

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО**  
**ГОСПОДАРСТВА імені О.М. БЕКЕТОВА**

С. В. Швець

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**  
з курсу  
**«ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ»**

*(для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання  
за напрямом підготовки 6.050701– "Електротехніка та електротехнології",  
а також для слухачів другої вищої освіти  
за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання")*

Харків  
ХНУМГ  
2013

Конспект лекцій курсу «Електричні апарати» (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701– "Електротехніка та електротехнології", а також для слухачів другої вищої освіти за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання") / С. В. Швець ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х.: ХНУМГ, 2013 - 152 с.

Автор: доц., к.т.н., доц. С. В. Швець

Рецензент: к.т.н., доц. Хітров А.В.

Рекомендовано кафедрою "Електропостачання міст",  
протокол засідання № 3 від 24 листопада 2011 р.

## ЗМІСТ

	Стор.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>ЛЕКЦІЯ 1.</b> ФУНКЦІЇ ТА ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВКАХ .....	5
<b>ЛЕКЦІЯ 2.</b> ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ. УМОВИ РОБОТИ, КЛІМАТИЧНЕ ВИКОНАННЯ, КАТЕГОРІЇ РОЗМІЩЕННЯ .....	11
<b>ЛЕКЦІЯ 3.</b> ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ .....	16
<b>ЛЕКЦІЯ 4.</b> ПРОЦЕСИ НАГРІВАННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ. РЕЖИМИ РОБОТИ	25
<b>ЛЕКЦІЯ 5.</b> КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ. ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ .....	36
<b>ЛЕКЦІЯ 6.</b> ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ТА ПРОЦЕСИ ДУГОГАСІННЯ. ПРОЦЕСИ ПРИ ВІДКЛЮЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО ТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	45
<b>ЛЕКЦІЯ 7.</b> ПЕРЕНАПРУГИ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ВІДКЛЮЧЕННЯМ СТРУМУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ. ПРИНЦИПИ ДУГОГАСІННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ .....	50
<b>ЛЕКЦІЯ 8.</b> ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА, КЛАСИФІКАЦІЯ. ПЕРЕХІДНИЙ ОПІР У КОНТАКТНИХ ПОВЕРХНЯХ. ПОВЕРХНЕВІ ПЛІВКИ, ЇХ ВПЛИВ НА ОПІР І БОРТЬБА З НИМИ. СТАРІННЯ ТА ЗНОС КОНТАКТІВ. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТІВ. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОМУТАЦІЙНИХ КОНТАКТІВ .....	56
<b>ЛЕКЦІЯ 9.</b> ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА. ВИМОГИ ДО ЗАПОБІЖНИКІВ. ПОГРАНИЧНИЙ СТРУМ. СТРУМОЧАСОВА ХАРАКТЕРИСТИКА .....	68
<b>ЛЕКЦІЯ 10.</b> ПРИВОДИ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ .....	73
<b>ЛЕКЦІЯ 11.</b> РУБИЛЬНИКИ І ПЕРЕМИКАЧІ. ПАКЕТНІ ВИМИКАЧІ. КОМАНДОАПАРАТИ ( КОНТРОЛЕРИ, КНОПКИ УПРАВЛІННЯ, КЛЮЧІ УПРАВЛІННЯ, ПУТЬОВІ І КІНЦЕВІ ВИМИКАЧІ). КОНТАКТОРИ І МАГНІТНІ ПУСКАЧІ .....	81
<b>ЛЕКЦІЯ 12.</b> АВТОМАТИЧНІ ПОВІТРЯНІ ВИМИКАЧІ (АВТОМАТИ) .....	91
<b>ЛЕКЦІЯ 13.</b> РЕЛЕ НАПРУГИ І СТРУМУ .....	107
<b>ЛЕКЦІЯ 14.</b> МАСЛЯНІ ВИМИКАЧІ .....	116
<b>ЛЕКЦІЯ 15.</b> ПОВІТРЯНІ ВИМИКАЧІ .....	130
<b>ЛЕКЦІЯ 16.</b> ВАКУУМНІ ВИМИКАЧІ .....	139
<b>СПИСОК ДЖЕРЕЛ</b> .....	152

## ВСТУП

Конспект лекцій з навчальної дисципліни "Електричні апарати" призначений для студентів 3 курсу денної форми та 4 курсу заочної форми навчання, а також для слухачів другої вищої освіти за напрямом підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології", спеціальність 6.05070103 "Електротехнічні системи електроспоживання".

В даному конспекті лекцій стисло розглядаються основи теорії, принципи роботи, конструкції вузлів електричних апаратів та режими їх роботи і експлуатаційні характеристики, а також рекомендації по вибору електричних апаратів і розрахунку їх окремих вузлів. Конспект написано у відповідності до навчального плану та робочої програми курсу "Електричні апарати" для напряму підготовки 6.050701 – "Електротехніка та електротехнології".

Мета посібника - дати студентам знання, необхідні для розуміння фізики процесів, що відбуваються в електричних апаратах при різних режимах роботи, конструкції сучасних електричних апаратів при напрузі до 1000 В та 6-35 кВ, принципів їх роботи, а також грамотного вибору електричних апаратів для розподільних мереж цих напруг.

Матеріал викладено таким чином, щоб при відносно невеликому об'ємі посібника акцентувати увагу на розумінні фізичних процесів і явищ, що відбуваються в електричних апаратах, основах роботи найбільш широко вживаних електричних апаратів в номінальному режимі, режимі перевантаження та режимі короткого замикання.

Список джерел, дозволить студентам поглиблювати і розширювати здобуті знання, плідно використовувати час, призначений для самостійної роботи.

Конспект лекцій призначений для слухачів та студентів вищих навчальних закладів, які спеціалізуються в галузі електропостачання та електротехніки, а також може бути використаний при курсовому і дипломному проектуванні та при вивченні різного електротехнічного обладнання.

Конспект лекцій ухвалено:

Кафедрою електропостачання міст. (протокол № 3 від 24 листопада 2011 р.).

Вченою радою факультету електропостачання та освітлення міст. (протокол № 6 від 17 лютого 2011 р.).

## ЛЕКЦІЯ 1

### ФУНКЦІЇ ТА ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВКАХ

#### 1.1 Предмет курсу, його роль і місце серед інших дисциплін

Беззаперечним і усіма усвідомленим є факт, що рівень розвитку суспільства визначається рівнем його енергозабезпечення. Разом з електричними машинами електричні апарати є фундаментальними засобами, що забезпечують прогрес в області електрифікації, автоматизації і комп'ютеризації і сучасний їх стан. Саме тому дисципліна електричні апарати – одна із базових дисциплін для майбутніх спеціалістів енергетиків, в тому числі з енергетичного менеджменту.

*Електричні апарати* – це пристрої, що служать для керування потоком електроенергії від генератора (джерела) до споживача. Більш детальне визначення таке:

*Електричні апарати* – це пристрої електротехніки, що використовуються для вмикання, вимикання електрокіл, контролю, захисту, керування, регулювання роботою установок, що призначені для передачі, перерозподілу та споживання енергії.

*Предмет курсу* "Електричні апарати" полягає у вивченні основ функціонування електричних апаратів, їх конструкцій, та їх експлуатаційних характеристик і в першу чергу тих електричних апаратів, що використовують в енергетичних та технічних системах і при автоматизації різних технологічних і виробничих процесів.

В результаті вивчення курсу студент повинен *знати*:

- основні фізичні принципи роботи;
- розрахунки окремих елементів і вузлів апаратів;
- методи вибору провідників та апаратів і області їх застосування;
- основні технічні вимоги до апаратів.

*Вміти*:

- виконувати розрахунки для правильного вибору автоматичних вимикачів, рубильників, пускачів і контакторів;
- визначати розрахункові умови короткого замикання;
- виконувати вмикання електричних апаратів, вимикання при короткому замиканні.

Дисципліна "Електричні апарати" базується на знаннях вищої математики, фізики, ТОЕ, елементів теорії електричних машин.

Електричні апарати застосовуються практично всюди, де необхідно керувати потоками електроенергії – починаючи від АЕС і закінчуючи побутовими приладами, наприклад, таких як пральна машина, електропраска, сучасна електролампа.

*Дисципліна "Електричні апарати"* одна із базових дисциплін для майбутніх фахівців інженерів-електриків.

## 1.2 Класифікація електричних апаратів

Класифікація електричних апаратів може проводитись по-різному. Це зв'язано з різноманітністю апаратів та функцій, які вони виконують, із суміщенням в одному апараті декількох функцій. По одній ознаці їх класифікувати дуже важко, бо ознак по яких можна розділяти або об'єднати апарати є багато: габарити, призначення, допустимі струми і напруги, температурні режими експлуатації, кліматичні умови та багато інших. Найбільш прийнятною є класифікація електричних апаратів по призначенню, що передбачає їх поділ на наступні великі групи:

1) *комутаційні апарати* – призначені для вмикання, вимикання та перемикання електричних кіл. Це рубильники, пакетні вимикачі, вимикачі навантаження, автоматичні вимикачі, перемикачі, роз'єднувачі.

2) *захисні* – для захисту електричних кіл від короткого замикання (запобіжники високої та низької напруги);

3) *обмежуючі* – для обмеження струмів короткого замикання (реактори) і перенапруги (розрядники);

4) *пускорегулюючі* – для пуску, регулювання частоти обертання, струму, напруги електричних машин та інших споживачів електроенергії (контактори, пускачі, силові і командні контролери, реостати);

5) *контролюючі* – це апарати для контролю заданих електричних і неелектричних параметрів ( реле, датчики);

б) електричні апарати для вимірювань шляхом ізолювання первинних кіл від вторинних (трансформатори струму і напруги);

7) *регулюючі електричні апарати* – для автоматичного неперервного регулювання заданого параметра електричної сітки або автоматичного підтримання неперервної стабілізації.

В межах однієї групи апарати поділяються на апарати низької напруги, як правило до 660 В, і високої ( вище 1000 В або 3000 В).

*По виду струму розрізняють апарати:*

- змінного струму;
- постійного струму;
- промислової частоти;
- високої частоти( відбійні молотки).

*По роду захисту від оточуючого середовища* апарати поділяють на ті, що працюють у відкритому середовищі, закритому, водозахисному, вибухонебезпечному та на повітрі.

*По способу дії* ( електромагнітні, магнітоелектричні, електродинамічні, індукційні, теплові і т.п.).

*По принципу роботи* апарати розділяють на контактні і безконтактні. Контактні мають рухомі контакти; безконтактні діють на принципі зміни їх параметрів: індуктивності, ємності, електричного опору.

*За ступенем автоматизації застосування* електричні апарати можна поділити на автоматичні, що діють в залежності від заданого режиму, і ручного перемикання, що працюють від волі оператора.

### 1.3 Вимоги до електричних апаратів

В залежності від призначення, умов експлуатації, необхідної надійності і т.д. вимоги до електричних апаратів дуже різноманітні. Однак можна сформулювати **загальні вимоги до всіх груп електричних апаратів**:

1. При номінальному режимі роботи температура струмоведучих елементів апарата не повинна перевищувати значень, що відповідають державним стандартам або іншим нормативним документам. Номінальний режим – це той режим, при якому електричний апарат функціонує у відповідності до його паспортних даних.
2. В кожному електричному колі може бути ненормальний (перевантаження) або аварійний (коротке замикання) режим. В цих випадках струм в 50 і більше раз перевищує номінальний.
3. Апарат при роботі в аварійному режимі на протязі певного часу знаходиться під великим термічним та електродинамічним навантаженням. Однак ці навантаження не повинні викликати остаточних явищ, що порушують працездатність апарату після усунення перевантажень, або короткого замикання.
4. Ізоляція електричних апаратів повинна витримувати перенапруги і мати запас, що враховує погіршення властивостей ізоляції внаслідок старіння, осадження, пилу, бруду, вологи.
5. Контакти апаратів, призначених для відключення, повинні бути розраховані на струми короткого замикання.
6. До кожного апарату пред'являються специфічні вимоги, обумовлені його призначенням.

Розглянемо конкретніше **основні вимоги до електричних апаратів**. Ці вимоги визначаються державними стандартами, або поки апарат знаходиться в стадії проектування і не накопичено достатньо інформації про його можливості, технічними умовами.

Технічні умови діють тоді, коли ще не накопичено достатнього досвіду проектування, експлуатації і виготовлення електричного апарату.

Кожен апарат повинен мати **незмінні технічні параметри**.

Електричні апарати оцінюються за:

- Величиною номінальної напруги. Вона відрізняється для змінного (36 В, 127 В, 220 В, 380 В, 660 В) і постійного струму (24 В, 48 В, 110 В, 220 В, 440 В, 780 В);
- Режимом роботи – тривалий або короткочасний. При тривалому режимі роботи струм повинен протікати не менше часу, необхідного для досягнення сталої температури всіма частинами апарату при незмінних нормальних умовах охолодження.
- Електричною та механічною зносостійкістю. Вони визначають кількість спрацювань апарату, поки він не стане непридатним.

**Електрична зносостійкість** визначається тим, як зношуються контакти внаслідок вигорання під дією електричної дуги або стирання внаслідок спрацювання.

**Механічна зносостійкість** – це зносостійкість, що обумовлюється зношуванням деталей під час їх обертового і поступального руху поверхонь, коли контакти вдаряються або труться.

Електрична зносостійкість, як правило, менше механічної.

**Комутаційна здатність** – здатність відключати струми (менші струми відключаються гірше, чим великі).

**Ізоляційна стійкість** як в холодному, так і в нагрітому стані (при струмі  $1.05 I_{ном}$ ) повинна витримувати випробувальну напругу струму з  $f = 50$  Гц на протязі 1-ї хвилини (випробувальні напруги залежать від номінальних і становлять від 500 В (при  $U_{ном} = 24$  В) до 3 кВ (при  $U_{ном} = 750$  В)) і мати запас, що враховує погіршення ізоляції внаслідок старіння матеріалу або осадження пилу, бруду, вологи.

Ізоляція повинна на протязі 1хв. витримувати випробувальну напругу змінного струму частотою 50 Гц відповідно до ГОСТ 12434 та відповідати номіналам, о зазначені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Номінальна напруга, В	Номінальна напруга по ізоляції, В	Випробувальна напруга, В
12, 24	24	500
380, 440, 500	> 500	2500
750	>1000	3000
1000	>1000	3500

Термостійкість – визначається діючим значенням струму, протікання якого на протязі всієї роботи апарату не викликає його нагрівання вище допустимих температур (іноді вводять як характеристику величини

$$I_{терм.стійк} \cdot t_{терм.стійк}).$$

Електродинамічна стійкість визначається максимально допустимим струмом, який може витримувати апарат не руйнуючись ні електрично, ні механічно і не відключаючись самовільно. Електродинамічні зусилля досягають *десятків тисяч Ньютон*, внаслідок малих відстаней між струмоведучими частинами і струмів до сотень кА. Апарат повинен витримувати ці струми і зусилля. У нього не повинно бути зварювання контактів або механічного руйнування деталей.

Допустимі температури нагрівання елементів найбільш важливих і відповідальних видів апаратів визначаються нормативними вимогами до цих апаратів. Якщо цих вимог не існує, то керуються по допустимій температурі наступним: температура контактів із міді – при  $t_{окр.середов.} = +40^{\circ}C$ ,  $\Delta T = 55^{\circ}C$  із накладками з срібла  $\Delta T = 80^{\circ}C$ .

Крім того:

- до кожного апарата пред'являються специфічні вимоги, обумовлені його призначенням (наприклад, вимикач повинен вимикати струм на протязі 0,04 – 0,06 с., а трансформатор струму повинен давати похибку не більше заданого значення);
- будь-який електричний апарат повинен по можливості мати найменші габарити, масу і вартість;
- апарат повинен бути простим по обслуговуванню, технологічним при



- виробництві, тобто дозволяти автоматизацію у процесі всього виробництва;
- електричні апарати, у зв'язку з тим, що вони використовуються в складних системах енергопостачання, повинні мати високу надійність, бо від їх роботи залежить надійність роботи складної і дорогої системи.

#### 1.4 Основні матеріали, що застосовують в апаратобудуванні

Матеріали, що застосовують в апаратобудуванні, можуть бути розбиті на наступні групи:

- 1) провідникові - головним чином мідь, сталь, алюміній, латунь і ін.;
- 2) магнітні - різного роду сталі і сплави - для магнітопроводів;
- 3) ізоляційні - для електричної ізоляції струмоведучих частин друг від друга і від заземлених частин;
- 4) дугостійкі ізоляційні - азбест, кераміка, пластмаси - для дугогасильних камер;
- 5) сплави, що володіють високим питомим опором - для виготовлення різних резисторів;
- 6) контактні - срібло, мідь, металокераміка - для забезпечення високої електричної зносостійкості контактів;
- 7) біметали - застосовуються в автоматичних апаратах, що використовують лінійне подовження різних металів при нагріванні струмом;
- 8) конструкційні - метали, пластмаси, ізоляційні матеріали - для додання апаратам і їхнім деталям тих або інших форм і для виготовлення деталей, переважним призначенням яких є передача та сприйняття механічних зусиль.

#### 1.5 Основні позначення апаратів та елементів в електричних системах

При складанні електричних схем додержуються позначень апаратів та елементів електричних систем, наведених нижче.

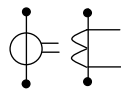
  $m$  - обмотка трансформатора

 - реактор (апарат для обмеження струмів короткого замикання)


 - котушка з виводом

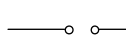
 - котушка з магніто-діелектричним магнітопроводом


 - котушка індуктивності з магнітопроводом (реактор або дросель)

 - трансформатор струму


 - трансформатор струму в каскадному з'єднанні

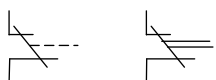
 - електричний розрядник (трубчастий)

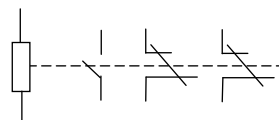
 - електричний розрядник (кульовий)

 - розімкнутий контакт (ключ)

 - контакт автоматичного вимикача

 - контакт із механічним зв'язком (замикаючий)

 - контакт із механічним зв'язком (розмикаючий)

 - реле електричне із замикаючим і розмикаючим контактами

## ЛЕКЦІЯ 2

### ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ. УМОВИ РОБОТИ, КЛІМАТИЧНЕ ВИКОНАННЯ, КАТЕГОРІЇ РОЗМІЩЕННЯ

#### 2.1 Основні параметри електричних апаратів

Номинальні параметри. Номинальним значенням параметра (номинальним параметром) називається вказане виробником електротехнічного пристрою значення параметра, яке є початковим для підрахунку відхилення від цього значення при експлуатації та випробуваннях пристрою (ПУЭ).

Загальними для електротехнічного обладнання є такі номинальні параметри.

*Номинальна напруга  $U_{ном}$*  - напруга, при якій передбачена довготривала нормальна робота електротехнічного пристрою. Вона обумовлює необхідну електричну ізоляцію апарата.

Згідно з ГОСТ 721-77 (Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В) в Україні прийнята наступна шкала номинальних 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.

*Номинальний струм  $I_{ном}$*  - струм, тривале протікання якого викликає нагрівання струмопровідних елементів та ізоляції електротехнічного пристрою не більше встановлених значень температур при номинальній температурі навколишнього середовища. Номинальні значення струмів електротехнічних апаратів регламентує ГОСТ 6827-76 (Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов). Значення отримують з приведеного цифровою ряду шляхом перемноження на 1; 10; 100 і т. д.: 1\*; 1.25; 1.6\*; 2; 2.5\*; 3,15; 4\*; 5; 6,3\*; 8 (\* позначені значення для переважного використання).

*Номинальна температура навколишнього середовища  $\theta_{ном}$*  - умовна температура навколишнього середовища, при якій розраховують інші номинальні параметри. ГОСТ 8024-84 (Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Норма нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний) визначає номинальними температурами навколишнього середовища такі:

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

## 2.2 Кліматичне виконання, 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.** Вплив механічних і кліматичних чинників на електричні апарати за умов експлуатації регламентуються діючими стандартами 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). Під кліматичними чинниками докільля розуміються температура і вологість навколишнього повітря, тиск повітря (висота над рівнем моря), сонячне випромінювання, дощ, вітер, пил (зокрема і сніг), сольовий туман, іній, гідростатичний тиск води, дія цвілевих грибків, вміст у повітрі корозійно-активних агентів. Нормальні значення кліматичних чинників докільля, прийняті для використання у техніці, відповідають даній географічній зоні з урахуванням місця розміщення апарату. У технічній документації на електричний апарат завжди обумовлюються значення кліматичних чинників, у яких забезпечується нормальна експлуатація виробів. Ці значення прийнято називати номінальними. Є також робочі та граничні значення чинників.

