроприймач (рис. 12.9). Фазним дротом «протікає» струм  $I_\phi$  (напрямок струму взятий умовно, оскільки струм змінний), а нейтральним дротом «повертається» струм  $I_N$ . Якщо ізоляція електроприймача непошкоджена (рис. 12.9, а), то ці струми однакові за величиною та протилежні за напрямком, тобто їх сума  $I_\phi + I_N = 0$ .

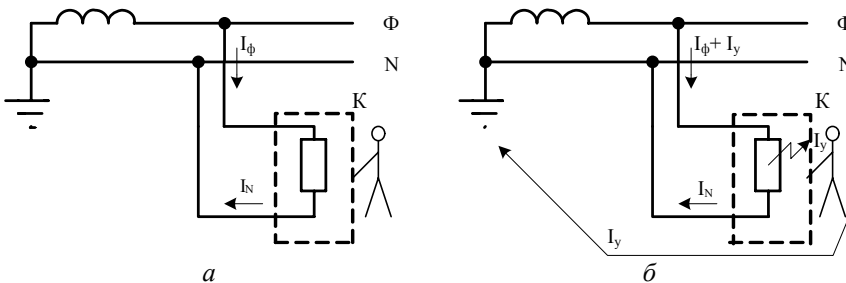


Рис. 12.9

Інший випадок розподілу струму спостерігаємо у разі пошкодження ізоляції (рис. 12.9, б). Коли частина, або вся фазна напруга (залежно від місця пошкодження) потрапляє на *електропровідний* корпус електроприймача  $K$ , наприклад, металевий корпус електродрилі. При доторканні корпусу пошкодженого інструмента починає текти струм «витоку»  $I_y$  через фазний дріт, корпус інструмента, через людину на землю і далі, через елементи заземлення нейтрального дроту. *Цей струм не «повертається» через нейтральний провідник, що з'єднує електродріль із мережею.*

Отже, у разі *пошкодження* ізоляції фазним дротом електроприймача «витакає» струм  $I_\phi + I_y$ , а нейтральним дротом повертається тільки  $I_N$ . Ураховуючи, що  $I_\phi = -I_N$ , сума струмів у двох провідниках уже не дорівнюватиме нулю ( $\sum I = I_y$ ). На цьому явищі базується робота ПЗВ.

**Конструкція ПЗВ.** Пристрій захисного вимкнення (рис. 12.10) містить основні контакти 1, розраховані на комутацію струмів електроприймача (для увімкнення однофазних електроприймачів і чотири – трифазних). Дроти первинного кола (два або чотири) проходять через кільцевий магнітопровід трансформатора-суматора 5.

У разі пошкодження ізоляції електроприймача або дотику струмопровідних елементів після трансформатора, векторна сума струмів у цих дротах не дорівнює нулю (див. пояснення вище).

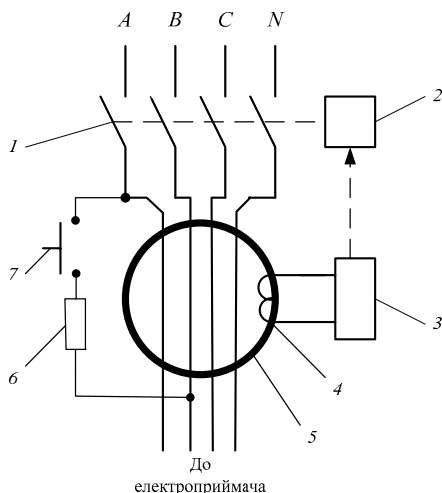


Рис. 12.10

Якщо результуючий струм буде перевищувати певне значення  $\Delta I$ , яке назвали *номінальним диференціальним струмом вимкнення ПЗВ*, то у вторинній обмотці 4 трансформатора-суматора з'являється струм, достатній для спрацювання вимикаючого реле 3. Останнє діє на механізм вимкнення 2, викликає спрацювання ПЗВ та вимкнення електроприймача від джерела живлення.

Для періодичної перевірки працездатності ПЗВ на його лицьовій панелі встановлена

кнопка *Тест 7*, натискання якої ініціює струм витоку, що дорівнює  $2,5\Delta I$  через опір  $b$ .

Наведений опис конструкції ПЗВ є найпростішим варіантом його виконання. Випускають складніші ПЗВ із незначною затримкою спрацювання (0,01–0,3 с, тип *G*) та селективні з витримкою 0,04–0,5 с (тип *S*).

Намагання об'єднати в одному комутаційному апараті функції ПЗВ та захист від надмірних струмів, які виконують звичайними автоматичними вимикачами, спричинило створення нової групи електротехнічних пристроїв – *диференційних автоматів*.

**Технічні характеристики ПЗВ.** До основних технічних характеристик ПЗВ належать:

- номінальна напруга  $U_{\text{ном}} - 230/400$  В;
- номінальний струм  $I_{\text{ном}} -$  від 16 до 100 А;
- номінальний диференційний струм вимкнення  $I_{\Delta} - 10, 30, 100, 300$  та 500 мА;
- номінальний струм вимкнення (для диференційних автоматів) – до 10 кА;
- ресурс електричний – більш ніж 20 000 комутацій, механічний – більш ніж 40 000 комутацій.

Детальнішу інформацію про схеми ввімкнення ПЗВ з аналізом типових похибок можна знайти в праці [25].

## 12.4. Струмообмежувальні реактори

Струми короткого замикання в сучасних потужних електричних мережах можуть сягати сотень кілоамперів. Спричинені ними електродинамічні сили можуть бути настільки великими, що не завжди вдається виконати електрообладнання необхідної електродинамічної стійкості. Окрім того, у момент КЗ спостерігають значне зниження напруги на суміжних ділянках мережі. Для «пом'якшення» цих негативних наслідків використовують *струмообмежувальні реактори* – спеціальні електротехнічні апарати, які обмежують струм КЗ і які підтримують напругу на шинах підстанції за аварійного режиму.

Розглянемо дві лінії, які відходять від збірних шин *A* (рис. 12.11, *a*). У лінії із силовим вимикачем *QF1* струмообмежувальний реактор не встановлений. У разі виникнення в цій лінії короткого замикання, від генератора *G* до місця пошкодження потече струм КЗ  $I_{\text{К1}}$ .

Величина цього струму залежить тільки від індуктивного опору генератора  $X_r$  і лінії до шин  $A$ . Тому, по-перше, струм  $I_{K1}$  може бути неприпустимо значним і, по-друге, у момент КЗ у цій лінії на шинах  $A$  спостерігають глибоке зниження напруги.

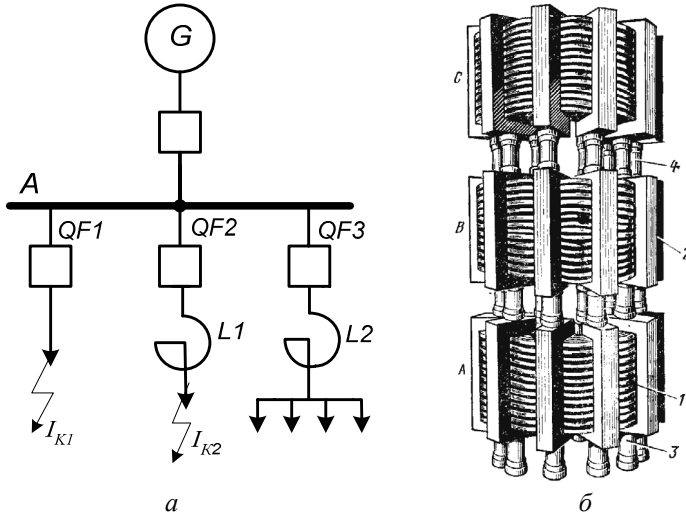


Рис. 12.11

Інша ситуація буде, якщо КЗ виникне в лінії з вимикачем  $QF2$  і встановленим послідовно з ним струмообмежувальним реактором  $L1$ .

Враховуючи, що індуктивний опір реактора значно перевищує опір генератора  $X_p \gg X_r$ , струм КЗ у цьому разі буде набагато меншим за  $I_{K2} \ll I_{K1}$ . При цьому також не буде відбуватися такого значного зниження напруги на шинах підстанції  $A$ .

Струмообмежувальний реактор може бути увімкнений послідовно до силового вимикача в кожній відхідній лінії, наприклад реактор  $L1$  і вимикач  $QF2$ , або бути спільним для кількох відхідних ліній – реактор  $L2$  після вимикача  $QF3$ .

**Конструкція реакторів.** Реактор являє собою котушку індуктивності з постійним реактивним опором. Для забезпечення постійного реактивного опору реактори до 35 кВ виготовляють без сталевго осердя. У вітчизняній практиці широко застосовують *бетонні реактори*. На рис. 12.11, б наведений загальний вигляд такого реактора. Реактор складається з котушок  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (для відповідних фаз). Він зроблений з витків ізольованого багатожиль-

ного мідного або алюмінієвого дроту 1. Витки закріплюють у радіально розміщених бетонних стояках 2. Від землі та між собою котушки ізольовані опорними ізоляторами 3 і 4. Для покращення відведення виділеного в реакторі тепла між окремими витками і рядами котушок є повітряний проміжок 3...5 см.

Бетонні реактори випускають для номінальної напруги 10 і 35 кВ і номінальних струмів від 400 до 4000 А. Допустимі струми КЗ через реактори (струми їх динамічної стійкості) перевищують номінальні в 10–20 разів.

## ■ Розділ 13

### ЕЛЕКТРИЧНІ РЕЛЕ

#### 13.1. Класифікація реле

*Реле* – електричний апарат, який стрибкоподібно змінює свій стан за певного значення параметра, який на нього діє.

**Класифікація.** Залежно від функціонального призначення реле поділяють на три групи:

- вимірювальні;
- допоміжні;
- вказівні.

*Вимірювальні реле* безпосередньо сприймають зміну контрольованого параметра. У разі перевищення (зниження) контрольованим параметром певного значення, виставленого на реле (його називають *уставкою* реле), реле спрацьовує та змінює положення своїх контактів. До вимірювальних реле належать: реле струму та напруги, реле частоти та потужності, реле опору та інші реле.

Вимірювальні реле, що спрацьовують після досягання значення контрольованого параметра, більшого ніж уставка, називають *максимальними реле*, а ті, що спрацьовують за значень, менших ніж уставка, – *мінімальними*.

*Допоміжні реле* виконують у пристроях захисту одну або кілька таких функцій:

- розмноження контактів;
- посилення потужності контактів;
- створення витримок часу.

Перші дві функції зазвичай виконують проміжні реле, а останню – спеціальні *реле часу*.

*Вказівні реле* призначені для сигналізування і зберігання інформації про минулі команди в пристроях захисту та автоматики.

Електромеханічні реле можуть виконувати за електромагнітним, індукційним, електродинамічним і магнітоелектричним принципами. Найпоширеніші електромагнітні реле.

Електромеханічні реле поступово замінюють електронними (статичними) реле, що виконані на базі напівпровідникових елементів (див. підрозд. 13.4).

### 13.2. Принцип дії електромагнітного реле

Електромагнітне реле (рис. 13.1) має магнітопровід (осердя) 6 зі встановленою на ньому обмоткою 7. Зворотна пружина 1 створює механічну силу  $F_m$ , під дією якої яркір 3 *переходить* у верхнє положення (упор 2 фіксує це положення). Коли обмоткою електромагніту проходить струм достатньої величини, електромагнітна сила  $F_e$ , що виникає в робочому проміжку, притягає яркір до осердя. При цьому замикаються (розмикаються) контакти 4 і 5. Докладно робота електромагнітів постійного та змінного струмів розглядалося раніше (див. розділ 6).

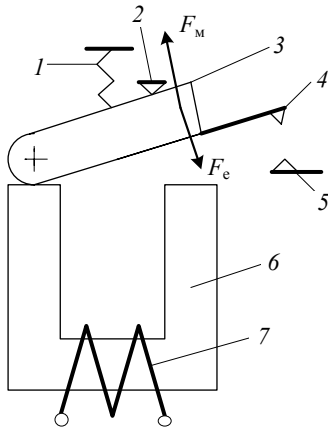


Рис. 13.1

Значення параметра (струму, напруги, частоти тощо), за якого відбувається спрацьовування реле, називають *параметром спрацьовування*  $x_{сп}$ . Значення параметра, за якого відбувається повернення реле в початковий стан (відпускання реле), називають *параметром повернення*  $x_{пов}$ .

Для низки реле дуже важливим технічним параметром є відношення  $x_{пов}/x_{сп}$ , яке називають *коефіцієнтом повернення*  $K_{пов}$ . У максимальних реле  $K_{пов} < 1$ , у мінімальних –  $K_{пов} > 1$ . Чим ближчим є  $K_{пов}$  до одиниці, тим досконалішим є реле.

Існує три способи зміни уставок електромагнітних реле (рис. 13.1):  
– шляхом зміни сили натягу поворотної пружини 1;



- шляхом зміни кількості витків обмотки електромагніту 7;
- шляхом зміни довжини повітряного проміжку між якорем і магнітопроводом.

### 13.3. Вимірювальні реле струму та напруги

Реле струму серії РТ-40 і реле напруги серії РН-50 призначені для роботи в пристроях релейного захисту й автоматики. Вони безперервно контролюють струм (напругу) у вторинному колі. Унаслідок перевищення вхідним параметром значення вставки реле спрацьовує.

**Реле струму.** Конструктивно реле струму виконане у вигляді П-подібного магнітопроводу 1 (рис. 13.2), зібраного зі шихтованого заліза. На магнітопроводі розміщені дві обмотки 2, які можна з'єднувати між собою послідовно або паралельно та змінювати при цьому діапазон уставки струмів. На алюмінієвому стояку 3 на осі 5 підвішена рухома частина реле. Вона складається з Г-подібного сталевого якоря 14, на якому закріплений рухомий контакт 6 і механічний демпфер вібрації 4.

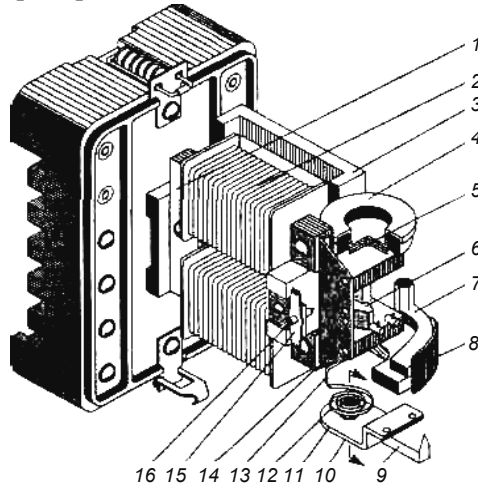


Рис. 13.2

Демпфер являє собою порожнистий барабан з переділками, заповнений кварцовим піском.

Положення якоря фіксується упором 16. Зусилля протидії створює спіральна пружина 12, яка одним кінцем 13 пов'язана з віссю

якоря, другим – з покажчиком уставки струму 9. Пружина кріпиться на пружинотримачі 10 з допомогою шестигранної втулки 11. Значення вставок нанесені на шкалу 8, закріплену на ізоляційній колодці 7.

Реле струму РТ-40 випускають для струмів від 0,05 до 200 А і мають обмотку з малим опором, їх коефіцієнт повернення дорівнює 0,8, а потужність, яку вони споживають, становить від 0,2 до 8 ВА. Контакти реле здатні комутувати струм не більший ніж 1 А.

**Реле напруги.** Електромагнітні реле напруги серії РН-50 конструктивно мало відрізняються від реле РТ-40. Їх випускають для кіл постійної (уставки від 0,7 до 100 В) і змінної (уставки від 12 до 400 В) напруги і вони мають обмотку зі значним опором.

### 13.4. Допоміжні реле

**Реле часу** призначені для створення необхідних витримок часу у пристроях релейного захисту й автоматики. Із цією метою широко використовують реле часу з годинниковим механізмом серії ЕВ-100 (для оперативних кіл постійного струму напругою 24...220 В) і ЕВ-200 (для кіл змінного струму напругою 100...380 В).

Конструкції реле цих серій практично однакові, за винятком конструкції електромагніту. У реле ЕВ-100 (рис. 13.3) електромагніт виготовлений у вигляді соленоїда з котушкою 6, магнітопроводом 11 і циліндричним якорем 7, що втягується. За відсутності напруги на котушці якір під дією пружини піднімається вгору і зводить важіль годинникового механізму 8. При цьому пружина годинникового механізму 9 розтягується, і місткові рухомі контакти 1, закріплені на траверсі 2, що повертається, встановлюються у вихідне положення. Унаслідок подавання оперативної напруги на обмотку якір втягується, вивільняє важіль 8.

Під дією пружини годинникового механізму траверса 2 починає рівномірно повертатися. Через певний час рухомий контакт на нижньому кінці траверси перемикає два нерухомі *основні* контакти, закріплені на колодці 4.

На другому (верхньому) кінці траверси може закріплюватися другий рухомий контакт, який унаслідок обертання короткочасно замикає *проскакувальні* контакти, установлені на колодці 3. Зміна уставок часу реле відбувається шляхом зміни положення колодок 3 і 4 відносно початкового положення траверси 2, тобто відстані, яку

повинна пройти траверса 2 для замикання контактів на колодках 4 та 3. При цьому змінюється час руху траверси (з моменту подавання напруги на котушку до моменту замикання контактів). Окрім контактів з витримкою часу в реле передбачені контакти *миттєвої* дії 14.

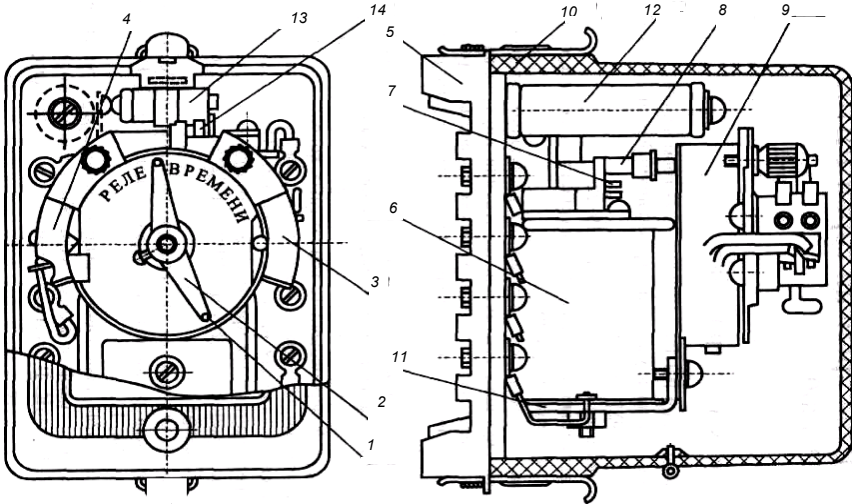


Рис. 13.3

У комплект реле входить додатковий опір 12 і конденсатор 13. Усі елементи закріплені на пластмасовому цоколі 5 і накриваються прозорою кришкою 10.

**Проміжні реле** у схемах автоматики та релейного захисту збільшують потужність контактів (струм, що проходить контактами) і кількість контактів. Випускають різноманітні серії проміжних реле. У пристроях захисту й автоматики широко використовують реле серії РП23 для кіл постійного струму і РП25 для кіл змінного струму.

Загальний вигляд реле РП23 зображений на рис. 13.4. Реле має осердя 1, обмотку 2 і ярк 3. Упор 12 фіксує верхнє положення якоря. Контактна рейка 14 з розміщеними на ній чотирма рухомими мостковими контактами 6 переміщується напрямною скобою 8.

На пластмасовому цоколі 10 закріплені чотири пари контактів 5, які замикаються, і одна пара контактів 5, які розмикаються (у разі переставлення нерухомих контактних деталей можна отримати інші комбінації контактів).

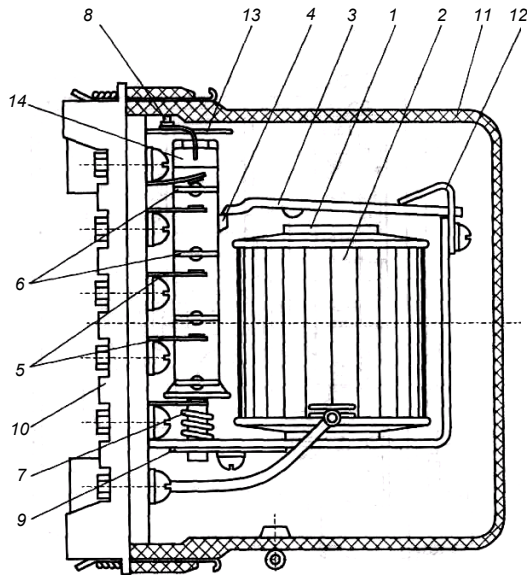


Рис. 13.4

Унаслідок спрацьовування реле ярів тисне на виступ 4 контактної рейки та переміщує її вниз і стискає при цьому зворотну пружину 7. Реле накривається прозорим кожухом 11.

Реле РП25 відрізняється від РП23 лише за конструкцією магнітопроводу й якоря (виконаних із шихтованого заліза).

Комутаційна здатність контактів реле РП у колах постійного струму – 100 ВА (за напруги 24...250 В і струму до 2 А), а в колах змінного струму – 500 ВА (за тих самих напруг та струмів до 5 А).

### 13.5. Електронні реле

Із 1990-х років в техніці релейного захисту почали успішно застосовуватися електронні (статичні) реле – релейні пристрої, що містять інтегральні мікросхеми. Застосування мікросхем дозволило помітно покращити характеристики реле захисту порівняно з електромагнітними реле, і розширити їх функції.

Електронні реле захисту мають кілька вузлів, яких немає в традиційних електромагнітних реле. На рис. 13.5 наведена узагальнена структурна схема електронних реле. Реле має 5 основних вузлів.

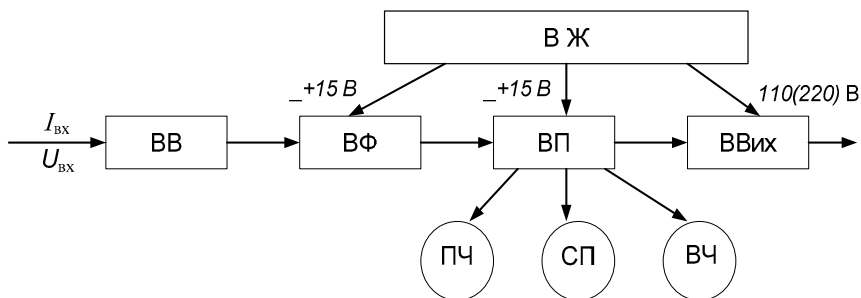


Рис. 13.5

*Вузол вимірювання (ВВ)* містить вимірювальні перетворювачі або датчики струму та напруги, на які вимірювальна інформація надходить від вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

*Вузол формування (ВФ)* формує із сигналів, що надходять від ВВ, спеціальні напруги змінного (або випрямленого) струму, які використовують для реалізації характеристики реле після їх зіставлення у вузлі порівняння.

*Вузол порівняння (ВП)* призначений для перетворення напруг у форму, зручну для порівняння, виконання саме операцій порівняння і одержання на виході вузла керуючого сигналу, що свідчить про відповідність напруги (струму), що подається на реле, уставці спрацювання.

*Вузол виходу (ВВих)* забезпечує спрацювання електромагнітного вихідного реле, що входить до нього, після надходження сигналу керування з ВП.

*Вузол живлення (ВЖ)* призначений для одержання від джерела оперативного струму об'єкта, що захищається, стабілізованих напруг постійного струму, необхідних для роботи мікросхем і вихідного електромагнітного реле.

Зупинимося детальніше на виконанні вузлів ВФ і ВП, у яких найбільше застосовують мікросхеми – операційні підсилювачі (ОП).

У вузлі формування відбувається оброблення сигналів, що надходять від датчиків струму або напруги. Обсяг такого оброблення залежить від типу реле і може дуже розрізнитися. У найпростіших – це тільки випрямлення, у інших – підсилення і зсув по фазі, у третіх – диференціювання сигналів, що надходять. Окрім того, у вузлі формування, якщо виникає потреба, відбувається придушення або виділення окремих гармонік.

У серійних реле струму та напруги застосовують найпростіший спосіб формування – випрямлення, яке відбувається на основі двонапівперіодного випрямляча, зібраного на діодах (рис. 13.6).

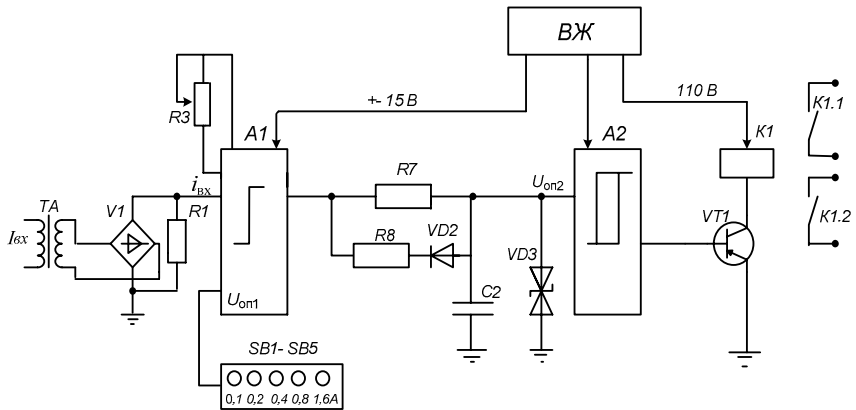


Рис. 13.6

Вузол порівняння може складатися з трьох частин (рис. 13.5). У перетворювальній частині (ПЧ) вузла порівняння здійснюється перетворення синусоїдальних або випрямлених сигналів, що надходять з ВФ, на імпульси визначеної форми, зручної для виконання операцій порівняння. Найчастіше із цією метою використовують імпульси прямокутної форми.

У другій частині ВП – схемі порівняння (СП) – відбувається порівняння вхідного сигналу з опорною напругою  $U_{оп}$ .

Як опорну напругу в серіях реле струму та напруги використовують напругу постійного струму стабільного значення. У складніших реле в СП відбувається порівняння імпульсів, що надходять не тільки за значенням, але й за тривалістю.

Третьою складовою частиною є виконавча частина (ВЧ), у якій формується командний сигнал, якщо результат порівняння показує, що параметри струмів або напруг, що надходять в реле, відповідають умовам його спрацьовування. Звичайно ВЧ являє собою підсилювач із позитивним зворотним зв'язком, що забезпечує релейний ефект дії реле.

Як приклад розглянемо роботу реле максимального струму серії АЛ. На рис. 13.6 наведена структурна схема. Реле виконане за

часоімпульсним принципом, що гарантує добру перешкодостійкість реле. Вузол вимірювання (ВВ) – це проміжний трансформатор струму  $TA$ , вузлом формування є випрямляючий міст  $VI$ .

Перетворювальною частиною ВП є однопороговий компаратор. Компаратор – це порівнювальний пристрій двох вхідних напруг. Коли перша (вимірювана) напруга стає більшою за другу (опорної), напруга на виході компаратора стрибкоподібно змінюється  $A1$  (рис. 13.6).

Компаратор  $A1$  одночасно виконує перший етап порівняння, порівнюючи сигнал, що надходить (пропорційний  $i_{вх}$ ) із заданою опорною напругою  $U_{оп1}$ . Для встановлення опорної напруги передбачені перемикачі вставок струму  $SB1$ – $SB5$ . Вихідний сигнал першого порогу компаратора  $A1$  надходить на наступний рівень порівняння – часопорівнювальний ланцюг, що має резистори  $R7$ ... $R8$ , діод  $VD2$ , конденсатор  $C2$  і стабілітрони  $VD3$ . Пороговим елементом цього ланцюга і одночасно виконавчою частиною (ВЧ) вузла порівняння є тригер Шмітта  $A2$ .

Тригер Шмітта являє собою компаратор з одним заземленим входом, фіксованими опорною напругою і позитивним зворотним зв'язком. Завдяки їй зміна знака вихідної напруги і зворотний перехід в початковий стан відбувається за різних рівнів вхідної напруги.