Значення кліматичних чинників, у яких зберігається працездатність апарату при допустимих відхиленнях точності та забезпечується збереження номінальних параметрів з гарантованим терміном служби апаратів, називаються **робочими**.

Значення кліматичних чинників, які діють за межами робочих кліматичних чинників, і після припинення дії яких точність і номінальні параметри апарату відновлюються, прийнято називати **граничними**.

З погляду впливу кліматичних чинників поверхня земної кулі ділиться на цілий ряд макрокліматичних районів. Кожен макрокліматичний район характеризується однорідністю географічних факторів і кількісних показників кліматичних чинників у своїй території.

Згідно з ГОСТ 15150-69 всі вироби промисловості за своїм виконанням підрозділяються на вироби, що призначені для експлуатації в умовах суші, рік (озер) та моря. В таблиці 2.1 наведена класифікація макрокліматичних районів і маркування виробів, призначених для експлуатації в районах суші та річок (озер). Більшій частині території України притаманний помірний клімат.

**Категорії розміщення.** Згідно з ГОСТ 15150-69 всі вироби залежно від навколишнього середовища, де вони повинні експлуатуватися, підрозділяються на п'ять категорій розміщення.

*Вироби першої* категорії призначені для експлуатації на відкритому повітрі.

*Вироби другої* категорії призначені для експлуатації під накриттям, або в приміщеннях, де відсутнє пряме попадання сонячних променів та осадків, і де коливання температури та вологості не суттєво відрізняється від коливань на відкритому повітрі (намети, кузови, металеві приміщення без теплоізоляції та ін.).

*Вироби третьої* категорії призначені 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 (ка-

м'яні, бетонні, дерев'яні і металеві з теплоізоляцією приміщення без опалення або з опаленням, яке здійснюється дуже рідко).

Таблиця 2.1

Клімат у макрокліматичному районі	Позначення в маркуванні виробу	
	російське	латинське
<b>Помірний</b> Середня із щорічних абсолютних максимумів температура повітря дорівнює або нижче +40 °С, середня із щорічних абсолютних мінімумів температура вище -45 °С. Діапазон робочих температур при експлуатації -45...+40 °С.	У	N
<b>Помірно холодний</b> Діапазон робочих температур при експлуатації -60...+40 °С.	УХЛ	NF
<b>Холодний</b> Середня із щорічних абсолютних мінімумів температура нижче -45 °С. Діапазон робочих температур при експлуатації -60...+40 °С.	ХЛ	F
<b>Тропічний</b>	Т	T
<b>Тропічно вологий</b> Сполучення температури, рівної або вище +20 °С и відносної вологості вище 80% спостерігається 12 і більше годин у добу за безперервний період більше 2 місяців (концентрація хлоридів - менш 0,3 мг/м <sup>2</sup> ·добу, сірчистого газу - 20 - 250 мг/м <sup>2</sup> ·добу). Діапазон робочих температур при експлуатації +1...+40 °С.	ТВ	TH
<b>Тропічно сухий</b> Середня із щорічних абсолютних максимумів температура повітря вище +40 °С (концентрація хлоридів - менш 0,3 мг/м <sup>2</sup> ·добу., сірчистого газу - 20 - 250 мг/м <sup>2</sup> ·добу.). Діапазон робочих температур при експлуатації -10...+50 °С.	ТС	TA
<b>Всі райони, окрім районів з дуже холодним кліматом</b> Загальнокліматичне виконання. Для макрокліматичних районів на суші, крім району з дуже холодним кліматом (концентрація хлоридів - 0,3 - 30 мг/м <sup>2</sup> ·добу, сірчистого газу - 20 - 250 мг/м <sup>2</sup> ·добу). Діапазон робочих температур при експлуатації -60...+50 °С.	О	U

Вироби четвертої категорії призначені для експлуатації в приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами. Ця категорія, в свою чергу, поділяється на підкатегорії:

- вироби для експлуатації в приміщеннях з частковим кондиціонуванням повітря;
- вироби для експлуатації в лабораторіях, капітальних, житлових та подібних приміщеннях.

*Вироби п'ятої* категорії призначені для експлуатації у приміщеннях підвищеної вологості, де можлива довготривала наявність води та інтенсивна конденсація вологості (шахти, підвали, корабельні приміщення та ін.).

Умовне позначення кліматичного виконання і категорії розміщення виробів завжди наносяться в кінці маркування виробу. Наприклад, агрегат безперебійного живлення АБП-1 -50-400-50 УХЛ4.

Треба пам'ятати, що на роботу електричних апаратів суттєво впливає атмосферний тиск. Зниження тиску погіршує діелектричні властивості повітря та інтенсивність охолодження апаратів. У зв'язку з цим апарати стандартного виконання призначені для роботи на висоті до 1000 м над рівнем моря. Якщо планується використовувати такий апарат на більшій висоті, то слід враховувати необхідність відповідного зменшення його електричного навантаження.

**Захисні оболонки.** Згідно з ГОСТ 14254-96 (Степени защиты, обеспечиваемые оболочками. Код IP.) ступінь захисту корпусів електрообладнання від проникнення у їх внутрішнє середовище сторонніх тіл та захисту обслуговуючого персоналу від контакт) з деталями під напругою або рухомими частинами позначають двома латинськими літерами IP та двома цифрами за ними.

*Перша цифра* (табл. 2.2) характеризує ступінь захисту персоналу від розташованих усередині корпусу елементів під напругою або рухомих частин, а також ступінь захисту внутрішніх частин виробу від попадання всередину твердих тіл.

*Друга цифра* (табл. 2.3) характеризує захист виробу від проникнення всередину води. Наприклад, ступінь захисту IP54 забезпечує захист від пилу, але не виключає можливості обмеженого проникнення його, а також забезпечує апарату повну бризкозахищеність, але не витримує попадання на нього потоку води. Корпуси з подібним ступенем захисту найбільш пристосовані для використання в умовах промислового виробництва, але не на вулиці.

Для постійного використання поза приміщеннями необхідно використовувати корпуси зі ступенем захисту IP65, які забезпечують повний захист від пилу і потоку води. За наявності, наприклад, накриття, можна використовувати корпуси зі ступенем захисту IP64.

Таблиця 2.2

Ступінь захисту	Характеристики захисту персоналу або захисту від попадання твердих тіл
1	2
0	Захист відсутній
1	Захист від проникнення всередину оболонки великої частини поверхні людського тіла, наприклад, рук або проникнення твердих тіл діаметром більше за 50 мм
2	Захист від проникнення всередину оболонки пальців або предметів довжиною більше 80 мм та твердих тіл діаметром більше за 12 мм
3	Захист від проникнення всередину оболонки інструментів, проволочки, твердих тіл діаметром більше 2,5 мм
4	Захист від проникнення всередину оболонки проволочки і твердих тіл діаметром більше 1 мм
5	Частково захищає від проникнення всередину оболонки пилу, але допускає проникнення його в кількості, котра не впливає на роботу виробу
6	Повне запобігання проникненню пилу

Таблиця 2.3

Ступінь захисту	Характеристики захисту від води
0	Захист відсутній
1	Краплі води, що вертикально падають на оболонку, не повинні наносити шкоди виробу
2	Краплі води, що падають під кутом 15 градусів до вертикалі, не повинні наносити шкоди виробу
3	Дощ, що падає на оболонку під кутом 60 градусів до вертикалі, не повинен наносити шкоди виробу
4	Вода, що розбризкується у будь-якому напрямку відносно виробу, не повинна наносити шкоди виробу
5	Потік води, що ллється на виріб у будь-якому напрямку, не повинен наносити шкоди виробу
6	Сильний потік води (100 л/хв при 100 кПа) або хвилі не повинні викликати попадання води в оболонку виробу в кількості, достатній для нанесення шкоди
7	Вода не повинна проникати в оболонку при зануренні у воду на глибину до 15 см
8	Виріб придатний для довготривалого занурення у воду при умовах, встановлених виробником

### 2.3 Основні складові частини електричних апаратів

Складовими частинами електричних апаратів є:

1. Деталь - елементарна частина апарата, яка виготовлена з цілого куска матеріалу без застосування складальних операцій.
2. Вузол (складальна одиниця): розбірне або нерозбірне з'єднання двох або більшої кількості деталей. Вузол, з якого починається складання апарата називається **базовим**.
3. Група - з'єднання вузлів та деталей, яке є однією з основних складових частин апарата та виконує певну функцію.

Електричні апарати мають блочну конструкцію. Блок складається з декількох груп, одна з яких є базовою.

Найбільш поширені частини апаратів класифікуються за наступними групами:

- провідники струму ведучого контуру та їх контактне з'єднання;
- комутуючі контакти;
- дугогасильні пристрої;
- механізми;
- електромагніти;
- електроізоляційні деталі та вузли;
- корпусні деталі, оболонки та резервуари.

## ЛЕКЦІЯ 3

### ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

#### 3.1 Основні поняття

Прямолінійний провідник довжиною  $l$ , який обтікається струмом та розташований у магнітному полі з індукцією  $B$ , зазнає механічної сили

$$F = ilB \sin \beta, \quad (3.1)$$

де  $\beta$  – кут між напрямом вектора магнітної індукції та напрямом струму в провіднику.

Аналогічні сили виникають між провідником, який обтікається струмом, і феромагнітною масою. Напрямок дії сили визначається „правилом лівої руки”.

Напрямок дії сили може бути також визначений із такого загального положення. Сили, які діють у контурі зі струмом, намагаються змінити конфігурацію контуру так, щоб магнітний потік, який охоплюється контуром, збільшився.

У системі з декількох провідників, які обтікаються струмом, можна завжди уявити, що будь-який з цих провідників розташований у магнітному полі, що створене струмами інших провідників, і відповідним чином взаємодіє з цим полем. Завдяки цьому між провідниками, охопленими спільним магнітним потоком, завжди виникають механічні сили. Ці сили називаються електродинамічними.

Досить зручним для визначення напрямку дії електродинамічної сили є метод, запропонований академіком В.Ф. Миткевичем, відповідно до якого накладають одну на одну картини магнітних полів, що створюються струмом кожного з провідників. Завдяки цьому сила, яка діє на провідник, направлена в бік, де поле послаблене.

За нормальних експлуатаційних умов електродинамічні сили, як правило, малі й не викликають будь-яких деформацій, а тим більше поломок деталей в апаратах. Однак при коротких замиканнях ці сили досягають досить значних величин і можуть викликати деформацію або руйнування не тільки окремих деталей, але і всього апарата. Ця обставина вимагає проведення розрахунку апарата або окремих його вузлів на електродинамічну стійкість, тобто на здатність витримати без пошкодження проходження найбільш можливого в експлуатаційних умовах струму або заданого струму короткого замикання. Такий розрахунок тим більш необхідний через те, що з метою отримання мінімальних габаритів в апаратах намагаються розміщувати струмопровідні частини якомога ближче одна до одної.

Розрахунок електродинамічних сил ведеться звичайно або виходячи із закону Біо – Савара, або за умови зміни запасу магнітної енергії системи.

#### 3.2 Розрахунок електродинамічних сил на основі закону Біо – Савара

Візьмемо систему з двох провідників 1 і 2, розташованих в одній площині (рис. 3.1), по яких проходять струми  $i_1$  та  $i_2$ .

Відповідно до закону Біо – Савара напруженість магнітного поля, створеного елементом  $du$  провідника 2 в місці розташування елемента  $dx$  провідника 1, буде



$$dH_{dx} = \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha, \quad (3.2)$$

де  $\alpha$  – кут між вектором  $\rho$  і напрямом струму по елементу  $dy$ .

Весь провідник 2 створить у місці розташування елемента  $dx$  напруженість магнітного поля

$$H_{dx} = \int_{l_2} dH_{dx} = \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha. \quad (3.3)$$

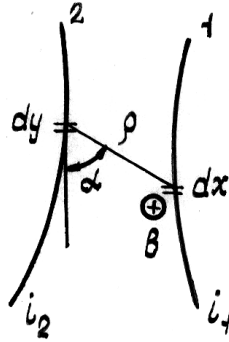


Рис. 3.1 - До визначення електродинамічної сили між двома провідниками, розташованими в одній площині

Елементарна сила, яка діє на елемент  $dx$ , що обтікається струмом  $i_1$ ,

$$dF_{dx} = \frac{\mu_0}{4\pi} H_{dx} i_1 \sin \beta dx, \quad (3.4)$$

де  $\beta$  – кут між вектором індукції  $B = \mu_0 H_{dx}$  і вектором струму  $i_1$ ;  $\mu$  – магнітна проникність повітря.

За умовою провідники розташовані в одній площині. Вектор індукції в цьому разі перпендикулярний площині, на якій розташовані провідники, тобто площині креслення. Кут  $\beta$  дорівнює  $90^\circ$ ,  $\sin \beta = 1$ .

У такому разі

$$dF_{dx} = i_1 dx \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha. \quad (3.5)$$

Повну силу  $F$  взаємодії між провідниками 1 і 2 отримаємо після інтегрування  $dF_{dx}$  по всій довжині провідника 1:

$$F = \int_{l_1} dF_{dx} = \int_{l_1} i_1 dx \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha. \quad (3.6)$$

Вважаючи струми  $i_1$  та  $i_2$  незмінними по всій довжині провідника, рівняння (1.6) можна переписати у вигляді добутку членів:

$$F = i_1 i_2 \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_1} dx \int_{l_2} \frac{dy}{\rho^2} \sin \alpha. \quad (3.7)$$

Перший член цього виразу залежить тільки від величин струмів. Другий член залежить тільки від взаємного геометричного розташування провідників і являє собою безрозмірну величину. Величину цю часто називають коефіцієнтом контуру, який позначимо буквою  $c$ . Тоді

$$F = ci_1i_2 \frac{\mu_0}{4\pi}, \quad (3.8)$$

тобто сила взаємодії між двома провідниками, які обтікаються струмами  $i_1$  і  $i_2$ , пропорційна добутку цих струмів та при  $i_1 = i_2$  залежить від геометрії провідників.

Підставивши в (1.8) значення  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , обчислюємо силу в ньютонках

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 c, \text{ Н} . \quad (3.9)$$

### 3.3 Розрахунок електродинамічних сил за зміною запасу електромагнітної енергії контурів

Електромагнітне поле навколо провідників і контурів зі струмом має певний запас енергії. Електромагнітна енергія контуру, який обтікається струмом  $i$ , дорівнює

$$W = L \frac{i^2}{2}. \quad (3.10)$$

Електромагнітна енергія двох контурів, які обтікаються струмами  $i_1$  і  $i_2$ ,

$$W = L_1 \frac{i_1^2}{2} + L_2 \frac{i_2^2}{2} + Mi_1 \cdot i_2, \quad (3.11)$$

де  $L_1, L_2$  – індуктивності контурів;  $M$  – взаємоеіндуктивність контурів.

Кожна деформація контуру (зміна розміщення його елементів або їх частин) або зміна взаєморозміщення контурів приводять до зміни запасу електромагнітної енергії. При цьому робота сил у будь-якій системі дорівнює зміні запасу енергії цієї системи:

$$Fdx = dW, \quad (3.12)$$

де  $dW$  – зміна запасу енергії системи при деформації системи в напрямі  $x$  під дією сили  $F$ .

На зазначеному законі (3.12) і заснований метод визначення електродинамічних сил у контурах. Електродинамічна сила в контурі або між контурами, яка діє в напрямі  $x$ , дорівнює швидкості зміни запасу енергії системи при деформації її в тому самому напрямі:

$$F_x = \frac{dW}{dx}. \quad (3.13)$$

Відповідно до сказаного електродинамічна сила в контурі, який обтікається струмом  $i$ , дорівнює

$$F_x = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL}{dx}, \quad (3.14)$$

а електродинамічна сила між двома взаємопов'язаними контурами зі струмами  $i_1$  та  $i_2$  буде

$$F_x = \frac{i_1^2}{2} \cdot \frac{dL_1}{dx} + \frac{i_2^2}{2} \cdot \frac{dL_2}{dx} + i_1 i_2 \frac{dM}{dx}. \quad (3.15)$$

### 3.4 Електродинамічні сили між паралельними провідниками круглого перерізу

Візьмемо два паралельні круглі провідники 1 і 2 (рис. 3.2), що розташовані в

одній площині на відстані  $a$  один від одного, по яких проходять струми  $i_1$  та  $i_2$ .

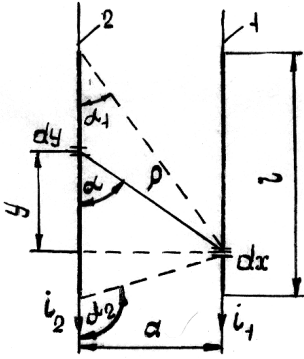


Рис. 3.2 - До визначення електродинамічної сили між паралельними провідниками круглого перерізу

Розрахунок будемо проводити на підставі закону Біо – Савара. Виконавши всі операції аналогічно (3.2) – (3.9), одержимо

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \cdot c, \quad (3.16)$$

де  $c = \int_{l_1} dx \int_{l_2} \frac{dy}{\rho^2} \sin \alpha.$

Виразимо підінтегральні змінні другого інтеграла через одну із змінних, а саме через кут  $\alpha$ . Прийнемо за початок координат елемент  $dy$  і напрям струмів, який збігається з позитивним напрямом координат. У цьому разі поточна координата

$$y = \operatorname{arctg} \alpha; \quad \rho = \frac{a}{\sin \alpha}; \quad (3.17)$$

$$dy = -\operatorname{arctg} \alpha \frac{d\alpha}{\sin^2 \alpha}.$$

Підставивши отримані вирази в (3.16) і вважаючи, що провідник 2 поширюється від  $+\infty$  до  $-\infty$ , чому відповідає зміна кута від  $\pi$  до 0, одержимо

$$\overline{C} = \int_{l_1} dx \int_a^\pi -\frac{\sin \alpha}{a} d\alpha = -\frac{2}{a} \int_{l_1} dx. \quad (3.18)$$

Сила, що діє на провідник  $l$  дорівнює

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \left( -\frac{2}{a} \int_{l_1} dx \right), H. \quad (3.19)$$

Очевидно, що якщо провідник  $l$  так само, як і провідник 2, поширюється до  $\pm \infty$ , то сила  $F$  буде наближатися до нескінченності.

Якщо ж провідник  $l$  має скінченну довжину  $l$ , то

$$F = -10^{-7} i_1 i_2 \frac{2}{a} \int dx = -10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}, H. \quad (3.20)$$

Знак мінус показує, що за однаково направлених струмів провідники будуть притягатися, а за протилежно направлених струмів ( $i_1 - i_2$ ) провідники будуть відштовхуватися ( $F$  виходить позитивною). У подальшому для зручності знак мінус будемо опускати, а напрям сили визначати за зазначеними вище правилами.

Рівняння (3.20) визначає силу взаємодії між двома провідниками, один з яких нескінченно довгий, а другий має скінченну довжину і розміщений симетрично відносно першого. У разі, коли обидва провідники будуть мати скінченну величину  $l$ ,

границі інтегрування для (3.17) будуть вже не від  $\pi$  до 0, а від  $\alpha_2$  до  $\alpha_1$  (див. пунктир рис. 3.2) і сила взаємодії між двома круглими провідниками, довжина яких скінченна і рівна за величиною, визначиться рівнянням

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left( \sqrt{\frac{l^2 + a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \right), \text{ Н.} \quad (3.21)$$

У (3.21) множник перед дужкою являє собою силу взаємодії між двома провідниками, один з яких має нескінченну довжину. Позначимо цю силу через  $F_\infty$ . Коефіцієнт, заключений у дужках, являє собою величину, меншу за одиницю. При  $\frac{a}{l} < 0,2$  (на практиці, як правило,  $\frac{a}{l} < 0,2$ ) цією величиною по відношенню до одиниці можна нехтувати. Тоді рівняння (3.21) прийме вигляд

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left( 1 - \frac{a}{l} \right) = F_\infty \left( 1 - \frac{a}{l} \right), \text{ Н.} \quad (3.22)$$

Залежність  $\frac{F}{F_\infty}$  від величини  $\frac{a}{l}$  наведена на рис. 3.3.