Вузол виходу (ВВих) реле складається з транзистора  $VТ1$  і електромагнітного реле  $K1$  з вихідними контактами  $K1.1$  і  $K1.2$ .

Вузол живлення (ВЖ) використовує зовнішню напругу 220 В змінного струму, перетворюючи його на  $\pm 15$  В, необхідні для живлення мікросхем, і 110 В – для живлення вихідного реле  $K1$ .

В Україні серійно випускають такі електронні реле.

*Реле максимального струму серії АЛ* призначене для контролю струму і спрацьовує в разі перевищення останнім значення вставки. Залежно від марки вставки реле струму можуть задавати діапазон 0,05...120 А. Реле мають коефіцієнт повернення в діапазоні 0,9... 0,95, допустимий струм вихідних контактів 2–2,5 А. Реле марки АЛ-3 додатково має витримку часу в діапазоні 0,1...99 с.

*Реле максимальної (мінімальної) напруги серії НЛ* призначене для контролю напруги в електричних мережах і спрацьовує внаслідок підвищення (зниження) напруги вище (нижче) за задану вставку. Залежно від марки уставки реле напруги можуть бути задані в діапазоні 10...400 В. Максимальні реле мають коефіцієнт

повернення 0,9...0,98, мінімальні – 1,05...1,1. Потужність вихідних контактів до 300 ВА на змінному і до 60 Вт на постійному струмах.

*Реле контролю трифазної напруги серії ЕЛ* призначене для захисту споживачів трифазного струму від таких ненормальних режимів ( залежно від марки реле):

– симетричного зниження напруги в трьох фазах у межах 0,5...0,7  $U_{\text{ном}}$  ;

– зниження напруги в одній фазі у межах 0,6 ...0,75  $U_{\text{ном}}$ ;

– неправильного чергування фаз;

– обривання однієї або двох фаз.

*Реле часу серії ВЛ* призначено для створення в пристроях РЗА необхідних затримок часу. Залежно від марки уставки реле витримок часу знаходяться в діапазоні від 0,1 с до 99 год.

### 13.6. Вибір реле

Електромеханічні реле доцільно обирати в такій послідовності:

– скласти електричну схему пристрою, призначеного для виконання заданої функції, у якому передбачається використання одного або кількох реле (основні параметри схеми: напруга живлення, потужність навантаження та інші повинні бути відомі);

– залежно від виконуваної в електричній схемі функції, обирають відповідну серію реле (реле струму, напруги, часу, проміжні тощо);

– номінальна напруга реле повинна бути не меншою за напругу оперативного джерела живлення

$$U_{\text{р,ном}} \geq U_{\text{дж}}; \quad (13.1)$$

– номінальна напруга котушки електромагніту реле повинна дорівнювати напрузі живлення і відповідати типу струму джерела

$$U_{\text{кот,ном}} = U_{\text{дж}}; \quad (13.2)$$

– комутаційна здатність контактів реле повинна дозволяти надійно комутувати потужність (струм) навантаження на контакти

$$S_{\text{кон,ном}} \geq S_{\text{нав}} \text{ чи } I_{\text{кон,ном}} \geq I_{\text{нав}}. \quad (13.3)$$

Послідовність вибору реле може проілюструвати такий приклад.

**Приклад.** *Необхідно обрати реле для схеми ввімкнення навантаження потужністю  $S_{\text{нав}}=450 \text{ ВА}$  в однофазну мережу змінного струму напругою  $U_{\text{ном}}=220 \text{ В}$ . У схемі необхідно передбачити контроль напруги джерела з автоматичним вимкненням навантаження за зменшення напруги більше ніж на 10 %.*



1. На рис. 13.7 наведена електрична схема, яка виконує задані функції. Схема працює таким чином. Після ввімкнення вимикача  $B$  напруга джерела подається на обмотку реле мінімальної напруги  $KV$ .

Якщо напруга джерела більша ніж 90 % від  $U_{\text{ном}}$ , тобто більше ніж 200 В, реле  $KV$  спрацьовує і замикає свої контакти  $KV$ . Напруга джерела подається на обмотку проміжного реле  $KL$ , що спрацьовує і замикає свої контакти  $KL$  (необхідність проміжного реле пояснена нижче) та вмикає навантаження  $S_{\text{наб}}$  до джерела. Унаслідок зменшення напруги живлення нижче за 200 В, реле  $KV$  відпускає, його контакти роз'єднуються, обмотка реле  $KL$  знеструмується, і його контакти вимикають навантаження.

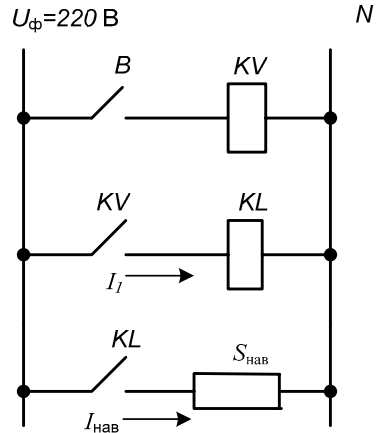


Рис. 13.7

2. Вибір реле почнемо з проміжного реле  $KL$ . Попередньо обираємо реле серії РП25, призначене для роботи в колах змінного струму.

Згідно з умовою (13.3) комутаційна здатність реле повинна бути не меншою ніж  $S_{\text{наб}} = 450 \text{ VA}$ . Відповідно до даних [26] контакти реле РП25 здатні комутувати потужність до 500 ВА за напруги до 250 В і струмів до 5 А.

Визначимо струм у колі навантаження  $I_{\text{наб}} = 450/220 = 2,05 \text{ A}$ .

Як бачимо, умова (13.3) виконується:  $S_{\text{кон. ном}} = 500 \text{ VA} \geq S_{\text{наб}} = 450 \text{ VA}$  і  $I_{\text{кон. ном}} = 5 \text{ A} \geq I_{\text{наб}} = 2,05 \text{ A}$ .

Реле РП25 має номінальну напругу 220 В і таку саму номінальну напругу котушки, тобто умови (13.1) і (13.2) виконуються. Отже, реле РП25 цілком відповідає умовам використання.

Для подальшого вибору необхідно знати потужність, яку споживає котушка реле  $KL$ , згідно з працею [26]  $S_{\text{кот. РП25}} = 10 \text{ VA}$ .

3. Перейдемо до вибору реле напруги  $KV$ . Уставку мінімальної напруги 200 В має реле типу РН54/320, призначене для кіл змінного струму [26]. Номінальна напруга цього реле 320 В, – виконується умова (13.1).

Перевіримо комутаційну здатність контактів реле РН54/320 (умова (13.3), яка, відповідно до праці [26], дорівнює 300 ВА за струму до 2 А і напруги 220 В. Навантаженням для контактів реле є обмотка

реле  $KL$ , яка споживає  $10 \text{ VA}$ , тобто струм у колі обмотки дорівнює  $I_1 = 10/220 \approx 0,05 \text{ A}$ . Тобто, умова (13.3) виконується:

$$S_{\text{кон. ном}} = 300 \text{ VA} \geq S_{\text{нав}} = 10 \text{ VA} \text{ чи } I_{\text{кон. ном}} = 2 \text{ A} \geq I_1 = 0,05 \text{ A}.$$

Таким чином можна зробити висновок, що всі параметри реле  $PH54/320$  відповідають умовам використання.

Необхідність проміжного реле  $KL$  зумовлена недостатньою комутаційною здатністю контактів реле напруги  $KV$  ( $S_{\text{кон. ном}} = 300 \text{ VA}$ ), що не дозволяє «прямо» комутувати навантаження  $S_{\text{нав}} = 450 \text{ VA}$ .



### Запитання та завдання до модуля III

1. Якими є призначення, похибки, класи точності трансформаторів напруги?
2. Схарактеризуйте конструкції, схеми вимкнення трансформаторів напруги.
3. Від чого залежить вибір трансформаторів напруги?
4. Які призначення, похибки, класи точності трансформаторів струму?
5. Дайте характеристику конструкції, схеми вимкнення трансформаторів струму.
6. Від чого залежить вибір трансформаторів струму?
7. Якими є призначення, переваги та недоліки плавких запобіжників?
8. Охарактеризуйте конструкції запобіжників на напругу менше ніж  $1000 \text{ V}$ : основні елементи, методи гасіння дуги.
9. Дайте характеристику конструкції запобіжників напругою, меншою ніж  $1000 \text{ V}$ : основні елементи, методи гасіння дуги, металургійний ефект.
10. Що зумовлює вибір плавких запобіжників напругою до  $1000 \text{ V}$ ?
11. Від чого залежить вибір плавких запобіжників напругою вищою за  $1000 \text{ V}$ ?
12. Схарактеризуйте конструктивну схему та принцип роботи пристрою захисного вимкнення.
13. Дайте характеристику струмообмежувальних реакторів за такими ознаками: призначення, конструкція, принцип дії.
14. Наведіть класифікацію електромеханічних реле.
15. Які основні елементи конструкції електромеханічних реле?
16. Охарактеризуйте вимірювальні реле за призначенням, конструкцією, основними елементами.
17. Якими є призначення, конструкція, основні елементи проміжних реле?
18. Які призначення, конструкція, основні елементи реле часу?
19. Схарактеризуйте вказівне реле за призначенням, конструкцією, основними елементами.
20. Від чого залежить вибір електромагнітних реле?

■ Розділ 14

ШИННІ КОНСТРУКЦІЇ

14.1. Електричні шини

*Збірними шинами називають спеціальну конструкцію в РП, що поєднує окремі електричні кола і призначену для приймання та розподілу електроенергії. У відкритих РП збірні шини виконують на основі неізолюваних, гнучких провідників. У закритих РП аеропортів та інших об'єктів їх виконують на основі твердих неізолюваних провідників.*

*Ошиновкою називають шини невеликої довжини, що з'єднують електричні апарати зі збірними шинами або між собою.*

**Форма шин.** У практиці використовують шини прямокутного, круглого, квадратного та коритоподібного перерізу.

*Шини прямокутного перерізу (рис. 14.1, а) випускають у вигляді смуг розмірами від  $h=15 \times xb=3 \text{ мм}^2$  до  $120 \times 10 \text{ мм}^2$ . Останні витримують тривале проходження ними змінного струму до 2000 А.*

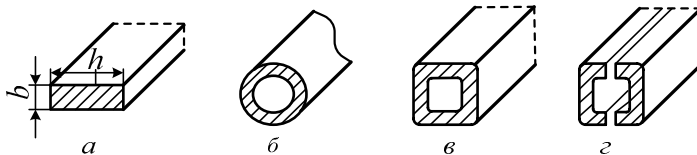


Рис. 14.1

Такі переваги шин прямокутного перерізу як легке з'єднання з електричними апаратами та між собою, гарні умови охолодження, достатня механічна міцність за електродинамічних дій струмів КЗ і невисоке значення коефіцієнта поверхневого ефекту зумовили їх широке використання в електроустановках напругою, меншою як 35 кВ і зі струмом, меншим ніж 2000 А.

За більших струмів можна використовувати пакети, складені з двох або трьох паралельних шин на кожну фазу. Однак такі складені шини усе рідше застосовують через складність монтажу, недостатню механічну міцність за більших струмів КЗ, вище значення коефіцієнта поверхневого ефекту та необхідність застосування через певні відстані прокладок між смугами шин. Прокладки виключають можливість «злипання» смуг однієї фази за КЗ.

*Шини круглого перерізу* (рис. 14.1, б) широко використовують в установках 110 кВ і вище. Така форма шин дозволяє уникнути підвищеної напруженості електричного поля на різких вигинах поверхні провідника, рівномірно розподіляючи електричне поле. У місцях високої напруженості поля відбувається посилення іонізації повітря, і можуть виникати коронні розряди, що знижують електричну міцність повітря. Із цієї причини можливі перекриття ізоляторів та пробій між фазами.

*Шини квадратного та коритоподібного перерізу* (рис. 14.1, в, г) не мають деяких із зазначених недоліків складених шин і більш ефективно використовують матеріал провідника, допускаючи більшу густину струму. Окрім того, шини такого перерізу мають більшу механічну міцність на вигин. Шини коритоподібного перерізу простіші у виготовленні і, тому, дешевші.

**Матеріал шин.** Матеріал, з якого виготовляють шини, повинен мати гарну електричну провідність, що забезпечує малі втрати електроенергії, і механічну міцність, щоб протистояти електродинамічним силам, що виникають у шинах за струмів КЗ. До таких матеріалів відносять: алюміній, мідь і сталь.

*Алюмінієві шини* мають досить гарну електричну провідність, що разом із незначною вартістю та легкістю алюмінію зумовило їх практично повсюдне використання.

*Мідні шини* значно дорожчі за алюмінієві, але вони добре протистоять дії хімічних реагентів. Їх доцільно використовувати в електроустановках, що розташовані поблизу від хімічних заводів, морського узбережжя та солоних озер.

*Сталеві шини* мають гіршу провідність, за змінного струму у них можливі втрати на вихрові струми та гістерезис. Однак, завдяки дешевості, великій механічній міцності та меншій дефіцитності, сталеві шини можна використовувати в електроустановках зі струмами, меншими за 325 А.

**Електродинамічні сили в шинах.** Відомо, що якщо по двох паралельних провідниках проходять струми  $i_1$  і  $i_2$  (рис. 14.2), то між ними виникає електродинамічна сила  $F_D$ , яка намагається їх наблизити (якщо напрямки струмів збігаються) або відштовхнути (якщо струми спрямовані протилежно).

Погонні зусилля, які виникають у цих провідниках, визначають за таким виразом:

$$F_0 = 2k_\phi i_1 i_2 10^{-7}/a, \quad (14.1)$$

де  $F_0$  – погонна сила, докладена до кожного метра провідника;  $k_\phi$  – коефіцієнт, що враховує прямокутну форму шин і залежить від їх розмірів та відстані  $a$ ;  $i_1$  і  $i_2$  – значення струмів у провідниках;  $a$  – відстань між центрами провідників.

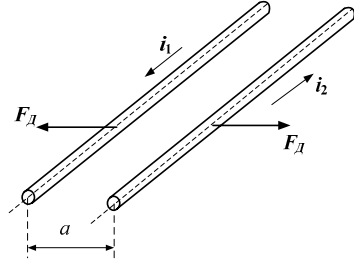


Рис. 14.2

На рис. 14.3 наведені залежності коефіцієнта  $k_\phi$  (14.1) від розмірів і розташування шин. Як видно із графіка, якщо має місце співвідношення

$$a - b \geq 2(h+b), \quad (14.2)$$

то можна з достатньою точністю взяти  $k_\phi = 1$ .

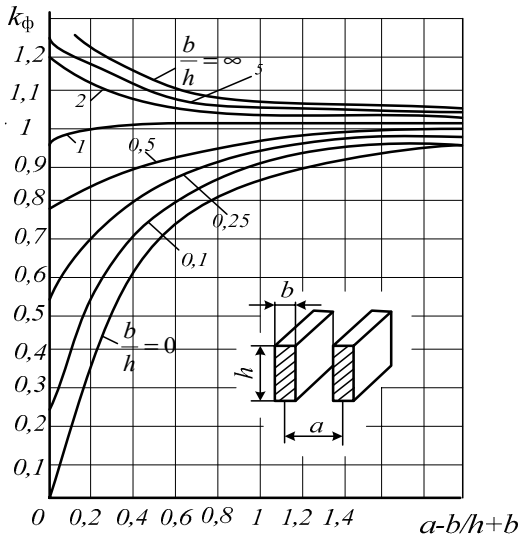


Рис. 14.3

Під час проходження трифазного змінного струму по трьох шинах, розташованих в одній площині (рис. 14.4), найбільше зусилля буде докладене до середньої шини в момент проходження трифазного ударного струму  $KЗ - i_v^{(3)}$ . Значення цієї електродинамічної сили  $F_d$ , залежатиме від відстані між точками кріплення шин на опорних ізоляторах  $l$ , відстані між осями шин  $a$  та визначатиметься за виразом

$$F_d^{(3)} = 1,76 k_{\Phi} l (i_v^{(3)})^2 10^{-7} / a. \quad (14.3)$$

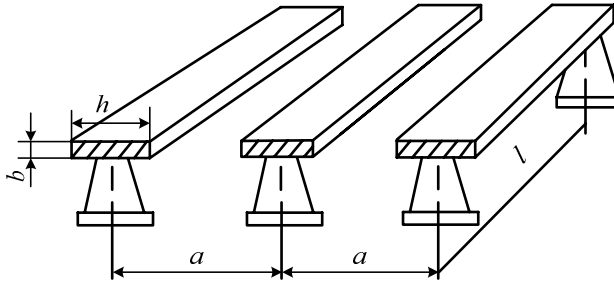


Рис. 14.4

Виникаючі в шинах сили намагаються їх зблизити (відштовхнути), чому перешкоджає кріплення шин до нерухомих опорних ізоляторів. Шини вигинаються, і в їх матеріалі виникає механічна напруга  $\sigma$ , розрахункове значення якої можна визначити за формулою

$$\sigma_{\text{розрах}} = M / W, \quad (14.4)$$

де  $M$  – згинальний момент;  $W$  – момент опору вигину.

Згинальний момент  $M$  залежить від плеча докладання сили  $l$  і дорівнює

$$M = F_d^{(3)} l / 10. \quad (14.5)$$

Момент опору вигину дорівнює

$$W = h^2 b / 6 \text{ або } W = b^2 h / 6. \quad (14.6)$$

Перша із формул (14.6) справедлива у разі розташування шин пліском в одній площині (рис. 14.4), друга – у разі розташування їх на ребрі (див. рис. 14.7, б).

Шини витримують електродинамічну дію струму КЗ, якщо розрахункове значення механічного напруження в матеріалі шин  $\sigma_{\text{розрах}}$  буде не більшим ніж допустиме  $\sigma_{\text{доп}}$  і дорівнюватиме 70 % напруги руйнівального матеріалу  $\sigma_p$ :

$$\sigma_{\text{розрах}} \leq \sigma_{\text{доп}} = 0,7 \sigma_p. \quad (14.7)$$

Значення допустимого напруження на вигин у різних матеріалах, що використовуються для шин, наведені в табл. 14.1.

Таблиця 14.1

Матеріал	$\sigma_{\text{доп}}$ , МПа
Алюміній АТ	65
Алюміній АТТ	90
Мідь МТ	130
Сталь	160

**Нагрівання шин.** Для забезпечення тривалої надійної роботи контактів у шинах і запобігання надмірного нагрівання ізольованих частин апаратів, до яких примикають шини, температура алюмінієвих шин у закритих РП не повинна перевищувати довгостроково допустимого значення  $\theta_{\text{дов. доп}} = 70$  °С. У разі проходження струмів КЗ допустиме короткочасне нагрівання алюмінієвих шин до температури  $\theta_{\text{доп}} = 200$  °С, мідних – до 300 °С, сталевих – до 400 °С.

Кінцева температура нагрівання шини у разі проходження струму КЗ в інженерній практиці визначається з допомогою кривих, наведених на рис. 14.5. При цьому, враховуючи, що збірні шини обирають з певним запасом за допустимим струмом, необхідно уточнити їх початкову температуру  $\theta_{\text{поч}}$ , зміна якої спричинена проходженням робочого струму навантаження  $I_{\text{роб}}$

$$\theta_{\text{поч}} = \theta_0 + (\theta_{\text{дов. доп}} - \theta_{\text{ном}}) (I_{\text{роб}} / I_{\text{дов. доп}})^2, \quad (14.8)$$

де  $I_{\text{дов. доп}}$  – довгостроково допустимий струм шини заданого перерізу [19];  $\theta_{\text{ном}}$ , – номінальна температура навколишнього повітря, яка дорівнює 25 °С (див. підрозд. 1.3);  $\theta_{\text{дов. доп}}$  – довгостроково допустима температура нагрівання шин;  $\theta_0$  – середньорічна температура місця установки шин.

Відкладаючи отримане значення  $\theta_{\text{поч}}$  на ординаті графіка (рис. 14.5) і використовуючи потрібну криву, знаходимо на осі абсцис відповідну точку  $A_{\text{поч}}$ . Додавши до цієї величини значення густини теплового імпульсу  $\Delta A$ , виділеного в шинах струмом КЗ

$$\Delta A = I_{\infty}^2 t_{\text{п}} / s^2, \quad (14.9)$$

де  $I_{\infty}$  – значення струму КЗ, що встановилося, А;  $s$  – переріз шин, мм<sup>2</sup>;  $t_{\text{п}}$  – приведений час дії струму КЗ (докладне визначення величини  $t_{\text{п}}$  розглянуто в підрозд. 14.3 в прикладі на с. 230).

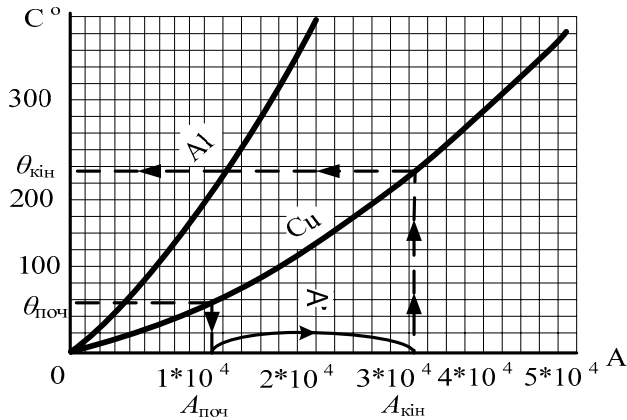


Рис. 14.5

Отримаємо на абсцисі величину  $A_{\text{кін}}$  з допомогою якої і тієї самої кривої знаходимо кінцеву температуру нагрівання шин струмом КЗ  $\theta_{\text{кін}}$ . Для правильно обраних шин повинна виконуватися умова

$$\theta_{\text{кін}} \leq \theta_{\text{доп}} \quad (14.10)$$

**З'єднання шин.** За подовження шин, виконання відводів (ошиновки) для приєднання фідерів, що відходять, і апаратів шини необхідно з'єднувати між собою. На практиці використовують такі способи з'єднання прямокутних шин.

*Внапуск наскрізними болтами* – найбільш простий спосіб з'єднання шин. Залежно від ширини шини застосовують два болти, розташовані за діагоналлю, або чотири болти (рис. 14.6, а).

Головні недоліки болтових з'єднань – ослаблення згодом сили притиснення контактних поверхонь, збільшення перехідного опору і, як наслідок, перегрівання місця контактування. Зменшення сили притиснення викликає різниця коефіцієнтів лінійного розширення алюмінієвих (мідних) шин і сталевих болтів. Так, зі зростанням температури алюміній під болтовим з'єднанням розширюється інтенсивніше, що призводить до його механічної деформації (змінання).

Змінання викликає зменшення тиску в контакті із подальшим зниженням температури. Істотному зростанню перехідного опору сприяє також волога, що потрапляє в ослаблене з'єднання та посилює процеси окиснення. Тому болтові з'єднання шин потребують постійної уваги та систематичного підтягнення під час експлуатації.



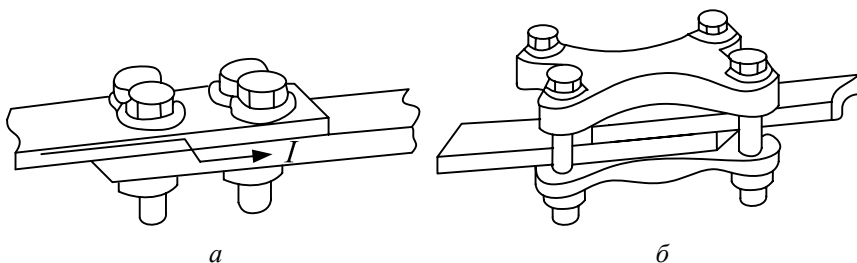


Рис. 14.6

З'єднання з допомогою стискальних накладок (рис. 14.6, б) не потребує попереднього розміщення та свердління отворів. Воно має високу механічну міцність і менший перехідний опір. Такому з'єднанню меншою мірою властиві недоліки болтового з'єднання.

З'єднання зварюванням найнадійніший і найдешевший вид з'єднання, що забезпечує сталість перехідного опору. Опанування процесу зварювання алюмінію під флюсом дозволило широко використовувати цей спосіб з'єднання, що не потребує постійного контролю під час експлуатації.

**Фарбування шин.** Шини закритих РП обов'язково фарбують з метою:

- зменшення їх кородування;
- збільшення тепловіддавання та допустимого струму;
- забезпечення безпеки та кодування.

За змінного трифазного струму шини фази А фарбують у жовтий колір, фази В – у зелений, фази С – у червоний, нульової робочої нейтралі у блакитний [11]. Шини червоного кольору (фаза С) повинні розташовуватися першими на шляху можливого наближення обслуговуючого персоналу.

За постійного струму в червоний колір фарбують позитивну шину (+), у синій – негативну (–), а нульову – у блакитний. Резервну шину фарбують поперечними смугами кольору основної шини.

Для контролю напруги з допомогою переносних індикаторів на шинах 6 – 35 кВ необхідно залишати незабарвлені ділянки довжиною до 10 см на рівні людського зросту. Облямовані чорною фарбою незабарвлені ділянки шин залишають для накладення переносних заземлень.

## 14.2. Опорні та прохідні ізолятори

*Ізолятори, призначені для кріплення та ізолювання струмовідних частин електричних пристроїв (шин, вимикачів та ін.) від заземлених конструкцій.*

Ізолятори виготовляють на певну номінальну напругу, вони повинні мати необхідну електричну та механічну міцність, тепло- та вологостійкість. За функціональним призначенням ізолятори, що використовують у трансформаторних підстанціях, поділяють на опорні та прохідні.

**Опорні ізолятори** використовують для кріплення на них струмовідних частин. У закритих РП 6...10 кВ використовують опорні ізолятори типу ІО і ІОР. Літери маркування означають; І – ізолятор, О – опорний, Р – ребристий, К – для комплектних РП. Перша після літер цифра маркує номінальну напругу (кВ), друга – мінімально руйнуюче ізолятор зусилля  $F_{р\text{вн}}$  (кН). Ізолятори типу ІО й ІОР випускають зі значеннями  $F_{р\text{вн}}$ , що дорівнюють 2,5; 3,75; 7,5; 15; 20 і 30 кН.

Опорний ізолятор типу ІО (рис. 14.7, а) складається з фарфорового корпусу 1, вкритого глазур'ю білого або коричневого кольорів. Глазур унаслідок випалу розплавлюється і, з'єднуючись із фарфором, утворює стійку до хімічних і атмосферних впливів плівку. Верхня металева вставка 2 має отвір із наріззю, що слугує для кріплення струмовідних частин. З допомогою нижньої металевої вставки 3 ізолятор прикріплений до заземленої конструкції. В ізоляторах, розрахованих на більші механічні зусилля, замість уставок використовують металеві фланці, що охоплюють корпус. З'єднує вставки і фланці з тілом високоякісна цементна суміш 4.

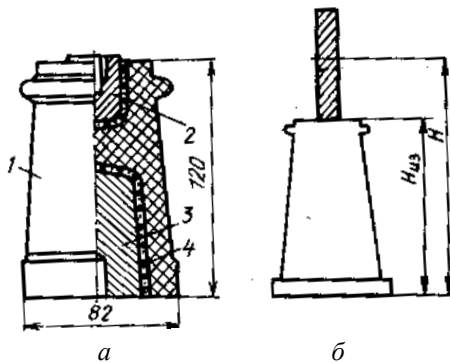


Рис. 14.7

Опорні ізолятори **витримують напруження**, що виникають у шинах і електричних апаратах під час проходження струмів КЗ. Силу, що згинає ізолятор  $F_{зг}$ , можна визначити з виразу

$$F_{зг} = F_d k_h, \quad (4.11)$$

де  $F_d$  – електродинамічна сила (14.3);  $k_h = H/H_{із}$  – коефіцієнт, що враховує перевищення центру шини  $H$ , установленної на ребро, над висотою ізолятора  $H_{із}$  (рис. 14.7, б). Для шин, закріплених пліском,  $k_h = 1$ .

Максимально допустиме значення зусилля згину для конкретного ізолятора обмежене нерівністю

$$F_{зг} < 0,6 \text{ руйн.} \quad (14.12)$$

**Прохідні ізолятори** використовують для **проводу** струмовідних частин апаратів і шин через металеві корпуси, стінки та перекриття розподільного пристрою.

Для використання в закритих РП випускають ізолятори типу П (П – прохідний), інші скорочення аналогічні до тих, що використовують для опорних ізоляторів. Перша цифра в маркуванні відповідає номінальній напрузі, друга – номінальному струму ізолятора, третя – мінімальному зусиллю руйнування в кілоньютонах. Технічні дані прохідних ізоляторів 6...35 кВ можна знайти в праці [19].

На рис. 14.8 наведена конструкція прохідного ізолятора. Струмовідна шина або стрижень 3 проходить усередині порожнього циліндричного фарфорового корпусу 1. На середині ізолятора кріплять овальний фланець 4 із двома отворами кріплення. Фланці для ізоляторів на струми до 1600 А виконують із чавуну, а на більші струми (для уникнення сильного нагрівання вихровими струмами та гістерезисом) з немагнітного чавуну *силуміну*. Із боків ізолятор закривають дві металеві шайби 2, що мають прямокутні отвори за розміром шин.

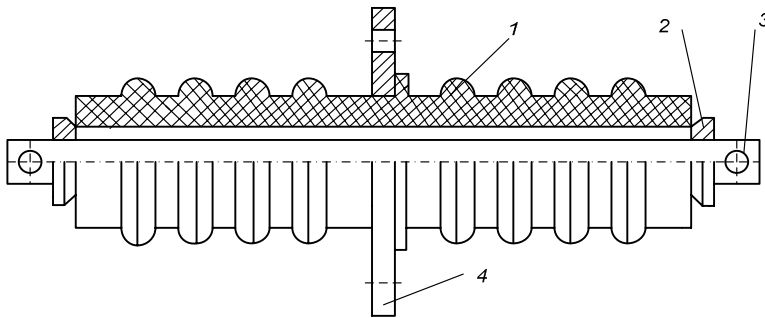


Рис. 14.8

На опорний ізолятор також діє згинальне зусилля під час проходження струмів КЗ. Враховуючи, що плече прикладення сили

дорівнює половині відстані між прохідним і найближчим опорним ізолятором, згинальну силу можна визначити за виразом

$$F_{зг} = 0,5 F_{д},$$

де  $F_{д}$  – електродинамічна сила (14.3). Значення сили  $F_{зг}$  не повинне перевищувати  $0,6 F_{руйн}$  (14.12).

### 14.3. Шинні конструкції. Вибір шин та ізоляторів

**Систему шин, установлену на опорних ізоляторах, називають шинною конструкцією.** Залежно від компонування РП шинні конструкції можуть закріплювати згори комплектних РП, кріпитися до стіни або стелі. В усіх цих випадках шини можуть розташовувати на ізоляторі пліском (див. рис. 14.4) або на ребро (див. рис. 14.7, б). У разі розташування широких сторін шин в одній площині (див. рис. 14.4) вони мають більшу динамічну стійкість. Шини, розташовані широкою площиною перпендикулярно до висхідних потоків повітря, охолоджуються трохи гірше, що необхідно враховувати, обираючи їх допустимий струм (див. приклад).

Шинну конструкцію обирають під час проектування будівельної частини та комплектування РП. Нині РП виконують на основі комплектних розподільних пристроїв (КРП) (див. підрозд. 15.4), у яких шини розташовані в горизонтальній площині, зазвичай, пліском із відстанню між осями шин  $a = 0,25$  м за напруги 6...10 кВ. Далі обирають шини й ізолятори, послідовність його покажемо на прикладі.

**Приклад.** *Необхідно обрати збірні шини та ізолятори для РП-10 кВ аеропорту, що має секційну систему шин, укомплектовану гніздами КСО-393 (див. підрозд. 15.4). Робочий струм для кожної секції  $I_{роб} = 160$  А, ударний і трифазний струм КЗ, що встановилися на шинах, відповідно дорівнюють  $i_v = 20$  кА,  $I_{\infty}^{(3)} = 7,6$  кА, час вимкнення захисту лінії живлення  $t_{вимк} = 1,5$  с. Середньорічна температура місцевості  $\theta_0 = 15^{\circ}\text{C}$ .*

**Вибір шин.** Збірні шини згідно із Правилами [11] обирають за допустимим струмовим навантаженням, виходячи з можливого максимального струму згідно з виразом (10.2), де  $I_{ном}$  слід розуміти як довгостроково допустимий струм  $I_{дов.доп}$ . У секційній системі шин під час ремонту однієї із секцій, робочий струм іншої секції подвоюється, отже  $I_{роб. max} = 320$  А. Використовуючи дані довідника [19], обираємо алюмінієві шини  $30 \times 4$  мм<sup>2</sup> ( $S = 120$  мм<sup>2</sup>), розрахо-

вані на довгостроково допустимий струм  $I_{\text{дол. доп}} = 365 \text{ А}$ . Враховуючи, що середньорічна температура в РП суттєво відрізняється від  $\theta_{\text{ном}} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ , здійснимо коригування довгостроково допустимого струму шин згідно з виразом

$$I'_{\text{дол. доп}} = k_{\theta} k_{\text{роз}} I_{\text{дол. доп}}, \quad (14.13)$$

де  $k_{\theta}$  – коефіцієнт, що враховує відмінність середньорічної температури від номінальної і дорівнює

$$k_{\theta} = \sqrt{\frac{(\theta_{\text{дол. доп}} - \theta_0)}{(\theta_{\text{дол. доп}} - \theta_{\text{ном}})}} = \sqrt{\frac{(70 - 15)}{(70 - 25)}} \approx 1,1;$$

$k_{\text{роз}}$  – коефіцієнт, що враховує вплив розташування шин на їх охолодження, який дорівнює 0,95 для шин, розташованих пліском, і дорівнює одиниці для шин, установлених на ребро. Тоді згідно з (14.13) маємо

$$I'_{\text{дол. доп}} = 1,1 \cdot 0,95 \cdot 365 = 381 \text{ А},$$

що більше за  $I_{\text{раб. max}} = 320 \text{ А}$ . Умова (10.2) виконується.

Далі необхідно перевірити обраний переріз шин на електродинамічну та термічну стійкості за струмів КЗ.

Для перевірки шин на **електродинамічну стійкість**, спочатку визначимо з виразу (14.3) силу  $F_{\text{д}}$ , враховуючи, що в КРП КСО-393 відстань між опорними ізоляторами однієї фази дорівнює  $l = 1 \text{ м}$ , а відстань між осями шин різних фаз  $a = 0,25 \text{ м}$ .

$$F_{\text{д}} = 1,76 (20 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-7} / 0,25 = 280 \text{ Н}.$$

Коефіцієнт  $k_{\text{ф}}$  у виразі (14.3) беремо таким, що дорівнює 1, тому що відповідно до виразу (14.2) маємо

$$a - h = 250 - 30 = 230 > 2(h + b) = 2(30 + 4) = 68.$$

Тоді згинальний момент згідно з виразом (14.5) дорівнює

$$M = F_{\text{д}}^{(3)} \cdot l / 10 = 280 \cdot 1 / 10 = 28 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

а момент опору вигину (14.6)

$$W = h^2 \cdot b / 6 = (0,03)^2 \cdot 0,004 / 6 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Отже, розрахункове значення механічної напруги в матеріалі згідно з виразом (14.4) буде дорівнювати

$$\sigma_{\text{розрах}} = M / W = 28 \text{ Н} \cdot \text{м} / 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 = 46,6 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 = 46,6 \text{ МПа},$$

що менше за допустиме напруження для алюмінію марки АТ  $\sigma_{\text{доп}} = 65 \text{ МПа}$  (див. табл. 14.1), тобто умова (14.7) виконується.

Перевірку обраного перерізу на **термічну стійкість** почнемо з визначення початкової температури шин  $\theta_{\text{поч}}$  під час проходження робочого струму за формулою (14.8)

$$\theta_{\text{нач}} = 15 + (70 - 25) \cdot (160 / 381)^2 \approx 22 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Для розрахунків величини густини теплового імпульсу  $\Delta A$  (14.9) необхідно визначити значення наведеного часу дії струму КЗ  $t_{\Pi}$  з виразу

$$t_{\Pi} = t_{\text{III}} + t_{\text{па}}, \quad (14.15)$$

де  $t_{\text{III}}$  – наведений час періодичної складової струму КЗ;  $t_{\text{па}}$  – наведений час аперіодичної складової струму КЗ.

За  $t_{\text{ВИМК}} > 1$  с величиною  $t_{\text{па}}$  можна знехтувати та узяти  $t_{\Pi} \approx t_{\text{ВИМК}} = 1,5$  с. Підставляючи це значення у вираз (14.9), визначимо значення густини теплового імпульсу

$$\Delta A = I_{\infty}^2 t_{\Pi} / S^2 = (7,6 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,5 / (120)^2 = 0,6 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^2.$$

Згідно з графіком, наведеним на рис. 14.5, визначимо кінцеву температуру алюмінієвих шин, під час проходження струму КЗ.  $\theta_{\text{кін}} \approx 110$  °С. Вона нижча за допустиму температуру короточасного нагрівання  $\theta_{\text{доп. Al}} = 200$  °С, умова (14.10) виконується.

Таким чином, обрані шини динамічно та термічно стійкі за заданого струму КЗ.

**Вибір ізоляторів.** Як опорний ізолятор оберемо ізолятор типу ІОР-10-2,5 з номінальною напругою 10 кВ. Отже, умова (10.1) задовольняється.

Перевіряємо ізолятор на зусилля згину, викликане електродинамічною силою  $F_{\text{д}} = 280$  Н. Узагальнюючи вирази (14.11) і (14.12) і, враховуючи, що шини закріплені пліском ( $k_{\text{н}} = 1$ ), маємо

$$F_{\text{изг}} = 280 \cdot 1 = 280 \text{ Н} < 0,6 \cdot 2500 = 1500 \text{ Н}.$$

Умова (14.12) задовольняється.

Прохідний ізолятор типу ІПП-10/400-3,75 також задовольняє вимогу (10.1). Його номінальний робочий струм  $I_{\text{ном}} = 400$  А перевищує  $I_{\text{роб. max}} = 320$  А, умова (10.2) виконується.

Перевірка на механічну стійкість згідно з виразами (14.10) і (14.12)

$$F_{\text{изг}} = 280 \cdot 1 = 280 \text{ Н} < 0,6 \cdot 2500 = 1500 \text{ Н}.$$

дає позитивний результат.

## ■ Розділ 15

### СХЕМИ ТА КОНСТРУКЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИБОРІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

#### 15.1. Класифікація та основні вимоги до розподільних пристроїв

**Розподільний пристрій (РП)** – це електроустановка, призначена для приймання та розподілу електроенергії, для роботи електричних апаратів, шин та допоміжного обладнання. Розподільні

пристрої виготовляють відкритого та закритого типів, а також постачають у вигляді готових комплектів.

*Відкритим розподільним пристроєм (ВРП)* називають РП, у якому все або основне обладнання розташоване на відкритому повітрі. Відкриті РП виконують на напругу 35 кВ і вищу. В аеропортах також використовують ВРП-35 і 10 кВ у складі головної понижувальної підстанції ГПП-35/10 кВ або ГПП-110/10 кВ.

*Закритим розподільним пристроєм (ЗРП)* називають РП, обладнання якого розташоване в будівлі. В аеропортах ЗРП-6 (10) і 0,4 кВ звичайно вмонтовують у будинки, окремо розміщені ТП або інші об'єкти (КДП, аеровокзалу і т. ін.).

*Комплектним розподільним пристроєм (КРП)* називають РП, що складаються із цілком або частково закритих шаф (камер, гнізд) або блоків із вбудованими в них силовими апаратами, пристроями захисту й автоматики, що надходять із заводів у зібраному або цілком підготованому для збирання вигляді. Комплектні РП для зовнішнього встановлення позначають КРПЗ. Докладно конструкції КРП розглянуті в підрозд. 15.4.

**Головні вимоги до конструкції ЗРП.** Закриті РП усіх напруг, зазвичай розміщені в окремих приміщеннях. Можливе розміщення цих ЗРП в одному приміщенні за умови, що їх буде експлуатувати одна організація.

Трансформаторні підстанції і ЗРП не можна розміщувати:

– під душовими, туалетами, приміщеннями з мокрим виробництвом і т. п.;

– безпосередньо під і над приміщеннями, у яких може перебувати більше як 50 людей більш ніж одну годину (на трансформаторні приміщення із сухими трансформаторами або якщо вони з незаймистим наповнювачем цієї вимоги не обов'язково дотримуватись). Виконання цієї вимоги змушує відмовлятися від використання масляних трансформаторів у будівлях вокзалів, пасажирських павільйонах і інших приміщеннях, де постійно скупчуються пасажери.

Конструкція ЗРП повинна забезпечити безпечне та зручне здійснення ремонтних робіт, вільний доступ до обладнання під час оглядів. Правила [11] обумовлюють мінімальні відстані від струмовідних частин до різних елементів ЗРП (табл. 15.1 і рис. 15.1).

Таблиця 15.1

Найменування відстаней	Позначення на рис. 15.1	Відстань, мм за напруги, кВ		
		6	10	35
Від струмовідних частин до заземлених конструкцій і частин споруд	$A_{\text{ф-з}}$	90	120	290
Між провідниками різних фаз	$A_{\text{ф-ф}}$	100	130	320
Від струмовідних частин до суцільних огорожень	Б	120	150	320
Від струмовідних частин до сітчатих огорожень	В	190	220	390
Між неогородженими струмопровідними частинами різних ланцюгів	Г	2000	2000	2200
Від неогороджених струмопровідних частин до підлоги	Д	2500	2500	2700
Від неогороджених виходів із ЗРП до землі	Е	4500	4500	4750
Від контактів і ножа роз'єднувача у відключеному положенні до ошиновки, приєднанні до другого контакту	Ж	110	150	350

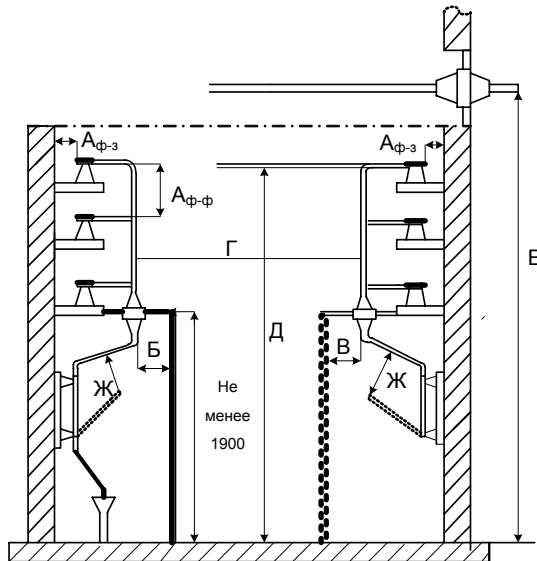


Рис. 15.1



Для огляду обладнання в ЗРП передбачені коридори шириною, не меншого ніж 1 м з однібічним і 1,2 м за двобічного розташування обладнання. У коридорі керування, де розташовані приводи вимикачів або роз'єднувачів, вказані розміри слід збільшити до 1,5 і 2 м відповідно [11].

Із ЗРП передбачений один вихід назовні або в приміщення з вогнетривкими стінами та перекриттями, якщо довжина РП не перевищує 7 м, і два виходи за довжини РП більшої ніж 7 м.

Двері РП повинні відчинятися назовні, мати замки, що відчиняються зсередини без ключа. Встановлення порогів у дверях коридорів неприпустиме. Матеріал підлоги повинен виключати можливість утворення цементного пилу.

Для запобігання випадковим доторканням до неізольованих струмовідних частин вони відділюють від коридорів спеціальні огороження суцільного, сітчастого або змішаного типів (рис. 15.1). На суцільні огороження кріплять приводи вимикачів і роз'єднувачів, через сітчасті – оглядають обладнання. Висота огороження повинна бути не меншою ніж 1,9 м. У сітчастому огороженні розміри осердя не повинні перевищувати 25×25 мм. Лінійні виводи із приміщень ЗРП назовні на не обгороджену територію повинні відстояти від землі не менш ніж на 4,5 м за  $U_{НОМ} = 6...10$  кВ (рис. 15.1).

## 15.2. Схеми електричних з'єднань РП-6...35 кВ

**Варіанти приєднань до збірних шин 6...35 кВ.** Приєднання живильних (вхідних) фідерів і фідерів, що відходять до збірних шин РП-6...35 кВ можуть бути виконані з використанням різної комутаційної апаратури. На рис. 15.2 наведені можливі варіанти виконання таких приєднань.

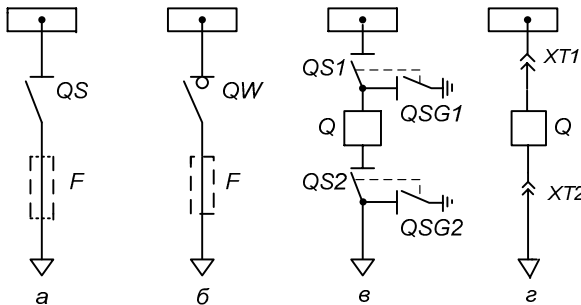


Рис. 15.2

Найпростіше та найдешевше приєднання *живильного фідера* можна здійснити на основі роз'єднувача  $QS$  (рис. 15.2, *a*). Однак оперувати роз'єднувачем можна тільки без навантаження (див. підрозд. 8.2). Тому, для вимкнення фідера роз'єднувачем  $QS$ , необхідно попередньо вимкнути живильний кабель на підстанції, розташованій попереду або повністю зняти навантаження з даної підстанції, що потребує додаткового часу і збільшує кількість необхідних оперативних перемикачів.

З допомогою роз'єднувача до збірних шин може бути приєднаний *вихідний фідер*, захищений, зазвичай, запобіжником  $F$  (на рис. 15.2 показаний пунктиром для варіанта вихідного фідера).

Приєднання, виконане на основі вимикача навантаження  $QW$  (рис. 15.2, *b*), дозволяє безпосередньо комутувати робочі струми до 630 А (найбільші номінальні струми для вітчизняних і закордонних апаратів). Для захисту вихідних фідерів, що відходять, також використовують *запобіжники*  $F$ . Таке приєднання до збірних шин ТП завдяки своїй простоті та досить низькій вартості знаходить у СЕ підприємств і аеропортів найширше використання.

За зростання навантажень ( $I_{\text{роб. max}} > 630$  А), упровадженні системи дистанційного керування режимом роботи розподільних мереж 6...35 кВ або використанні в приєднанні обладнань РЗіА, приєднання слід виконувати на основі силових вимикачів  $Q$  (рис. 15.2, *в*), оснащених автоматизованими приводами (див. підрозд. 8.4). У схемі приєднань окрім вимикача, зазвичай, використовують два роз'єднувачі. Роз'єднувач  $QS1$ , що приєднує вимикач до збірних шин, називають *шинним*, а роз'єднувач  $QS2$ , що приєднує кабельну (повітряну) лінію, – *лінійним*. За оперативного вимкнення необхідно строго дотримуватися послідовності дій: першим вимикають силовий вимикач  $Q$ , потім вимикають лінійний роз'єднувач  $QS2$  і останнім – шинний  $QS1$  (для вмикання послідовність зворотна).

Згідно із Правилами [11] будь-які роботи на високовольтних електроустановках слід виконувати за накладеного заземлення. Сучасні КРУ оснащені стаціонарними заземлювачами, що входять у конструкцію роз'єднувачів. Так, наприклад, унаслідок вимкнення силового вимикача  $Q$  (рис. 15.2) і роз'єднувачів  $QS1$  і  $QS2$  заземлювачі  $QSG1$  і  $QSG2$  вмикаються, надійно заземлюючи вимикач  $Q$  і приєднану лінію.

Найбільш прогресивним рішенням є виконання приєднань на основі викотих комірок (рис. 15.2, *г*), у яких силові вимикачі  $Q$

розташовані на візках, а роль роз'єднувачів виконують штепсельні роз'єми  $XT1$  і  $XT2$ . Такий варіант КРУ має такі переваги:

- у разі аварії в КРП, пошкоджену комірку можна замінити на резервну за кілька хвилин, що суттєво зменшує час перерви в електропостачанні;

- ремонт пошкодженої комірки можна виконати в спеціально оснащених лабораторії, що підвищує якість ремонту.

Слід зазначити, що роз'єднувач є «найслабшим» елементом РП. Виконання роз'єднувачами комутацій з неправильною послідовністю і їх відмова часто призводять до аварій в РП. Тому, збільшення кількості роз'єднувачів у РП підвищує ймовірність помилки персоналу під час виконання оперативних перемикачів.

**Схеми електричних з'єднань РП-6...35 кВ.** Існує значна кількість схем електричних з'єднань високовольтних РП: схеми з однією і двома системами збірних шин, кільцеві схеми, схеми з обхідною системою шин та інші [16]. У СЕ 6-35 кВ промислових підприємств і аеропортів застосовують такі, найбільш прості з них.

**Схема РП з однією несекаційною системою збірних шин** (рис. 15.3) відрізняється простотою потребуючи мінімальної кількості оперативних перемикачів у разі вимкнення або увімкнення фідерів. Так, для відключення лінії Л1 досить відключити вимикач  $Q3$ , а для виведення його в ремонт ще й роз'єднувачі  $Q1$  і  $Q2$  (на рис. 15.3 роз'єднувачі з метою спрощення позначені косою рисою). Схему легко виконати з комплектних камер, з'єднавши їх загальною системою шин А.

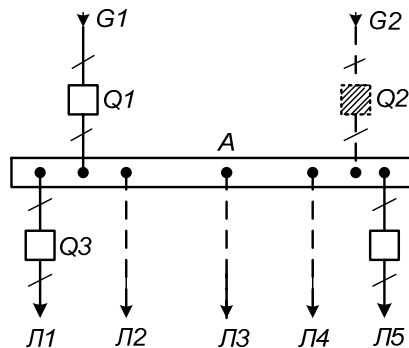


Рис. 15.3

Окрім основного джерела  $G_1$  у схемі можна передбачити відімкнення резервного джерела  $G_2$ , ручним способом, яке може бути обладнане пристроєм АВР. Однак при цьому слід мати на увазі, що і за наявності двох незалежних джерел  $G_1$  і  $G_2$ , розглянута схема з однією несекційною системою шин для таких вихідних ліній, Л1 – Л5 стає єдиним незалежним джерелом, так як за КЗ на шинах А вимкнуться обидва вводи.

**До недоліків розглянутої схеми слід віднести:**

– необхідність вимкнення всіх споживачів для ремонту (профілактичного або аварійного) збірних шин А або будь-якого шинного роз'єднувача;

– за КЗ, наприклад, у лінії Л1 і відмови її РЗ або вимикача  $Q_2$  спрацює захист, розташований попереду (неселективне вимкнення) і всі споживачі, підімкнені до шин А, знеструмляться.

Розглянуту схему РП широко використовують у СЕ підприємств і аеропортів, що мають одне централізоване джерело електроенергії. За наявності на підприємстві автономних джерел схему можна використовувати в ТП живильних електроприймачів другої та першої категорій, за відсутності АДЖ – для електроприймачів третьої категорії.

**Схема РП з однією секційною системою збірних шин** (рис. 15.4) вирізняється достатньою простотою і наочністю, що дозволяє знизити імовірність помилкових дій персоналу. Кожна секція шин В1 і В2 у нормальному режимі отримує електроенергію від свого незалежного джерела  $G_1$  і  $G_2$ . Секціонування шин може бути здійснене або двома роз'єднувачами  $QS_1$  і  $QS_2$ , або силовим вимикачем  $QSB$  (на рис. 15.4 він заштрихований) із двома роз'єднувачами.

Установлення тільки одного секційного роз'єднувача небажане, тому що у разі виведення його на профілактику необхідно було б вимкнути обидві секції шин РП, знеструмивши всі електроприймачі на час профілактики.

Використання двох роз'єднувачів дозволяє залишити в роботі одну секцію, вимкнувши ремонтований роз'єднувач із боку цієї секції іншим роз'єднувачем.

Установка секційного вимикача  $Q_3$  доцільна за наявності в СЕ підприємства системи дистанційного керування або під час виконання ним функцій секційного АВР. Схема має досить високу на-

дійність, так як дозволяє подавати електроенергію на всі фідери, що відходять за відмови одного із джерел (при цьому спрацьовує секційний АВР або вмикаються два секційні роз'єднувачі).

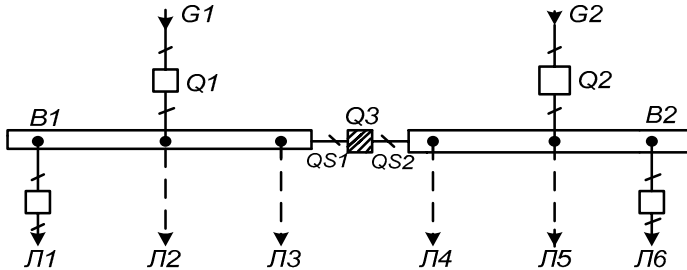


Рис. 15.4

У разі неусунутого КЗ на вихідному фідері (за відмови його захисту або вимикача), КЗ на секції шин або під час виконання на ній профілактичних робіт знеструмлюють тільки відімкнені до секції електроприймачі. Однак, враховуючи, що на важливих об'єктах (першої категорії надійності електропостачання) встановлене обладнання АВР з боку 0,4 кВ, більшість електроприймачів буде продовжувати отримувати електроенергію.

До недоліків розглянутої схеми слід віднести відсутність централізованого резервного живлення під час виконання профілактичних або ремонтних робіт на одній із секцій шин (відповідне джерело доводиться вимикати), а також вимкнення деяких електроприймачів, що живляться від цієї секції, які не мають резервного введення.

Імовірність відімкнення другого робочого джерела за час виконання профілактики, яку проводять раз на рік і яка триває кілька годин, досить мала. Тому розглянуту схему РП слід рекомендувати до використання в СЕ 6–35 кВ підприємств і аеропортів, що мають два централізовані джерела живлення, розподільна мережа яких виконана за подвійною радіальною схемою. Після встановлення автономного джерела схема буде задовольняти вимоги до електропостачання також електроприймачів першої категорії особливої групи.

Подальше вдосконалювання електричних схем РП-6...35 кВ пов'язане з використанням другої системи шин і потребує більших капітальних витрат.

**Схема РП із двома системами збірних шин**, зображена на рис. 15.5, її використання дозволяє підмикати будь-яку лінію Л, що відходить до кожного з двох джерел  $G1$  або  $G2$ .

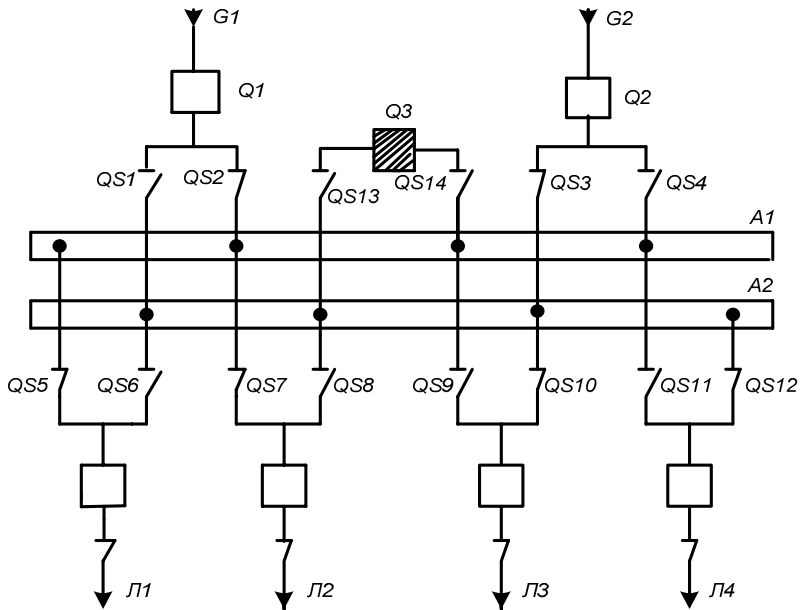


Рис. 15.5

У нормальному режимі джерело  $G1$  підімкнене до першої системи шин  $A1$  (замкнений роз'єднувач  $QS2$ ), а джерело  $G2$  – до другої системи шин  $A2$  (замкнений роз'єднувач  $QS3$ ). Шиноз'єднувальний вимикач  $Q3$  відімкнений. Лінії  $Л1$  і  $Л2$ , що відходять, підключені до шин  $A1$  (замкнені роз'єднувачі  $QS5$  і  $QS7$ ), а лінії  $Л3$  і  $Л4$  – до шин  $A2$  (замкнені роз'єднувачі  $QS10$  і  $QS12$ ).