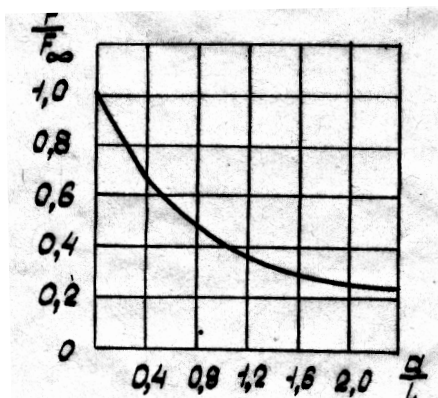


Рис. 3.3 - Залежність  $F / F_\infty$  від величини  $a/l$

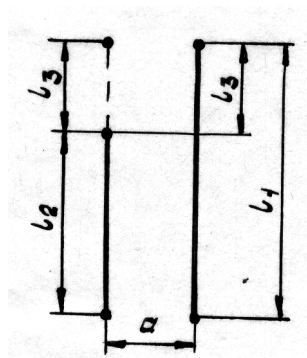


Рис. 3.4 - До визначення електродинамічної сили між паралельними провідниками нерівної довжини

На практиці досить часто провідники мають нерівну довжину. Силу взаємодії між такими провідниками можна знайти викладеним вище способом, виконуючи інтегрування кожного разу у відповідних границях. Можна це завдання вирішити, застосувавши рівняння (3.21).

На рис. 3.4 наведені два провідники нерівної довжини  $l_1$  і  $l_2$ , розташовані один від одного на відстані  $a$ , по яких проходять струми  $i_1$  та  $i_2$ .

Наростимо провідник  $l_2$  на відрізок  $l_3$  до величини, що дорівнює  $l$ . Провідник  $l_1$  можемо також зобразити як такий, що складається з двох відрізків  $l_2$  і  $l_3$ .

Тоді можемо написати, що сила взаємодії між провідниками завдовжки  $l_1$  і  $l_2$  ( $F_{l_1 l_2}$ ) дорівнює сумі сил взаємодії між двома провідниками  $l_2$  однакової довжини  $F_{l_2 l_2}$  і двома провідниками довжиною  $l_2$  і  $l_3$  ( $F_{l_2 l_3}$ ):

$$F_{l_1 l_2} = F_{l_2 l_2} + F_{l_2 l_3}. \quad (3.23)$$

Аналогічно можна написати:

$$F_{l_1 l_2} = F_{l_1 l_1} - F_{l_2 l_3} - F_{l_3 l_3}. \quad (3.24)$$

Склавши рівняння (3.23) і (3.24), одержимо

$$2F_{l_1 l_2} = F_{l_1 l_1} + F_{l_2 l_2} - F_{l_3 l_3}. \quad (3.25)$$

Отже, сила взаємодії між двома провідниками нерівної довжини виражається через силу взаємодії провідників рівної довжини. При цьому  $l_1$  і  $l_2$  – величини задані, а  $l_3 = l_1 - l_2$ .

На підставі рівняння (3.21)

$$F_{l_1 l_2} = 10^{-7} i_1 i_2 \left[ \frac{l_1}{a} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{a}{l_1} \right)^2} - \frac{a}{l_1} \right) + \frac{l_2}{a} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{a}{l_2} \right)^2} - \frac{a}{l_2} \right) - \frac{l_1 - l_2}{a} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{a}{l_1 - l_2} \right)^2} - \frac{a}{l_1 - l_2} \right) \right], \text{ Н.} \quad (3.26)$$

Сила взаємодії між паралельними круглими провідниками може бути також визначена за зміною запасу електромагнітної енергії.

Перший випадок – обидва провідники належать до однієї системи. Індуктивність системи з двох паралельних провідників радіусом  $r$  і завдовжки  $l$ , які розташовуються на відстані  $a$ , за умови, що  $l \gg a$ , визначається формулою

$$L = 4l \left| \ln \frac{a}{r} + 0,25 \right|. \quad (3.27)$$

Нас цікавить сила, яка діє в напрямі  $a$  згідно з (3.14)

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{da}.$$

Виходячи з (3.27)  $\frac{dL}{da} = \frac{4l}{a}$ , а

$$F = 10^{-7} i^2 \frac{2l}{a}, \text{ Н.} \quad (3.28)$$

З (3.28) видно, що результат вийшов таким самим, як при визначенні цих сил на підставі закону Біо – Савара.

Другий випадок – провідники належать до двох різних систем, при цьому самі системи зазнають деформації. Взаємоіндукція між двома провідниками завдовжки –  $l$ , які розташовуються один від одного на відстані  $a$ , за умови, що  $l \gg a$ , визначається формулою

$$M = 2l \left( \ln \frac{2l}{a} - 1 \right). \quad (3.29)$$

Згідно з (3.15) сила, яка діє в напрямі  $a$ , визначиться таким чином:

$$F = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dl_1}{da} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dl_2}{da} + i_1 \cdot i_2 \frac{dM}{da},$$

де  $\frac{dL_1}{da} = 0$ ;  $\frac{dL_2}{da} = 0$ ,

оскільки самі системи не зазнають деформації, а з (3.29)

$$\frac{dM}{da} = -\frac{2l}{a},$$

то

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}, \text{ Н.} \quad (3.30)$$

тобто результат, як і слід було чекати, виявився той самий.

### 3.5 Електродинамічні сили між паралельними провідниками прямокутного перерізу

В електричних апаратах і в електричних мережах широке розповсюдження мають провідники прямокутного перерізу (шини). Шини можуть розташовуватися на ребро або плазом.

Ми не будемо тут проводити всіх математичних викладок, а наведемо кінцевий результат. Сила взаємодії між паралельними провідниками прямокутного перерізу при  $l \gg a$  визначається виразом

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} K_\phi, \text{ Н} \quad (3.31)$$

де  $K_\phi = f\left(-\frac{a-b}{b+h}\right)$  – коефіцієнт, який залежить від геометричних розмірів провідників і відстані між ними.

Величина цього коефіцієнта для різних співвідношень  $a$ ,  $b$  і  $h$  зображена кривими (рис. 3.5).

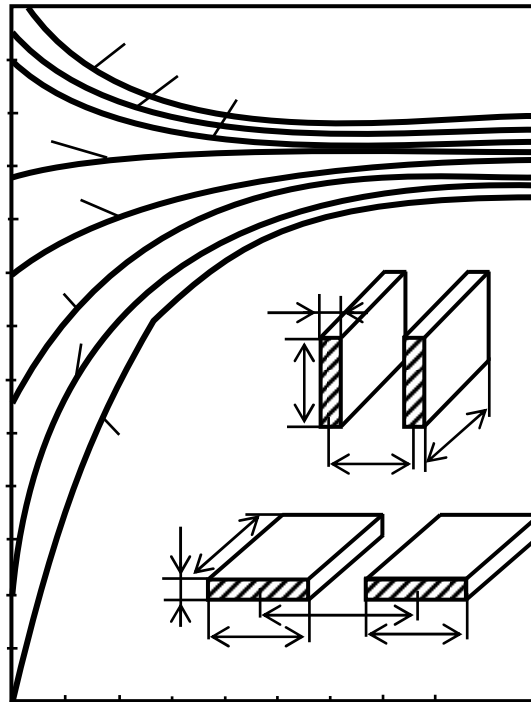


Рис. 3.5 - Залежність коефіцієнта  $K_\phi$  від розмірів провідників

Слід зазначити, що при розташуванні шини плазом сили виявляються більшими, ніж при розташуванні на ребро. Але й міцність при розташуванні шин плазом, пропорційна опорі згину, виявляється більшою. Через це іноді виявляється вигідніше розташовувати шини плазом.

### 3.6 Електродинамічні сили між взаємно перпендикулярними провідниками

На рис. 1.6 наведені форми перпендикулярно розташованих провідників, які часто зустрічаються в апаратах, наприклад у рубильниках, місткових контактних

системах і багатьох інших апаратах і вузлах.

Визначимо електродинамічну силу, яка діє на провідник 1 (рис. 3.6, а). Задачу будемо розв'язувати уже відомим нам способом на підставі закону Біо – Савара. З'єднаємо початок координат осей  $x$  і  $y$  з точкою перетину осей провідників. Виділимо на провідниках елементи  $dx$  і  $dy$ .

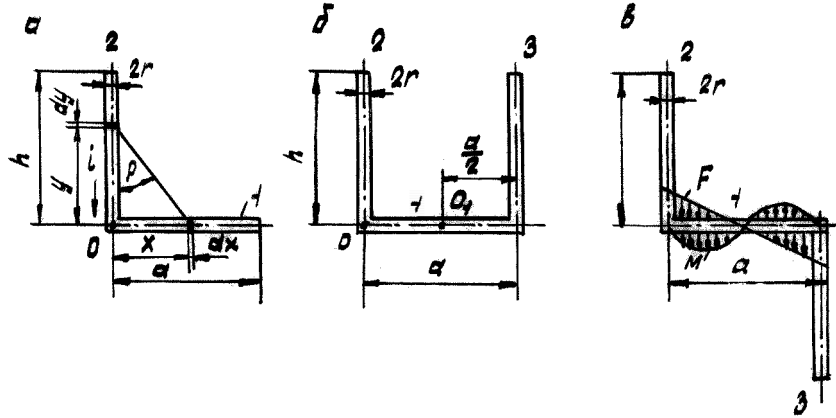


Рис. 3.6 - До визначення електродинамічної сили між перпендикулярно розташованими провідниками

Елемент  $dy$  створює в місці розташування елемента  $dx$  магнітне поле напруженістю

$$dH_x = \frac{id_y}{\rho^2} \sin \alpha. \quad (3.32)$$

Якщо провідник 2 простягається від нуля до нескінченності, то в місці розташування  $dx$  створюється магнітне поле напруженістю

$$H_x = \int_0^{\infty} \frac{-idy}{\rho^2} \sin \alpha. \quad (3.33)$$

Струм по провіднику 2 беремо зі знаком мінус, оскільки він направлений протилежно напрямку позитивної координати. Перейдемо до однієї змінної:

$$y = x \operatorname{ctg} \alpha; \quad \rho = \frac{x}{\sin \alpha},$$

звідки

$$dy = -x \frac{d\alpha}{\sin^2 \alpha}.$$

Замінивши в (3.33) змінні та границі інтегрування, одержимо

$$H_x = \int_{\pi}^0 \frac{i \sin \alpha d\alpha}{x} = \frac{i}{x}. \quad (3.34)$$

Сила, яка діє на елемент  $dx$ , буде

$$dF_x = \frac{i}{x} (idx) \frac{\mu_0}{4\pi}.$$

На весь провідник 1 буде діяти сила

$$F = \int_r^a dF_x = i^2 \frac{\mu_0}{4\pi} \int_r^a \frac{dx}{x} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}, \text{ Н.} \quad (3.35)$$

При виведенні формули (3.35) ми вважали, що провідник 2 простягається

до нескінченності. У дійсності провідник 2 буде мати скінчену довжину, припустимо  $h$ , і рівняння (3.35) буде мати вигляд

$$F = 10^{-7} i^2 \left( \ln \frac{a}{h + \sqrt{h^2 + a^2}} - \ln \frac{r}{h + \sqrt{h^2 + r^2}} \right), H. \quad (3.36)$$

На перемичку 1 між провідниками 2 і 3 (рис. 3.6, б) буде діяти сила вдвічі більша, ніж на провідник 1 (рис. 3.6, а). При  $h \rightarrow \infty$

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}, H, \quad (3.37)$$

а при  $h$ , скінченній довжині,

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \left( \ln \frac{a}{h + \sqrt{h^2 + a^2}} - \ln \frac{r}{h + \sqrt{h^2 + r^2}} \right), H.$$

Для наведених форм провідників (див. рис. 3.6) часто треба знайти момент відносно точки  $O$  (наприклад для рубильника) або точки  $O_1$  (місткова контактна система).

Момент відносно точки  $O$  буде дорівнювати

$$M_0 = 10^{-7} i^2 \left( a \ln \frac{a-r}{r} + r \right), H \cdot m. \quad (3.38)$$

Момент відносно точки  $O_1$  дорівнює

$$M_{0_1} = 10^{-7} i^2 \left( \frac{a}{2} \ln \frac{a}{4r} + r \right), H \cdot m. \quad (3.39)$$

Сили взаємодії між провідниками 1 – 2 і 1 – 3 (рис. 3.6, в) протилежно направлені. Епюри результуючих сил і згинального моменту, які діють на провідник 1, показані на рис. 3.6, в.

### 3.7 Графоаналітичний метод розрахунку електродинамічних сил між прямолінійними провідниками

Графоаналітичний метод ґрунтується на геометричній інтерпретації наведених вище рівнянь.

Для двох паралельних провідників однакової довжини коефіцієнт контуру згідно з (3.21) дорівнює

$$c = \frac{2l}{a} \left( \sqrt{\frac{l^2 + a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \right) = \frac{2}{a} (\sqrt{l^2 + a^2} - a).$$

Величина під знаком кореня являє собою довжину діагоналі  $D$  (рис. 3.7, а) прямокутника зі сторонами  $l$  і  $a$ , отже,

$$c = \frac{2(D - a)}{a} = \frac{2D - 2a}{a}. \quad (3.40)$$

Зробивши відповідну підстановку в рівнянні (1.26) для паралельних провідників неоднакової довжини (рис. 3.7, б), одержимо

$$c = 2 \left( \frac{D_1 - a}{a} + \frac{D_2 - a}{a} - \frac{s - a}{a} \right) = 2 \frac{(D_1 + D_2) - (s + a)}{a}. \quad (3.41)$$



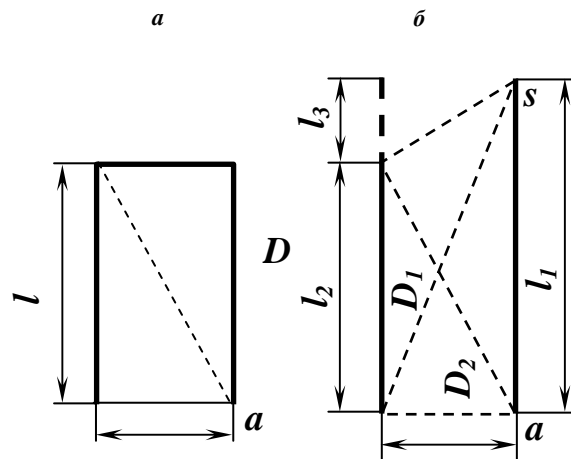


Рис. 3.7 - До визначення електродинамічної сили графічним методом

Отже, приходимо до висновку: коефіцієнт контуру паралельних провідників дорівнює поділеній на висоту подвоєній різниці сум довжин діагоналей і бокових сторін чотирикутника (прямокутника, трапеції, паралелограма), побудованого на даних відрізках провідників.

Аналогічну дещо складнішу інтерпретацію можна одержати і для перпендикулярно розташованих провідників.

## ЛЕКЦІЯ 4

### ПРОЦЕСИ НАГРІВАННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ. РЕЖИМИ РОБОТИ

#### 4.1 Втрати у провідниках, обтічних струмом

Потужність  $P$ , яка втрачається в провіднику при проходженні по ньому струму, буде

$$P = I^2 R, \quad (4.1)$$

де  $I$  – ефективне значення струму;  $R$  – опір провідника.

При постійному струмі  $R$  відповідає омичному опору:

$$R = R_{ом} = \frac{\rho l}{s}. \quad (4.2)$$

При змінному струмі втрати виходять більшими, ніж при постійному струмі. Це зростання втрат відбувається за рахунок поверхневого ефекту та ефекту близькості й враховується коефіцієнтом додаткових витрат  $K_\delta$ , який дорівнює сумі коефіцієнтів поверхневого ефекту  $K_n$  та ефекту близькості  $K_\delta$ . Коефіцієнт додаткових витрат більший за одиницю, тобто

$$K_\delta = K_n + K_\delta > 1. \quad (4.3)$$

Опір при змінному струмі

$$R = K_\delta R_{ом} = R_{акт} \quad (4.4)$$

називається активним опором.

Активний опір – це деякий фіктивний опір провідника, помножений на квадрат ефективного струму, що дає втрати, які дійсно є при змінному струмі.

**Поверхневий ефект.** Змінне магнітне поле, яке охоплює провідник, по якому проходить змінний струм (рис. 4.1, а), приводить до появи в цьому провіднику електрорушійної сили, направленої назустріч прикладеній напрузі. Центральні шари провідника перетинаються більшим магнітним потоком, ніж зовнішні. Протиелектрорушійна сила, що наводиться в центральних шарах, буде більшою, ніж в зовнішніх шарах. Це приведе до зменшення густини струму  $j$  в центральних шарах порівняно з густиною струму в зовнішніх (рис. 4.1, б). Зазначене фізичне явище носить назву поверхневого ефекту. Вплив цього явища сприймається нами як збільшення опору провідника, оскільки при одному й тому ж значенні прикладеного опору змінний струм, що протікає по провіднику, буде меншим, ніж постійний. Коефіцієнт поверхневого ефекту  $K_n$  зростає зі зростанням частоти струму і питомої провідності матеріалу провідника, а також залежить від відношення периметра провідника до його перерізу. При нагріванні питома провідність спадає, отже зменшується і вплив поверхневого ефекту. При більшому радіусі магнітний потік, який перетинає центральні шари, буде більшим, отже більшими будуть нерівномірність розподілу струму і коефіцієнт поверхневого ефекту. Величину  $K_n$  зручніше виразити у функції  $f(\rho)$ , де  $f$  – частота струму, а  $\rho$  – питомий опір.

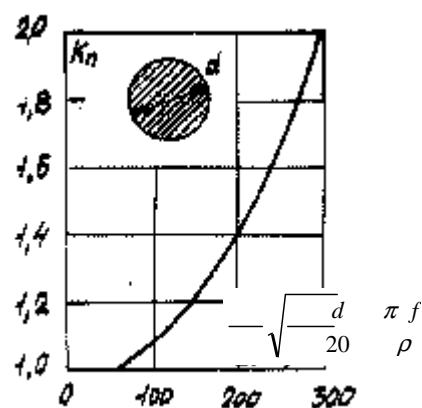
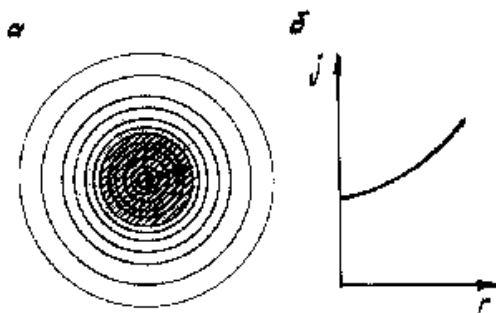


Рис. 4.1 - Магнітне поле навколо провідника зі струмом і розподіл густини струму по перерізу провідника при немагнітного матеріалу змінному магнітному полі

На рис. 4.2 наведені значення  $K_n$  для суцільного круглого провідника у функції параметра  $\frac{d}{20} \sqrt{\frac{\pi f}{\rho}}$ .

Оскільки при змінному струмі, а особливо при підвищеній і високій частоті середня частина перерізу провідника погано використовується, то в цих випадках вигідно брати не суцільний круглий провідник, а порожню трубу і застосовувати провідники з якомога більшим відношенням периметра до перерізу.

На рис. 4.3 наведені значення  $K_n$  для круглих порожнистих провідників, а на рис. 4.4 – для провідників прямокутного перерізу.

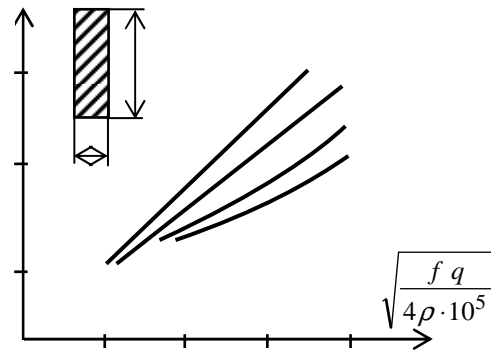
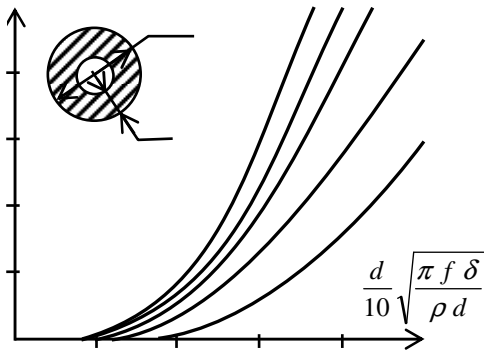


Рис. 4.3 - Коефіцієнти поверхневого ефекту для порожнистих провідників із немагнітного матеріалу

Рис. 4.4 - Коефіцієнти поверхневого ефекту для провідників прямокутного перерізу із немагнітного матеріалу

**Ефект близькості.** Візьмемо два паралельні обтічні струмом провідники (рис. 4.5). Кожний з провідників буде перебувати в змінному магнітному полі сусіднього провідника.

Відомо, що напруженість поля навколо провідника зі струмом (криві 1, 2; рис. 4.5, б) спадає в міру віддалення від провідника. Отже, шари провідника, розташовані ближче до сусіднього провідника, будуть пронизуватися більшим магнітним потоком, ніж віддалені. У ближніх шарах буде наводитись більша електрорушійна сила, у віддалених – менша. Між шарами одного провідника з'явиться електрорушійна сила і виникнуть струми. В одних шарах цей напрям струмів буде збігатися з напрямом основного струму, в інших шарах – протилежний йому.