Для профілактики, наприклад, першої системи шин  $A1$  необхідно перевести живлення ліній  $Л1$  і  $Л2$  на джерело  $G2$ . Для цього виконують такі операції. Вмикають шиноз'єднувальний вимикач  $Q3$ , при цьому джерела  $G1$  і  $G2$  вмикаються для паралельної роботи. Потім вмикаються роз'єднувачі  $QS6$  і  $QS8$  і вимикаються  $QS5$  і  $QS7$ . При цьому лінії  $Л1$  і  $Л2$  виявляються переведеними на живлення від шин  $A2$  без перерви електропостачання. Далі вимикаються вимикачі  $Q1$ ,  $Q3$  і роз'єднувачі  $QS1$  і  $QS13$ . При цьому збірні шини  $A1$

виявляються вимкненими, і на них можна починати виконувати профілактичні роботи.

У разі оснащення вимикача  $Q1$  пристроєм АВР джерело  $G1$  буде резервувати джерело  $G2$  (роз'єднувач  $QS2$  повинен бути вимкнений) на час виконання робіт. Таким чином, розглянута схема РП дозволяє зберігати в роботі всі приєднання, зокрема обидва джерела під час виконання профілактики на будь-якій секції шин, що забезпечує її високу надійність.

Недоліком схеми є необхідність виконання значної кількості перемикачів роз'єднувача в строгій послідовності. Для усунення можливих помилок персоналу в РП необхідне обов'язкове використання спеціальних блокувань від неправильних дій роз'єднувачами. Так само, під час увімкнення джерел  $G1$  і  $G2$  на паралельну роботу також можливі значні поштовхи і перетоки потужності. Окрім того, розглянута схема потребує використання більшої кількості обладнання і більших за розмірами приміщень, тобто підвищених капітальних витрат. У зв'язку із цим схеми РП із двома системами шин поки що нечасто використовують СЕ підприємств.

### 15.3. Схеми РП-0,4 кВ і електроприймачів 1–3 категорій

**Варіанти приєднань до збірних шин РП-0,4 кВ.** Приєднання живильних фідерів і фідерів, що відходять до шин РП-0,4 кВ найпростіше виконати з допомогою рубильника  $S$  (рис. 15.6, *а*), що дозволяє комутувати робочі струми фідера. Для захисту вихідної лінії від струмів перевантаження і КЗ у схемі використовують плавкий запобіжник  $F$ . Таке приєднання найдешевше, але йому властиві певні недоліки. Так, для заміни перегорілого запобіжника потрібна резервна плавка вставка необхідного номіналу, трохи часу і кваліфікований персонал.

У схемі, де використовуються більш дорогі автоматичні вимикачі  $QF$  (рис. 15.6, *б*), ці недоліки відсутні. Рубильник  $S$  тут необхідний для вимкнення від збірних шин автомата під час виконання на ньому профілактичних і ремонтних робіт.

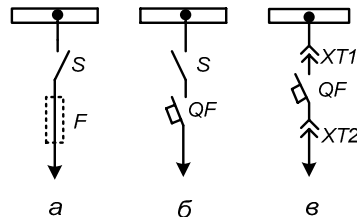


Рис. 15.6

Потужнострумові автомати, що мають значну масу, встановлюють на викотних візках. Під час викочування візка відбувається розмикання штепсельних рознімів  $XT$  (рис. 15.6, *в*), і автомат вимикається з двох боків.

**Схеми електричних з'єднань РП-0,4 кВ.** Схеми електричних з'єднань РП-0,4 кВ принципово не відрізняються від схем РП-6...35 кВ. Вони також можуть бути виконані з однією несекціонованою (див. рис. 15.3) або секціонованою системою шин (див. рис. 15.4). На зазначених схемах замість високовольтного комутаційного обладнання (роз'єднувачів, вимикачів навантаження та силових вимикачів) використовують низьковольтні апарати (рис. 15.6).

**Схеми електроживлення ЕП 3-ї категорії.** Для електропостачання електроприймачів 3-ї категорії досить мати одне незалежне джерело  $G$  (рис. 15.7) і, у разі його відмови мати можливість протягом доби відновити електропостачання [11]. Тому, електроприймачі 3-ї категорії, зазвичай, підключають до однієї несекціонованої системи шин, використовуючи найдешевший варіант приєднання з рубильника (див. рис. 15.6, *а*).

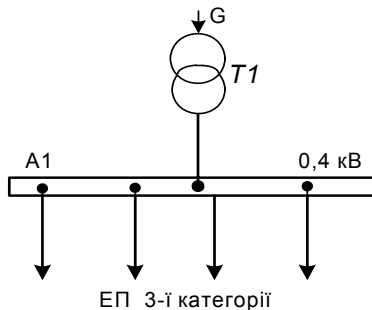


Рис. 15.7

праці [11], слід здійснювати від двох незалежних джерел (вводів). У разі відмови одного з вводів необхідно передбачити можливість *ручного* підмикання до іншого вводу.

За наявності на підстанції двох централізованих вводів  $G1$  і  $G2$  електроприймачі 2-ї категорії доцільно підмикати до однієї з двох секцій шин В1 і В2 РП-0,4кВ (рис. 15.8, *а*). Між секціями встановлюють секційний рубильник  $S3$ .

У разі відмови одного із вводів, наприклад  $G1$ , ручним способом вимикають ввідний рубильник  $S1$ , а потім замикається секційний рубильник  $S3$ . При цьому всі електроприймачі секції В1 перемикаються на постачання від жерела  $G2$ .

Схеми електроживлення **ЕП 2-ї категорії.** Електропостачання електроприймачів 2-ї категорії, згідно з вимогами



Якщо на підстанції встановлений один силовий трансформатор (основне централізоване введення), то, як резервне джерело, можна використовувати автономний дизель-генератор ДГА (рис. 15.8, б). За справного основного вводу шини А1 живильні електроприймачі 2-ї категорії підімкнені до нього (автомат  $QF1$  увімкнений. У разі відмови основного вводу автомат  $QF1$  вимикається, ручним способом запускають дизель-генератор і вмикається автомат  $QF2$ . Електроприймачі 2-ї категорії переходять на живлення від автономного джерела. За наявності на підстанції потужних електроприймачів 3-ї категорії для них доцільно передбачити окремі шини А2 (на рис. 15.9 показані пунктиром), на які електроенергія від ДГ подаватися не може.

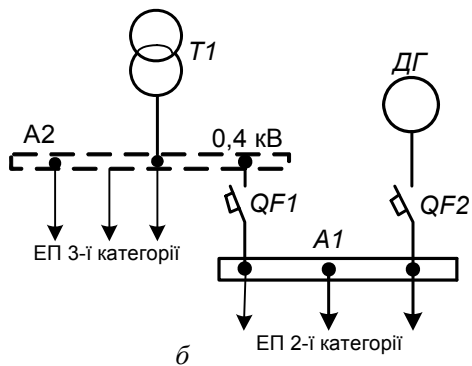
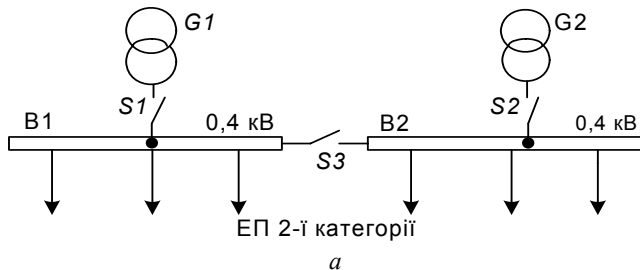
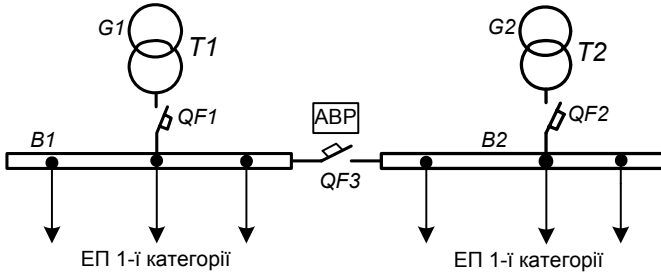


Рис. 15.8

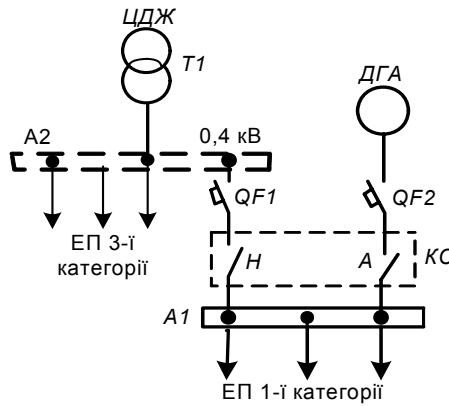
**Схеми електроживлення ЕП 1-ї категорії.** Згідно з працею [11] ЕП 1-ї категорії повинні отримувати електроенергію від двох незалежних джерел з автоматичним підімкненням до резервного вводу.

За наявності на підстанції двох незалежних централізованих високовольтних введів (увімкнень)  $G1$  і  $G2$  (рис. 15.9, *a*) і двох силових трансформаторів  $T1$  і  $T2$  електроприймачі 1-ї категорії доцільно живити від однієї із двох секцій шин  $B1$  або  $B2$ . У нормальному режимі кожна секція і відповідні ЕП підімкнені до свого вводу.

У разі відмови одного із джерел, наприклад,  $G2$ , спочатку, за сигналом пристрою АВР, відбувається вимкнення ввідного автомата другої секції  $QF2$ , а потім увімкнення секційного автомата  $QF3$ .



*a*



*б*

Рис. 15.9

Час перемикання секції  $B2$  на резервне для неї джерело  $G1$  звичайно не перевищує 1–3 с. За наявності на об'єкті й електроприймачів 2-ї та 3-ї категорії значної потужності для їх живлення доцільно виділити окрему шину.

Якщо ж сумарна потужність таких електроприймачів незначна, їх можна підмикати безпосередньо до шин В1 і В2.

У разі вводу в підстанцію тільки одного централізованого джерела живлення (ЦДЖ, рис. 15.9, б) як друге доцільно використовувати автономне джерело, наприклад, *автоматизовані* дизель-генераторні установки типу ДГА-24, ДГА-48, АСДА-100 або АСДА-200 (цифри вказують на потужність у кіловатах).

У нормальному режимі електроприймачі 1-ї категорії отримують електроенергію від ЦДЖ через увімкнений контактор Н контакторної станції КС (автомати *QF1* і *QF2* увімкнені). У разі відмови централізованого джерела контактор Н вимикається, одночасно подається команда на запускання автономного джерела. Коли напруга на генераторі сягне номінального значення (через 8...20 с і залежно від типу установки), спрацьовує контактор А, підмикаючи шини А1 до резервного джерела.

За наявності на об'єкті потужних електроприймачів 3-ї категорій для їх живлення доцільно виділити окрему шину А2 (на рис. 15.9, б показана пунктиром). Як видно з роботи схеми, резервне джерело живити шину А2 не може, тому його потужність слід обирати залежно від сумарної потужності електроприймачів шин А1, з враховуючи одночасність їх роботи.

На сучасних підприємствах, зокрема й в аеропортах, встановлюють значну кількість електроприймачів 1-ї категорії особливої групи [ 11], поновлення електроживлення яких повинне бути гарантоване через заданий час (звичайно це кілька секунд). Для підімкнення таких електроприймачів створюють спеціальні РУ із *шинами гарантованого живлення* (ШГЖ).

Електроприймачі **1-ї категорії особливої групи, що допускають перерви живлення до  $t_{пер} \leq 1$  с**, можуть отримувати електроенергію за схемою, наведеною на рис. 15.10. На схемі є три незалежні джерела – централізовані *G1*, *G2* і автономне *G3*, дві шини гарантованого живлення В1 (ШГЖ1) і В2 (ШГЖ2), з'єднані між собою секційним АВР (автомат *QF7*), і дві шини А1 і А2 для підімкнення електроприймачів 2-ї і 3-ї категорій (у разі їх відсутності на об'єкті або малій їх потужності шини А1 і А2 можуть не встановлювати). У схемі використані також дві контакторні станції КС1 і КС2. За наявності якісної напруги на двох централізованих джерелах *G1* і *G2* у контакторних станціях замкнені контактори основних вводів

Н і напруга від цих джерел подається на відповідні шини В1 і В2. У разі відмови одного із джерел, наприклад,  $G_2$ , відмикається контактор Н станції КС2 і починається запуск автономного джерела  $G_3$ . Одночасно спрацьовує АВР на автоматі  $QF7$  (увідний автомат  $QF6$  перед цим вимикається), і шина ШГЖ2 на час запускання джерела  $G_3$  підмикається до шин ШГЖ1, тобто до джерела  $G_1$ .

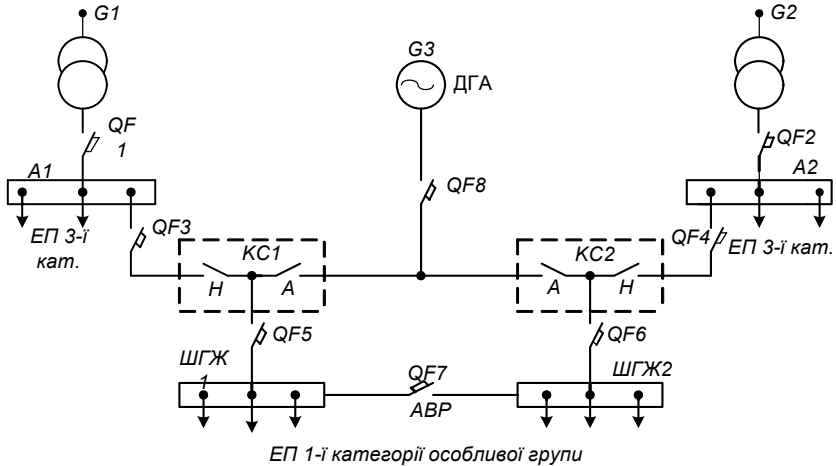


Рис. 15.10

Після досягнення на виході джерела  $G_3$  номінальної напруги:

- вмикається автомат  $QF8$ , потім – контактор резервного вводу А станції КС2;
- вимикається секційний автомат  $QF7$  і автомат  $QF6$  підмикає шини ШГЖ2 до автономного джерела  $G_3$ .

Після відновлення якісної напруги на джерелі  $G_2$  контактор А в станції КС2 вимикається, а контактор Н вмикається, перемикаючи шини ШГЖ2 знову на джерело  $G_2$ . З незначною затримкою відбувається зупинення автономного джерела  $G_3$ . Так як схема цілком симетрична, в аналогічній послідовності відбуваються перемикачів і у разі відмови джерела  $G_1$ .

Переваги схеми такі:

- схема повністю виконана із серійних виробів, що не потребують дороблень під час їх взаємодії;
- жодна поодинокa відмова будь-якого елемента схеми не призводить до одночасного порушення живлення обох шин ШГЖ;

– раціонально використовується потужність автономного джерела, що живить тільки шини ШГЖ.

Однак схемі властиві і недоліки:

– важко домогтися селективної роботи кількох послідовно ввімкнених автоматів ( $QF7$ ,  $QF3$  і  $QF5$ ) у комплексі із секційним автоматом  $QF7$ ;

– не повною мірою використовується обладнання, що входить у комплект автономного джерела;

– значна кількість обладнання.

Поява на підприємствах і в аеропортах електроприймачів, технологічна робота яких порушується навіть за короткочасних перерв електропостачання (обчислювальні центри, інструментальні системи посадки та ін.) зумовила появу РП із *шинами безперервного живлення* (ШБЖ), перерви в подаванні електроенергії на яких взагалі не припустимі, або не повинні перевищувати сотих часток секунди.

Електроприймачі *1-ї категорії особливої групи, що потребують безперебійного електроживлення* ( $t_{\text{пер}} = 0$ ), отримують електроенергію від спеціальних пристроїв безперервного живлення. Вони можуть бути виконані на основі маховиків, що запасують кінетичну енергію, або випрямно-інверторних статичних перетворювачів, оснащених акумуляторами.

Схема з використанням маховичкового агрегата типу АГМ-20 (агрегат гарантованого живлення маховичковий) наведена на рис. 15.11, а, де  $G1$  і  $G2$  – централізовані джерела,  $G3$  – автономний дизель-генератор,  $КС$  – контактні станції, ШБЖ – шини безперервного живлення.

Агрегат АГМ-20 складається з асинхронного електродвигуна  $M$  потужністю 28 кВт і синхронного трифазного генератора потужністю 20 кВА, з'єднаних одним валом, на якому закріплений маховик діаметром 1040 мм і масою 1520 кг.

У нормальному режимі електропостачання енергія від джерела  $G1$  через контактор основного вводу  $H$  станції  $КС1$  і замкнений контактор  $КМ1$  надходить на електромотор  $M$ . Він обертає генератор  $G$ , електроенергія від якого через контактор основного вводу  $H$  станції  $КС2$  надходить до ШБЖ.

У разі відмови джерела  $G1$  станція  $КС1$  перемикає живлення АГМ-20 на джерело  $G2$  за час не більший ніж 1 с. У разі відмови й

джерела  $G2$  запускається автономне джерело  $G3$ . Після виходу його на номінальну частоту обертання спрацьовує контактор  $KM2$  ( $KM1$  відімкнувся раніше), підімкнувши двигун  $M$  до джерела  $G3$ . За час запускання джерела  $G3$  генератор  $G$  виробляє електроенергію за рахунок кінетичної енергії, накопиченої в маховику. Запас енергії маховика достатній для вироблення генератором 100 % потужності протягом 20 с. При цьому, унаслідок гальмування ротора генератора, його частота знижується до 42,6 Гц.

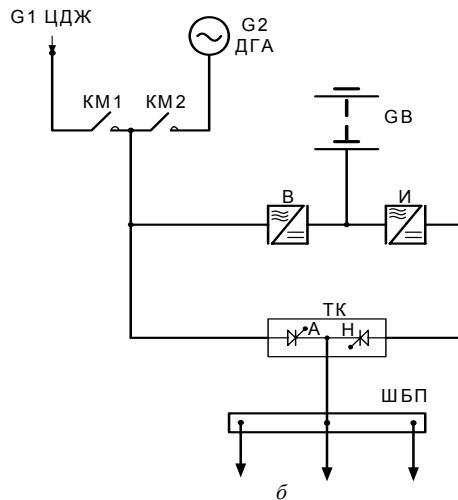
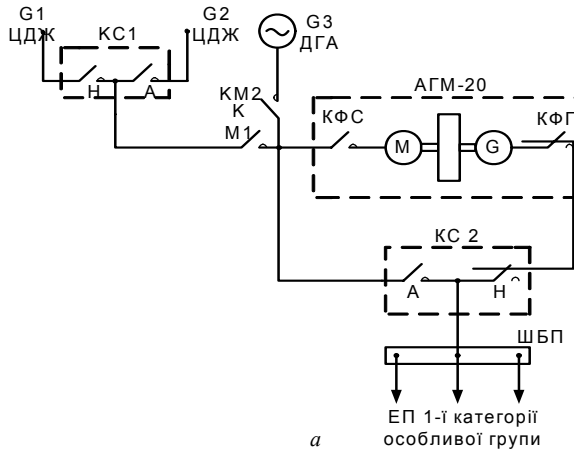


Рис. 15.11

Таким чином, ШБЖ отримує безперервне живлення у разі відмов двох централізованих джерел  $G1$  і  $G2$ .

Контакторна станція КС2 призначена для підімкнення ШБЖ безпосередньо до централізованих джерел у разі відмови самого агрегата АГМ-20.

Експериментальна експлуатація агрегата АГМ-20 виявила два його основні недоліки:

- малий ресурс агрегата (3000 год), який, головним чином, обмежений надійністю опорних підшипників;

- не всі електроприймачі, підімкнені до ШБЖ, допускають роботу за зниження частоти до 43 Гц.

Системи безперервного електропостачання, що працюють на статичних перетворювачах, в експлуатації надійніші. Один з можливих варіантів такої системи наведений на рис. 15.11, б. Система отримує живлення від двох або трьох джерел ( одне з яких може бути автономним).

У випрямлячі В трифазна напруга 380 В перетворюється на постійну напругу 240 В. У інверторі І відбувається зворотне перетворення постійної напруги на трифазну змінну.

Акумуляторна батарея  $GB$  у нормальному режимі постійно підзаряджається. Під час перемикань зовнішніх джерел або у разі їх відмови інвертор отримує енергію від батареї  $GB$ . Час, протягом якого інвертор може виробляти електроенергію необхідної якості, залежить від ємності акумуляторної батареї та потужності навантаження (зазвичай це 0,25...2 год).

У разі відмови інвертора І, у схемі передбачений тиристорний перемикач Т, який за час не більший ніж 0,02 с (один період) підімкне ШБЖ безпосередньо до централізованого джерела живлення.

#### **15.4. Комплектні розподільні пристрої 6...35 кВ і 0,4 кВ**

**КРП-6,10 кВ.** В Україні високовольтні КРП на середні напруги 6–35 кВ випускають кілька підприємств. Камери серії КСО-393 (рис. 15.12) мають понад 20 варіантів комплектування, кожен з яких має свій каталоговий номер (рис. 15.13), і відповідну схему первинних з'єднань. У серії як комутаційні апарати використовують роз'єднувачі, вимикачі навантажень та вакуумні силові вимикачі (останні мають у каталоговому номері літеру В). Камери КСВ-393 мають такі технічні параметри:

- номінальна напруга – 6; 10 кВ;
- номінальний струм головних кіл з вимикачами навантаження – 630 А;
- номінальний струм трансформаторів струму – 50; 75; 100; 150; 200; 300; 600; 1000; (1600) А;
- номінальний струм відімкнення вимикача навантаження – 0,63 кА;
- номінальний струм відімкнення вакуумного вимикача – 20 кА;
- номінальний струм запобіжників 6 кВ: 31.5; 50; 80; 100; 125А;
- номінальний струм запобіжників 10 кВ: 31.5; 40; 63; 80; 100 А
- номінальний струм збірних шин – 630; 1000; (1600) А;
- номінальний струм шинних мостів – 630; 1000; (1600) А;
- струм електродинамічної стійкості (амплітуда) – 51 кА;
- струм термічної стійкості – 20 кА;
- час проходження струму термічної стійкості 2 с для камер на 630 А, 3 с для камер на 1000 А і 1 с для камер з вимикачами навантаження.



Рис. 15.12

Камери з каталоговим номером 01 і 02 оснащені роз'єднувачами *QS* і заземлювачами *QSG* приєднаних до них ліній. У камері 02 додатково встановлений заземлювач шин *QSG1*. Слід пам'ятати, що роз'єднувачем можна комутувати ланцюг тільки без навантаження.



У камері 03 як комутаційний апарат використаний вимикач навантаження  $QW$ , що дозволяє комутувати навантаження до 630 А. Як видно з рис. 15.13, розглянуті камери не комплектують запобіжниками, тому їх доцільно використовувати як вхідні.

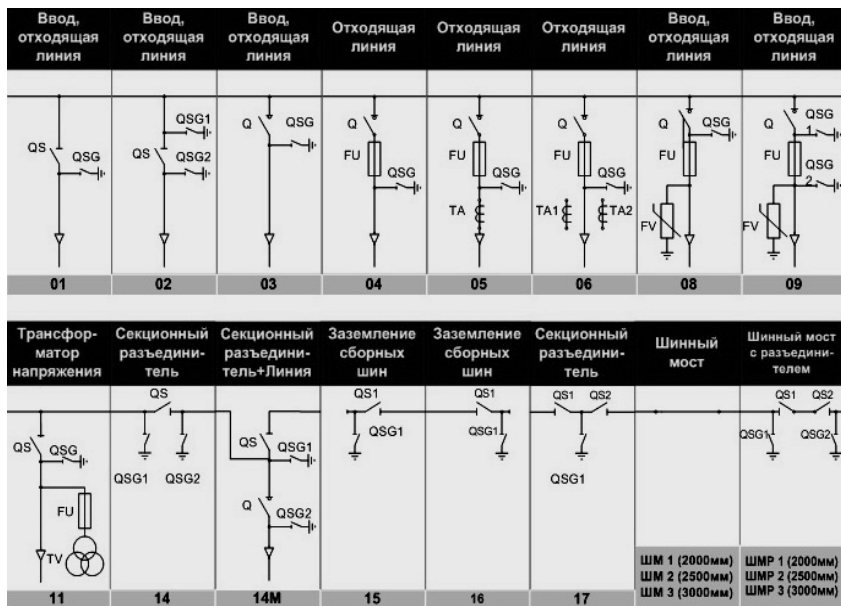


Рис. 15.13

Камери з номерами 04...09 оснащені високовольтними запобіжниками  $FU$ , вимикачами навантаження і заземлювачами ліній, що дозволяє використовувати їх для комутації і захисту ліній, що відходять від струмів КЗ і перевантаження. Камеру 05 порівняно з камерою 04 доповнено трьома трансформаторами струму  $TA$  для пофазного контролю струму в лінії. У камері 06 встановлено лише два трансформатори струму для підімкнення лічильників.

У камерах 08 і 09 встановлені розрядники  $FV$ , які захищають обладнання підстанції від можливих перенапруг, що надходять ззовні. Тому, ці камери доцільно використовувати для приєднання повітряних ліній електропередач. Камеру 11, укомплектовану вимірювальним трансформатором напруги  $TV$ , вводять до складу РП у разі необхідності вимірювати напругу на вводі і підімкнення лічильників електроенергії.

З'єднання двох секцій шин, розташованих уздовж однієї стіни, можна здійснити за допомогою камер 14, 14М і 17. У камері 14 розташований один секційний роз'єднувач і два заземлювачі для кожної із секцій шин. У камері 14М, окрім роз'єднувача *QS* передбачена можливість приєднати зовнішній ввід через вимикач навантаження *QW*. У камері 17 встановлені два роз'єднувачі і один заземлювач, який можна використовувати для заземлення лівої або правої секцій. Якщо секції шин розташовані на протилежних стінах, то їх з'єднання можна виконати з допомогою шинних мостів (ці камери не мають каталогового номера). У разі необхідності виконати заземлення в окремих камерах використовують камери 15 і 16.

Використання вакуумних силових вимикачів дозволило розширити номенклатуру камер. Ці камери з вмонтованими в них мікропроцесорними пристроями РЗіА дозволяють реалізовувати різні види релейних захистів і пристроїв АВР (камера 13В – АВР на ввіді, камера 14В – секційний АВР). Камери 3В і 6В можна використовувати для приєднання вхідних і відхідних ліній. У камері 12В встановлений вимірювальний трансформатор напруги, що дозволяє контролювати напругу на вході ТП.

**Приклад.** *Необхідно обґрунтувати види високовольтних апаратів і скомпонувати РП-10 кВ для структурної схеми, наведеної на рис. 15.14.*

*Оскільки максимальний робочий (післяварійний) струм на ввіді проектованої ТП дорівнює 753 А (рис. 15.14), то необхідно використати комірки з дорогими силовими вимикачами.*

*Вважаючи, що вихідні лінії не оснащені РЗіА і дистанційним керуванням, а їх струми не перевищують 630 А. ( $I_{Д} = 115,6$  А,  $I_{Т} = 34,7$  А), то приєднаємо ці фідери до збірних шин через комірки з недорогими вимикачами навантаження та запобіжниками.*

*Тому, обираємо серію КРП на 10 кВ, комплектувану силовими вимикачами та вимикачами навантаження – КСО-393.*

*1. Спочатку необхідно перевірити відповідність технічних характеристик камер серії КСО-393 умовам застосування в проектованій ТП за такими параметрами:*

- номінальною напругою  $U_{ном} = 10$  кВ  $\geq U_{мережі} = 10$  кВ;*
  - номінальним струмом  $I_{ном} = 1000$  А  $\geq I_{роб.мах} = 753$  А;*
  - електродинамічною стійкістю  $i_{ел.дин} = 51$  кА  $\geq i_y = 22$  кА;*
  - термічною міцністю  $I_T^2 t_T = 20$  кА<sup>2</sup>·с  $\geq I_{КЗ}^2 t_{відімк} = 8$  кА<sup>2</sup>·1,5 с.*
- Умови виконуються.*

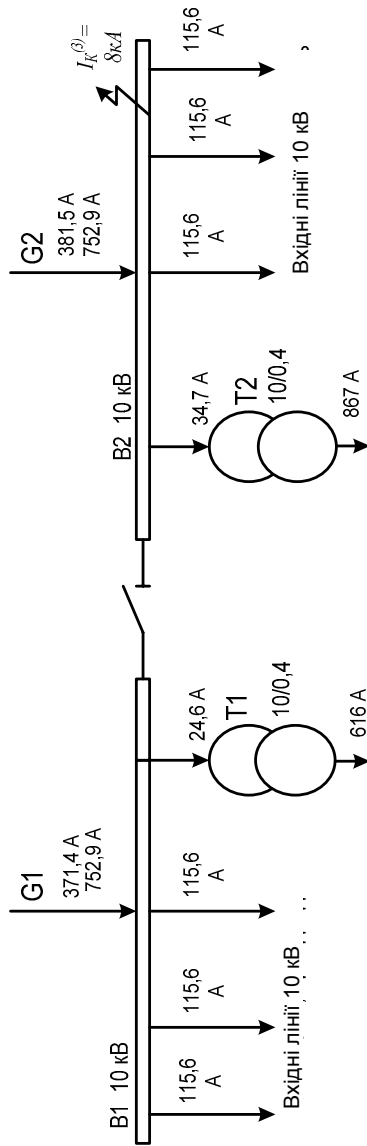


Рис. 15.14

2. Для приєднання вхідних ліній, у яких максимальний струм дорівнює 753 А, як пояснювалося вище, доведеться використати камери із силовими вимикачами. У серії КСО-398, це камери 03В, 06В, 12В або 17В, оснащені вакуумними силовими вимикачами. У камері 03В роз'єднувач–заземлювач приєднаний після вимикача, що дозволяє заземлити заздалегідь відімкнений кабельний ввід. У камері 06В роз'єднувач – заземлювач встановлений до силового вимикача, що дозволяє виконувати ремонтні роботи на вимикачі, залишаючи збірні шини під напругою.

У камері 12В додатково встановлені вимірювальний трансформатор напруги для контролю напруги на вводі та у місці підімкнення лічильників, а також заземлювач збірних шин. У нашому прикладі на вводах доцільно використати універсальну камеру 12В.

3. Для приєднання до збірних шин вихідних ліній Л1–Л6, як пояснювалося вище, доцільно використати вимикачі навантаження із запобіжниками. Це камери 04, 05, 06 і 09. (камера 03 має у своєму складі тільки вимикач навантаження із заземлювачем). Камера 04 оснащена високовольтними запобіжниками, а камери 05 і 06 додатково трансформаторами струму. Камера 09 має у своєму складі вентиляльні розрядники, які не будуть задіяні, оскільки вихідні лінії виконані кабелями.

Зважаючи, що необхідно захистити вихідні лінії від струмів КЗ і перевантажень з допомогою запобіжників, а також на необхідність контролювати струми в цих лініях, зупинимося на камері 06, що має запобіжники і два трансформатори струму (ТС).

4. Для приєднання силового трансформатора до збірних шин використовуємо камеру 05 оснащену запобіжниками та трьома ТС для приєднання амперметрів, що дозволяють контролювати струми в трьох фазах на вході трансформатора.

5. У разі відмови одного із вводів, приєднані до нього вихідні лінії, зі своїми збірними шинами необхідно жити від іншого джерела. Необхідно мати можливість з'єднати секції шин між собою, для цього – у РП встановимо камеру 11 (ШМР) – шинний міст з двома роз'єднувачами.

Остаточне компонування РП-10 кВ показано у вигляді схеми заповнення РП, наведеної на рис. 15.15.

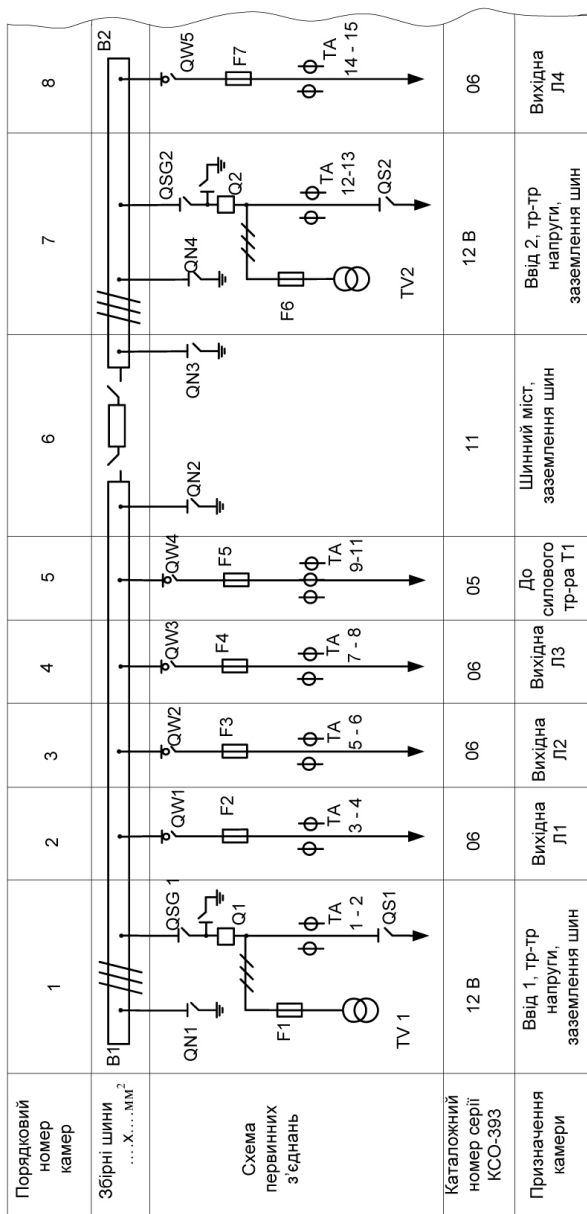


Рис. 15.15

**КРП-0,4 кВ.** Розподільні пристрої напругою меншою ніж 1000 В нині виконують із панелей і щитів заводського виготовлення. Широке застосування знаходять панелі серії ЩО-90 (щити однобічного обслуговування 1990 р. розроблення). Панелі ЩО-90 мають такі технічні характеристики:

- номінальна напруга змінного струму – 660/380 В;
- частота – 50 Гц;
- номінальний струм до 4000 А;
- струм термічної стійкості збірних шин не менший ніж 40 кА;
- струм динамічної стійкості збірних шин панелей 20, 40 кА;
- габаритні розміри: 700x600x2000 мм.

**Приклад.** Враховуючи, що максимальний струм у РП-0,4 кВ. дорівнює 1484 А, перевіримо можливість компоновання РП-0,4 кВ з допомогою панелей ЩО-90.

Як бачимо, умови номінальної напруги, номінального струму, струму термічної та динамічної стійкості задовольняються.

Враховуючи, що максимальний струм на ввіді РП (від силового трансформатора в післяаварійному режимі) дорівнює 1484 А (рис. 15.16), використовуємо ввідну панель з шинним приєднанням ЩО90-1114, оснащену автоматом ВА55 на номінальний струм 1600 А.

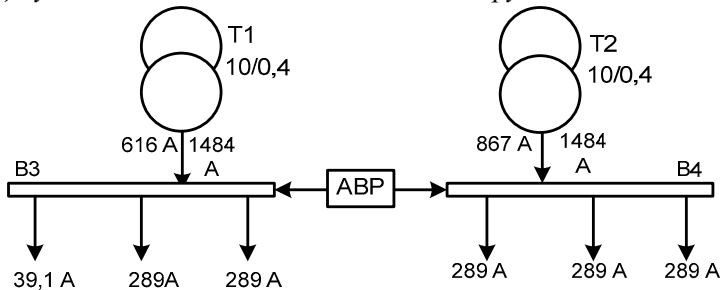


Рис. 15.16

До кожної секції РП необхідно приєднати по три вихідні лінії. Для цих приєднань можна використати розподільні панелі укомплектовані запобіжниками або автоматичними вимикачами.

Наприклад, можна використати панель ЩО90-1404 із запобіжниками, у якій чотири приєднання зі струмами до 400 А (у нашому прикладі струми на вихідних лініях 289 А і 39 А).

Панелі укомплектовані автоматами, зручними в експлуатації, але вони дорожчі за панелі із запобіжниками. Проте на струми до

400 А розподільних панелей з автоматами промислово не випускають (випускають на струми до 200 А). Тому зупинимося на розподільній панелі ЩО90-1404 із чотирма вихідними приєднаннями, захищеними запобіжниками (одне приєднання не буде задіяне, його можна використовувати як резервне).

Між секціями низьковольтних шин В3 і В4 передбачене встановлення АВР 0,4 кВ. Враховуючи, що максимальний струм через автомат панелі АВР дорівнює 867 А, між секціями шин використовуємо секційну панель ЩО90-1308, оснащену автоматом на струм менший ніж 1000 А і облаштовану АВР.

Нарешті, з боків секцій передбачимо встановлення бічних панелей ЩО90-1605 і ЩО90-1606. Компонування показане на рис. 15.17 у вигляді схеми РП-0,4 кВ.

## 15.5. Конструкції трансформаторних підстанцій аеропортів

На сучасних підприємствах трансформаторні підстанції 6–35 кВ практично всюди використовують закриті розподільні пристрої. Розглянемо як приклад конструкцію та компонування двох типових для аеропортів підстанцій: вогонькової ТП і центральної розподільної підстанції (ЦРП).

Вогонькові ТП призначені для подавання електроенергії світло-сигнальним системам посадки повітряних суден. Від цих підстанцій, зазвичай, живляться і радіотехнічні засоби забезпечення посадки: курсові радіомаяки (КРМ), глісадні радіомаяки (ГРМ), ближні приводні радіомаяки (БПРМ) та ін. Усі ці об'єкти відносять до електроприймачів 1-ї категорії особливої групи і тому повинні мати можливість отримувати електроенергію від трьох незалежних джерел (див. підрозділ 15.3).

Вогонькова ТП розташована в бетонному або цегляному одноповерховому будинку (рис. 15.18). Електроенергія напругою 6–10 кВ від двох централізованих введів по двох кабельних лініях надходить у РП-10(6) кВ, у якому розміщені дві секції шин (див. рис. 15.4) змонтованих на кількох камерах. Камери кожної секції розміщені вздовж протилежних стін РП. Обидві секції можуть з'єднуватися шинним мостом (ШМ).

		от Т1			от Т2	
Схема панелі						
№ панелі	ЩО 90-1605	ЩО 90-1114 ВА 55-43, 1600А	ЩО 90-1308 ВА55-41, 1000 А	ЩО 90 - 1404 4х400 А	ЩО 90 - 1404 4х400 А	ЩО 90-1606 ЩО 90-1114 ВА 55-43, 1600А
Призначення панелі	Торцева	Ввід від силового трансформатора Т1	Секційна з АВР	Підімкнення відхідних ліній та резерв	Підімкнення відхідних ліній та резерв	Ввід від силового трансформатора Т2 Торцева

Рис. 15.17



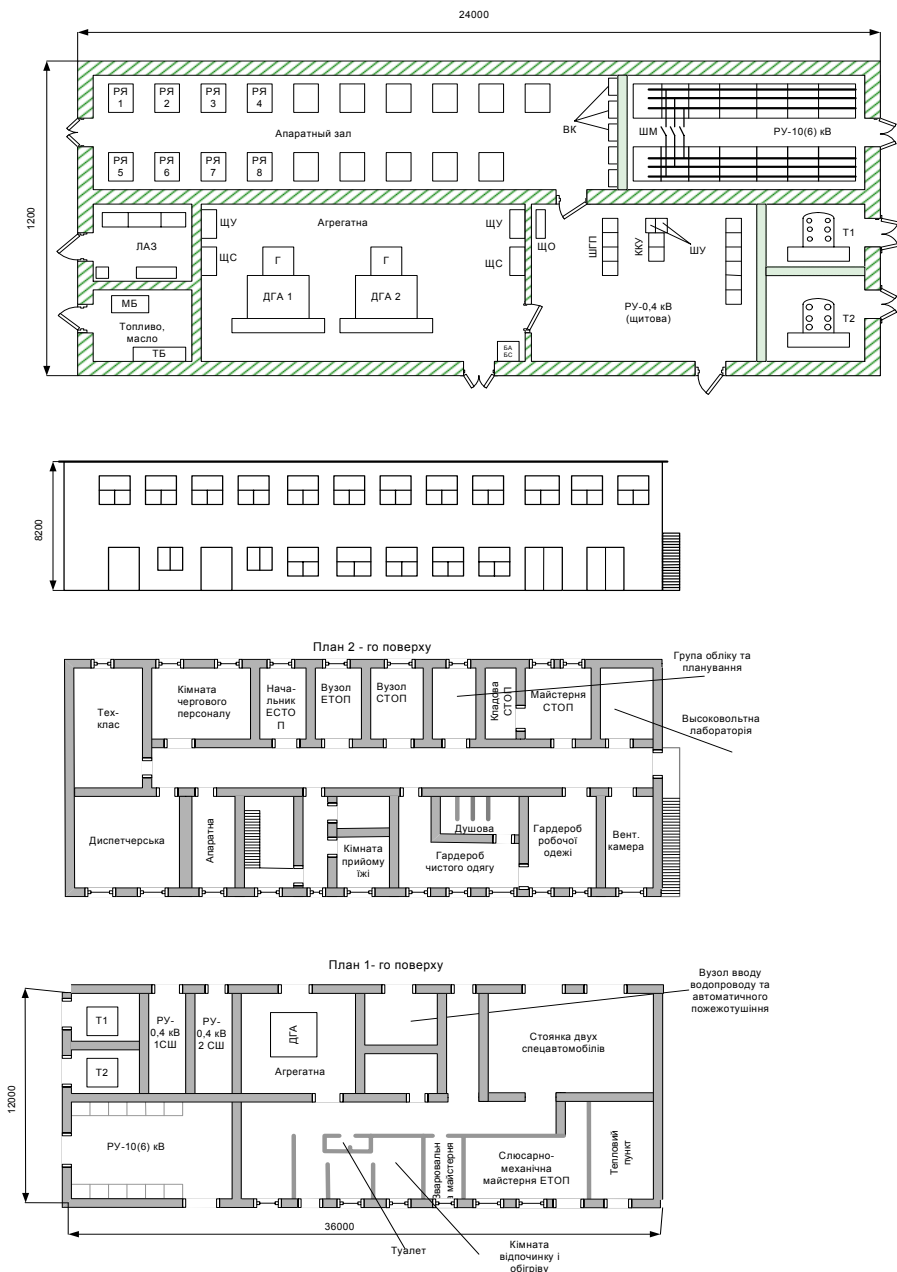


Рис. 15.18

Силові трансформатори Т1 і Т2 розташовані в окремих приміщеннях і з'єднані з РП-10(6) кВ високовольтними кабелями, прокладеними в кабельних каналах. З РП-0,4 кВ, виконаного за схемою, наведеною на рис. 15.10, трансформатори з'єднані шинами, пропущеними через стіну. РП-0,4 кВ комплектований з низьковольтних панелей, наприклад серії ЩО-90. У приміщенні щитової також розміщені шафи керування (ШК), шафи гарантованого живлення (ШГЖ), батареї конденсаторів для компенсації реактивної потужності (ККУ) і щит освітлювальний (ЩО).

Від РП-0,4 кВ напруга по кабелях, прокладених під підлогою, подається в апаратну залу, де розташовані регулятори яскравості (РЯ), що живлять, різні групи вогнів світлосигнальної системи посадки. Оскільки напруга на виході РЯ може сягати більш ніж 2 кВ, їх виходами керують високовольтні контактори (ВК).

У трансформаторній підстанції передбачене приміщення для встановлення однієї або двох, залежно від потужності світлосигнальної системи, автономних дизель-генераторних автоматизованих установок (ДГА). У комплект ДГА входять також щити силові (ЩС), щити керування (ЩК), акумуляторні батареї автоматики (БА) і стартерні батареї (БС). Електроенергія від ДГА через ЩС надходить на ШГЖ. В окремому приміщенні встановлені паливні (ПБ) і масляні (МБ) баки дизель-генераторів.

Керування режимами роботи регуляторів яскравості, залежно від метеоумов, здійснює дистанційно диспетчер посадки із КДП з допомогою лінії багатопроводового зв'язку і спеціальної апаратури. Остання, розміщена в лінійно-апаратній залі (ЛАЗ).

*Центральна розподільна підстанція (ЦРП)* здійснює приймання електроенергії від зовнішніх централізованих джерел і розподіляє її по території аеропорту на напрузі 6-10 кВ. На ЦРП працює постійний черговий персонал, приміщення оснащено власним електричним обладнанням (РУ-6(10) кВ, РУ-0,4 кВ, силовими трансформаторами, автономними електроагрегатами та ін.). Для оперативнішого керування окремими підрозділами служби електросвітлотехнічним забезпеченням польотів (ЕСТЗП) в одному будинку (рис. 15.18) розміщені й інші технічні приміщення (майстерні, лабораторія, гараж), а також санітарно-побутові (гардероб, душові) і службові приміщення.

## ■ Розділ 16

### ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

#### 16.1. Призначення пристроїв заземлення станцій та підстанцій, їх види та вимоги до них

Заземлювальні пристрої в електроустановках (ЕУ) виконують головним чином з метою захисту людини від ураження електричним струмом, блискавкозахисту будівель, споруд і устаткування, а також для забезпечення нормального режиму роботи ЕУ.

Заземленню зазвичай підлягають усі металеві частини ЕУ, що в нормальному режимі не знаходяться під напругою: корпуси електричних машин, апаратів, світильників, каркаси розподільних щитів і шаф, металеві оболонки кабелів, кабельні конструкції й інші елементи, які добре проводять електричний струм.

Відомо, що значення струму замикання на землю в електричній мережі та тривалість його проходження залежать від робочого заземлення [28]. В ефективно заземлених мережах струм у землі сягає кількох тисяч і навіть десятків тисяч амперів, але тривалість його проходження не перевищує кількох десятих частки секунди. У мережах з ізольованою нейтраллю, а також в резонансно-заземлених мережах струм замикання на землю малий (кілька амперів) і рідко перевищує кілька десятків амперів, але тривалість його протікання в землі може досягати кількох годин [29].

У місці замикання на землю, де густина струму максимальна, можуть виникати градієнти напруги та потенціали, небезпечні для людей, що пояснюють питомим опором землі (грунту)  $\rho_z$ , який перевищує питомий опір провідникових матеріалів у  $10^8 - 10^{12}$  разів.

Заземлювальні пристрої складаються із заземлювачів (провідників безпосередньо дотичних до землі) і заземлювальних провідників (штаб), що сполучають частини ЕУ із заземлювачами.

У разі пошкодження ізоляції, ударів блискавки через заземлювальні пристрої можуть проходити значні струми  $I_3$  і на них може з'являтися значна напруга щодо зони нульового потенціалу землі, яка лежить за межами зони розходження струму, пропорційна опором заземлювача  $R_3$ , оскільки:

$$U_3 = I_3 \cdot R_3.$$

Оскільки питомий опір землі (грунту)  $\rho_{\text{пр}}$  у багато разів більший за питомий опір провідників, то основний опір заземлювача зосереджується у зоні його сполучення із землею, через те, що площа сполучення відносно невелика. У міру віддалення від заземлювача площа  $S$  кожного подальшого шару землі завтовшки  $\Delta X$  росте пропорційно відстані до заземлювача  $X$ , отже опір його швидко падає (приблизно у  $X^{1,1} - X^2$  раз), оскільки:

$$\Delta R_3 = \frac{\rho_{\text{пр}} \Delta X}{S} \approx \frac{\rho_{\text{пр}} \Delta X}{kX^2}.$$

Питомий опір металу заземлювального пристрою практично не впливає на опір  $R_3$  і тому його виготовляють зазвичай із заліза.

Унаслідок стікання струму із заземлювача за рахунок великого опору шарів ґрунту, що прилягають до нього, спостерігають швидке зростання потенціалу на поверхні землі у міру наближення до заземлювача (рис. 16.1); це може створити небезпечну для життя людини напругу між окремими точками поверхні землі (її називають *кроковою напругою*) та між заземленими металевими конструкціями та поверхнею землі (напруга дотику).

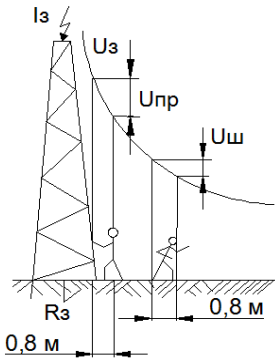


Рис. 16.1

Зазначену напругу визначають між двома точками поверхні землі або заземленою конструкцією і поверхнею землі, що знаходяться на відстані 0,8 м, і вона пропорційна опорі заземлювача  $R_3$ . Тому на станціях та підстанціях, а також лініях електропередач застосовують пристрої заземлення [30, 31] призначенні для створення шляху струму в землі з можли-

во малим опором і усунення небезпечних напруг між металевими предметами в зоні розтікання струму, а також між цими предметами та поверхнею землі, тобто для забезпечення безпеки людей, які перебувають поблизу чи на території ЕУ.

З метою підвищення електробезпеки ПУЕ регламентують максимально можливі значення опору заземлювачів залежно від номінальної напруги ЕУ, можливого значення струму, що проходить через заземлювач та питомого опору ґрунту.

Нормативні значення  $R_3$  визначають з урахуванням імовірності появи людини поблизу заземлювача у разі порушення ізоляції ЕУ, рівню її навченості та захищеності від ураження електричним струмом, а також вартості заземлювача та значною мірою виходять з економічних міркувань.

Існує три види заземлення: *робоче, захисне та блискавкозахисне*.

*Робоче заземлення* необхідне для забезпечення нормальної роботи ЕУ, її частин та мережі згідно з визначеним для них режимом функціонування. До нього належать заземлення нейтралей силових трансформаторів, генераторів, реакторів поперечної компенсації довгих ліній, вимірних трансформаторів напруги і т.ін.

*Захисне заземлення* необхідне для забезпечення безпеки персоналу під час обслуговування ЕУ. До нього належать заземлення зовнішніх металевих частин електричних машин, трансформаторів, електричних апаратів і струмопроводів, які у нормальному режимі не перебувають під напругою. Під час експлуатації до таких частин можуть торкатися люди. Якщо ізоляція пробита, то на цих частинах може виникнути небезпечна напруга, тому їх заземлюють. До захисного заземлення відносять також заземлення в одній точці вторинних кіл трансформаторів струму та напруги.

*Блискавкозахисне заземлення* застосовують для ефективного захисту електроустановок від грозових перенапруг під час блискавки. До блискавкозахисного заземлення відносять заземлення стрижневих і тросових громовідводів, металеві покрівлі будинків і споруд, металевих і залізобетонних опор ліній електропередач та порталів розподільної установки заземлення розрядників та іскрових проміжків.

Звичайно для виконання усіх видів заземлення використовують один заземлювальний пристрій. Він має заземлювач, який безпосередньо торкається до землі та системи провідників, які з'єднують заземлювані елементи із заземлювачем.

Розрізняють *природні* та *штучні* заземлювачі. До перших відносять: металеві трубопроводи, за винятком трубопроводів пального; сталеві та свинцеві оболонки кабелів; металеві та залізобетонні фундаменти будинків та споруд тощо, які використовують для відведення струму в землю. Штучні заземлювачі – це система пов'язаних між собою вертикальних і горизонтальних провідників, яку використовують для проходження струму в землю. Часто в ЕУ використовують різні заземлювачі, увімкнені паралельно.

## 16.2. Конструкції заземлювальних пристроїв

Пристрої заземлення ЕУ напругою понад 1000 В в ефективно-заземленій мережі виконують, дотримуючись вимог або до їх опору, або до напруги дотику, до конструкції і до обмеження напруги на пристрої заземлення.

Напруга на пристрої заземлення, під час стікання з нього струму замикання на землю, не повинна перевищувати 10 кВ. Напруга понад 10 кВ допускається на заземлювальних пристроях, винесення потенціалів з яких за межі будинків та зовнішньої огорожі ЕУ неможливий. За напруги на пристроях заземлення від 5 до 10 кВ слід вживати заходів захисту ізоляції кабелів зв'язку і телемеханіки щодо недопущення винесення небезпечних потенціалів за межі ЕУ.

Пристрої заземлення, які виконують із дотриманням вимог до його опору, повинні мати у будь-який час року опір не більший ніж 0,5 Ом, включно з опором природних заземлювачів.

Пристрій заземлення, виконаний із дотриманням вимог до напруги дотику, повинен забезпечувати у будь-який час року напругу дотику не більшу, ніж допустима. Опір заземлювального пристрою при цьому визначають за допустимою напругою на пристрої заземлення та струму замикання на землю. Можна рекомендувати для розрахунків такі допустимі напруги дотику ( $U_{\text{дот.}}$ ) (табл. 16.1) [30, 31]:

Таблиця 16.1

Тривалість дії, с	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	1,0–3,0
$U_{\text{дот. доп.}}$ , В	500	400	200	130	100	65

Небезпека ураження залежить від значення струму і тривалості його проходження через тіло людини (табл. 16.2).

Таблиця 16.2

Тривалість, с	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0
Допустимий струм, мА	500	250	100	75	65

Визначаючи допустиму напругу дотику, слід розраховувати час, як суму дії захисту та повного часу вимикання вимикача.

У мережах з ізолюваною нейтраллю пристрій захисного заземлення станцій і підстанцій повинен мати опір:

$$R \leq 125 / I_p, \quad (16.1)$$

якщо пристрій заземлення одночасно використовують для електроустановок напругою як вищою, так і нижчою за 1000 В, та:

$$R \leq 250 / I_p, \quad (16.2)$$

якщо пристрій заземлення використовують тільки для електроустановок напругою понад 1000 В, але в обох випадках опір не повинен перевищувати 10 Ом.

У формулах (16.1),(16.2)  $I_p$  – розрахунковий струм.

У мережах з ізолюваною нейтраллю за розрахунковий струм беруть струм замикання на землю:

$$I_p = I_3 = 3U_{\phi} \omega C = 3I_C,$$

де  $C$  – ємність однієї фази землі.

У мережах, де використовують компенсацію ємнісного струму замикання на землю, за розрахунковий можуть брати струм:

– для пристроїв заземлення, до яких приєднані компенсувальні апарати – струм, який дорівнює 125 % від номінального струму цих апаратів;

– для пристроїв заземлення, до яких не приєднані компенсувальні апарати – залишковий струм на землю, який може проходити після вимикання найпотужнішого з компенсувальних апаратів або найрозгалуженішої ділянки мережі.

Розрахунковим може бути також струм плавлення запобіжника, або струм спрацювання релейного захисту від однофазного короткого замикання на землю.