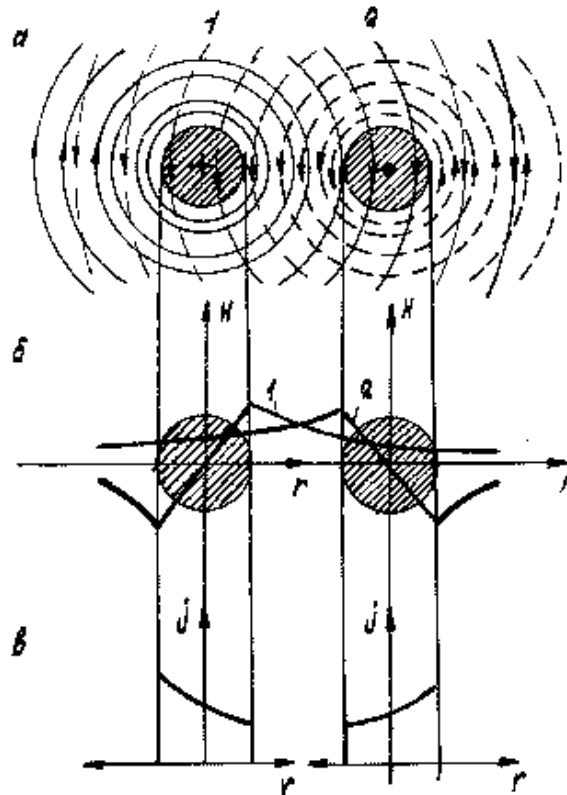


Рис. 4.5 - Ефект близькості

У кінцевому результаті ефект впливу одного провідника на інший, названий ефектом близькості, викличе нерівномірний розподіл струму по перерізу провідників (рис. 4.5, в) і зростання втрат внаслідок цього. Значення коефіцієнта близькості  $K_b$  залежно від параметра  $\sqrt{f/R}$  і розмірів провідників круглого і прямокутного перерізів наведені на рис. 4.6 і рис. 4.7.

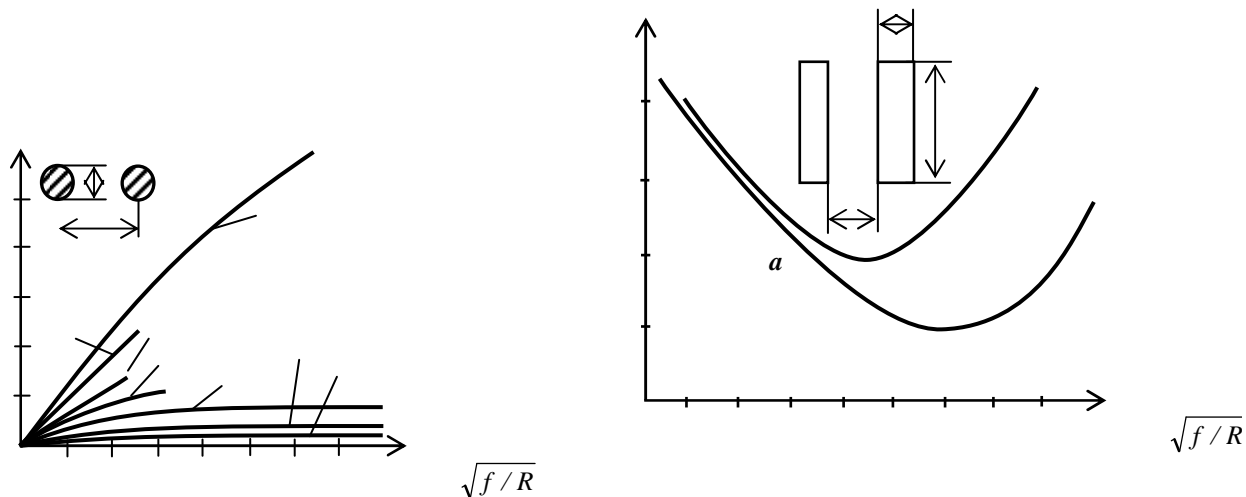


Рис. 4.6 - Коефіцієнти ефекту близькості для провідників круглого перерізу із немагнітного матеріалу

Рис. 4.7 - Коефіцієнти ефекту близькості для провідників прямокутного перерізу із немагнітного матеріалу

#### 4.2 Втрати в деталях з магнітних матеріалів

Як відомо, в магнітних матеріалах, які розташовані в змінному магнітному полі, виникають втрати  $P_c$ , обумовлені явищами гістерезису  $P_2$  і вихрових струмів  $P_e$ . Ці втрати виявляються в нагріванні матеріалу, і для їх зменшення магнітопроводи для змінного магнітного потоку виконують, як правило, шихтованими, тобто набраними з електрично ізольованих одна від одної пластин завтовшки 0,2 – 0,5 мм. Напрямок шихтування має бути вздовж магнітних ліній (рис. 4.8) з метою обмеження величини вихрових струмів і зниження втрат.

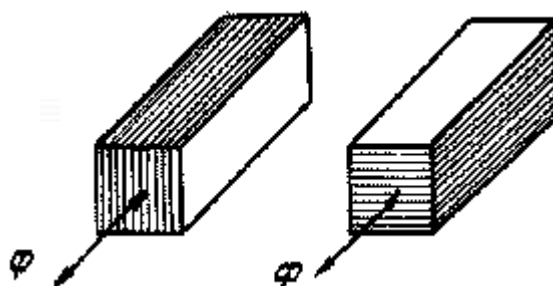


Рис. 4.8 - Напрямок шихтування магнітопроводів

Для зниження втрат на гістерезис застосовуються леговані сталі, які мають більш вузьку гістерезисну петлю.

Втрати в магнітопроводах апаратів при змінному потоці можуть бути

підраховані за формулою

$$P_c = P_g + P_z = \left[ \tau_g \left( \frac{f}{100} \right)^2 + \tau_z \frac{f}{100} \right] B^2 \cdot 10^{-8}, \text{ Вт/кг}, \quad (4.5)$$

де  $\tau_g$  і  $\tau_z$  – коефіцієнти, що враховують втрати на вихрові струми й гістерезис;  $f$  – частота;  $B$  – індукція.

### 4.3 Віддача тепла нагрітим тілом

Передача тепла завжди йде від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і відбувається до тих пір, доки температура тіл не зрівняється. Чим вища температура нагрітого тіла, тим інтенсивніше буде відбуватися передача тепла.

Розрізняють три види передачі тепла – теплопровідністю, конвенцією й випромінюванням.

**Теплопровідність.** Це властивість матеріалу передавати тепло від більш нагрітих місць до менш нагрітих. Передача тепла може відбуватися всередині одного тіла, між двома стичними тілами і між двома тілами, розділеними третім.

Кількість тепла  $dQ$ , яке проходить за одиницю часу  $dt$  від більш нагрітої ділянки до менш нагрітої, пропорційна площадці (перерізу)  $ds$ , через яку передається тепло, перепаду температури  $d\theta/dx$  у напрямі, перпендикулярному до площадки, і залежить від теплопровідних властивостей середовища:

$$dQ = -\lambda \frac{d\theta}{ds} ds dt. \quad (4.6)$$

Знак мінус взятий тому, що передача тепла йде від більш нагрітих місць до менш нагрітих.

Теплопровідні властивості середовища характеризуються коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$ , що чисельно дорівнює кількості тепла, яке проходить через площадку в  $1 \text{ м}^2$  протягом  $1 \text{ с}$  при перепаді температури в  $1^\circ\text{С}$ . Розмірність  $\lambda$  дорівнює  $\text{Вт/м} \cdot \text{град}$ .

**Конвекція.** Газ або рідина, що дотикається до поверхні нагрітого тіла, нагріваються від цієї поверхні. Нагрівання шарів, що дотикаються, відбувається за рахунок теплопровідності. Нагріті шари стають легшими за сусідні більш холодні шари навколишнього середовища, піднімаються догори, виносять відібране у нагрітого тіла тепло.

Зазначений фізичний процес і носить назву тепловіддачі через конвекцію.

Якщо швидкість руху часток охолоджуючого середовища визначається тільки ступенем їх нагріву біля поверхні гарячого тіла, то конвекція називається природною.

Якщо швидкість руху часток охолоджуючого середовища задається примусово (за допомогою вентиляторів, насосів), то конвекція називається штучною.

Чим швидше рухаються частки охолоджуючого середовища, тим інтенсивніше відбувається охолодження. Кількість тепла, яке віддається конвекцією, –

$$Q = K_k (\theta_1 - \theta_0) F, \quad (4.7)$$

де  $K_k$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ;  $\theta_1$  – температура нагрітого тіла,  $^\circ\text{С}$ ;  $\theta_0$  – температура охолоджуючого середовища,  $^\circ\text{С}$ ;  $F$  –

поверхня тепловіддачі, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією  $K_k$  визначає кількість тепла, яка віддається в секунду з 1 м<sup>2</sup> нагрітої поверхні при різниці температур поверхні та охолоджуючого середовища в 1°С. Він залежить від багатьох факторів, головні з яких швидкість руху і теплоємність охолоджуючого середовища, температура поверхні та середовища, геометричні розміри нагрітої поверхні.

**Випромінювання.** Це процес тепловіддачі, за якого тепла енергія, перетворюючись у променеву, передається від нагрітого тіла в навколишній простір.

Поверхня, яка відбиває від себе всі промені, що падають на неї, називається абсолютно білою поверхнею. Поверхня, яка повністю поглинає всі промені, що падають на неї, називається абсолютно чорною. До таких поверхонь дуже близька сажа платинова, чорна та ін. Абсолютно чорне тіло має максимальну здатність випромінювання й основні закони випромінювання виведені для нього. Випромінювальна здатність інших тіл порівнюється з випромінювальною здатністю абсолютно чорного тіла як еталона.

Кількість тепла, випромінюваного з 1 м<sup>2</sup> поверхні нагрітого тіла в 1 с, визначається величиною

$$Q = K_e \left[ \left( \frac{\theta_1}{1000} \right)^4 - \left( \frac{\theta_0}{1000} \right)^4 \right], \text{Вт/м}^2, \quad (4.8)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт випромінювання, Вт/К<sup>4</sup>м<sup>2</sup>,  $K_e = 5,7\tau$ ,  $\tau$  – постійна випромінювання (див. таблиці в довідниках);  $\theta_1$  – температура нагрітого тіла, К;  $\theta_0$  – температура тіл, на які падають промені, К.

**Тепловіддача у сталому режимі.** Тепловіддача з поверхні тіла звичайно відбувається одночасно конвекцією та випромінюваннями. При цьому важко визначити, яка частина тепла передається в навколишнє середовище тим чи іншим видом тепловіддачі. Тому вводять поняття коефіцієнта тепловіддачі  $K_m$ .

Таблиця 4.1 – Характеристика поверхонь при тепловіддачі

Поверхня та її характеристика	Коефіцієнти тепловіддачі $K_m$ , Вт/(м <sup>2</sup> °С)	
	у повітрі	у маслі
Горизонтальні стрижні круглої міді діаметром 1 – 6 см	13...3,5	–
Плоскі шини червоної міді, поставлені на ребро	6...9	–
Чавунна, сталева або залізна поверхня, тонко ошпакльована і вкрита лаковою фарбою	10...14	–
Будь-яка поверхня, вкрита лаком	12...16	–
Фарфорові циліндри, занурені в бак з маслом	–	50...150
Обмотка з паперовою ізоляцією	10...12,5	25...36
Пакет листового заліза	10...12,5	70...90

Коефіцієнт тепловіддачі (табл. 4.1) визначає кількість тепла, яка віддається в навколишнє середовище за 1 с усіма видами тепловіддачі з 1 м<sup>2</sup> тепловіддаючої

поверхні при різниці температур нагрітого тіла і навколишнього середовища в  $1^\circ\text{C}$ . Розмірність  $K_m$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

У сталому режимі, коли всі втрати в провіднику віддаються в навколишнє середовище

$$P = K_m \tau_{cm} F, \quad (4.9)$$

звідки

$$\tau_{cm} = \frac{P}{K_m F}, \quad (4.10)$$

де  $P$  – потужність втрат у провіднику,  $\text{Вт}$ ;  $K_m$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\tau = \theta_m - \theta_0$  – перевищення сталої температури нагрітого тіла  $\theta_m$  над температурою навколишнього середовища  $\theta_0$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  $F$  – тепловіддаюча поверхня,  $\text{м}^2$ .

Рівняння (4.10) носить назву формули Ньютона.

#### 4.4 Нагрівання та охолодження однорідного провідника в часі за тривалого режиму роботи

Якщо потужність втрат у провіднику при проходженні по ньому електричного струму дорівнює  $P$ , то за час  $dt$  в ньому виділиться енергія

$$P \cdot dt = I^2 K_c R_{om} dt. \quad (4.11)$$

Частина цієї енергії піде на нагрівання провідника

$$GCd\tau, \quad (4.12)$$

а частина буде відведена в навколишнє середовище

$$FK_m \tau dt, \quad (4.13)$$

де  $G$  – маса провідника,  $\text{кг}$ ;  $C$  – питома теплоємність,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$ ;  $F$  – поверхня тепловіддачі провідника,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – перевищення температури провідника по відношенню до навколишнього середовища,  $^\circ\text{C}$ ;  $K_m$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ .

Для будь-якого моменту часу буде правильне таке рівняння теплового балансу:

$$Pdt = GCd\tau + FK_m \tau dt. \quad (4.14)$$

Якщо прийняти  $R$ ,  $C$ ,  $K_m$  постійними, то розв'язання рівняння відносно  $\tau$  буде мати вигляд

$$\tau = \frac{P}{FK_m} \left( 1 - e^{-\frac{FK_m}{GC} t} \right) + \tau_0 e^{-\frac{FK_m}{GC} t}, \quad (4.15)$$

де  $\tau_0$  – перевищення температурою провідника температури середовища в момент початку процесу.

У дійсності  $R$ ,  $C$  і  $K_m$  залежать від температури, і отже, будуть змінюватися в часі. Похибку, обумовлену зробленим припущенням, можна знизити, якщо зазначені величини приймати не для початкової температури, а для температури, близької до тієї, яка буде мати місце при сталому режимі.

Величина  $GC/FK_m = T$  має розмірність часу і носить назву постійної часу нагрівання. Фізично вона є тим часом, за який провідник нагріється до сталої температури за відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище. При  $t = \infty$

рівняння (4.15) прийме вигляд

$$\tau_{\infty} = \frac{P}{FK_m} = \tau_{cm}, \quad (4.16)$$

тобто має місце сталий процес, стале перевищення температури якого визначається формулою (4.10).

Отже, рівняння (4.15) може бути переписане у вигляді

$$\tau = \tau_{cm}(1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T}. \quad (4.17)$$

При  $\tau_0 = 0$ , тобто коли процес починається з холодного стану,

$$\tau = \tau_{cm}(1 - e^{-t/T}). \quad (4.18)$$

Згідно з (4.17) і (4.18) перевищення температури провідника змінюється в часі за законом показової функції (експоненти). Стале перевищення температури (при  $t = \infty$ ) в обох випадках одне й те саме і не залежить від величини  $\tau_0$ .

На рис. 4.9 наведені криві 1 і 2, побудовані відповідно рівнянням (4.18, 4.17). Час  $t$  тут береться в долях  $T$ . Температура  $\tau_{cm}$  звичайно досягається через час  $t = (3...5)T$ . На рисунку показано графічне визначення величини  $T$ . Це буде відрізок  $AB$  на прямій сталого перевищення температури  $\tau_{cm}$ , який відсічений дотичною, що проведена на початку координат до кривої нагрівання. Величина  $T$  може бути також визначена за кривою нагрівання на тій підставі, що за час  $T$  перевищення температури досягає  $0,632 \tau_{cm}$ .

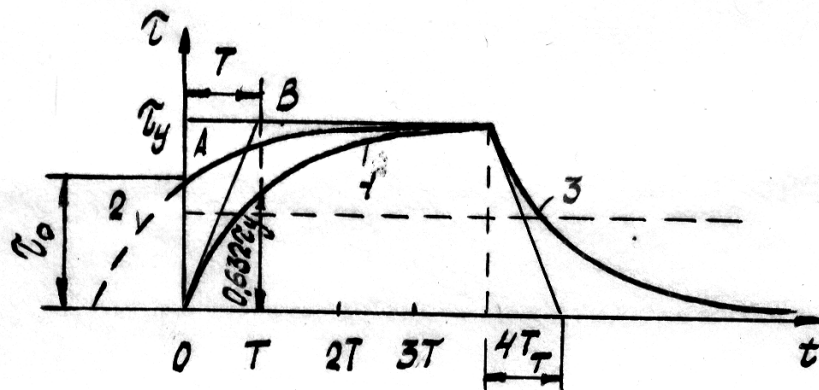


Рис. 4.9 - Зміна температури у часі в процесах нагрівання та охолодження

Розглянемо тепер процес охолодження провідника. Припустимо, що в якийсь момент часу протікання струму по провіднику припинялося. Провідник почне охолоджуватись. Рівняння (4.14) приймає вигляд

$$0 = GCd\delta + FK_m \tau dt, \quad (4.19)$$

звідки

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T}. \quad (4.20)$$

Крива 3 (рис. 4.9) побудована за цим рівнянням з припущення, що  $\tau_0 = \tau_{cm}$ . Крива охолодження є дзеркальним зображенням кривої нагрівання 2 відносно прямої (наведена пунктиром), що проведена посередині між віссю абсцис і прямою сталого перевищення температури. Аналогічно попередньому, але з відліком від прямої  $\tau_{cm}$  визначається графічно величина  $T$ .



#### 4.5 Нагрівання та охолодження однорідного провідника при короткочасному навантаженні

При тривалому режимі припустиме навантаження  $P_{тр}$  вибирається так, щоб сталі перевищення температури  $\tau_{ст}$  дорівнювало припустимому  $\tau_{пр}$ . Перевищення температури в цьому разі змінюється по кривій 1 (рис. 4.10). При тому самому навантаженні в короткочасному режимі роботи за час  $t_n$  перевищення температури досягло б значення  $\tau_i$ , тобто провідник не був би повністю використаний щодо нагрівання. При короткочасному режимі слід так навантажити провідник  $t_{пр}$ , щоб його перевищення температури змінювалося за кривою 2 і в кінці режиму (за час  $t_n$ ) досягло  $\tau_{max}$ .

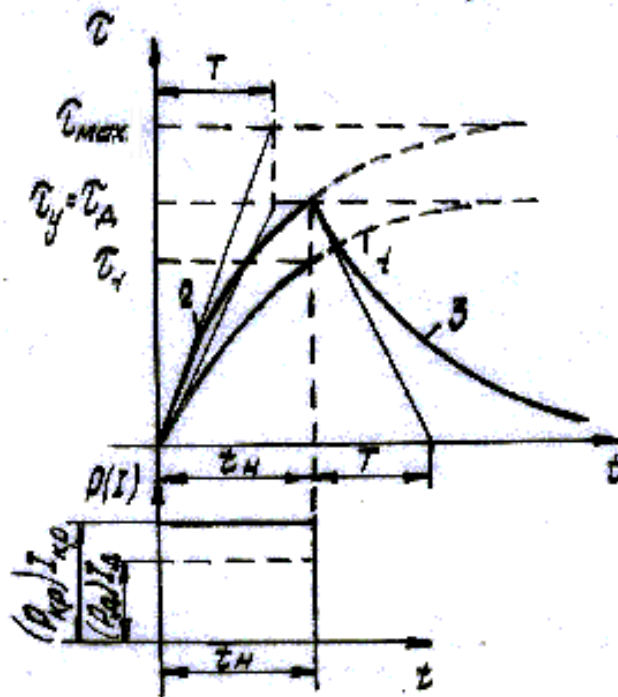


Рис. 4.10 - Криві процесу нагрівання та охолодження однорідного провідника при короткочасному режимі роботи

За таким навантаженням в тривалому режимі досягалася б температура  $\tau_{max}$ , яка перевищує  $\tau_{пр}$ .

Отже, коефіцієнт перевантаження за потужністю втрат для короткочасного режиму визначається із співвідношення

$$K_p = \frac{P_{кр}}{P_{пр}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{пр}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}} > 1. \quad (4.21)$$

Оскільки втрати пропорційні до квадрата струму, то коефіцієнт перевантаження по струму

$$K_i = \sqrt{K_p} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}}. \quad (4.22)$$

Охолодження провідника буде відбуватися за тією самою кривою 3, що й при тривалому режимі.

#### 4.6 Нагрівання та охолодження однорідного провідника при повторно-короткочасному навантаженні

Повторно-короткочасним називається режим роботи, за якого періоди навантаження  $t_n$  чергуються з паузами (рис. 4.11). При цьому ні за час навантаження, ні за час паузи перевищення температури не досягає сталого значення.

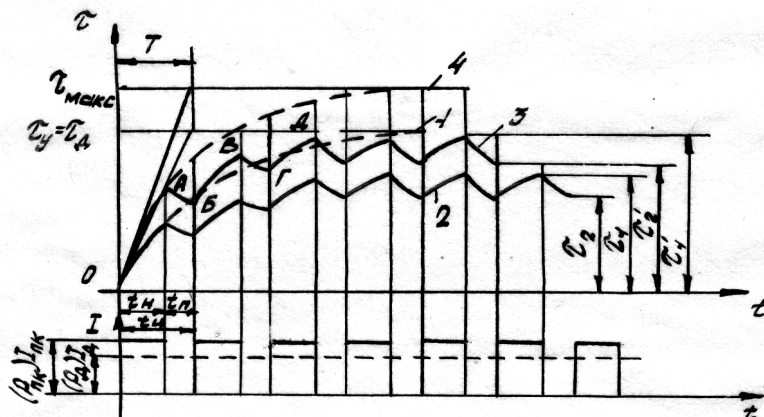


Рис. 4.11 - Криві процесу нагрівання та охолодження однорідного провідника при повторно-короткочасному навантаженні

Повний період  $t_n + t_{п}$  називається циклом  $t_{ц}$ . Характеризується режим тривалістю вмикань –  $ПВ\%$  і частотою вмикань – кількістю циклів за годину.  $ПВ\%$  являє собою виражене у відсотках відношення тривалості навантаження до тривалості всього циклу:

$$ПВ\% = \frac{t_n}{t_n + t_{п}} \cdot 100\% . \quad (4.23)$$

За час навантаження провідник нагрівається (ділянки  $OA, BB, \dots$ ), за час паузи він охолоджується (ділянки  $AB, BG, \dots$ ). До кінця кожного з періодів температура не досягає сталого значення. Однак з деякого моменту часу настає положення, за яким підвищення температури за період навантаження дорівнює її пониженню за період паузи. Перевищення температури коливається між деяким максимумом  $\tau_1$  та мінімумом  $\tau_2$ .

Як і при короткочасному режимі, стале перевищення температури (крива 2) буде нижчим за припустиме (крива 1), якщо провідник навантажений номінальним струмом тривалого режиму  $I_{пр}$ . Ця величина дорівнює допустимому значенню (крива 3), якщо струм підвищити до  $I = I_{нк}$ . При навантаженні  $I = I_{нк}$  перевищення температури при тривалому режимі досягло б  $\tau_{max} > \tau_{пр}$  (крива 4).

Коефіцієнти перевантаження за потужністю втрат і струму визначаються із співвідношень

$$K_p = \frac{P_{нк}}{P_{пр}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{ст}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_n + t_{п}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}} ; \quad (4.24)$$

$$K_I = \frac{I_{нк}}{I_{пр}} = \sqrt{K_p} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_n + t_{п}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}} , \quad (4.25)$$

де  $P_{нк}$  – потужність втрати при повторно-короткочасному режимі.

#### 4.7 Нагрівання однорідного провідника при короткому замиканні

Коротке замикання характеризується великим струмом і малою тривалістю (від декількох тисячних секунди до декількох секунд). При коротких замиканнях припускається в 2 – 3 рази вища температура нагрівання провідника, ніж при номінальному струмі, а отже і тепловіддача зростає у три рази. При цьому втрати в провіднику зростають у сотні разів. Отже, тепловіддача складе тільки 1 – 3 % від усієї енергії, яка виділяється в провіднику, і можна вважати, що вся енергія йде на його нагрівання.

Рівняння теплового балансу (4.14) в такому разі прийме вигляд

$$Pdt = GCd\tau, \quad (4.26)$$

звідки

$$d\tau = \frac{p}{GC} dt = \frac{\rho}{\gamma C} K_0 \left( \frac{i}{s} \right)^2 dt, \quad (4.27)$$

де  $i$  – миттєве значення струму;  $\rho$  – питомий опір;  $\gamma$  – питома вага матеріалу провідника;  $C$  – питома теплоємність;  $s$  – переріз провідника;  $K_0$  – коефіцієнт додаткових втрат.

Принципово  $\rho$  і  $C$  є змінними величинами, які залежать від температури. Змінною величиною в часі є і струм короткого замикання. Однак для спрощення розрахунку можна прийняти ці величини постійними.

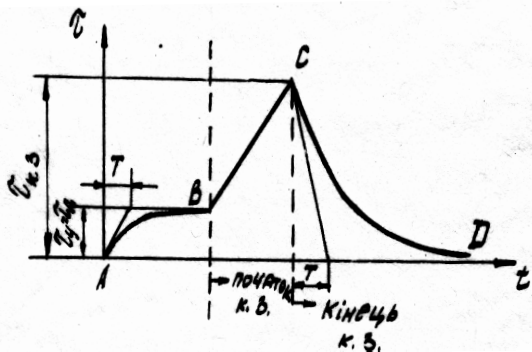


Рис. 4.12 - Нагрівання однорідного провідника при короткому замиканні та охолодження його після вимкнення:  $AB$  – процес нагрівання при номінальному режимі;  $BC$  – те саме при короткому замиканні;  $CD$  – охолодження

При цьому значення  $\rho$  і  $C$  слід брати для температури нагрітого провідника. Тоді

$$\tau_{кз} = \frac{\rho_{зар}}{\gamma C_{зар}} K_0 i^2 t + \tau_{поч} \quad (4.28)$$

де  $\tau_{поч}$  – перевищення температури провідника над температурою навколишнього середовища в момент початку короткого замикання.

Нагрівання провідника при короткому замиканні відбувається практично по прямій (рис. 4.12). Охолодження провідника після вимкнення короткого замикання відбувається за тими самими законами, що і при нормальних режимах (4.20).

#### 4.8 Нагрівання ізольованих провідників

При сталому режимі перевищення температури на поверхні ізольованих провідників (рис. 4.13) буде

$$\tau_1 = \frac{P}{FK_m} \quad (4.29)$$

Нас, однак, цікавить температура  $\tau_{\max}$  на внутрішній стороні ізоляції, яка буде більшою  $\tau_1$ :

$$\tau_{\max} = \tau_1 + \Delta\tau, \quad (4.30)$$

де  $\Delta\tau$  – перепад температур в товщі ізоляції, який дорівнює:

$$\Delta\tau = \frac{P}{2\pi l\lambda} \ln \frac{D}{d}. \quad (4.31)$$

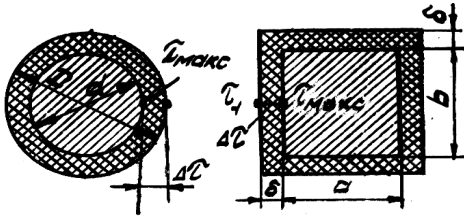


Рис. 4.13 - До визначення перевищення температури на внутрішній стороні ізоляції

Для прямокутного провідника

$$\Delta\tau = \frac{P\delta}{2\lambda l(a+b)}. \quad (4.32)$$

Таким чином, якщо розрахунок вести на одиницю довжини, то перевищення температури на внутрішній стороні ізоляції для круглого провідника

$$\tau_{\max} = \frac{P}{K_m \pi D} + \frac{P}{2\pi \lambda} \ln \frac{D}{d}, \quad (4.33)$$

а для прямокутного

$$\tau_{\max} = \frac{P}{2(a+b)} + \frac{P\delta}{2\lambda(a+b)}, \quad (4.34)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності ізоляції провідника;  $\delta$  – товщина ізоляції.

## ЛЕКЦІЯ 5

### КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ. ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ

#### 5.1 Загальні відомості

Будь-яке розмикання сильнструмового електричного кола постійного струму супроводжується появою дуги на контактах, що розмикаються. Якщо б цього явища не було, то ми б мали дуже великі затруднення при управлінні електричними установками. Уся енергія, яка запасена в магнітному полі системи, повинна була б при вимкненні обернутись в енергію електричного поля, а це веде до небезпечних для ізоляції перенапруг.

Наявність електричної дуги дозволяє здійснювати вимкнення кіл постійного току або зовсім без напруг, або з перенапругами, величиною яких можна керувати. Енергія магнітного поля системи виділяється в дузі та обертається в теплову енергію.

Розмикання електричного кола при скільки-небудь значних струмах і напругах, як правило, супроводжується електричним розрядом між контактами, що розходяться; повітряний проміжок між контактами іонізується і стає на деякий час

провідником, в ньому виникає дуга. Протягом цього часу струм в колі падає від початкового значення до нуля. Фізично процес вимкнення полягає в деіонізації повітряного проміжку між контактами, тобто в перетворенні його в діелектрик, і припиненні внаслідок цього протікання струму.

Електрична дуга була вперше визначена в 1802 році професором військової медико-хірургічної академії в Петербурзі Василем Володимировичем Петровим. Повідомлення про відкриття електричної дуги та про можливості використання її для освітлення та плавлення металів було зроблено в книзі "Известия о гальвановольтовых опытах", які виконував професор фізики Василь Петров, що була видана в Петербурзі в 1803 році.

Електрична дуга являє собою вид розряду, який характеризується великою щільністю струму, високою температурою, підвищеним тиском газу та малим падінням напруги на дуговому проміжку. При цьому має місце інтенсивне нагрівання електродів (контактів), на яких утворюються так звані анодні та катодні плями. Катодне свічення концентрується в невеликій яскравій плямі, розжарена частина протилежного електрода утворює анодну пляму.

У залежності від відстані між електродами бувають короткі та довгі електричні дуги.

Коротка дуга характеризується тим, що її довжина значно (приблизно в 10 разів) менше від радіуса катодної плями, температура анодної плями вище за температуру катодної плями, що приводить до більш швидкого випаровування матеріалу анода.

У довгій дузі радіус катодної плями значно менше від її довжини, а анодна пляма може стати набагато більшою від катодної. Тому в довгій дузі катод випаровується швидше за анод.

У дузі можна відзначити три області, дуже різні за характером процесів, що протікають. Безпосередньо до негативного електрода (катода) дуги прилягає область катодного падіння напруги. Далі йде плазмовий стовп дуги. Безпосередньо до позитивного електрода (анода) прилягає область анодного падіння напруги. Ці області схематично показані на рис. 5.1. Розміри областей катодного й анодного падіння напруги (рис. 5.1) дуже перебільшені. У дійсності їх протяжність дуже мала, наприклад, протяжність катодного спаду напруги приблизно дорівнює шляху вільного руху електрона (менше 1 мк). Протяжність області анодного спаду напруги звичайно дещо більша від цієї величини.

Область катодного спаду напруги характеризується високим градієнтом, який досягає десятків і сотень вольт на сантиметр. Однак через малу протяжність цієї області спад напруги в ній невеликий – він близький до потенціалу іонізації парів матеріалу катода.

Анодний спад напруги дорівнює декільком вольтам. Звичайно він менше від катодного спаду напруги, а градієнт в цій області значно менший, ніж в області катодного спаду. Збільшення градієнта в біляанодній області викликано наявністю електронної хмари, обумовленої так званим динатронним ефектом.

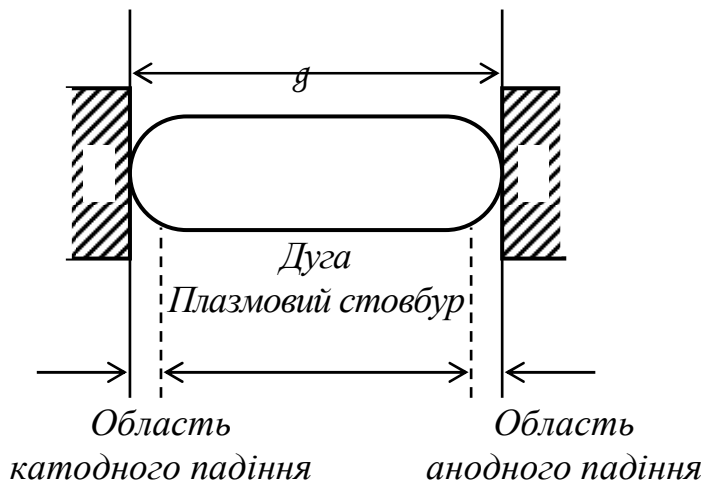


Рис. 5.1 - Будова дуги

## 5.2 Процеси іонізації дугового проміжку

Під дією електричного поля електрони розганяються і бомбардують анод, вибираючи з нього електрони, які й утворюють електричну хмару. Біля електродів спад напруги залежить від матеріалу електродів і навколишнього газу. В останній частині дуги, що називається плазмовим стовпом дуги, спад напруги практично прямо пропорційний довжині дуги. Градієнт тут приблизно постійний вздовж стовпа. На рис. 5.2. схематично зображено розподіл градієнта і напруги довжини дуги.

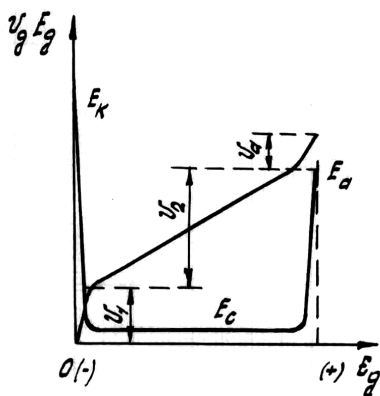


Рис. 5.2 - Розподіл падіння напруги і градієнта по довжині дуги

У звичайних умовах повітря є хорошим ізолятором. Так, необхідна для пробую повітряного проміжку в 1 см напруга становить не менше 30 кВ. Щоб повітряний проміжок став провідником, необхідно створити в ньому певну концентрацію заряджених частинок (електронів та іонів).

Електронна дуга, що являє собою потік заряджених частинок, у початковий момент розходження контактів виникає в результаті наявності вільних електронів газу дугового проміжку і електронів, що випромінюються з поверхні катода. Вільні електрони, що містяться в проміжку між контактами, починають переміщатись з великою швидкістю в напрямі від катода до анода під дією сил електричного поля. Напруженість поля (градієнт напруги) на початку розходження контактів може досягати декількох тисяч кіловольт на сантиметр.

Під дією сил цього поля вириваються електрони з поверхні катода і переміщуються до анода. Створений таким шляхом початковий потік електронів

створює в подальшому інтенсивну іонізацію дугового проміжку.

Для дугових процесів, що мають місце в електричних апаратах низької напруги, найбільше значення мають процеси, які відбуваються в електродах (термоелектронна й автоелектронна емісія), і процеси, що відбуваються в дугових проміжках (термічна й ударна іонізація).

Термоелектронна емісія (випромінення електронів з нагрітої поверхні) має вирішальне значення при дуже високих температурах катодної плями. З електронної теорії металів відомо, що в металі завжди є велика кількість вільних електронів, які рухаються в різних напрямках між вузлами кристалічної решітки. Коли який-небудь електрон наближається до поверхні металу, то він може вилетіти в навколишній простір, якщо швидкість його достатньо велика. Але для цього він повинен подолати сили тяжіння з боку позитивних іонів, які є в металі.

На подолання цих сил повинна бути затрачена робота, яка називається роботою виходу електрона, або роботою виходу. Робота виходу залежить від роду металу і для кожного металу вона є характерною постійною величиною, яка звичайно виражається в електрон-вольтах. Найменшу роботу виходу мають лужно-земельні метали – цезій, барій та інші. Робота виходу для деяких матеріалів наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Матеріал	Робота виходу, еВ	Матеріал	Робота виходу, еВ
Цезій	1,81	Срібло	4,15
Барій	2,52	Вольфрам	4,52
Цинк	4,28	Залізо	4,77
Мідь	4,40	Платина	5,32

Робота виходу зменшується за наявності на поверхні металу адсорбованої плівки газу, домішків деяких інших металів, забруднень і т. д. Зменшення роботи виходу приводить до посилення термоелектронної емісії при даній температурі.

При розходженні контактів різко зростає перехідний опір контакту й щільність струму в останній контактній ділянці. Ця ділянка розігрівається до розплавлення й утворення містка з розплавленого та киплячого металу. Тут має місце випаровування металу контактів. На негативному електроді утворюється так звана катодна пляма (розжарена ділянка), яка служить основою дуги й осередком випромінення електронів у перший момент розходження контактів. Щільність струму термоелектронної емісії залежить від температури та матеріалу електрода. Вона невелика, і хоч може бути достатньою для виникнення електричної дуги, але її недостатньо для підтримання горіння.

Автоелектронна емісія (явище випромінювання електронів з катода під дією сильного електричного поля) має місце при малих відстанях між контактами. У момент розмикання контактів між ними виникає розрив, спочатку надто малий, а потім він швидко зростає. Через те, що в початкові моменти утворення цього проміжку величина його дуже мала, а прикладена напруга скінченна, то градієнт електричного поля в проміжку дуже великий. Напруженість електричного поля достатня для виривання електронів з холодного катода. Електрон, що вилетів з

поверхні металу, може бути повернений в метал утримуючими силами за відсутності зовнішнього поля. За наявності ж цього поля він може бути, навпаки, вилучений з поверхні металу, тобто може стати електроном емісії.

Як було відзначено, забруднення поверхні металу знижує роботу виходу. Тому забруднення контактів посилює автоелектронну емісію і тим самим полегшує умови виникнення дуги. Струм автоелектронної емісії також надто малий і може служити тільки початком розвитку дугового розряду.

Таким чином, виникнення розряду на контактах, що розходяться, пояснюється наявністю термоелектронної та автоелектронної емісії. Перевага того чи іншого фактора залежить від величини струму, матеріалу й чистоти поверхні контактів, швидкості їх розходження і від інших факторів.

Ударна іонізація відбувається в тих випадках, коли вільні електрони, що рухаються під дією електричного поля з великою швидкістю, мають достатній запас кінетичної енергії. При зіткненні в дуговому проміжку з нейтральними частинками газу вони вибивають з них електрони, утворюючи позитивно заряджені іони та нові вільні електрони.

Щоб електрон міг іонізувати частинку газу, він повинен рухатися з деякою певною швидкістю. Швидкість електрона залежить від різниці потенціалів та довжини його вільного пробігу. Тому звичайно вказується не швидкість руху електрона, а те мінімальне значення різниці потенціалів, яке необхідно мати на довжині вільного пробігу, щоб електрон до кінця шляху набув необхідної швидкості. Ця різниця потенціалів носить назву потенціалу іонізації.

Потенціал іонізації  $U_i$  для різних газів різний (таблиця 5.2). Для парів металу він приблизно в два рази нижче, ніж для газів.

Таблиця 5.2

Елемент	$U_i, \text{В}$	Елемент	$U_i, \text{В}$
Водень	15,4	Мідь	10,3
Кисень	15,5	Алюміній	7,72
Азот	15,8	Залізо	7,86
Окис вуглецю	14,3	Вольфрам	7,98
Вугілля	11,26	Платина	8,7

Потенціал іонізації газової суміші визнається найнижчим з потенціалів іонізації вхідних у газову суміш компонентів і в дуже малому ступені залежить від концентрації цих компонентів. Навіть за наявності невеликого домішку парів металу ступінь іонізації в значній мірі визначається потенціалом іонізації парів металу. Наприклад, 1 % парів міді дає потенціал іонізації суміші 10,1 В, домішок 50 % парів міді – 8,08 В.

Якщо електрон при ударі з нейтральною частинкою не має необхідної для вибивання вільного електрона енергії, може відбуватися ступінчаста іонізація. При цьому атом переходить у збуджений стан, тобто його електрон з внутрішньої орбіти переходить на зовнішню, більш віддалену. Для іонізації такого атома потрібна менша енергія. При наступних зіткненнях з вільними електронами він іонізується. Таким



чином, іонізація відбувається поступово.

Слід відзначити, що ударна іонізація залежить від тиску газу в області простору, що оточує дугу. Підвищення тиску веде до зменшення довжини вільного пробігу електронів та іонів, і отже, до кінця шляху вони не набудуть швидкості, необхідної для іонізації атомів або молекул газу. Внаслідок цього процес іонізації послаблюється, а для підтримання дуги потрібна більш висока напруга.

Термічна іонізація являє собою процес іонізації під дією високої температури. Підтримання дуги після її виникнення, тобто забезпечення виниклого дугового розряду достатньою кількістю вільних зарядів, пояснюється основним і практично єдиним видом іонізації – термічною іонізацією.