У відкритих ЕУ з ізолюваною нейтраллю напругою понад 1000 В, на площі, де розташоване устаткування, на глибині не меншій ніж 0,5 м необхідно прокласти замкнений горизонтальний заземлювач – контур, до якого приєднують устаткування. Якщо при цьому питомий опір землі перевищує 500 Ом·м, то необхідно додатково прокласти горизонтальні заземлювачі вздовж рядів устаткування з боку його обслуговування, на глибині 0,5 м і на відстані 0,8...1,0 м від фундаменту або основи устаткування [11].

У заземлювальних пристроях, які виконуються з дотриманням вимог щодо їх опору, необхідно прокладати поздовжні та поперечні горизонтальні заземлювачі та з'єднувати їх між собою в зазем-

лювальну сітку. Поздовжні заземлювачі прокладають уздовж рядів ЕУ з боку його обслуговування на глибині 0,5...0,7 м і на відстані 0,8...1,0 м від фундаменту, або основи устаткування. Поперечні заземлювачі необхідно прокласти у зручних місцях серед устаткування на глибині 0,5...0,7 м. Відстані між ними доцільно збільшувати від периферії до центру заземлювальної сітки, при цьому відстані повинні бути відповідно не більшими ніж 4,0; 5,0; 6,0; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0 та 20 м. Розміри комірки заземлювальної сітки біля місця приєднання нейтралей силових трансформаторів та короткозамикачів до пристрою заземлення не повинні перевищувати 6х6 м.

У заземлювальних пристроях, які виконують з дотриманням вимог до напруги дотику, розміщення поздовжніх та поперечних горизонтальних заземлювачів визначають вимогами обмеження напруги дотику до нормативних значень і зручності приєднання устаткування до заземлювального пристрою.

Поблизу місця заземлення нейтралей трансформаторів і короткозамикачів поздовжні та поперечні горизонталі заземлювачів необхідно прокласти в чотирьох напрямках.

#### ***Розрахунок пристроїв заземлення в ЕУ з ізольованою або резонансно заземленою нейтраллю***

В ЕУ 6–35 кВ з ізольованою або резонансно заземленою нейтраллю опір (Ом) заземлювального пристрою в будь-який час року повинен бути таким:

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3}, \quad (16.3)$$

де  $I_3$  – розрахунковий струм заземлення на землю, А;  $U_3 = 250$  В – допустима напруга на заземлювачі.

Якщо нейтраль заземлюють через реактор то, за розрахунковий струм для заземлюючого пристрою приймається струм, який дорівнює 125 % його номінального струму. Для пристроїв заземлення підстанцій, на яких реактори відсутні, за розрахунковий струм беруть некомпенсований ємнісний струм, який виникає під час вимикання потужного заземлювального реактора.

Опір пристроїв заземлення для електроустановок 6–35 кВ не повинен перевищувати 10 Ом [11].

В електроустановках напругою, меншою за 1000 В з ізольованою нейтраллю в будь-який час опір пристрою заземлення повинен бути таким:



$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} \quad (16.4)$$

де  $I_3$  – розрахунковий струм замикання на землю, А;  $U_3 = 125$  В – допустима напруга на заземлювачі.

Значення  $R_3$  не повинне бути більшим ніж 10 Ом за потужності джерела до 100 кВА і 4 Ом – за більшої потужності [20].

Слід зазначити, що людина, яка доторкнулась до заземленого устаткування за однофазного замикання на землю в мережі, потрапляє не під напругу  $U_3$ , а під напругу дотику  $U_{\text{дот}}$ , яка менша за напругу  $U_3$ .

Заземлювальні пристрої установок з ізольованою або резонансно–заземленою нейтраллю виконують у вигляді прямокутника з горизонтальних та вертикальних заземлювачів. Розрахунок таких пристроїв з достатньою для практичних цілей точністю виконують методом коефіцієнтів використання [32], вважаючи ґрунт однорідним за глибиною.

Розрахунок виконують у такій послідовності [20].

1. Визначають розрахунковий струм  $I_3$  і за формулою (16.3) або (16.4) знаходять опір заземлювального пристрою  $R_3$ .

2. Визначають опори природних заземлювачів  $R_{\text{пр}}$ . Для цього для конкретної установки виконують необхідні вимірювання, значення яких приблизно можуть бути такими: сталева водопровідна труба – 2...4 Ом; металева оболонка кабеля – 2...3 Ом; система трос – опора – 2,5...3 Ом.

Якщо  $R_{\text{пр}} < R_3$ , то вертикальні заземлювачі непотрібні, на території прокладають тільки горизонтальний заземлювач (звичайно штабу), який приєднують не менше ніж у двох точках до природного заземлювача.

Якщо  $R_{\text{пр}} > R_3$ , то необхідно спорудити штучні заземлювачі, опір яких

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{пр}} R_3}{R_{\text{пр}} - R_3}. \quad (16.5)$$

Для штучних заземлювачів використовують вертикальні заземлювачі – стрижні довжиною 3...5 м, діаметром 12...20 мм та горизонтальні заземлювачі – сталеві штаби 40x4 мм.

3. Визначають розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{розр}} = K_{\text{кл}} \rho,$$

де  $\rho$  – питомий опір ґрунту, який вимірюють за нормальної вологості (деякі значення  $\rho$  наведені у табл. 16.3);  $K_{\text{кл}}$  – кліматичний коефіцієнт. У середніх кліматичних районах (другий, третій) для вертикальних елементів довжиною 3...5 м  $K_{\text{кл}}=1,45\dots1,15$ ; для горизонтальних елементів довжиною 10...15 м  $K_{\text{кл}}=3,5\dots2,0$ .

Таблиця 16.3

Ґрунт	Питомий опір, Ом·м	Ґрунт	Питомий опір, Ом·м
Пісок	100...400	Чорнозем	10...50
Супісок	150...400	Торф	20
Суглинок	40...150	Вапняк	1000...2000
Ґлина	8...70	Скелястий ґрунт	2000...4000

4. Визначають попередню конфігурацію заземлювача з урахуванням його розміщення на певній території, причому відстань між вертикальними елементами беруть не меншою за їх довжину. За планом заземлювального пристрою визначають попередню кількість вертикальних заземлювачів і довжину горизонтальних заземлювачів.

5. Визначають опір одного вертикального заземлювача (стрижня), Ом:

$$R_{\text{ст.од}} = \frac{0,366\rho_{\text{розр}}}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (16.6),$$

де  $\rho_{\text{розр}}$  – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;  $l$  – довжина стрижня, м;  $d$  – діаметр стрижня, м;  $t$  – глибина закладання стрижня, яка дорівнює відстані від землі до поверхні землі до середини заземлювача, м.

6. Визначають кількість вертикальних заземлювачів

$$n_{\text{в}} = \frac{R_{\text{ст.од}}}{R_{\text{ш}} \eta_{\text{в}}}, \quad (16.7)$$

де  $\eta_{\text{в}}$  – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, який залежить від відстані  $\alpha$  між ними, їх довжини  $l$  та їх кількості  $n_{\text{в}}$  (табл. 16.4).

Таблиця 16.4

Відношення $\alpha/l$	Кількість електродів $n_b$	$\eta_b$	Відношення $\alpha/l$	Кількість електродів $n_b$	$\eta_b$	
1	4	0,66...0,72	2	20	0,61...0,66	
	6	0,58...0,65		40	0,55...0,61	
	10	0,52...0,58		60	0,52...0,58	
	20	0,44...0,50		3	4	0,84...0,86
	40	0,38...0,44			6	0,78...0,82
	60	0,36...0,42			10	0,74...0,78
2	4	0,76...0,80	3	20	0,68...0,73	
	6	0,71...0,75		40	0,64...0,69	
	10	0,66...0,71		60	0,62...0,67	

7. Визначають опори горизонтальних заземлювачів, (з'єднувальної штаби контуру)

$$R_r = \frac{0,366 \cdot \rho_{\text{розр.г}}}{l} \lg \frac{2l^2}{bt},$$

де  $l$  – довжина з'єднувальної штаби, м;  $b$  – ширина штаби, м;  $t$  – глибина закладання штаби, м;  $\rho_{\text{розр.г}}$  – розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтальних заземлювачів, Ом·м.

З урахуванням коефіцієнта використання  $\eta_r$  опір з'єднувальної штаби

$$R_r^l = \frac{R_r}{\eta_r},$$

де  $\eta_r$  – коефіцієнт використання з'єднувальної штаби (табл. 16.5).

Таблиця 16.5

Відношення $\alpha/l$	Кількість вертикальних електродів						
	4	6	8	10	20	30	50
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28
3	0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37

8. Визначають необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням з'єднувальної штаби:

$$R'_B \leq \frac{R'_r R_3}{R'_r - R_3}.$$

9. Визначають уточнену кількість вертикальних заземлювачів

$$n'_B = \frac{R_{\text{ст.од}}}{R'_B \eta'_B},$$

де  $\eta'_B$  – уточнене значення коефіцієнта використання.

**Приклад 1.** Розрахувати пристрій заземлення підстанції 35/10 кВ. Мережі 35 та 10 кВ працюють з ізолюваною нейтраллю трансформаторів. З боку 35 кВ струм замикання на землю  $I_3 = 6 \text{ А}$ , з боку 10кВ  $I_3 = 20 \text{ А}$ . Власні потреби підстанції одержують живленням від трансформатора 10/0,4 кВ. Обмотка 0,4 кВ має заземлену нейтраль. Природних заземлювачів немає. Питомий опір землі за нормальної вологості  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Устаткування підстанції розташоване на площі 18х28 м. Підстанція знаходиться в 2-му кліматичному районі.

Опір пристрою заземлення для ВРУ 35кВ розраховують за формулою (16.3)

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3} = \frac{250}{6} = 41,66 \text{ Ом}.$$

Опір пристрою заземлення для установок 10 Ом становить

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3} = \frac{250}{20} = 12,5 \text{ Ом}.$$

Опір пристрою заземлення нейтралі обмотки 0,4 кВ трансформатора не повинен бути більшим за 4 Ом [20].

Отже, остання вимога є вирішальною для розрахунків:

$$R_3 \leq 4 \text{ Ом}.$$

Пристрій заземлення виконують як контур із штаби 40х4 мм, яку прокладають на глибині 0,7м навколо устаткування підстанції, та

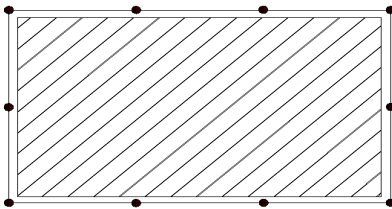


Рис. 16.5

вертикальних стрижнів довжиною 5м і діаметром 12 мм. Відстань між стрижнями поперек беремо  $\alpha = 10 \text{ м}$ . Загальна довжина штаби 100 м. Попередня кількість стрижнів  $n = 10$  (рис. 16.5).

Визначаємо опір одного вертикального стрижня за формулою (16.6):

$$R_{\text{ст.од}} = \frac{0,366\rho_{\text{розр}}}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \frac{0,366 \cdot 125}{5} \left( \lg \frac{2 \cdot 5}{12 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3,5 + 5}{4 \cdot 3,5 - 5} \right) = 9,15 (\lg 833,3 + 0,5 \lg 2,1) = 26,725 + 1,47 = 28,198 \text{ Ом},$$

де  $\rho_{\text{розр}} = K_{\text{кл}}\rho = 1,25 \cdot 100 = 125 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $K_{\text{кл}} = 1,25$  знаходимо за [33, табл. 8.2] для 2-го кліматичного району.

Необхідна кількість стрижнів

$$n_{\text{В}} = \frac{R_{\text{ст.од}}}{R_{\text{В}}\eta_{\text{В}}} = \frac{28,198}{4 \cdot 0,66} = 10,68,$$

де  $\eta_{\text{В}} = 0,66$  визначаємо за табл. 16.4. для  $\alpha/l = 2$ ,  $n = 10$ .

Опір заземлювальної итаби розраховують як

$$R_{\text{Г}} = \frac{0,366\rho_{\text{розр-Г}}}{l} \lg \frac{2l^2}{bt} = \frac{0,366 \cdot 3 \cdot 10}{100} \lg \frac{2 \cdot 100^2}{40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7} = 1,098 \lg \frac{2 \cdot 10000 \cdot 10^3}{40 \cdot 0,7} = 1,098 \lg 714,285 \cdot 10^3 = 6,427 \text{ Ом},$$

де  $\rho_{\text{розр-Г}} = K_{\text{кл}}\rho = 3 \cdot 100 = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $K_{\text{кл}} = 3,0$  знаходимо за [30, табл. 8.2].

Опір итаби у контурі з 10 вертикальних електродів

$$R_{\text{Г}}' = \frac{R_{\text{Г}}}{\eta_{\text{Г}}} = \frac{6,427}{0,4} = 16,06 \text{ Ом},$$

де  $\eta_{\text{Г}} = 0,4$  визначають за табл. 16.5 для  $\alpha/l = 2$ , та  $n = 10$ .

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням використання з'єднувальної итаби

$$R_{\text{В}}' = \frac{R_{\text{Г}}' R_{\text{З}}}{R_{\text{Г}}' - R_{\text{З}}} = \frac{16,06 \cdot 4}{16,06 - 4} = 5,327 \text{ Ом}.$$

Уточнена кількість стрижнів

$$n_{\text{В}}' = \frac{R_{\text{ст.од}}}{R_{\text{В}}'\eta_{\text{В}}} = \frac{28,198}{5,327 \cdot 0,66} = 8.$$

Отже, остаточно  $n = 8$ , тобто двох стрижнів у краях контуру підстанції не визначаємо (рис. 16.6).

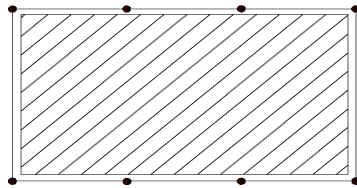


Рис. 16.6

### **Розрахунок пристроїв заземлення для ЕУ з ефективно заземленою нейтраллю**

Відповідно до ПУЕ [11] пристрої заземлення в ЕУ 110 кВ і вище розраховують за допустимим опором заземлення  $R_3 = 0,5 \text{ Ом}$ .

Це спричиняє невикористані перевитрати провідникового матеріалу та працевитрати під час спорудження пристроїв заземлення для підстанцій із малою площею, які не мають природних заземлювачів.

Досвід експлуатації розподільних установок на 110 кВ і вище дозволяє перейти до нормування напруги дотику, а не величини  $R_3$  [34], оскільки на тіло фактично діє напруга

$$U_{\text{л}} = U_{\text{дот}} - U_{\text{с}},$$

де  $U_{\text{дот}}$  – напруга доторкування;  $U_{\text{с}} = R_{\text{с}} I_{\text{л}}$  – напруга на ступнях людини.

Якщо вважати, що ступня – це диск радіусом 8 см

$$R_{\text{с}} = \frac{\rho_{\text{в.ш.}}}{2 \cdot 4r} = \frac{\rho_{\text{в.ш.}}}{8 \cdot 0,08} = 1,5 \rho_{\text{в.ш.}},$$

де  $\rho_{\text{в.ш.}}$  – питомий опір верхнього шару ґрунту, Ом·м;  $r$  – радіус ступні, см.

Струм, який проходить через тіло людини, повинен бути меншим за допустимий струм для людини (табл. 16.6):

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{дот}} - U_{\text{с}}}{R_{\text{л}}}.$$

Таблиця 16.6

Тривалість, с	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0
Допустимий для людини струм $I$ , мА	500	250	100	75	65

Знаючи допустимий струм, можна знайти допустиму напругу дотику:

$$U_{\text{дот}} \leq R_{\text{л}} I_{\text{л}} + U_{\text{с}},$$

або

$$U_{\text{дот}} \leq R_{\text{л}} I_{\text{л}} + 1,5 I_{\text{л}} \rho_{\text{в.ш.}}.$$

Для розрахунків рекомендують такі допустимі напруги дотику (табл. 16.7).

Таблиця 16.7

Тривалість, с	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	1–3
Найбільша $U_{\text{дот. доп}}, \text{В}$	500	400	200	130	100	65

За розрахункову тривалість впливу прийнято

$$\tau_{\text{в}} = t_{\text{р.з}} + t_{\text{в.в.}}$$

де  $t_{\text{р.з}}$  – час дії релейного захисту;  $t_{\text{в.в.}}$  – час вимикання вимикача.

Для робочих місць, де персонал торкається до заземлених частин під час оперативних перемикань, беруть час дії резервного захисту, для інших місць – час дії основного захисту.

Пристрій заземлення, виконаний за нормами напруги дотику, повинен забезпечити у будь-який час року обмеження  $U_{\text{дот}}$  – до нормованого в межах всієї території підстанції, а напруга на пристрої заземлення не повинна перевищувати 10 кВ.

Якщо  $U_3 > 5 \dots 10 \text{кВ}$ , то необхідно вжити заходів щодо захисту ізоляції вихідних кабелів від підстанції, та щодо запобігання винесення високого потенціалу за межі ЕУ.

Пристрій заземлення для установок 110 кВ і вище виконують із вертикальних електродів, з'єднувальної штаби, штаби, яку прокладають уздовж рядів устаткування, а також вирівнювальних штаб, які прокладають поперечно. Відстань між штабами не повинна перевищувати 30 м.

Є різні методи розрахунку складних заземлювачів [16,30]. Розглянемо один з них [20,8].

Складний заземлювач (рис. 16.7, а, б) замінений розрахунковою квадратною моделлю (рис. 16.8, а, б) за умови рівності їх площ  $S$ , загальної довжини  $L_r$  горизонтальних провідників, глибини їх прокладання  $t$ , кількості і довжини вертикальних заземлювачів та глибини їх прокладання.

У розрахунках багат шаровий ґрунт замінює двошаровий, верхній – товщиною  $h_1$ , з питомим опором  $\rho_1$  нижній – з питомим опором  $\rho_2$ . Величини  $\rho_1, \rho_2, h_1$  визначають вимірюваннями з урахуванням кліматичного коефіцієнта  $K_{\text{кл}}$ .

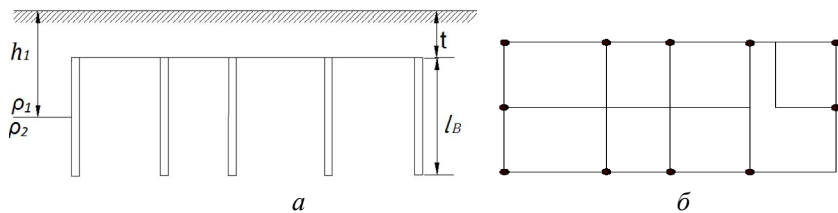


Рис. 16.7

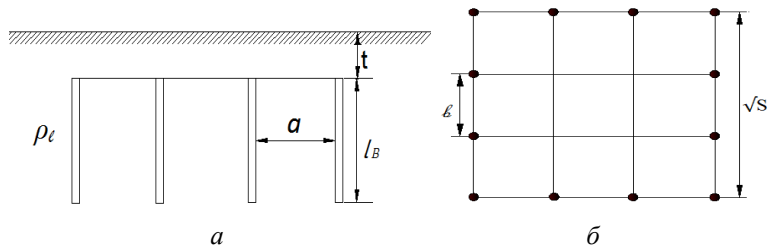


Рис. 16.8

Розрахунок виконують у такій послідовності.

1. Визначають напругу на заземлювачі

$$U_3 = \frac{U_{\text{дог. доп}}}{K_{\text{дог}}},$$

де  $U_{\text{дог. доп}}$  – допустима напруга доторкування;  $K_{\text{дог}}$  – коефіцієнт напруги дотику, для складних заземлювачів коефіцієнт визначають за формулою

$$K_{\text{дог}} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_B L_\Gamma}{\alpha\sqrt{S}}\right)^{0,45}},$$

де  $l_B$  – довжина вертикального заземлювача, м;  $L_\Gamma$  – довжина горизонтальних заземлювачів, м;  $\alpha$  – відстань між вертикальними заземлювачами, м;  $S$  – площа пристрою заземлення, м<sup>2</sup>;  $M$  – параметр, який залежить від співвідношення  $\frac{\rho_1}{\rho_2}$  (табл. 16.8):



Таблиця 16.8

$\rho_1/\rho_2$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10
$M$	0,36	0,5	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,8	0,82

$\beta$  – коефіцієнт, який визначають за опором тіла людини  $R_{л}$  та опором проходження струму від ступнів  $R_c$  :

$$\beta = \frac{R_{л}}{R_{л} + R_c}.$$

У розрахунках беруть  $R_{л} = 1000 \text{ Ом}$ ;  $R_c = 1,5 \rho_{в.ш.}$ .

2. Оскільки  $U_3 = R_3 I_3$ , то допустимий опір заземлювального пристрою повинен бути, Ом:

$$R_{з.доп} \leq \frac{U_3}{I_3},$$

де  $I_3$  – розрахунковий струм однофазного короткого замикання (КЗ) в розгляданій установці.

3. Визначають загальний опір природних заземлювачів, Ом:

$$R_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{R_{каб}} + \frac{1}{R_{ф}} + \frac{1}{R_{с.т.о}}},$$

де  $R_{каб}$  – опір розходження струму кабелів;  $R_{ф}$  – опір розходження струму фундаментів;  $R_{с.т.о}$  – опір розходження струму системи трос – опори.

Якщо  $R_{пр} < R_{з.доп}$ , то споруджують тільки сітку з горизонтальних штаб; якщо  $R_{пр} > R_{з.доп}$ , то необхідне спорудження штучного заземлювача, опір якого визначають за формулою (16.5).

4. Визначають загальний опір складного заземлювача, який розглядають як розрахункову модель, Ом:

$$R_3 = A \frac{\rho_c}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_c}{L_r + L_b}, \quad (16.8)$$

де

$$A = (0,444 - 0,84 \frac{l_b + t}{\sqrt{S}}), \text{ за умови } 0 \leq \frac{l_b + t}{\sqrt{S}} \leq 0,1 :$$

$$A = (0,358 - 0,25 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}}), \text{ за умови } 0,1 \leq \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5;$$

$\rho_e$  – еквівалентний питомий опір землі, Ом · м (табл. 16.9);  $L_B$  – загальна довжина вертикальних заземлювачів,  $L_B = l_B n_B$ .

Таблиця 16.9

$\frac{\rho_1}{\rho_2}$	$\frac{a}{l_B}$	Відносна товщина шару $(h_1 - t) / l_B$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
0,125	0,5..4	0,95	0,9	0,8	0,7	0,62	0,54	0,52
0,25	0,5..4	0,97	0,93	0,85	0,78	0,71	0,65	0,64
0,5	0,5..4	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,77
1	1–4	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1,02	1,03	1,05	1,1	1,13	1,3	1,4
	2	1,03	1,07	1,1	1,13	1,15	1,32	1,5
	4	1,05	1,17	1,13	1,15	1,20	1,38	1,6
5	1	1,05	1,1	1,15	1,22	1,35		2,4
	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	1,86	2,7
	4	1,33	1,41	1,50	1,65	1,83	2,12	3,5
10	1	1,1		1,28		1,62		3,7
	2	1,3	1,2	1,5	1,38	1,8	2,6	5,5
	4	1,52	1,4	1,88	1,6	2,33	2,5	6,0

Одержане значення  $R_3$  повинне бути меншим за  $R_{з\text{-доп}}$  або  $R_{ш}$ .

Якщо опір заземлювача перевищує необхідну величину, то необхідно збільшити площу  $S$ , довжину  $L_r$ , кількість вертикальних заземлювачів  $n_B$  та їх довжини. Усе це потребує додаткових витрат і на підстанції це важко здійснити. Для безпеки доторкання можна підсипати гравій або щебень із шаром 0,15...0,2 м по всій території ВРУ. Питомий опір верхнього шару при цьому помітно зростає (5000...10000) Ом · м, що знижує струм, який проходить через тіло людини, оскільки зростає опір проходження струму від ступнів  $R_c$ . У розрахунках відповідно зменшується коефіцієнт  $\beta$  і зростає допустимий опір заземлювального пристрою.

**Приклад 2.** Розрахувати пристрій заземлення для високовольтної розподільної установки (ВРУ) напругою 110/10 кВ.

Площа ВРУ  $15 \times 25 \text{ м}^2$ . Задано  $\rho_1 = 400 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $\rho_2 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_1 = 2 \text{ м}$ ;  $t = 0,7 \text{ м}$ ;  $l_B = 5 \text{ м}$ ;  $\tau = 5 \text{ м}$ ;  $t_{\text{рз}} = 0,1 \text{ с}$ ;  $t_{\text{ВВ}} = 0,1 \text{ с}$ ; струм замикавання на землю за однофазного короткого замикання на такій підстанції  $I_3 = 2 \text{ кА}$ . Природні заземлювачі відсутні. Нейтраль обмотки  $110 \text{ кВ}$  трансформатора заземлена безпосередньо, нейтраль обмотки  $10 \text{ кВ}$  – ізольована від землі.

Для  $\tau_B = t_{\text{рз}} + t_{\text{ВВ}} = 0,1 + 0,1 = 0,2 \text{ с}$  допустима напруга дотику  $U_{\text{доп.дот}} = 400 \text{ В}$ . Для визначення напруги на заземлювачі  $U_3$  необхідно знати коефіцієнт напруги дотику:

$$K_{\text{дот}} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_B L_r}{a\sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,75 \cdot 0,625}{\left(\frac{5 \cdot 190}{5\sqrt{15 \cdot 25}}\right)^{0,45}} = 0,1678,$$

де  $M = 0,72$  якщо  $\rho_1 / \rho_2 = 400 / 80 = 5$ ,

$$\beta = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + 1,5\rho_{\text{в.ш}}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 400} = 0,625; L_r = 190 \text{ м}.$$

Напруга на заземлювачі

$$U_3 = \frac{U_{\text{доп.дот}}}{K_{\text{дот}}} = \frac{400}{0,1678} = 2383,8 \text{ В}$$

лежить у межах допустимої напруги (менша за  $10 \text{ кВ}$ ).

Допустимий опір пристрою заземлення

$$R_{3\text{-доп}} = \frac{U_3}{I_3} = \frac{2383,8}{2000} = 1,19 \text{ Ом}.$$

Дійсний план пристрою заземлення перетворюємо на розрахункову модель зі стороною

$$\sqrt{S} = \sqrt{15 \cdot 25} = 19,36 \text{ м}.$$

Кількість комірок уздовж сторони квадрата

$$m = \frac{L_r}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{190}{2 \cdot 19,36} - 1 = 3,9.$$

Беремо  $m = 4$ . Довжина штабу у розрахунковій моделі

$$L_r^1 = 2\sqrt{S}(m+1) = 2 \cdot 19,36(4+1) = 193,6 \text{ м}.$$

Довжина сторін комірки

$$b = \frac{19,36}{4} = 4,84 \text{ м}.$$

Кількість вертикальних заземлювачів за периметром контуру за умови  $a/l_B = 1$ :

$$n = \frac{\sqrt{S \cdot 4}}{1 \cdot l_B} = \frac{19,36 \cdot 4}{5} = 15,49.$$

Беремо  $n_B = 16$ .

Загальна довжина вертикальних заземлювачів

$$L_B = l_B n_B = 5 \cdot 16 = 80 \text{ м.}$$

Відносна глибина

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{19,36} = 0,244 > 0,1,$$

тому

$$A = 0,385 - 0,25 = 0,14; \quad \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = 0,385 - 0,25 \cdot 0,244 = 0,324.$$

За табл. 16.9 для  $\rho_1/\rho_2 = 5$ ;  $a/l_B = 1$ , знаходимо:

$$\text{за } \frac{h_1 - t}{l_B} = \frac{2 - 0,7}{5} = 0,26, \quad \rho_e/\rho_2 = 1,256,$$

тоді  $\rho_e = 1,256 \cdot \rho_2 = 1,256 \cdot 80 = 100,48 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

За (16.8) визначаємо опір заземлювача

$$R = A \frac{\rho_e}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_e}{L_r + L_B} = 0,324 \frac{100,48}{19,36} + \frac{100,48}{19,36 + 80} = 0,324 \cdot 5,19 + 0,367 = 2,048 \text{ Ом},$$

що більше за  $R_{3\text{,доп}} = 1,19 \text{ Ом}$ .