За різних умов дослідники отримували температуру дуги в границях від 5 000 до 50 000 К. За такої високої температури швидкість теплового руху молекул газу досягає настільки великої величини, що при зіткненні їх стає можливим вибивання електронів з атомів, тобто відбувається іонізація газу навіть без зовнішнього електричного поля. Основною характеристикою термічної іонізації є ступінь іонізації  $\alpha$ , що являє собою відношення кількості атомів у цьому проміжку. На рис. 5.3 дана зміна ступеня іонізації газу та парів металу в залежності від температури при атмосферному тиску.

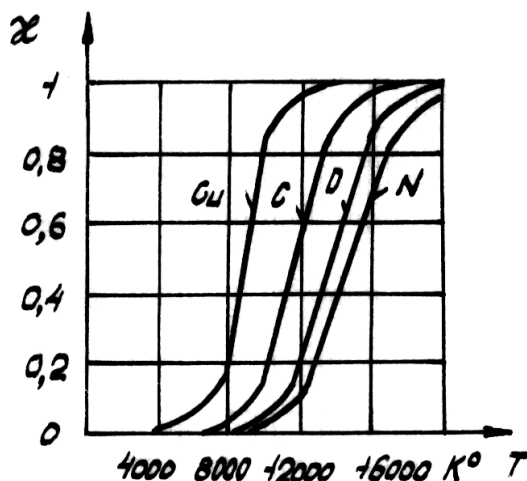


Рис. 5.3 - Залежність ступеня іонізації від температури

Пари металу іонізуються при значно меншій температурі, ніж газ, що пояснюється їх більш низьким потенціалом іонізації. При великих струмах електроди дуже випаровуються і простір між електродами насичується парами металу. У цьому випадку ступінь іонізації в значній мірі визначається потенціалом іонізації парів металу.

### 5.3 Процеси деіонізації дугового проміжку

Поряд з іонізаційними процесами в дузі паралельно й безперервно йдуть процеси деіонізації – рекомбінація та дифузія іонів та електронів. В усталеному режимі горіння дуги процеси іонізації й деіонізації в ній перебувають в рівновазі.

Стовп дуги з однаковою кількістю вільних позитивних і негативних зарядів характеризується високим ступенем іонізації газу. Речовину, ступінь іонізації якої близький до одиниці, тобто в якій практично немає нейтральних атомів і молекул, називають плазмою.

При запалюванні дуги, природно, переважну роль відіграють процеси іонізації, а при гасінні дуги – деіонізації. Процеси деіонізації в дуговому проміжку, як і процеси іонізації, визначаються характером кола і конструкцією контактів, а також станом дугового проміжку. Процес рекомбінації полягає в тому, що при зближенні позитивного іона й електрона вони притягуються і, зіткнувшись, нейтралізуються. Зіткнення позитивних і негативних частинок відбувається завдяки їх тепловому руху, причому, зіткненню сприяють електричні сили притягання, що діють між різноманітними зарядженими частинками. Із збільшенням кінематичної енергії частинок імовірність рекомбінації зменшується. Це означає, зокрема, що ймовірність рекомбінації зменшується при збільшенні температури.

У стовпі дуги негативними частинками є в основному електрони. Безпосереднє з'єднання електрона з позитивним іоном через велику різницю швидкостей малоімовірно. Звичайно рекомбінація відбувається за допомогою нейтральної частинки, яку електрон заряджає. При зіткненні цієї негативно зарядженої частинки з позитивним іоном утворюється одна або дві нейтральні частинки. Процес рекомбінації при горінні дуги з твердими ізолюючими стінками протікає найбільш інтенсивно. Це пояснюється тим, що при горінні дуги з діелектриком позитивні іони й електрони адсорбуються поверхністю діелектрика внаслідок їх притягання, яке визивається поляризацією діелектрика.

Рекомбінація на поверхні діелектрика йде з інтенсивністю, на кілька порядків більшою, ніж рекомбінація в стовбурі дуги, що має велике практичне значення, тому що ця властивість використовується в дугогасильних камерах.

Дифузія заряджених частинок як один із способів деіонізації полягає в переміщенні заряджених частинок з області горіння дуги з більшою концентрацією зарядів в оточуюче середовище з меншою концентрацією зарядів.

Дифузія обумовлена як електричними, так і тепловими факторами. Щільність зарядів у стовбурі дуги зростає від периферії до центру. При цьому створюється електричне поле, яке змушує іони рухатись від центру до периферії та залишати область дуги. У цьому ж напрямі діє й різниця температур стовпа дуги і навколишнього простору. Заряджені частинки, що вийшли з області дуги, в остаточному рахунку рекомбінуються поза цією областю. У стабілізованій дузі, що вільно горить, дифузія відіграє дуже малу роль. В дузі, що обдувається стисненим повітрям, а також у відкритій дузі, що швидко рухається, деіонізація за рахунок дифузії може мати значення, близьке до деіонізації внаслідок рекомбінації. У дузі, що горить у вузькій щілині або закритій камері, деіонізація відбувається головним чином за рахунок рекомбінації.

Таким чином, деіонізація дугового проміжку відбувається за рахунок рекомбінації заряджених частинок та їх дифузії за межі стовпа дуги. Процес рекомбінації збільшується з пониженням температури дуги. У відповідності до цього охолодження дуги веде до інтенсивної деіонізації та швидкого згасання дуги.

Із розглянутих процесів іонізації та деіонізації можна зробити висновок, що в залежності від фізичних властивостей різні гази будуть мати різні дугогасильні властивості. При горінні дуги в різних газах вона буде по різному охолоджуватись. У газах з великою теплопровідністю і теплоємністю дуга буде охолоджуватись сильніше, отже, такі гази мають кращі дугогасильні властивості.

## 5.4 Вольт-амперна характеристика дуги постійного струму

Основною характеристикою дуги постійного струму є залежність напруги дуги від струму, яка називається вольт-амперною характеристикою. Вольт-амперна характеристика дуги постійного струму має вигляд падаючої кривої (рис. 5.4, а). Зі зростанням струму напруга на дузі зменшується. Це означає, що опір дугового проміжку падає швидше, ніж збільшується струм.

Дуга виникає між контактами апарата при деякій напрузі  $U_3$  (рис. 5.4, б), що називається напругою запалювання і залежить від відстані між контактами, від температури й тиску середовища, що оточує дугу, і т.д. Вольт-амперна характеристика у вигляді кривої  $ab$  є статичною характеристикою дуги, тобто такою, що отримана при повільній зміні струму.

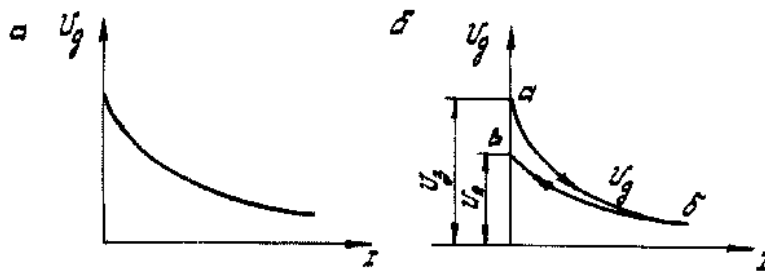


Рис. 5.4 - Вольт-амперні характеристики дуги постійного струму

Якщо ж від точки  $b$  зменшити струм дуги з більшою швидкістю так, щоб процеси деіонізації не встигали за зміною струму, то утворюється так звана динамічна характеристика  $bв$  (рис. 5.4, б).

Напруга на дуговому проміжку при зниженні струму до нуля називається напругою гасіння  $U_2$ . Вона завжди менша за напругу запалювання.

Як було відзначено, падіння напруги на дузі складається з падіння напруги в стовпі дуги  $U_c$  та катодного  $U_k$  і анодного падіння напруг. Біляелектродне падіння напруги залежить від матеріалу електродів і навколишнього газу і не залежить від довжини дуги.

Падіння напруги в стовпі дуги практично прямо пропорційне довжині дуги. Таким чином, падіння напруги на дуговому проміжку можна зобразити у вигляді

$$U_d = U_e + E_d l_d, \quad (5.1)$$

де  $U_e = U_k + U_a$  – біляелектродне падіння напруги;  $l_d$  – довжина дуги;  $E_d$  – подовжній градієнт напруги в стовпі дуги.

З формули виходить, що із збільшенням довжини дуги падіння напруги буде збільшуватись і вольт-амперна характеристика буде розташовуватись вище (рис. 5.5).

Залежність вольт-амперної характеристики дуги від тиску показана на рис. 5.6. Підвищення тиску газу в області простору, що оточує дугу, збільшує тепловідвід від неї через конвекцію.

Внаслідок цього процес іонізації послаблюється і для підтримування дуги потрібна більш висока напруга.

Головним іонізуючим фактором, що підтримує горіння електричної дуги, є термічна іонізація, отже, гасіння дуги повинно в основному здійснюватись за

рахунок її охолодження. Посилене охолодження дуги може бути досягнуто обдуванням її стисненим повітрям або швидким переміщенням її в повітрі силами магнітного поля. Рух дуги в магнітному полі показаний на рис. 5.7.

Електрична дуга може розглядатись як провідник зі струмом. Відомо, що на провідник зі струмом, який поміщений в магнітне поле, діє сила, напрямком якої визначається за правилом лівої руки (рис. 5.7, а). Інакше кажучи, провідник зі струмом буде завжди виштовхуватись із області згущення магнітних силових ліній.

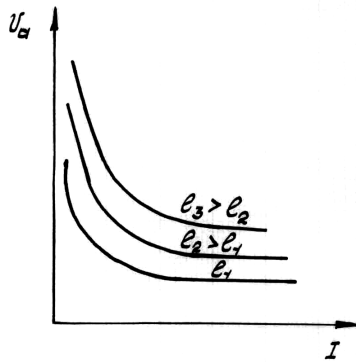


Рис 5.5 - Залежність вольт-амперної характеристики від довжини дуги

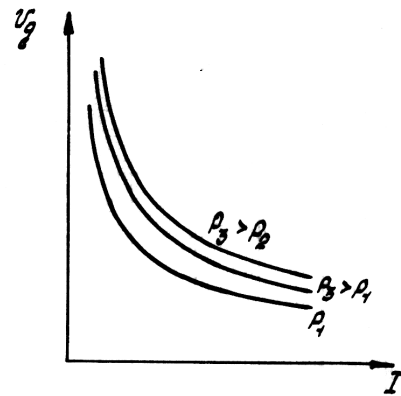


Рис. 5.6 - Залежність вольт-амперної характеристики дуги від тиску

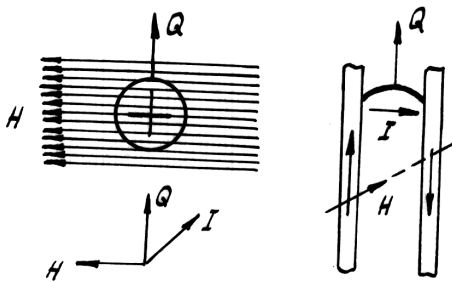


Рис. 5.7 - Рух електричної дуги в магнітному полі

При перпендикулярному відносно осі дуги зовнішньому магнітному полі, а також у власному магнітному полі контуру струму (рис. 5.7, б) дуга отримує поступальний рух. Діюча на дугу електромагнітна сила врівноважується опором повітря руху дуги, який ми можемо прийняти пропорційним квадрату швидкості:

$$Q = K v^2 \quad (5.2)$$

Через те, що електромагнітна сила, яка діє на дугу, пропорційна добутку  $IH$ , то, порівнюючи ці сили, одержимо:

$$A_1 IH = K v^2 \quad (5.3)$$

де  $I$  – струм в дузі;  $A_1$  – коефіцієнт пропорційності;  $H$  – напруженість магнітного поля.

Як правило, магнітне поле створюється струмом вимкнення та пропорційне йому, тобто

$$H = A_2 I \quad (5.4)$$

У такому випадку звідки

$$A_1 A_2 I^2 = A I^2 = K v^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{A}{K}} I^2 = K_1 I \quad (5.5)$$

тобто швидкість руху дуги пропорційна струму.

Зі зростанням швидкості руху дуги охолодження її посилюється і поздовжній градієнт напруги в стовпі дуги різко зростає. На рис. 5.8 зображена залежність вольт-амперної характеристики дуги при різних швидкостях руху.

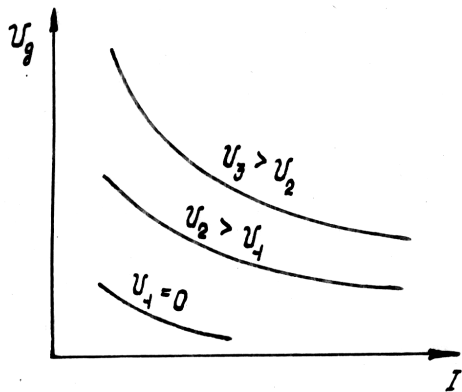


Рис. 5.8 - Залежність вольт-амперної характеристики дуги при різних швидкостях її руху

Чим вище розташована вольт-амперна характеристика дуги, тим більша напруга необхідна для її горіння, а отже й тим простіше її гасіння.

## ЛЕКЦІЯ 6

### ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ТА ПРОЦЕСИ ДУГОГАСІННЯ. ПРОЦЕСИ ПРИ ВІДКЛЮЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО ТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### 6.1 Умови гасіння дуги постійного струму

Електрична дуга постійного струму може бути погашена тільки в тому випадку, якщо процес деіонізації дугового проміжку протікає з більшою швидкістю, ніж процес іонізації.

При постійних параметрах кола зменшення кількості іонізованих частинок веде до зростання опору дуги і, отже, до зниження величини струму в дузі. Для всякого кола постійного струму, що складається із джерела струму, деякого опору та індуктивності за наявності дуги (рис. 6.1), можна записати рівняння

$$U = U_0 + iR + L \frac{di}{dt}, \quad (6.1)$$

звідки

$$L \frac{di}{dt} = (U - iR) - U_0.$$

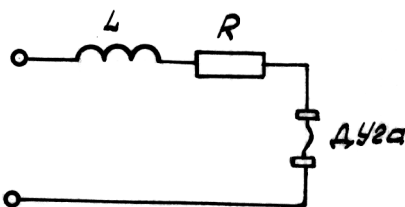


Рис. 6.1 - Коло постійного струму з електричною дугою

В усталеному режимі  $i = \text{const}$ ;  $\frac{di}{dt} = 0$ . Тому

$$U_0 = U - iR. \quad (6.2)$$

Для погашення дуги необхідно, щоб струм в ній весь час зменшувався. Це означає, що  $\frac{di}{dt} < 0$ . Щоб виконати цю умову, необхідно

$$U_g > U - iR \quad (6.3)$$

Графічне розв'язання рівняння наведено на рис. 6.2. Пряма 1 являє собою напругу джерела  $U$ , пряма 2 – різницю  $U - iR$ , крива 3 – вольт-амперну характеристику дугового проміжку  $U_\delta$ .

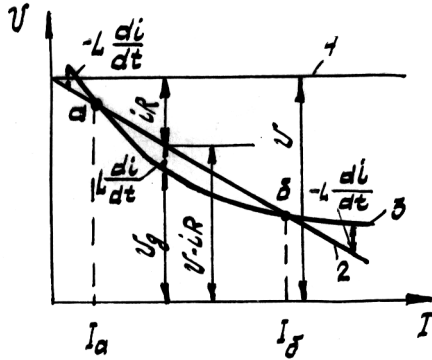


Рис. 6.2 - Графічне розв'язання рівняння кола постійного струму

Різниця ординат прямої 2 і 3 являє собою падіння напруги на індуктивності  $L \frac{di}{dt}$ . Ця напруга, як видно на рис. 6.2, може бути позитивною, негативною та дорівнювати нулю.

У точках  $a$  та  $б$  має місце рівноважний стан. Однак у точці  $a$  ця рівновага нестійка, в точці  $б$  – стійка.

При струмах  $i < I_a$  напруга  $U_\delta > U - iR$ , а  $L \frac{di}{dt}$  має негативне значення і через те, що струм буде зменшуватись до нуля, дуга буде згасати. У цьому разі напруга джерела  $U$  стає меншою за суму  $U_\delta + iR$ , тобто вона недостатня для підтримання дуги.

Якщо ж з будь-якої причини струм стане більше  $I_a$ , то виявиться, що  $U_\delta < U - iR$ , тобто сума  $U_\delta + iR$  менша за напругу джерела  $U$ , а  $L \frac{di}{dt} > 0$ . Надлишок напруги викличе збільшення струму, таке положення буде зберігатись доти, доки струм не досягне величини  $I_б$ . Через те, що між точками  $a$  і  $б$   $L \frac{di}{dt}$  є величиною позитивною, зростання струму в колі супроводжується накопиченням електромагнітної енергії.

При струмі  $i > I_б$  знову стає  $U_\delta > U - iR$ , а  $L \frac{di}{dt}$  є величиною негативною, тобто для підтримання такої величини струму напруга недостатня. Струм у колі буде падати до значення  $I_б$ . Дуга в точці  $б$  буде горіти стійко.

Наявність ділянок характеристики, де спостерігається самовільне збільшення струму, а також точки  $б$  стійкого горіння дуги вказує на те, що в розглянутих умовах розрив кола контактами неможливий.

Для гасіння дуги необхідно, щоб за будь-якого значення струму спостерігалась нерівність  $U_\delta > U - iR$ . Це означає, що вольт-амперна характеристика дуги повинна

на всій своїй довжині лежати вище за характеристику  $U - iR$ .

Підняття вольт-амперної характеристики дуги здійснюється звичайно дугогасильними пристроями, подовженням дуги, яке досягається розсуненням контактів або видуванням дуги. Видування здійснюється або внаслідок руху нагрітого дугою повітря, або шляхом електродинамічних взаємодій між струмом в дузі та магнітним полем.

Для оцінки здатності контактів розірвати електричне коло вводять так звану вольт-амперну характеристику вимкнення, яка являє собою залежність падіння напруги в колі від струму за умови, що дуга, яка виникла на контактах при їх розмиканні, гасне самовільно.

Граничним випадком, коли може виникнути дуга, є випадок дотику вольт-амперної характеристики дуги 3 прямої 2 в єдиній точці. Ця точка буде точкою нестійкого горіння дуги, при відхиленні від якої дуга завжди згасає, тому що  $L \frac{di}{dt} < 0$ .

Для побудови граничної вольт-амперної характеристики вимкнення до статичної вольт-амперної характеристики дуги проводять ряд дотичних (рис. 6.3), точки перетину яких з осями координат дають граничні значення напруги та струму. За цими значеннями будується шукана характеристика.

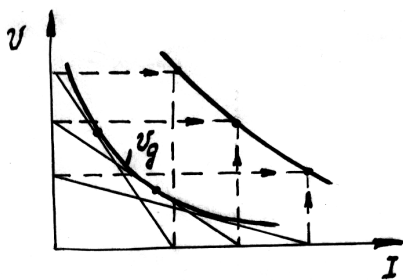


Рис. 6.3 - Побудова граничної вольт-амперної характеристики вимкнення

Якщо робочі значення напруг і струму в колі визначають точку, яка лежить нижче від граничної вольт-амперної характеристики, то дуга, утворена на контактах при їх розмиканні, гасне самовільно. Гранична вольт-амперна характеристика вимкнення дозволяє визначити граничну розривну потужність контактів як добуток напруги мережі та струму в колі контактів.

## 6.2 Особливості дуги змінного струму

На відміну від дуги постійного струму, яка є стаціонарною, дуга змінного струму є динамічною. У ній немає однозначної залежності напруги від струму. Вольт-амперна характеристика дуги змінного струму за період наведена на рис. 6.4. Стрілки показують напрям зміни струму при знятті характеристики.

Як і для постійного струму, напруга дуги в момент її появи (точка *a*) називається напругою запалювання, а напруга дуги в момент зникнення струму (точка *в*) – напругою гасіння.

Якщо для гасіння дуги постійного струму необхідно створити такі умови, за яких величина струму зменшилась би до нуля, то при змінному струмі в дузі незалежно від ступеня іонізації дугового проміжку величина струму зменшується до нуля кожного півперіоду, тобто кожного півперіоду дуга згасає і загоряється знову. Завдання гасіння дуги дещо полегшується. Коли струм не протікає, підведення

енергії до дуги припиняється і температура її різко падає. Протягом деякого часу, доки величина струму близька до нуля, інтенсивність іонізації сильно падає і, як правило, в цей час деіонізація переважає над іонізацією. Дуговий проміжок втрачає свою провідність – і дуга згасне. Величина струму в дузі змінюється за законом, який відмінний від синусоїдального.

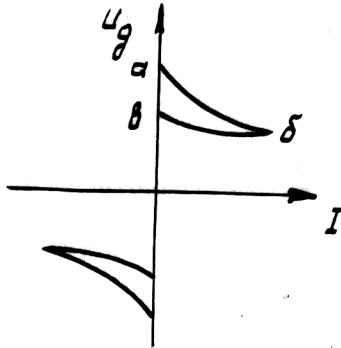


Рис. 6.4 - Вольт-амперна характеристика дуги змінного струму

У кінці одного півперіоду й на початку наступного опір дугового проміжку стає настільки великим, що відбувається різке обмеження величини струму. Таким чином, виникає деякий проміжок часу, протягом якого величина струму близька до нуля (так звана пауза струму).

Криві зміни струму й напруги на дуговому проміжку при змінному струмі для активного та індуктивного навантаження наведені на рис. 6.5. Напруга дуги має своєрідну форму.

На початку півперіоду вона швидко зростає і досягає напруги загоряння  $U_3$ . З виникненням дуги напруга швидко спадає до мінімуму  $U_0$ . У кінці півперіоду напруга знов зростає до величини напруги гасіння  $U_2$ . Пунктиром показана напруга мережі.

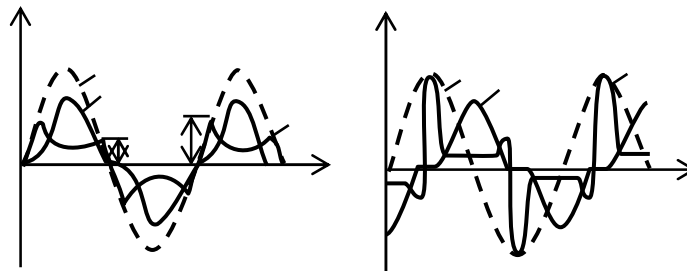


Рис. 6.5 - Криві зміни струму та напруги дуги змінного струму

Якщо між контактами утворилась дуга змінного струму, то кожного півперіоду при нульовому значенні струму дуга згасає. Електрична дуга може загорітись лише в тому випадку, якщо в колі буде напруга, що дорівнює напрузі загоряння дуги. Якщо при згасанні дуги не може виникнути напруга, яка більша за напругу загоряння дуги, то вона знов загорітись не може.

У колах з активним навантаженням (рис. 6.5, а) якщо величина струму дорівнює нулю, напруга мережі також дорівнює нулю і умови гасіння дуги набагато сприятливіші, ніж в індуктивних мережах, в яких при нульовому значенні струму напруга досягає максимальної величини (рис. 6.5, б).

У той момент, коли величина струму дуги дорівнює нулю, на її електродах відновлюється напруга, яка дорівнює напрузі джерела. Процес відновлення напруги



в залежності від характеру мережі може бути миттєвим, коливальним внаслідок наявності в мережі індуктивності та ємності, а також аперіодичним.

Розглянемо найпростішу схему мережі, яка зображена на рис. 6.6. У момент згасання дуги на ємності залишається деяка напруга, і вона починає розряджатись через опір  $R$  та індуктивність  $L$ . Процес розрядження може бути коливальним або аперіодичним. При коливальному процесі напруга розрядження накладається на напругу джерела, робоча частота якого звичайно значно менша за власну частоту коливань мережі.

Припустимо, що індуктивність мережі  $L$  велика, а тому струм через дугу зсунутий відносно напруги джерела на кут, близький до  $90^\circ$ . Припустимо, що дуга згасла і більше не загорялась. Процес відновлення напруги на електродах дуги в цьому разі зображено на рис. 6.7, *а*. Якщо дуга загоряється (рис. 6.7, *б*), процес можна зобразити таким чином. Напруга, яка відновлюється, в деякий момент пробиває дуговий проміжок, і через нього починає проходити струм. При цьому напруга на дуговому проміжку зменшується з величини  $U_3$  (напруга загоряння) до напруги горіння дуги  $U_0$ . Літерою  $\tau$  тут позначена пауза струму.

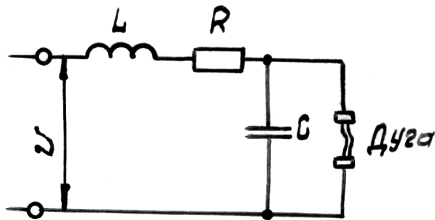


Рис. 6.6 - Мережа змінного струму з електричною дугою

Випадок аперіодичного відновлення напруги після припинення струму дуги показаний на рис. 6.7, *в*.

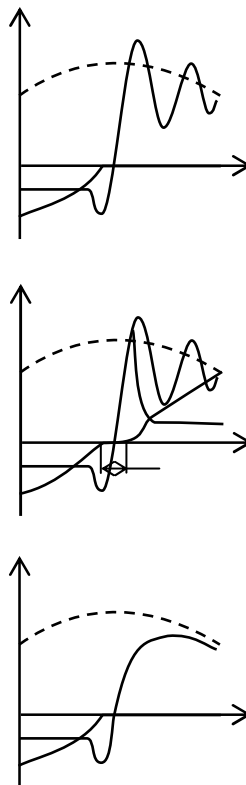


Рис. 6.7 - Процеси відновлення напруги на контактах

Після згасання дуги іонізація, що існувала в стовпі дуги (плазма дуги), зникає не відразу. Температура цього так званого залишкового стовпа дуги падає швидко, а з падінням температури зростає електрична міцність (напруга, необхідна для пробію дугового проміжку). Для відновлення дуги необхідно, щоб електрична міцність зростала повільніше, ніж відновлювальна напруга мережі, а для її згасання – навпаки. Ці співвідношення показані на рис. 6.8.

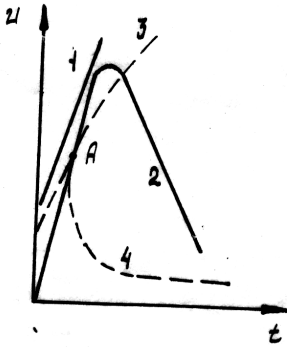


Рис. 6.8 - Умови гасіння та повторного загоряння дуги змінного струму

Якщо крива 1 зростання електричної міцності дугового проміжку вище за криву 2 відновлювальної напруги, дуга згасає і більше не загоряється. Якщо ж крива 3 відновлювальної міцності перетинає криву 2 (точка А), дуга загоряється знову і напруга падає по кривій 4.

Через те, що гасіння дуги при змінному струмі відбувається само собою кожного півперіоду, то основним завданням є не гасіння дуги протягом першого півперіоду, а недопущення її повторного загоряння.

При змінному струмі гасіння дуги є складним при напрузі 500 В і вище, але полегшується при напругах 220 і 380 В. Це пов'язано з дуже швидким відновленням електричної міцності в білякатодній області. Досвід показує, що з моменту зникнення струму в дузі білякатодний простір майже миттєво набуває електричної міцності порядку 150 – 250 В. Тому при напрузі 220 В відновлювальна міцність білякатодної області вже достатня для того, щоб забезпечити неможливість повторного загоряння дуги після першого ж півперіоду. При напрузі 380 В і вище для гасіння дуги за один півперіод необхідно застосовувати ті чи інші способи гасіння.

## ЛЕКЦІЯ 7

### ПЕРЕНАПРУГИ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ВІДКЛЮЧЕННЯМ СТРУМУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ. ПРИНЦИПИ ДУГОГАСІННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

#### 7.1 Способи гасіння електричної дуги

Гасіння електричної дуги є однією з актуальних проблем сучасного електроапаратобудування. Надійність роботи апаратів, як і їх конструктивні форми й області застосування, визначаються способом гасіння дуги.

З умови гасіння дуги (6.3) витікає, що для гасіння дуги необхідно, щоб  $U_0 > U - iR$ . Цього можна домогтись в результаті:

- 1) збільшення довжини  $l_0$  дуги;
- 2) підвищення поздовжнього градієнта напруги  $E_0$ ;

3) збільшення біяелектродного падіння напруги  $U_e$ .

Деіонізація стовпа пов'язана з розсіянням енергії. При незмінному струмі посилення процесів деіонізації приводить до підвищення падіння напруги на дузі. Більш ефективним є той спосіб гасіння, яким за інших однакових умов досягається більше падіння напруги на одиницю довжини дуги.

#### *Механічне розтягування дуги*

Механічне розтягування є найпростішим способом гасіння електричної дуги. Механічне розтягування дуги, яке здійснюється переміщенням електродів з визначеною швидкістю, застосовується в низьковольтних апаратах при вимкненні відносно невеликих струмів. У цьому випадку енергія, що надходить в дугу від джерела струму, розсіюється в основному шляхом теплопровідності й конвекції через бокову поверхню стовпа дуги.

Дослідження показують, що довжина дуги в момент її згасання (критична довжина дуги  $l_{кр}$ ) не залежить від швидкості розходження електродів, а залежить тільки від величини напруги струму, що вимикається. Зі зростанням струму й напруги довжина дуги збільшується.

Тривалість горіння дуги пов'язана з критичною довжиною дуги  $l_{кр}$  і швидкістю її подовження  $\vartheta$  співвідношенням

$$t = \frac{l_{кр}}{\vartheta} \quad (7.1)$$

При механічному розтягуванні опорні точки дуги стоять нерухомо на електродах, що приводить до сильного обгорання останніх. Для зменшення обгорання контактів слід прагнути забезпечити великі швидкості розходження, що потребує потужних вимикальних пружин.

Критична довжина дуги навіть при низьких напругах досягає значної величини. Так, при струмі  $I = 600$  А і напрузі  $U = 220$  В критична довжина дуги складає приблизно 25 см. При таких розхилах контактів потрібні потужні вимикальні пружини, які потребують практично нездійснюваних магнітних систем, тому гасіння електричної дуги шляхом механічного розтягування при великих струмах недоцільно.

#### *Гасіння дуги в магнітному полі*

Дієвим засобом розтягування електричної дуги є магнітне дуття. Для цього в зоні, де горить дуга, утворюється магнітне поле, спрямоване перпендикулярно стовпу дуги. Сили, що виникають при цьому, переміщують дугу в потрібному напрямі.

Гасіння електричної дуги за допомогою магнітного дуття, вперше запропоноване М.О. Доливо-Добровольським в 1962 році, широко застосовується в різних вимикачах.

Зовнішнє магнітне поле для переміщення електричної дуги в низьковольтних апаратах може бути отримане за допомогою дугогасильної котушки або постійних магнітів. У комутаційних апаратах найбільше поширення отримала дугогасильна котушка, що вмикається послідовно з контактами. Основними позитивними якостями цього способу збудження магнітного поля є надійність і незалежність напрямку сили, яка діє на дугу, від напрямку струму.

Розглянемо дугогасильні пристрої з магнітним дуттям (рис. 7.1). Дугогасильна котушка 2, як правило, виконується з феромагнітним осердям 1, полюси 3 якого охоплюють простір, де горить дуга 5. Взаємодіючи з полем котушки, дуга переміщається вправо, розтягується і згасає в дугогасильній камері 4.

У більшій частині апаратів дуга переміщається під дією зовнішнього та власного магнітних полів. Якщо надати електродам дугоподібну форму, яка розходиться (рис. 7.2, а), то дуга буде переміщатись під лінією електромагнітних сил до кінців рогів незалежно від напрямку струму. Одночасно з переміщенням дуга подовжується і після досягання критичної довжини згасає.

Аналогічно здійснюється гасіння дуги при розмиканні великих струмів рубильником (рис. 7.2, б).

Однак слід мати на увазі, що розтягування дуги під дією електродинамічних сил можливе тільки при великих струмах. При зменшенні струму зменшуються й електродинамічні сили, викликані ним, і при деякому критичному значенні струму дуга переміщатись не буде, а отже, і не погасне.

У залежності від конструктивних особливостей апаратів критичне значення струму дуги перебуває в межах від 3 до 30 А.

Схема (рис. 7.2, а) в електричних апаратах знаходить застосування у вигляді дугогасильної решітки, в якій дуга поділяється на ряд окремих дуг, що рухаються між кількома пластинами.

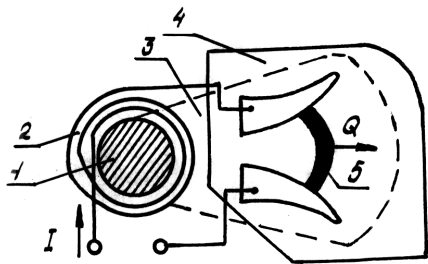


Рис. 7.1 - Дугогасильний пристрій з магнітним дуттям

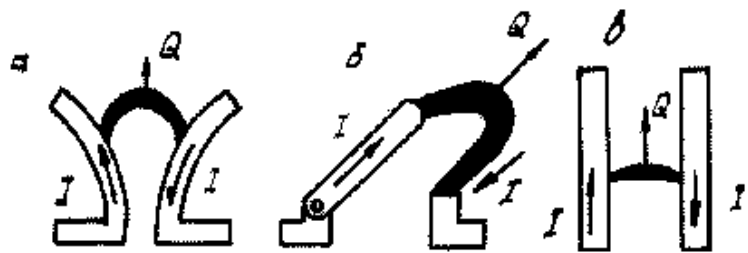


Рис. 7.2 - Схеми гасіння дуги розтягінням і переміщенням

Залежність швидкості руху дуги від відстані між пластинами показана на рис. 7.3. Наведена крива може бути розбита на три ділянки. На ділянці I має місце не дуга, а місточок з розплавленого металу, який може лише дуже повільно пересуватись електродинамічними силами або навіть зовсім не рухатись. Цей місточок існує, доки відстань між пластинами менша від деякого критичного  $l_1$  (до 1 мм). На ділянці II спостерігається різке зростання швидкості дуги із зростанням її довжини. При  $l > l_1$  місточок розплавленого металу рветься, виникає дуга, яка приходить в швидкий рух. На ділянці III швидкість руху дуги із збільшенням відстані між електродами зменшиться. Це пояснюється аеродинамічним опором повітря для довгої дуги, тому що остання вигинається й навіть може утворити петлі.

З рис. 7.3 видно, що застосовувати малі відстані між пластинами недоцільно, тому що будь-яка зупинка дуги приводить до пошкодження електродів.

#### *Гасіння дуги в дугогасильній решітці*

Дугогасильна решітка складається з ряду мідних або залізних пластин, між

якими дуга поділяється на декілька послідовно ввімкнених ділянок невеликої довжини (рис. 7.4).

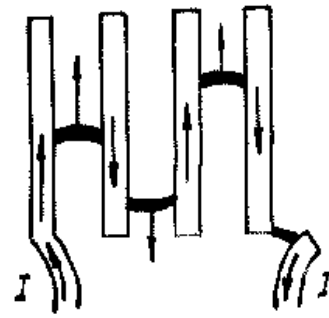
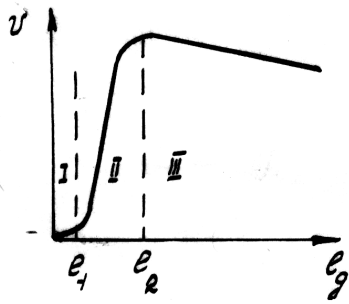


Рис. 7.3 - Залежність швидкості руху дуги від відстані між паралельними електродами  
Рис. 7.4 - Рух дуги в дугогасильній решітці

При цьому основна частина падіння напруги в дузі припадає на катодне і анодне падіння, тому що стовп дуги в кожному проміжку між пластинами дуже короткий і доля падіння в ньому невелика. За кількості пластин  $m$  кількість коротких дуг буде  $m + 1$ , і стільки ж буде  $U_e$  біяелектродних падінь напруги. Напруга на всій дузі з решіткою  $U_{dp}$

$$U_{dp} = U_e(m+1) + E_d l_d, \quad (7.2)$$

де

$$U_e = U_0 + U_k;$$

$$l_d = l_0(m+1).$$

Для відкритої дуги тієї ж довжини

$$U_{d0} = U_e + E_d l_d. \quad (7.3)$$

Таким чином, напруга на дузі в решітці

$$U_{dp} = U_{d0} + U_e m, \quad (7.4)$$

тобто при незмінній повній довжині дуги статична характеристика дуги в дугогасильній решітці (крива б, рис. 7.5) зображується тією ж за формою кривою, що й характеристика відкритої дуги (крива а), але зсунутою вгору на суму біяелектродних падінь напруги. Якщо кількість пластин велика, то величиною  $U_{d0}$  порівняно з  $U_e m$  можна знехтувати. Тоді

$$U_{dp} = U_e m.$$

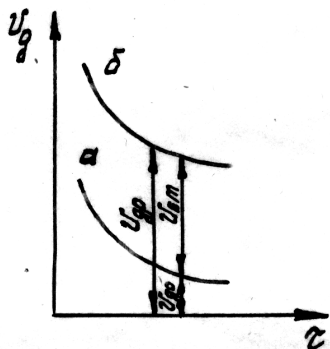


Рис. 7.5 - Вольт-амперні характеристики дуги

Щоб дуга в решітці погасла, кількість пластин, між якими вона повинна розташовуватись, має бути

$$m > \frac{U}{U_e}, \quad (7.5)$$

де  $U$  – напруга мережі.

Особливістю руху дуги в дугогасильній решітці є неоднакова швидкість руху ділянок дуги в окремих проміжках між пластинами. В одних проміжках дуга йде вперед, в інших – відстає (рис. 7.4). Це відбувається спочатку через неоднаковий опір руху дуги в різних проміжках, що викликається випадковими причинами.

Якщо в якомусь проміжку дуга опинилась нижче, ніж в сусідніх, то на неї діє електродинамічна сила з боку сусідніх пластин, яка направлена вниз. Слід відзначити, що умови входження дуги в решітку суттєво залежать від матеріалу пластин. При сталевих пластинах з'являється додаткова сила, яка втягує дугу в решітку. Зображена на рис. 7.6 картина силових ліній магнітного поля, створеного струмом дуги, показує, що на дугу діє сила, спрямована до пластин решітки. Такий розподіл силових ліній обумовлений малим магнітним опором сталі в порівнянні з повітрям. Опорна точка дуги, з'явившись на деякій відстані від осі сталеві пластины, рухається, наближаючись до осі (рис. 7.7).



Рис.7.6 - Втягування дуги в сталеву решітку



Рис. 7.7 - Траєкторія опорної точки дуги на сталевій пластині

Зазначені властивості сталевих пластин сприяли широкому розповсюдженню пристроїв з дугогасильними решітками.

Застосування сталевих пластин замість мідних або латунних, крім того, здешевлює конструкцію. Для запобігання шкідливої дії корозії сталеві пластини обмінюють.

Дугогасильна решітка дозволяє суттєво скоротити розмір дуги й гасити її в обмеженому обсязі при малому світловому та звуковому ефекті. Це забезпечило широке застосування решіток в дугогасильних пристроях контакторів і автоматичних вимикачів. Та ж сама мета і в контактів з багаторазовим розривом електричного кола. Типовою конструкцією є містковий контакт (рис. 7.8). Напруга, що приходить на кожну пару контактів, а отже й на дугу, у цьому випадку знижується в два рази.

#### *Гасіння дуги в поздовжніх щілинах*

У сучасних вимикачах широке розповсюдження отримали дугогасильні камери з поздовжніми щілинами. Щілину називають поздовжньою, якщо її вісь збігається за напрямом з віссю стовпа дуги. Щілина утворюється між двома ізоляційними пластинами. На рис. 7.9 схематично зображені дугогасильні пристрої з поздовжніми щілинами. Камера з однією вузькою щілиною (рис. 7.9, а) складається з

двох пластин, виготовлених з дугостійкого (звичайно керамічного) матеріалу. Дуга, що виникла при розходженні контактів, переміщається магнітним дугтям до щілини. Віддаючи тепло стінкам камери, дуга швидко згасає.

Дугогасильна камера з щілиною, яка поступово звужується, показана на рис. 7.9, б. Ідея цього пристрою полягає в тому, що при русі дуги у вузькій щілині струм зменшується, а разом з тим зменшується і діаметр дуги. Щоб забезпечити безперервне зіткнення дуги зі стінками камери, слід ширину щілини поступово зменшувати. У таких камерах часто роблять місцеві розширення щілини, які полегшують рух дуги та забезпечують зіткнення дуги зі стінками камери по більшій поверхні.