Визначаємо напругу дотику

$$U_{\text{дот}} = K_{\text{дот}} R_3 I_3 = 0,1678 \cdot 2,048 \cdot 2000 = 687,7 \text{ В.},$$

що більше за допустиме значення 400 В.

Необхідно зменшити напругу доторкування  $U_{\text{дот}}$ .

Припускаємо, що на підстанції можуть бути використані природні заземлювачі системи трос – опора лінії 110 кВ із загальним опором  $R_{\text{пр}} = 2 \text{ Ом}$ . Тоді необхідно визначити опір штучного заземлювача

$$R_{\text{шт}} = \frac{R_{\text{пр}} R_{3\text{,доп}}}{R_{\text{пр}} - R_{3\text{,доп}}} = \frac{2 \cdot 1,19}{2 - 1,19} = 2,938 \text{ Ом}.$$

Отже, опір заземлювального контуру підстанції задовольняє вимогу

$$R_3 = 2,048 < R_{шт} = 2,938 \text{ Ом}.$$

Загальний опір пристрою заземлення підстанції з урахуванням природних заземлювачів

$$R'_3 = \frac{R_3 R_{np}}{R_3 + R_{np}} = \frac{2,048 \cdot 2,0}{2,048 + 2,0} = 1,012 \text{ Ом},$$

тоді напруга дотику

$$U_{\text{дот}} = K_{\text{дот}} R'_3 I_3 = 0,1678 \cdot 1,012 \cdot 2000 = 339,6 \text{ В},$$

що менше за допустиму напругу 400 В.

Дотичне напруження  $U_{\text{дот}}$  можна зменшити в інший спосіб. Наприклад, підситимо гравій по всій поверхні підстанції. Шар гравію – 0,2 м. Питомий опір шару у такому разі буде  $\rho_{\text{в.ш}} = 3000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , тоді

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 3000} = 0,18,$$

$$K_{\text{дот}} \frac{0,75 \cdot 0,18}{\left(\frac{5 \cdot 190}{5\sqrt{15 \cdot 25}}\right)^{0,45}} = \frac{0,135}{2,794} = 0,048.$$

Підсипка гравію не впливає на розходження струму з пристрою заземлення, оскільки глибина закладання заземлювачів 0,7 м більше за товщину шару гравію, то співвідношення  $\rho_1 / \rho_2$  та величина залишаються незмінними.

$$\text{Отже, } U = \frac{400}{0,048} = 8333,3 \text{ В}.$$

Доступний опір заземлення

$$R_{3\text{-доп}} = \frac{8333,3}{2000} = 4,166 \text{ Ом},$$

що більше за  $R_3 = 2,048 \text{ Ом}$ .

Дотичне напруження

$$U_{\text{дот}} = K_{\text{дот}} R_3 I_3 = 0,048 \cdot 2,048 \cdot 2000 = 196,6 \text{ В},$$

що менше за допустиму напругу дотику  $U_{\text{доп.дот}} = 400 \text{ В}$ .

Отже, підсипання шару гравію є ефективним засобом для зменшення напруги доторкання.

Визначаємо також максимальний допустимий струм однофазного КЗ (див.раніше)на даній підстанції:

$$I_{з.мах} = \frac{U_{\text{доп.дог}}}{K_{\text{дог}} R_з} = \frac{400}{0,048 \cdot 2,048} = 4069,17 \text{ А.}$$

**Приклад 3.** Спроектувати заземлювач трансформаторної підстанції вогнів високої інтенсивності (ТП ВВІ), розміщений у 2-му кліматичному районі, якщо опір природних заземлювачів (кабелів)  $R_{з,е}$  становить 0,7 Ом, а виміряний питомий опір ґрунту  $\rho_{гр} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**Рішення.** Згідно з вимогами Правил устрою електроустановок (ПУЕ), в ЕУ з номінальною напругою до 360 В опір штучного заземлювача повинен бути не більшим за 30 Ом (при  $\rho_{гр} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – не більшим за 75 Ом), можливе збільшення  $R_з$  до 10 Ом). Визначаємо  $R_{з,и}$  за формулою (16.5), беручи  $R_{з,е} = 7 \text{ Ом}$  а  $R_{з,н} = 4 \text{ Ом}$  :

$$R_{з,и} = \frac{7 \cdot 4}{7 - 4} = 9,3 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір одиночного вертикального заземлювача довжиною 3 м діаметром  $d = 50 \text{ мм}$  і глибиною залягання  $t = 0,8 \text{ м}$ , наблизивши похибковий коефіцієнт до змiряного значення  $\rho_{гр}$  для 2-го кліматичного району згідно з працею [35] таким, що дорівнює 1,45 для вертикальних заземлювачів і 3,5 – для горизонтальних:

$$\rho_{\text{розр.в}} = 1,45 \rho_{\text{изм}} = 362 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$R_{\text{во}} = \frac{\rho_{\text{розр.в}}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + 3l}{4t + l} \right) = \frac{362}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 0,8 + 3 \cdot 3}{4 \cdot 0,8 + 3} \right) = 98,5 \text{ Ом.}$$

Визначимо за формулою (16.7) число вертикальних електродів:  
 $n = \frac{R_{\text{в.о}}}{R_{з,и}} = \frac{98,5}{9,3} = 10 \text{ шт.}$  Візьмемо розташування заземлювачів навколо ТП за контуром з відстанню між електродами 9 м і розмірами контура  $18 \times 27 \text{ м}$ . Згідно з працею [35] для даного випадку за  $n = 10$  і  $\alpha/t = 3$  можна взяти  $\eta_{\text{в}} = 0,75$ .

$$\text{Звідси: } R_{з,в} = \frac{R_{\text{в.о}}}{\eta_{\text{в}} n} = \frac{98,5}{0,75 \cdot 10} = 13,1 \text{ Ом.}$$

Для горизонтальної смуги шириною  $b = 10$  мм за глибини залягання  $0,8$  м  $\rho_{\text{розр.}} = 3,5 \cdot 250 = 880$  Ом·м. За  $l = 90$  м і  $\eta_r = 0,56$  опір горизонтальної смуги складе:

$$R_{3,r} = \frac{\rho_{\text{розр.г}}}{2\pi\eta_r} \ln \frac{2l^2}{bt} = \frac{880}{2 \cdot 3,14 \cdot 90 \cdot 0,56} \ln \frac{2 \cdot 90^2}{0,01 \cdot 0,8} = 40,6 \text{ Ом}.$$

Результуючий опір штучного заземлювача складе:

$$R_{3,и} = \frac{13,1 \cdot 40,5}{13,1 + 40,5} = 9,9 \text{ Ом}.$$

Отримане значення практично відповідає необхідному значенню  $R_{3,и} = 9,3$  Ом.

Враховуючи, що за  $\rho_{\text{гр}} > 100$  Ом·м нормоване значення  $R_{3,и}$  може бути збільшене в  $\rho_{\text{гр}}/100$  раз, отримане значення зі значним запасом відповідає поставленим вимогам. План і розміри спроектованого заземлювача показані на рис. 16.9.

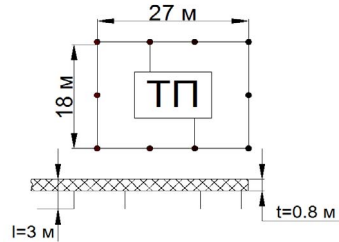


Рис. 16.9

### 16.3. Експлуатація заземлювальних пристроїв

На кожен заземлювальний пристрій, що знаходиться в експлуатації, повинні бути паспорт, що містить план розміщення електродів заземлювача і заземлювальних дротів зі всіма внесеними змінами, основні технічні дані, протоколи приймально-здавальних випробувань, результати перевірок станів і ремонтів.

У процесі експлуатації, поточних (не рідше ніж раз на три роки) та капітальних ремонтах візуально перевіряють наявність і стан заземлювальних провідників (відсутність обривів, стан забарвлення, затягування болтів). Якість зварних з'єднань визначають ударом молотка. Перевіряють наявність ланцюга між заземлювачами й елементами, що заземлюють (його опір ненормований). Виміряний опір заземлювальних провідників не повинен перевищувати розрахункового значення більш ніж в 1,2 разу, а опір їх контактів – 0,05 Ом.

Перевіряють стан пробивних запобіжників у вторинних ланцюгах знижувальних трансформаторів, які повинні бути справними.

Перевіряють опір петлі «фаза–нуль», користуючись приладами ЩІ1460, М417. Розрахункове значення струму КЗ в ЕУ до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю за мінімальної напруги мережі повинне перевищувати не менше ніж утричі номінальний струм найближчої плавкої вставки, нерегульованого розчіплювача автоматичного вимикача або розчіплювача з обернено залежною від струму характеристикою. Якщо мережі захищені автоматичними вимикачами з розчіплювачами, що миттєво спрацьовують, струм КЗ повинен перевищувати в 1,1 разу струм уставки, помножений на коефіцієнт розкиду. За відсутності відомостей про значення останнього струм КЗ повинен перевищувати в 1,4 разу, струм уставки автоматичних вимикачів з номінальним струмом не має перевищувати 100А і має бути в 1,25 разу, якщо  $t_{ном} > 100А$ .

Опір заземлювача визначають за допомогою приладу М416 або іншим вимірювачем опору заземлення. Вимірювання рекомендують здійснювати в періоди, коли ґрунти відтанули і мають мінімальну вологість. Для порівняння опору заземлювача з нормативними значеннями, обов'язкові для ґрунтів, що промерзли, необхідно виміряти значення  $R_z$ , збільшити в  $k$  разів. Значення похибкових коефіцієнтів наведені в праці [11].

Вибірково перевіряють стан елементів заземлювача з розкопуванням ґрунту. Бракують елементи, перетин яких зруйнований більш ніж на 50 %. Браковані елементи замінюють, а розкопування продовжують доки не будуть виявлені шість (поспіль) контактних з'єднань у задовільному стані. Для повітряних ліній (ПЛ) огляд з розкопуванням ґрунту виконують у 2 % загальної кількості опор із заземлювачами не рідше одного разу на 10 років. За незадовільного стану заземлювачів огляд повторюють на сусідніх опорах доки не виявлять двох справних заземлювачів поспіль.

Вимірювання опору заземлювачів опор ПЛ напругою до 1 кВ здійснюють під час капітальних і міжремонтних випробувань на всіх опорах із заземлювачами громозахисту і повторними заземлювачами нульового дроту, опір решти залізобетонних і металевих опор вимірюють вибірково у 2 % від їх загальної кількості.





## *Запитання та завдання до модуля IV*

1. Які існують способи заземлення нейтралей трансформаторів електричних мереж?
2. Які вимоги керівних документів до заземлення металевих частин ЕУ?
3. Які складові заземлювальних пристроїв ЕУ вам відомі?
4. Дайте визначення крокової напруги та напруги дотику.
5. Які види заземлення та коли його використовують для ЕУ?
6. Дайте характеристику природних та штучних заземлювачів, їх видів та типів.
7. Дайте характеристику системи заземлення згідно з комплексом стандартів ІЕС 60364 (ІЕС 364).
8. Яка послідовність розрахунку пристроїв заземлення в ЕУ з ізолюваною або резонансно заземленою нейтраллю?
9. Яка послідовність розрахунку пристроїв заземлення для ЕУ з ефективно заземленою нейтраллю?
10. Мережі якої напруги працюють з ізолюваними від землі нейтраллю всіма елементами мережі?
11. Мережі якої напруги працюють у режимі резонансного заземлення нейтраллю частини елементів мережі?
12. Мережі якої напруги працюють з ефективним заземленням нейтраллю трансформаторів мережі?
13. Назвіть головні переваги та недоліки електричних мереж, ізолюваних від землі.
14. Які основні переваги та недоліки резонансно заземлених мереж вам відомі?
15. Назвіть головні переваги та недоліки ефективно заземлених мереж.
16. Як впливає спосіб заземлення на техніко-економічні показники електричної мережі?

## Основні та електротехнічні одиниці (СІ)

Величина та її позначення	Одиниці СІ	
	найменування	розмірність
Довжина $l$	метр	м
Маса $G, g$	кілограм	кг
Час $t$	секунда	с
Електричний струм $I, i$	ампер	А
Термодинамічна температура $T$	кельвін	К
Кількість речовини $N$	моль	моль
Сила світла $J$	кандела	кд
Плоский кут $\alpha$	радіан	рад
Тілесний кут $\omega$	стерадіан	ср
Ємність електрична $C$	фарада	Ф (Кл/В)
Індукція магнітна $B$	тесла	Тл (Вб/м <sup>2</sup> )
Індуктивність особлива $L$	генрі	Гн (Вб/А)
Індукція взаємна $M$	генрі	Гн (Вб/А)
Кількість електрики $Q$	кулон	Кл (А·с)
Напруга електрична $U$	вольт	В
Напруженість електричного поля $E$	вольт на метр	В/м
Напруженість магнітного поля $H$	ампер на метр	А/м
Період коливання $T$	секунда	с
Потужність активна $P$	ватт	Вт (Дж/с)
Потужність реактивна $Q$	вар	вар
Потужність повна $S$	вольт-ампер	В·А
Густина струму $j$	ампер на м <sup>2</sup>	А/м <sup>2</sup>
Провідність електрична $G, g$	сіменс	См (1/Ом)
Провідність питома $\gamma$	сіменс на метр	См/м
Проникність діелектрична абсолютна $\epsilon_a$	фарад на метр	Ф/м
Проникність магнітна абсолютна $\mu_a$	генрі на метр	Гн/м
Стала електрична $\epsilon_0$	фарад на метр	Ф/м
Стала магнітна $\mu_0$	генрі на метр	Гн/м
Потенціал електричний $V, \varphi$	вольт	В
Потік магнітний $\Phi$	вебер	Вб (В·с)
Потокозчеплення $\Psi$	вебер	Вб
Робота, енергія, кількість теплоти $W$	джоуль	Дж (Вт·с)
Сила електрорушійна $E$	вольт	В
Сила магніторушійна $F_m$	ампер	А
Опір електричний $R, r$	ом	Ом

Величина та її позначення	Одиниці СІ	
	найменування	розмірність
Опір питомий $\rho$	ом·метр	Ом·м
Частота кутова електрична або магнітна $\omega, \Omega$	радіан на секунду	рад/с
Частота коливань електрична або магнітна $f$	герц	Гц (1/с)

## ДОДАТОК 2

## Технічні дані контакторів змінного струму

Серія	Номинальна напруга, В	Номинальний струм, А	Струм в обмотці електромагніту в момент увімкнення, А, за напруги, В	
			220	380
КТ-60, КТП-60	До 660	100, 160	2,1	1,4
		250	7,2	4,4
		400	9,8	–
		630	16,5	9,8
КТ-70, КТП-70	До 660	100	3,7	1,8
		160	3,9	1,8
МК	До 660	40, 63, 100,160	Потужність електромагніту 40 Вт	

**Примітки:**

1. У контакторах КТ – котушка електромагніту змінного струму з  $U_{\text{ном}} = 36, 110, 127, 220, 380$  і  $660$  В, у контакторах КТП і МК – котушка постійного струму з  $U_{\text{ном}} = 24, 48, 110$  та  $220$  В.

2. Струм в обмотці електромагніта змінного струму в увімкненому стані контактора в 10 разів менший ніж струм вмикання.

3. Контактори мають два – три допоміжні контакти на замикання та розмикання з допустимими струмами вмикання  $50$  А за напруги  $380$  В;  $30$  А за  $\sim 660$  В;  $25$  А за напруги  $110; 220$  В і струмами вимкнення  $5, 3$  та  $2,5$  А відповідно.

4. Допустима частота комутацій контакторів серії 60 – близько  $1200$  вмикань на годину, серії 70 – близько  $600$  вмикань на годину.

Технічні дані поширених пускачів ( $U_{\text{ном}} = 660 \text{ В}$ )

Серія	Величина	Номинальний струм, А	Потужність електромагніту, ВА		Зносостійкість (АС-3), $10^6$ циклів	
			за ввімкнення	за втримання	комутаційна	механічна
ПМА	3	40	200	20	Близько 2,5	Близько 16
	4	63	280	40	Близько 2,5	Близько 16
	5	100	350	45	Близько 2,5	Близько 10
	6	160	530	60	Близько 2,0	Близько 10
ПМЛ	1	16, 10	68	8	Близько 3,0	Близько 16
	2	25	87	7,6	Близько 2,0	Близько 16
	3	40	100	10	Близько 2,0	Близько 16
	4	63, 80	200	20	Близько 2,0	Близько 16
	5	125	380	30	Близько 4,0	Близько 16
	6	160	500	46	Близько 3,0	Близько 10
	7	200	800	57	Близько 2,0	Близько 10
ПМЕ	2	25	140	5,8	Близько 12,5	Близько 12,5
ПНВ	–	10	–	–	Близько 0,4	Близько 1,2
ПТ	–	16	–	–	5,0	–
	–	40	–	–	5,0	–

**Примітки:**

1. Електромагніти пускачів виконують на  $U_{\text{кот. ном}} = 24, 36, 40, 48, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 500, 660 \text{ В}$  змінного струму та 24, 48, 110 і 220 В постійного струму.

2. У пускачах використовують теплові реле з  $I_{\text{ном}}$  від 0,5 А близько  $I_{\text{ном. пуск}}$ .

3. Пускачі ПМА, ПМЛ і ПМЕ можуть мати близько чотирьох допоміжних контактів (на розмикання та замикання) зі струмами комутації до 6,3 А у пускачах 3-ї – 5-ї величини та на 10 А в пускачах 6-ї і 7-ї величини. На пускач можна встановити додатковий контактний блок з двома або чотирма контактами з номінальним струмом 16 А.

Технічні дані повітряних автоматичних вимикачів

Серія або тип автомата	Номинальна напруга, В	Номинальний струм автомата, А	Гранична здатність вимкнення за $U_{ном} = 380$ В, кА	Кількість полюсів	Номинальний струм розчіплювача, А	Тип розчіплювача* та вставки струму (кратність)		Час спрацювання		Додаткові розчіплювачі*										
						Від перевантаження	Від КЗ	за $I_{розч.ном}$	за КЗ, с											
АП50	~500; =200	1,6 – 63	0,3 – 6	2; 3	1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 50; 63	Т-регул. 0,6 – 1	ЕМ 3; 5; 10	< 30 хв	1,0 – 10**	Н <sub>ном</sub> , НЗ, ОП										
											25	0,7; 1,0 2,0	2; 3	0,3 – 1,6 2,0 – 6,0 8 – 16	1; 2; 3	0,6 – 1,6 2,0 – 12,5 16 – 25	ЕМ 12	< 20 хв	< 0,04	Н <sub>мін</sub> , НЗ
АЕ2000	~660; =220	100	6	2; 3	1,6 – 25 30 – 100	Т-регул. 0,9 – 1,15	ЕМ 12	< 20 хв	< 0,04	Н <sub>мін</sub> , НЗ										
ВА2000	~380	63	6	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,10, 16,20,25,32,40, 50,63	Т 1	ЕМ 4 ЕМ 7 ЕМ 15	< 60 хв	< 0,1	–										
											100	3	50, 63, 80, 100							
ВА2001	~415	100	6	3	50, 63, 80, 100	Т 1	ЕМ 4 ЕМ 7 ЕМ 15	< 60 хв	< 0,1	–										
ВА2003	~415	100	6	3	50, 63, 80, 100	Т 1	ЕМ 4 ЕМ 7 ЕМ 15	< 60 хв	< 0,1	–										

Продовження дод. 4

Серія або тип автомата	Номинальна напруга, В	Номинальний струм автомата, А	Гранична здатність відкриття за $U_{ном} = 380 В$ , кА	Кількість полюсів	Номинальний струм розчіплювача, А	Тип розчіплювача* та вставки струму (кратність)		Час спрацювання		Додаткові розчіплювачі*
						від перевантаження	від КЗ	за $I_{розч,ном}$	за КЗ, с	
ВА2004	~660	32	18	2,3	3, 5, 10, 16, 20, 32	Т 1	ЕМ 10	< 60 хв	< 0,02	-
		50			10, 20, 32, 40, 50					
		63			10, 20, 32, 40, 50, 63					
		100			60, 75, 100					
		250			125, 150, 175, 200, 225, 250					
		400			250, 300, 350, 400					
		630			500, 600, 630					
		800			600, 700, 800					
		160			16 – 160					
		250			160, 200					
400	200; 250									
А3700Б струмообмежув. з ЕМ і Т*	~ 660; = 400	160	5,5 – 75	2,3	320, 400	Т 1-1,15	ЕМ 4; 10 ЕМ 10	-	-	НЗ; 0П
		250	65	2; 3	160; 200					
		400	75	2; 3	200; 250					

Продовження дод. 4

Серія або тип автомата	Номінальна напруга, В	Номінальний струм автомата, А	Гранична здатність вимкнення за $U_{ном} = 380$ В, кА	Кількість полюсів	Номінальний струм розчіплювача, А	Тип розчіплювача* та вставки струму (кратність)		Час спрацювання		Додаючі розчіплювачі*
						від перевантаження	від КЗ	за $I_{розч.ном}$ 1,35	за КЗ, с	
А3700Б струмобмеж. з ЕМ		160	36	2; 3	80	-	ЕМ 4; 6; 10			
			75		160					
			80		250					
А3700Б струмобмеж. з П і ЕМ		400; 630	100	2; 3	400; 630	-	ЭМ 6; 8; 10			
			18 – 75		20 – 180					
			40		160 – 250					
			55		250 – 400					
А3700Ф не струмобмеж. з ЕМ	~ 660; = 400	160	25	2; 3	80	-	П 2; 3; 5; 7; 10 та ЕМ 10		4; 8 с **	НЗ; 0П
			30; 35		160					
А3700 С Селективний з П		630	50	2; 3	400; 630	-	ЕМ 6; 8; 10		-	
			50		160; 200; 250					
			60		250; 320; 400					
			60		400; 500; 630				0,1; 0,25; 0,4	
			60		400; 500; 630				4; 8; 16 с	

Серія або тип автомата	Номинальна напруга, В	Номинальний струм автомата, А	Гранична здатність вимкнення за $U_{ном} = 380$ В, кА	Кількість полюсів	Номинальний струм розчіплювача, А	Тип розчіплювача* (кратність)		Час спрацювання		Додаючі розчіплювачі*
						від перевантаження	від КЗ	за 1,35 $I_{розч.ном}$	за КЗ, с	
ВА88-32	~400	125	25	3; 4; 3+N	12,5; 16; 20; 25; 5; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125	Т 1	ЕМ 10	< 60 хв	< 0,02	Н; НЗ
ВА88-33		160	35		16; 20; 25; 32; 40; 63; 80; 100; 125					
ВА88-35	250	125; 160; 200; 250								
ВА88-37	400	250; 315; 400								
ВА88-40	800	400; 500; 630; 800								
ВА88-43	1600	1600	50		800; 1000; 1250; 1600		МІ 2(F); 0,6; 0,7; 0,8; 5(R); 10(B); 0,9; 1,0 12(M)	Див. захисні характеристики		

\* Типи розчіплювачів: Т – тепловий (Т1 – нерегульований); ЕМ – електромагнітний; П – напівпровідниковий; Н<sub>мін</sub> – мінімальної напруги; НЗ – незалежний; ОІП – у нульовому дрослі; Н0 – нульової напруги; МІП – мікропроцесорний (цифри після літер означають кратність спрацювання розчіплювача).

\*\* Значення часу за б-кратного  $I_{розч.ном}$ .



Технічні дані роз'єднувачів 6 – 35 кВ

Тип	Номінальна напруга, кВ	Струм			Маса, кг
		номіналь- ний, А	електродина- мічної стійкості, кА	термічної стійкості, кА (с)	
РВФ3	10	630	52	20	54
РВ3	10	630; 1000	52; 81	31,5	36; 54
РВК	10	2000	85	31,5	26
РВ3-Ш	10	2000	85	31,5	97
РВР3	10	4000	160	63	54
РВР3	20	8000	300	100	238
РД3	35	1000; 2000	63; 80	25; 31,5	57; 69
РГ	35	1000; 2000	40; 80	16; 31,5	53,9; 70,3

У таблиці введені такі позначення роз'єднувачів: Р – роз'єднувач, В – для внутрішнього установалення, Ф – фігурний (з прохідними ізоляторами), З – з ножами заземлення, К – з контактами кочення, Ш – шинний, Д – двоколонковий, Г – горизонтального установалення.

## Технічні дані вимикачів навантаження

Тип	Номинальна напруга, кВ	Струм				Привід
		номинальний, А	вимкнення, кА	електродинамічної стійкості, кА	термічної стійкості, кА (с)	
ВНР-10; ВНП-10	10 10	400	0,4	26	10 (1)	Ручний, Пружинний
ВНВП-10	10	320	2	40	20 (0,3)	Електро- магнітний
ВНП-16*	6	30, 75, 150	–	25	6 (10)	Ручний
ВНП-17*	10	30, 50, 100	–			

\* Застарілі типи вимикачів навантаження.

## Технічні характеристики силових вимикачів 6–35 кВ

Серія та тип вимикача*	Номинальний струм, А	Номинальний струм вимкнення, кА	Струм електродинамічної стійкості, кА		Струм термічної стійкості, кА, (за час, с)	Час, с			Маса, кг**	Застосований привід
			діючий	амплітудний		увімкнення повн.	вимкнення власн.	вимкнення повн.		
ВМП-10; ВМПМ-10	630; 1000; 1600	20	20	52	20 (4)	0,3	0,12	0,1	145 (4,5)	ПЭ-11, ПП-67, ППВ-10
	630; 1000; 1600; 3150	20; 31,5	20; 31,5	52; 80	31,5 (4)	0,3	– 0,12	0,1 0,1	240 (5,5) 400 (8)	ПЕВ-11
ВММ-10	400	10	10	25,5	10 (3)	0,2	–	0,12	90 (3, 5)	Пружинний
ВК-10	630; 1000; 1600	20; 31,5	20	52; 80	20 (4); 31,5 (4)	0,075	–	0,05	162 (12) 192 (12)	Пружинний, електро- магнітний
	1600; 2000	40	–	128	40 (3)				162 326	Електро- магнітний
ВВ-35	1250	20	20	52	20 (4)			0,07	–	–

Закінчення дод. 7

Серія та тип вимикача*	Номинальний струм, А	Номинальний струм вимкнення, кА	Струм електродинамічної стійкості, кА		Струм термічної стійкості, кА, (за час, с)	Час, с			Маса, кг**	Застосований привід
			діючий	ампліт.		увімк.	вим. повн.	вим. власн.		
ВР-10	630; 1000	20; 31,5	-	52; 80	20; 31,5 (3)	0,09	-	0,05	90	Електромагнітний
	1600; 2000								112	
	2500; 3150								290	
	800								30	
ВВ/TEL-6	800	8	-	32	8 (3)	0,01	-	0,06	30	Електромагнітний
ВВ/TEL-10	630	12,5	-	41	12,5 (3)	0,015	-	0,06	32	
	800	16	-	52	16 (3)					
	1000	20	-	25	20 (3)					
ВМП-35	1000	8,25	12	25	9 (5)	0,23	0,08	-	275 (13,5)	Пружинний
ВМК-35	630	8	10	26	10 (4)	0,14	0,08	0,05	504 (80)	ПЕ-11
	1000	16	26	45	16,5 (4)	0,11	0,08	0,05	710 (100)	Пневматичний

\*Скорочення в позначеннях вимикачів означають: В – вимикач, М – маломасляний, П – підвісний, К – колонковий, ВР – вакуумний Рівненського заводу, ВВ/TEL – вакуумний Севастопольського заводу «Гаврида-Електрик», ВВ – повітряний, П – із пружинним приводом, Е – з електромагнітним приводом. Цифра означає номінальну напругу в кВ.

\*\*У дужках наведено масу масла.

## Технічні характеристики трансформаторів напруги 6–35 кВ

Тип ТН	Номинальна напруга			Номинальна потужність для класу точності, ВА			Гранична потужність, незалежно від класу, ВА	Схема та група з'єднань	Маса, кг
	первинної, кВ	вторинної, В	вторинної додаткової, В	0,2	0,5	1			
НОЛ.08-6	6	100	–	30	50	75	200	1/1-0	26,5
НОЛ.08-10	10	100	–	50	75	150	300	1/1-0	28,5
НОЛП*	6	100	–	30	50	75	200	1/1-0	–
НОЛП*	10	100	–	50	75	150	300	1/1-0	–
ЗНОЛ.06-6	6/√3	100/√3	100/3;100	30	50	75	200	1/1/1-0-0	26,5
ЗНОЛ.06-10	10/√3	100/√3	100/3;100	50	75	150	300	1/1/1-0-0	28,5
ЗНОЛП-6	6/√3	100/√3	100/3;100	30	50	75	200	1/1/1-0-0	32
ЗНОЛП-10	10/√3	100/√3	100/3;100	50	75	150	300	1/1/1-0-0	32
3хЗНОЛ.06	6	100	100	30	50	75	200	1/1/1-0-0	95
3хЗНОЛП	10	100	100	50	75	150	300	1/1/1-0-0	105
ЗНОЛ-35	35/√3	100/√3	100/3	75	150	300	600	1/1/1-0-0	90
ЗНОЛЭ-35	35/√3	100/√3	100/3	–	150	300	600	1/1/1-0-0	60
НТМИ-6-66**	6	100	100/3	–	50	80	200	У/У/Δ-0	59
НТМИ-10-66*	10	100	100/3	–	120	200	500	У/У/Δ-0	81

\* Незаземлювані ТН з умонтованими захисними запобіжниками.

\*\* Застарілі ТН.

## Технічні характеристики трансформаторів струму 6–10 кВ

Тип та варіант виконання ТС	Струм			Гранична кратність обмотки 10Р	Номинальне вто- ринне наван- таження, ВА		Маса, кг
	первинний номінальний, А	електродина- мічної стійкості, кА	термічної стійкості, кА, с		0,2; 0,5	10Р	
ТОЛК-6 1,0 / 10Р	50	17,6	3,6 (1с)	8	30	–	10,5
	80	26	5,6 (1с)				
	100; 150; 200; 300; 400; 600	26	10 (1с)				
ТОЛК-10 1,0 / 5Р	50	17,6	3,6 (1с)	8	30	–	12
	80	26	5,6 (1с)				
	100; 150; 200; 300; 400; 600	26	10 (1с)				
ТПЛК-10 0,2;0,5 / 10Р	10	2,47	0,47 (3с)	12	10	15	48
	15	3,7	0,71 (3с)				
	30	7,4	1,42 (3с)				
	50	14,8	2,36 (3с)				
	100; 150; 200; 300; 400	74,5	4,72-9,45 (3с)				
	600	74,5	14,1; 18,9 (3с)				
	800; 1000; 1500	74,5	28,3 (3с)				
	20; 30	95-177	37,8-70,8 (3с)				
	40; 50; 75; 80; 100	96	38 (3с)				
	150; 200; 300; 400	102	40 (3с)				
ТПОЛ-10 0,2;0,5;1 / 10Р	600; 800	114	45 (3с)	10	10	15	20; 22
	1000; 1500	81,5	32 (3с)				
	2000	69	27 (3с)				
		51	20 (3с)				

Закінчення дод. 9

Тип та варіант виконання ТС	Струм			Гранична кратність обмотки 10P	Номінальне вторинне наван- таження, ВА		Маса, кг
	первинний номінальний, А	електроди- намічної стійкості, кА	термічної стійкості, кА, с		0,2; 0,5	10P	
ТОЛ-10 0,2;0,5;1/ 10P	5	1	0,4 (1с)	10	30	15	20
	10	2	0,76 (1с)				
	15	3	1,2 (1с)				
	20	4	1,56 (1с)				
	30	6,25	3,2 (1с)				
	40	7,56	4,3 (1с)				
	50	12,8	8 (1с)				
	75; 80	15	20 (1с)				
	100	25,5	31,5 (1с)				
	150	31,8	31,5 (1с)				
	200	51	31,5 (1с)				
	300; 400; 500;	102	40 (1с)				
	600; 750; 800;						
	1000; 1200; 1500						
ТЛ-10 0,5 / 10P	50	51	2,5 (3с)	15	10	15	-
	100	51	5 (3с)	15	10	15	
	150	51	7,5 (3с)	15	10	15	
	200	128	10 (3с)	15	10	15	
	300	128	15 (3с)	15	10	15	
	400	128	20 (3с)	15	10	15	
	600; 800; 1000;	128	31,5 (3с)	15	10	15	
	1500; 2000; 3000	-	40 (3с)	15	20	30	

**Основні технічні характеристики запобіжників  
напругою меншою ніж 1000 В**

Серія	Номінальний струм, А		Номінальний струм вимкнення, кА, за напруги змінного струму, В	
	запобіжника	плавкої вставки	380	500
ПР2	15	6, 10, 15	8	7
	60	15, 20, 25, 35, 45, 60	4.5	3.5
	100	60, 80, 100	11	10
	200	100, 125, 160, 200	11	10
	350	200, 260, 300, 350	11	10
	600	350, 430, 500, 600	11	10
	1000	600, 700, 850, 1000	11	10
ПН2	100	31,5; 40; 50; 63; 80; 100	100	1)
	250	80;100;125;160;200;250	100	
	400	200; 250; 315; 350; 400	40	
	600	315; 400; 500; 630	25	

**Примітки:**








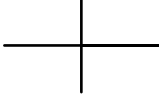
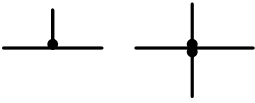

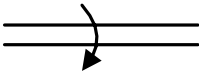

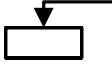
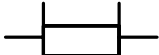
1. Запобіжники ПН2 можуть використовувати в мережі змінного струму за напруги до 500 В зі зменшеною комутаційною здатністю.
2. Запобіжники ПН2 можуть бути обладнані допоміжними контактами з номінальним струмом  $I_{ном} = 2$  А.
3. Похибки часу спрацьовування запобіжників до 1000 В відносно усереднених захисних характеристик сягають  $\pm 50$  %.

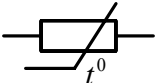
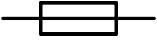




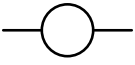
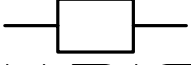
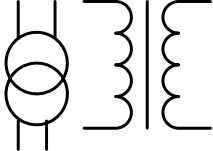
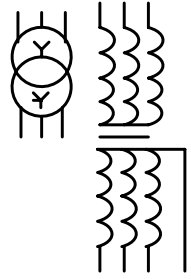
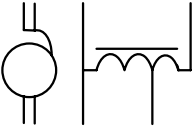
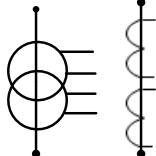


**Основні технічні характеристики високовольтних  
запобіжників серії ПКТ**

Номинальна напруга, кВ	Номинальний струм, А		Номинальний струм
	запобіжника	плавкої вставки	вимкнення, кА
6	20	2; 3,2; 5; 8; 10; 16; 20	40
	50	31,5; 40; 50	31,5
	100	50; 80; 100	31,5
	200	100; 160; 200	31,5
	400	315; 400	20
10	20	2; 3,2; 5; 8; 10; 16; 20	31,5
	50	31,5; 40; 50	31,5
	100	50; 80; 100	20
	200	100; 160; 200	20
35	10	2; 3,2; 5; 8; 10	3,5
	20	16; 20	3,5
	40	31,5; 40	3,5

**Умовні графічні позначення, що використовуються в електричних схемах відповідно до Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД)**

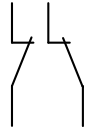
	Постійний струм
	Змінний струм
	Негативна полярність
	Позитивна полярність
$m \sim f U$	Змінний струм кількістю фаз $m$ , частотою $f$ , напругою $U$
	Трифазна обмотка з'єднана в трикутник
	Трифазна обмотка з'єднана в зірку
	Лінія електричного зв'язку, провід, кабель, шина
	Перетинання проводів
	З'єднання проводів
	Механічний зв'язок
	Обертальний рух за годинниковою стрілкою
	Резистор постійний
	Резистор змінний
	Шунт вимірювальний

	Терморезистор
	Запобіжник плавкий
	Конденсатор із постійною ємністю
	Котушка індуктивності
	Котушка індуктивності, дросель із магнітопроводом
	Реактор (у схемах електропостачання)
	Прилад електровимірювальний показувальний
	Прилад електровимірювальний реєструючий
	Трансформатор однофазний двообмотковий із феромагнітним магнітопроводом
	Трансформатор трифазний двообмотковий із феромагнітним магнітопроводом, з'єднання обмоток зірка-зірка з виведеною нейтральною точкою
	Однофазний автотрансформатор із феромагнітним магнітопроводом
	Вимірювальний трансформатор струму з одним магнітопроводом та двома вторинними обмотками

### Контакти комутаційних пристроїв



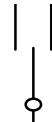
Замикаючий



Розмикаючий



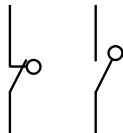
Перемикаючий



Перемикаючий з центральним середнім положенням



Контакти без самоповернення  
замикаючий



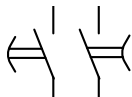
Контакти без самоповернення  
розмикаючий



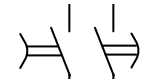
Контакти із самоповерненням:  
замикаючий



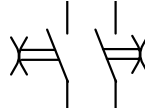
Контакти із самоповерненням  
розмикаючий



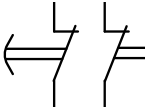
Замикаючі контакти із  
затримкою при спрацюванні



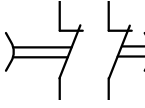
Замикаючі контакти із затримкою при поверненні



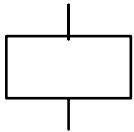
Замикаючі контакти із затримкою при спрацюванні та поверненні



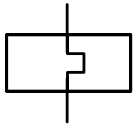
Розмикаючі контакти із затримкою при спрацюванні



Розмикаючі контакти із затримкою при поверненні



Котушка електромеханічного пристрою



Приймаючий пристрій електротеплового реле



Вимикач кнопковий натискний

**Силові контакти**



Контакт замикаючий



Контакт розмикаючий



Контакт, що замикає й гасить дугу



Контакт, що розмикає й гасить дугу



Контакт, що замикає з автоматичним спрацюванням



Контакт вимикача



Контакт роз'єднувача



Контакт вимикача навантаження



Вимикач високої напруги

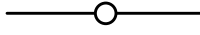
**Контакти рознімного з'єднання**



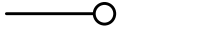
Штир



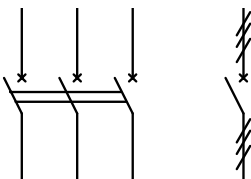
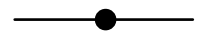
Гніздо



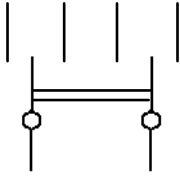
Контакти розбірного з'єднання



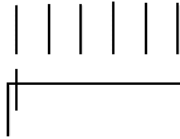
Контакти нерозбірного з'єднання



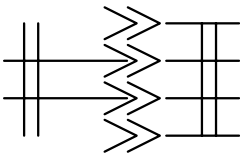
Вимикач триполосний



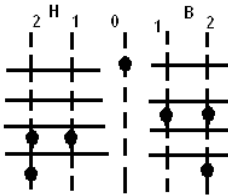
Перемикач двополосний  
трипозиційний із нейтральним  
положенням



Перемикач триполосний  
багатопозиційний  
(шестипозиційний)



З'єднання контактне рознімне  
чотирипровідне



Багатопозиційний перемикач  
зі складною комутацією  
(замикання контакту в  
кожному положенні  
вказується крапкою)

**Буквені коди електричних елементів і пристроїв, що використовуються в електричних схемах відповідно до Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД)**

- A** – пристрої, підсилювачі
- BE** – сельсин-приймач
- BC** – сельсин-датчик
- BK** – тепловий датчик
- BL** – фотоелемент
- BP** – датчик тиску
- BR** – тахогенератор вимірювання
- BV** – датчик швидкості
- C** – ємності
- DA** – аналогова мікросхема
- DD** – цифрова мікросхема, логічний елемент
- FU** – запобіжник плавкий від різних впливів
- G** – генератори, джерела живлення
- HA** – прилад звукової сигналізації
- HL** – прилад світлової сигналізації
- K** – реле, контактори, пускачі
- KA** – реле струму
- KK** – реле електротеплове
- KM** – контактор, магнітний пускач, автотрансформатори
- KT** – реле часу
- KV** – реле напруги
- L** – котушки індуктивності, дроселі
- M** – двигуни
- P** – прилади, вимірювальні пристрої
- PA** – амперметр
- PV** – вольтметр
- PW** – ватметр
- Q** – вимикачі в силових колах
- QF** – вимикач автоматичний з приводом
- QS** – роз'єднувач
- R** – резистори
- RK** – терморезистор

*Закінчення дод. 13*



**RP** – потенціометр  
**RS** – шунт вимірювальний  
**S** – комутаційні пристрої в калах  
**SA** – вимикач, перемикач  
**SB** – вимикач кнопковий  
**SF** – вимикач автоматичний

*Вимикачі, що спрацьовують від різних впливів:*

**SL** – рівня  
**SP** – тиску  
**SQ** – положення  
**SR** – частоти обертання  
**SK** – температури  
**T** – трансформатори  
**TA** – трансформатор струму  
**TS** – електромагнітний стабілізатор  
**TV** – трансформатор напруги, реактор  
**VD** – діод, стабілітрон  
**VT** – транзистор  
**VS** – тиристор  
**X** – контактні з'єднання  
**XP** – штир  
**XS** – гніздо  
**YA** – електромагніт у силових колах  
**YB** – гальма з електромагнітним приводом  
**YC** – муфта з електромагнітним приводом



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Козлов В. Д.* Электрооборудование трансформаторных подстанций аэропортов / В. Д. Козлов. – М. : Воздуш. трансп., 1993. – 248 с.
2. *Козлов В. Д.* Електричні апарати. Загальні питання електричних апаратів : посібник / В. Д. Козлов. – К. : НАУ, 2005. – 92 с.
3. *Козлов В. Д.* Електричні апарати. Модуль 2. Комутаційні апарати низької та середньої напруги : посібник / В. Д. Козлов, М. І. Соломаха. – К. : НАУ, 2006. – 84 с.
4. *Козлов В. Д.* Електричні апарати. Вимірювальні, контролювальні та захисні апарати : посібник / В. Д. Козлов, С. В. Єнчев. – К. : НАУ, 2007. – 72 с.
5. *Козлов В. Д.* Електричні апарати : лабораторний практикум / В. Д. Козлов, М. І. Соломаха, С. В. Єнчев. – К. : НАУ, 2008. – 44 с.
6. *Справочник-каталог.* Электротехническая продукция предприятий Украины. Ч. 1. Электротехнические изделия общепромышленного исполнения до 1000 В / под ред. В. Д. Козлова и Е. И. Удада. – К. : «Варта», 1995. – 136 с.
7. *Справочник-каталог.* Электротехническая продукция предприятий Украины. Ч. 2. Электротехнические изделия общепромышленного исполнения выше 1000 В / под ред. В. Д. Козлова и С. Я. Меженного. – К. : НАУ, 1998. – 172 с.
8. *Русско-украинский* толковый словарь по электроэнергетике / под ред. С. Я. Меженного. – К. : НИИ Энергетики, 1998. – 174 с.
9. *ГОСТ 15150-69.* Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортировки в части воздействия климатических факторов внешней среды.
10. *ГОСТ 14254-96.* Степени защиты, обеспечиваемые оболочками. Код IP.
11. *Правила* устройства электроустановок (ПУЭ 2009). – К. : Форт, 2009. – 699 с.
12. *ГОСТ 14312-79.* Контакты электрические. Термины и определения.
13. *ГОСТ 721-77.* Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.
14. *ГОСТ 6827-76.* Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов.
15. *ГОСТ 8024-84.* Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Норма нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.

16. *Васильев А. А.* Электрическая часть станций и подстанций : учебник для вузов / под ред. А. А. Васильева. – М. : Энергия, 1980. – 608 с
17. *Чунихин А. А.* Электрические аппараты / А. А. Чунихин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
18. *Родштейн Л. А.* Электрические аппараты / Л.А.Родштейн. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 304 с.
19. *Электротехнический справочник*. Т. 1. / под общей ред. П. Г. Грудинского и др. – М. : Энергия, 1994. – 776 с.
20. *Рожкова Л. Д.* Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
21. *Евдокимов Ф. Е.* Теоретические основы электротехники / Ф. Е. Евдокимов. – М. : Изд. центр «Академия», 2004. – 508 с.
22. *Сахаров П. В.* Проектирование электрических аппаратов / П. В. Сахаров. – М. : Энергия, 1971. – 324 с.
23. *Теория электрических аппаратов* / под ред. Г. Н. Александрова. – М. : Высш. шк., 1985. – 312 с.
24. *Штефан Ф.* Устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током / Ф. Штефан. – Прага : Изд. фирмы «MOELLER», 2004. – 84 с.
25. *Козлов В. Д.* Устройства защитного отключения // Электропанорама. – 2000. – № 2. – С. 11–13; № 3. – С. 14; № 4. – С. 12–13; № 5. – С. 19; № 6. – С. 14.
26. *Реле защиты* / под ред. В. С. Алексеева. – М. : Энергия, 1976. – 464 с.
27. *Букович Н. В.* Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем / Н. В. Букович. – Львів : Вища шк., 1988. – 248 с.
28. *Баркан Я. Д.* Эксплуатация электрических систем / Я. Д. Баркан. – М. : Высш. шк., 1990. – 304 с.
29. *Долгинов А. И.* Техника высоких напряжений в электроэнергетике / А. И. Долгинов. – М. : Энергия, 1968. – 464 с.
30. *Рябкова Е. Я.* Заземления в установках высокого напряжения / Е.Я. Рябкова. – М. : Энергия, 1978. – 224 с.
31. *Неклепаев Б. Н.* Электрическая часть электростанций и подстанций : учеб. для вузов / Б. Н. Неклепаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
32. *О внедрении* временных норм на напряжение прикосновения для распределительных устройств и трансформаторных подстанций напряжением выше 1000 В с глухим заземлением нейтрали. Решение № Э-13 76 Минэнерго СССР от 29 декабря 1976 г.
33. *Гук Ю. Б.* Проектирование электрической части станций и подстанций / Ю. Б. Гук, В. В. Кантан, С. С. Петрова. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
34. *Справочник* по электротехническому и светотехническому оборудованию аэродромов / под ред. Ю.К. Величко. – М. : Воздуш. трансп. 1994. – 272 с.

## ЗМІСТ

---

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ .....	3
ПЕРЕДМОВА .....	4
ВСТУП.....	6
<b>Модуль I. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ .....</b>	
<b>9</b>	
Розділ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ОСНОВНІ ВИМОГИ, ЩО ЇМ СТОВЛЯТЬ.....	9
1.1. Класифікація електричних апаратів.....	9
1.2. Кліматичне виконання, типи атмосфери, категорії розміщення та захисні оболонки електричних апаратів .....	10
1.3. Номінальні параметри та основні вимоги до електричних апаратів .....	14
1.4. Основні матеріали електричних апаратів.....	17
1.5. Види електричних схем.....	17
Розділ 2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ .....	20
2.1. Поняття електродинамічної стійкості.....	20
2.2. Електродинамічні сили в паралельних провідниках .....	22
2.3. Електродинамічні сили в перпендикулярних провідниках .....	24
2.4. Електродинамічні сили кільцевого витка та між витками .....	26
Розділ 3. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ .....	28
3.1. Проблема нагрівання електричних апаратів .....	28
3.2. Джерела тепла в електричних апаратах.....	30
3.3. Відведення тепла від нагрітого тіла.....	36
3.4. Нагрівання та охолодження апаратів у різних режимах роботи .....	41
3.5. Нагрівання у разі короткого замикання. Термічна стійкість електричних апаратів .....	45
Розділ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ.....	46
4.1. Визначення та класифікація контактів .....	46
4.2. Опір контактів.....	49
4.3. Матеріали, з яких виготовляють контакти .....	52

4.4. Нагрівання контактів .....	53
4.5. Електродинамічні сили в контактах.....	54
4.6. Конструкції комутаційних контактів .....	55
<b>Розділ 5. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА ТА МЕТОДИ ЇЇ ГАСІННЯ .....</b>	<b>60</b>
5.1. Електрична дуга в комутаційних апаратах.....	60
5.2. Фізичні процеси в дуговому проміжку .....	61
5.3. Електрична дуга постійного струму .....	64
5.4. Електрична дуга змінного струму .....	69
5.5. Основні методи гасіння електричної дуги.....	73
5.6. Вимикальна здатність електричних апаратів .....	81
<b>Розділ 6. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ</b>	
<b>В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ.....</b>	<b>82</b>
6.1. Основні терміни та співвідношення.....	82
6.2. Магнітні кола постійного струму.....	86
6.3. Магнітні кола змінного струму .....	91
<i>Запитання та завдання до модуля I .....</i>	<i>96</i>
<b>Модуль II. КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ НИЗЬКОЇ</b>	
<b>ТА СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ .....</b>	
<b>98</b>	
<b>Розділ 7. КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ НАПРУГОЮ</b>	
<b>МЕНШЕ НІЖ 1000 В .....</b>	<b>98</b>
7.1. Класифікація комутаційних апаратів та категорії	
застосування .....	98
7.2. Рубильники та перемикачі .....	99
7.3. Контактори .....	104
7.4. Пускачі .....	108
7.5. Автоматичні повітряні вимикачі .....	114
<b>Розділ 8. КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ НАПРУГОЮ</b>	
<b>ВИЩОЮ ЗА 1000 В .....</b>	<b>125</b>
8.1. Класифікація комутаційних апаратів вищих за 1000 В....	125
8.2. Роз'єднувачі, короткозамикачі та відокремлювачі .....	125
8.3. Вимикачі навантаження .....	130
8.4. Силові вимикачі. Класифікація, технічні параметри.....	132
8.5. Маломасляні вимикачі.....	134
8.6. Вакуумні вимикачі.....	138
8.7. Елегазові вимикачі.....	139
8.8. Повітряні вимикачі .....	141
8.9. Електромагнітні вимикачі.....	143
8.10. Синхронізовані вимикачі .....	145
<b>Розділ 9. ПРИВОДИ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ .....</b>	<b>147</b>
9.1. Визначення та класифікація приводів.....	147

9.2. Приводи комутаційних апаратів напругою меншою ніж 1000 В.....	148
9.3. Приводи роз'єднувачів та вимикачів навантаження .....	150
9.4. Приводи силових вимикачів .....	152
<b>Розділ 10. ВИБІР КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ.....</b>	<b>159</b>
10.1. Загальні умови вибору електротехнічних пристроїв.....	159
10.2. Вибір рубильників, перемикачів, контакторів та магнітних пускачів .....	160
10.3. Вибір автоматичних повітряних вимикачів .....	162
10.4. Вибір роз'єднувачів та вимикачів навантаження .....	169
10.5. Вибір силових вимикачів .....	171
<i>Запитання та завдання до модуля II.....</i>	<i>172</i>

### **Модуль III. ВІМІРЮВАЛЬНІ АПАРАТИ, АПАРАТИ КОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСНІ АПАРАТИ .....**

<b>Розділ 11. ВІМІРЮВАЛЬНІ АПАРАТИ.....</b>	<b>173</b>
11.1. Прилади електровимірювань трансформаторних підстанцій .....	173
11.2. Вимірювальні трансформатори напруги .....	175
11.3. Вимірювальні трансформатори струму .....	180
11.4. Вибір вимірювальних трансформаторів .....	184
<b>Розділ 12. ЗАХИСНІ АПАРАТИ .....</b>	<b>188</b>
12.1. Плавкі запобіжники .....	188
12.2. Вибір запобіжників .....	194
12.3. Пристрій захисного вимкнення .....	202
12.4. Струмообмежувальні реактори .....	205
<b>Розділ 13. ЕЛЕКТРИЧНІ РЕЛЕ.....</b>	<b>207</b>
13.1. Класифікація реле .....	207
13.2. Принцип дії електромагнітного реле .....	208
13.3. Вимірювальні реле струму та напруги .....	209
13.4. Допоміжні реле .....	210
13.5. Електронні реле.....	212
13.6. Вибір реле.....	216
<i>Запитання та завдання до модуля III.....</i>	<i>218</i>

### **Модуль IV. ШИННІ КОНСТРУКЦІЇ ТА КОНСТРУКЦІЇ ТП.....**

<b>Розділ 14. ШИННІ КОНСТРУКЦІЇ .....</b>	<b>219</b>
14.1. Електричні шини.....	219
14.2. Опорні та прохідні ізолятори.....	225

14.3 Шинні конструкції. Вибір шин та ізоляторів .....	228
<b>Розділ 15. СХЕМИ ТА КОНСТРУКЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИБОРІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ .....</b>	<b>230</b>
15.1. Класифікація та основні вимоги до розподільних пристроїв.....	230
15.2. Схеми електричних з'єднань РП-6...35 кВ .....	233
15.3. Схеми РП – 0,4 кВ і електроприймачів 1–3 категорій....	239
15.4. Комплектні розподільчі пристрої 6...35 кВ і 0,4 кВ .....	247
15.5. Конструкції трансформаторних підстанцій аеропортів .....	255
<b>Розділ 16. ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНІ ПРИБОРИ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ .....</b>	<b>259</b>
16.1. Призначення пристроїв заземлення станцій та підстанцій, їх види та вимоги до них .....	259
16.2. Конструкції заземлювальних пристроїв .....	262
16.3. Експлуатація заземлювальних пристроїв .....	279
<i>Запитання та завдання до модуля IV</i> .....	281
<i>ДОДАТОК 1. Основні та електротехнічні одиниці (СІ) .....</i>	<i>282</i>
<i>ДОДАТОК 2. Технічні дані контакторів змінного струму .....</i>	<i>283</i>
<i>ДОДАТОК 3. Технічні дані поширених пускачів .....</i>	<i>284</i>
<i>ДОДАТОК 4. Технічні дані повітряних автоматичних вимикачів .....</i>	<i>285</i>
<i>ДОДАТОК 5. Технічні дані роз'єднувачів 6–35 кВ .....</i>	<i>289</i>
<i>ДОДАТОК 6. Технічні дані вимикачів навантаження .....</i>	<i>290</i>
<i>ДОДАТОК 7. Технічні характеристики силових вимикачів 6–35 кВ .....</i>	<i>291</i>
<i>ДОДАТОК 8. Технічні характеристики трансформаторів напруги 6–35 кВ .....</i>	<i>293</i>
<i>ДОДАТОК 9. Технічні характеристики трансформаторів струму 6–10 кВ .....</i>	<i>294</i>
<i>ДОДАТОК 10. Основні технічні характеристики запобіжників напругою меншою ніж 1000 В .....</i>	<i>296</i>
<i>ДОДАТОК 11. Основні технічні характеристики високовольтних запобіжників серії ПКТ .....</i>	<i>297</i>
<i>ДОДАТОК 12. Умовні графічні позначення, що використовуються в електричних схемах відповідно до Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) .....</i>	<i>298</i>
<i>ДОДАТОК 13. Буквені коди електричних елементів і пристроїв, що використовуються в електричних схемах відповідно до Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) .....</i>	<i>304</i>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>306</b>

*Навчальне видання*

КОЗЛОВ Віктор Дмитрович  
ЗАХАРЧЕНКО Віктор Панасович  
ТАЧИНІНА Олена Миколаївна

## ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ

Підручник

За загальною редакцією В. Д. Козлова

Редактор *З. О. Остап'юк*  
Технічний редактор *А. І. Лавринович*  
Коректор *Л. М. Романова*  
Комп'ютерна верстка *Н. В. Черної*

Підп. до друку 08.06.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 18,14. Обл.-вид. арк. 19,5.  
Тираж 100 прим. Замовлення № 74-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002