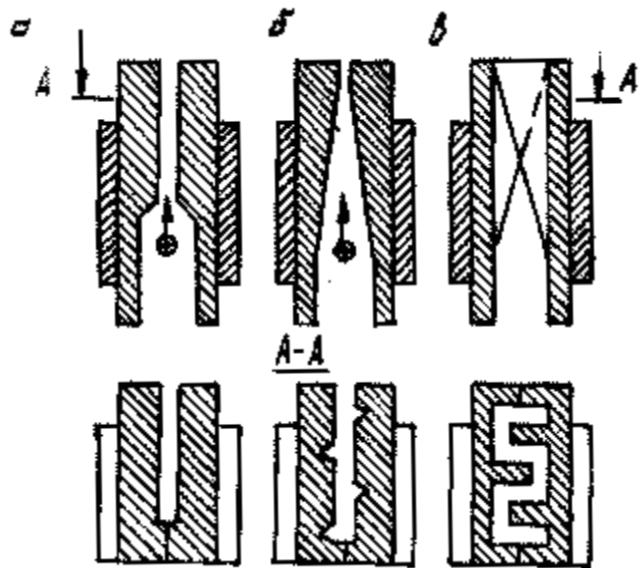
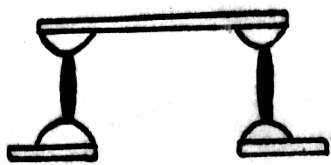


Рис. 7.8 - Дуга в містковому контакті

Рис. 7.9 - Типи дугогасильних камер

Гребінчаста, або лабіринтна камера показана на рис. 7.9, в. У ній дуга, рухаючись під дією магнітного поля, входить у проміжки між зубцями гребінок і приймає зигзагоподібну форму. При цьому здійснюється дуже тісний контакт між дугою і зубцями гребінок, а також збільшується її довжина, що дозволяє скоротити розміри камери. Поздовжні щілини застосовуються, як правило, разом з магнітним дугтям. Крім того, рух дуги по дугогасильних рогах, який застосовується звичайно в таких пристроях, викликає її подовження. Такий комбінований вплив на дугу дозволяє дуже швидко гасити її.

Швидкість руху дуги в щілинах залежить від ширини щілини. При великій ширині щілини стінки її чинять малий вплив на дугу, навіть при великих струмах, за яких діаметр дуги відповідно великий. У камері дуга рухається з меншою швидкістю, ніж на відкритому повітрі, тому що її рух гальмується аеродинамічним опором повітря, який більший в майже закритому просторі.

При зменшенні ширини щілини, коли її ширина стане дорівнювати діаметру дуги, з'являється нова сила опору, яку ми можемо розглядати як силу тертя дуги об стінки. Крім того, дуже зростає й аеродинамічний опір повітря, яке дуга виштовхує з щілини з одного боку і втягує подібно поршню з іншого боку камери.

Для виготовлення стінок камер застосовуються керамічні матеріали.

Застосування гіроскопічних і газогенеруючих матеріалів при дії високої температури недоцільно. У цьому випадку зі стінок камери буде відбуватись випаровування вологи або виділення газу, що призведе до зростання опору руху дуги і, отже, до зниження її швидкості.

## ЛЕКЦІЯ 8

### **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА, КЛАСИФІКАЦІЯ. ПЕРЕХІДНИЙ ОПІР У КОНТАКТНИХ ПОВЕРХНЯХ. ПОВЕРХНЕВІ ПЛІВКИ, ЇХ ВПЛИВ НА ОПІР І БОРОТЬБА З НИМИ. СТАРІННЯ ТА ЗНОС КОНТАКТІВ. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТІВ. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОМУТАЦІЙНИХ КОНТАКТІВ**

#### **8.1 Класифікація контактних з'єднань**

Під електричним контактом розуміють з'єднання двох провідників, яке дозволяє проводити струм. Ці провідники називаються контактними елементами або контактами, а поверхні провідників, що прилягають, контактними поверхнями.

Якість контактного з'єднання в основному визначає надійність роботи більшості електричних апаратів. Близько 50 % несправностей в електричних колах у тій чи іншій мірі пов'язані з контактними з'єднаннями. Особливо складне виконання контактів, що працюють при великих струмах.

За умовами роботи контактні з'єднання поділяються на дві основні групи: нерозмикаючі та розмикаючі.

До нерозмикаючих контактних з'єднань належать такі контактні з'єднання, при роботі яких не відбувається відокремлення однієї контактної поверхні від іншої. Здійснюються вони у більшості випадків шляхом механічного з'єднання провідників болтами, заклепками та іншими способами. Суцільнометалеві рухомі контактні з'єднання отримуються шляхом паяння або зварювання.

Нерухомі контактні з'єднання використовуються в усіх електричних апаратах для приєднання до них зовнішніх струмоведучих частин (шин, проводів і т. п.), а також для з'єднання окремих внутрішніх струмоведучих частин між собою.

До розмикаючих контактних з'єднань належать такі з'єднання, в яких повинно бути забезпечено відокремлення однієї контактної поверхні від іншої таким чином, щоб електричне коло між ними було повністю перерване і за необхідності знов створене. Такі контактні з'єднання використовуються в різного роду вимикачах, реле, контракторах і багатьох інших апаратах.

У залежності від геометричної форми контактів і кількості точок дотику розрізняють три типи контактів: точковий, лінійний, поверхневий.

Контакти, в яких з'єднання відбувається в одній точці (практично по дуже малій поверхні), називаються точковими (рис. 8.1, *а*).

Контакти, в яких з'єднання відбувається на лінії (практично по дуже вузькій поверхні), називаються лінійними (рис. 8.1, *б*).

Контакти, в яких з'єднання відбувається по широкій поверхні, називаються поверхневими (рис. 8.1, *в*).

До всіх контактних з'єднань ставляться вимоги надійності електричного



з'єднання, достатньої механічної міцності, допустимого нагрівання при тривалому протіканні номінального струму, стійкості проти зовнішніх впливів.

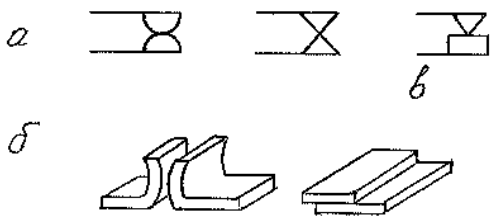


Рис. 8.1 - Типи контактів

Крім цих загальних вимог, до контактів різного роду в залежності від конструкції та призначення ставляться й інші специфічні вимоги.

## 8.2 Контактний опір

Згідно з законом Ома падіння напруги на ділянці провідника, по якому тече струм, буде  $U = IR$ .

Якщо провідник розрізати, а потім з'єднати встик місця зрізу, то провідник тієї ж довжини буде мати дещо більше падіння напруги  $U'$ , що вказує на додатковий опір  $R_k$  в електричному колі:

$$U' = (R_0 + R_k)I$$

Опір  $R$  називається контактним опором і складається з двох складових частин, що не залежать одна від одної:

$$R_k = R_{nl} + R_n \quad (8.1)$$

Перша складова  $R_{nl}$  викликана поверхневими плівками, які утворюються на контактних поверхнях і перешкоджають протіканню струму. Утворенню цих плівок сприяють зовнішні умови (температура, вологість повітря, умови роботи контактів). Ці плівки мають малу товщину і за достатнього контактного тиску легко руйнуються.

Друга складова, що називається перехідним опором  $R_n$ , є завжди, навіть за ідеально чистих поверхонь. Це обумовлено наявністю нерівностей на поверхні металу.

Дійсно, навіть при самій ретельній обробці контактних поверхонь з'єднання (контакт) між ними проходить лише в окремих точках (рис. 8.2). У місцях контакту провідників і в області, що безпосередньо прилягає до них, струм проходить через ділянки з дуже звуженим перерізом, а отже, і з підвищеним опором. Тому перехідний опір називають ще опором звуження.

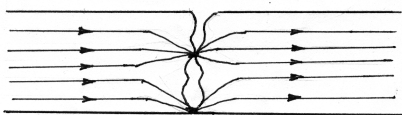


Рис. 8.2 - З'єднання контактних поверхонь

Для створення надійного контакту контактні поверхні повинні притискуватись одна до одної з деякою силою  $Q_k$ . При цьому в місці з'єднання відбувається зминання матеріалу і збільшення контактної поверхні, тобто виникнення нових точок контакту. Розмір і кількість таких площадок залежить від міцності матеріалу провідників і від сили взаємного притискання. Загальна площа контактних поверхонь визначається такою формулою:

$$S = \frac{Q_k}{\sigma}, \quad (8.2)$$

де  $Q_k$  – загальна сила стиснення контактів;  $\sigma$  – границя міцності матеріалу на зминання.

При практичних розрахунках для визначення перехідного опору користаються такою емпіричною формулою:

$$R_n = \frac{K}{Q_k^m}, \quad (8.3)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від матеріалу контактів, способу обробки та стану поверхні контактів;  $m$  – коефіцієнт, який залежить від форми контактів. Для точкових контактів  $m = 0,5$ , для лінійних  $m = 0,7$  і для площадних  $m = 1$ .

Значення коефіцієнта  $K$  для деяких матеріалів з очищеною від окислів контактною поверхнею: мідь – мідь  $K = (0,08 \div 0,14) \cdot 10^{-3}$ , алюміній – мідь  $K = 0,98 \cdot 10^{-3}$ , латунь – латунь  $K = 0,67 \cdot 10^{-3}$ , латунь – мідь  $K = 0,38 \cdot 10^{-3}$ , сталь – срібло  $K = 0,06 \cdot 10^{-3}$ .

Таким чином, перехідний опір контакту залежить від матеріалу, стану та форми контактних поверхонь і сили їх взаємного притиснення.

Залежність перехідного опору від сили натиснення зображена на рис. 8.3. Крива 1 відповідає процесу зростання сили, крива 2 – процесу зменшення сили. При притисненні контактуючих поверхонь однієї до іншої відбувається розплющування точок з'єднання, а також збільшення їх кількості. У результаті збільшується фактична поверхня з'єднання і зменшується контактний опір.

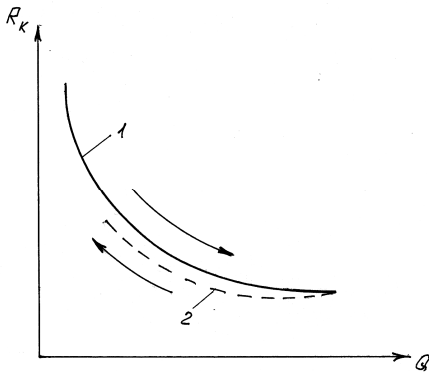


Рис. 8.3 - Залежність перехідного опору контактів від сили натиснення

Таким чином, для зменшення опору контакту треба збільшити контактне зусилля. Однак збільшення контактного зусилля призводить до зниження чутливості апарата, тому що потрібна велика сила від його привода. Тому в чутливих реле контактне зусилля береться таким, що дорівнює декільком ньютонам. В особливо чутливих реле контактне зусилля береться таким, що дорівнює декільком долям ньютонів. Допустимий струм при цьому – доли ампера. Для контактів, що розраховані на струми до 3 А, контактне зусилля береться до 300 Н, а для контактів, що розраховані на струми до 10 А, – 1 000 Н і вище.

### 8.3 Залежність опору контакту від падіння напруги на ньому

При зростанні струму в місці з'єднання перепади напруги і температури збільшуються. Разом з температурою збільшується і контактний опір. Залежність

перехідного опору контакту від температури (приблизно до 200 °С) за дослідними даними така:

$$R_k \approx R_n = R_{n0} \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha_0 \tau \right), \quad (8.4)$$

де  $R_{n0}$  – перехідний опір контакту при 0 °С;  $\alpha_0$  – температурний коефіцієнт збільшення опору контакту;  $\tau$  – перевищення температурою контакту температури навколишнього середовища.

Величина перегріву контакту приблизно може бути виражена таким рівнянням:

$$\tau = \frac{U_k^2}{8\rho\lambda}, \quad (8.5)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу контактів;  $U_k$  – падіння напруги на контакті;  $\lambda$  – питома теплопровідність матеріалу контактів.

Таким чином, перехідний опір контакту може бути зображений як деяка функція від падіння напруги на ньому. Графік залежності опору контакту від падіння напруги показаний на рис. 8.4.

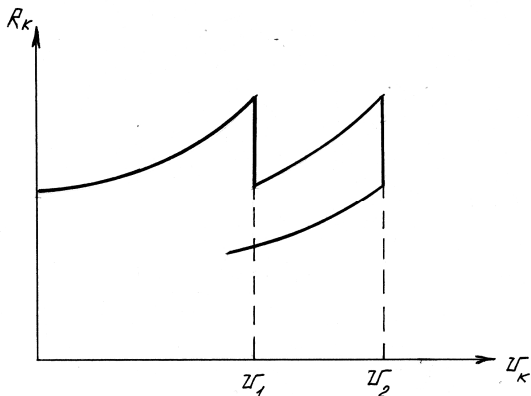


Рис. 8.4 - Залежність перехідного опору контактів від падіння напруги на них

При досягненні контактної напруги  $U_1$  опір контакту починає зменшуватись. Це пояснюється тим, що температура збільшується до температури розм'якшення, і контактна поверхня збільшується.

Після зниження, що обумовлене розм'якшенням матеріалу, знову спостерігається зростання опору. Однак нахил характеристики на цій ділянці відрізняється від теоретичного, оскільки розм'якшення продовжує впливати.

При подальшому збільшенні струму контактна напруга досягає нарешті порогової величини  $U_2$ , яка відповідає температурі плавлення матеріалу контакту. Контактна поверхня збільшується і опір різко падає.

Наведена залежність справедлива, якщо поверхні контактних з'єднань чисті й немає плівок металів. Якщо ж контактні деталі покриті плівками, що мають властивості напівпровідників, а отже, і від'ємний температурний коефіцієнт електричного опору, то підвищення напруги, а значить, і підвищення температури контакту може викликати зменшення його опору. Одержана крива дозволяє судити про стан контакту, а також дозволяє знайти основні характеристики матеріалу контакту – напругу розм'якшення і напругу плавлення.

Напруги розм'якшення і плавлення для деяких матеріалів наведені в табл. 8.1.

Таблиця 8.1 - Напруги розм'якшення і плавлення для деяких матеріалів

Матеріал	$U_1$ , В	$U_2$ , В
Золото	0,08	0,43
Срібло	0,09	0,37
Алюміній	0,10	0,30
Мідь	0,12	0,43
Залізо	0,21	0,60
Платина	0,25	0,65
Вольфрам	0,40	1,10

Плавлення контактів може призвести до їх зварювання, тобто до повного виходу з ладу. Особливу небезпеку являють собою аварійні режими роботи електричного кола, коли через замкнуті контакти протікають струми, які значно перевищують їх номінальні значення. Для запобігання зварювання контактів допустимі значення падіння напруги на них вибираються в 1,5 – 2 рази менше за відповідне значення напруги розм'якшення.

#### 8.4 Розрахунок контактів

Допустимі значення струму через замкнутий контакт визначаються допустимою температурою нагріву контактних поверхонь, за якої вони ще не розм'якшуються, тобто контактною напругою  $U_1$ :

$$I_{\text{дон}} = (0,5 \dots 0,8) \frac{U_1}{R_{\kappa}}, \quad (8.6)$$

де  $R_{\kappa}$  – опір контакту;  $I_{\text{дон}}$  – допустиме значення струму, що протікає через контакт.

Опір контакту збільшується із зменшенням контактного тиску. Знаючи струм, який протікає через контакти, можна визначити перехідний опір контактів  $R_{\kappa}$ :

$$R_{\kappa} = \frac{(0,5 \dots 0,8)U_1}{I_{\text{дон}}}. \quad (8.7)$$

Для забезпечення знайденого значення перехідного опору контактний тиск знаходиться з формули

$$R_{\kappa} = \frac{K}{Q_{\kappa}^m}. \quad (8.8)$$

Розміри контактів вибирають з урахуванням допустимого значення струму. Розмір срібних контактів рекомендують вибирати згідно з табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Навантаження $I_{\text{дон}}$ , А	Діаметр $d_{\kappa}$ , мм	Товщина $h_{\kappa}$ , мм
1 – 3	1 – 3	0,3 – 1,0
3 – 5	3 – 5	0,5 – 2,0
5 – 10	5 – 8	1,0 – 2,0
10 – 20	8 – 12	1,5 – 3,0
20 – 50	12 – 16	1,5 – 3,0

Розміри металокерамічних контактів (ОК12 і ОК15):

- допустимий струм, ампер: 10 – 15; 15 – 25; 25 – 50; 50 – 75 А;
- діаметр: 5; 6; 8; 10 мм.

Після вибору розмірів контактів здійснюють їх перевірку на міцність. Максимальне питоме зминання контактів підраховується за формулою

$$\sigma_{зм} = 1,5 \frac{Q_k}{s} \quad (8.9)$$

Воно повинно бути меншим від границі міцності матеріалу контактів.

## 8.5 Основні конструкції контактних з'єднань

Конструкція контактного з'єднання повинна забезпечувати надійне неослаблене при експлуатації притиснення контактних поверхонь і мінімальний перехідний опір.

Плоскі провідники (шини) вигідніше скріпляти кількома меншими болтами, ніж одним великим, тому що в цьому разі забезпечується більша кількість точок стикання.

Ще менший перехідний опір забезпечується стягуванням шин накладками.

Кінці круглих провідників для надійного контакту розплющуються або забезпечуються наконечниками. Наконечники напаюються або приварюються.

З'єднання за допомогою концентричних затискачів складається з корпусу 1, розрізних конусних втулок 2 і пайок 3 (рис. 8.5). При закручуванні гайок втулки щільно обтискують провідник. Для з'єднання круглого провідника з плоским круглий провідник може бути розплющений, забезпечений наконечником або концентричним затискачем.

Розмикаючі контактні з'єднання є основним елементом комутаційних апаратів. Вони застосовуються для розмикання та замикання струмоведучих частин електричного кола, яке здійснюють звичайно рухом однієї контактної поверхні відносно іншої, нерухомої. Прийнято рухому частину контактної з'єднання називати рухомим контактом, нерухому – нерухомим контактом, а все з'єднання – просто контактом.

У контакторах, пускачах, реле та інших апаратах розривні контакти поділяються:

- на замикаючі (за відсутності струму в обмотці електромагнітного механізму вони розімкнені, а за наявності струму в обмотці відбувається притягання якоря і контакти замикаються);
- розмикаючі (вони замкнені при знеструмленому реле і розмикаються при його спрацьовуванні, коли по обмотці протікає струм).

Умовно прийняте розділення на контакти для малих, середніх і великих струмів. Контакти, розраховані на малі струми, розмикають і замикають кола до одиниць ампер. Контакти розраховані на середні струми – від десятків до сотень ампер і на більші струми – від тисячі до кількох десятків тисяч ампер.

У контактах, що розраховані на малі струми, для створення високого місцевого питомого контактного тиску при малій загальній силі стиснення рекомендується створювати точковий контакт шляхом надання одному з контактів півсферичної або

конічної форми. Приклади конструктивного виконання контактів, що розраховані на малі струми, наведені на рис. 8.6.

Контакти, що розраховані на середні та великі струми, можуть бути поділені на пальцеві, місткові, врубні, роликові, торцеві, розеткові. З'єднання можуть виготовлятися одноступінчастими і багатоступінчастими.

В одноступінчастому контакті контактна пара служить як для тривалого проведення струму у ввімкненому положенні, так і для розривання дуги при розмиканні.

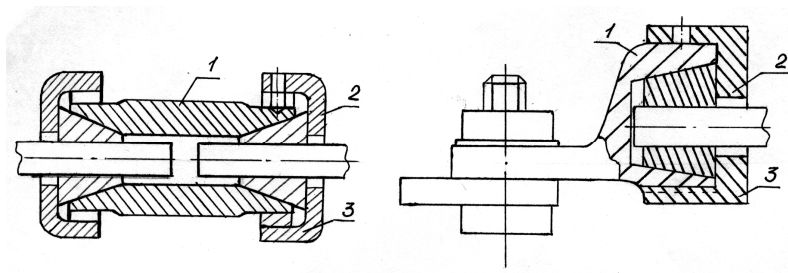


Рис. 8.5 - З'єднання провідників за допомогою концентричних затискачів

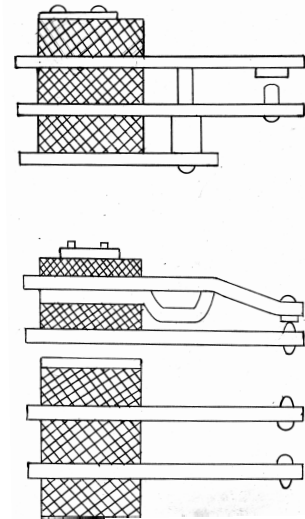


Рис. 8.6 - Контакти на малі струми

Багатоступінчасті контактні системи складаються з паралельно ввімкнених головних і дугогасильних контактів (рис. 8.7). Головні контакти  $1, 1'$  розраховуються на тривале протікання струму навантаження і повинні мати якомога менший перехідний опір.

Дугогасильні контакти  $2, 2'$  виготовляються з дугостійкого матеріалу, тому що вони повинні витримувати горіння електричної дуги. Вони замикаються перед головними контактами і розмикаються після них. Іноді застосовують систему з трьох паралельних контактів: головних, проміжних і дугогасильних.

Проміжні контакти служать для полегшення переходу струму з дугогасильних контактів у головні (при замиканні) і навпаки (при розмиканні).

Пальцеві контакти (рис. 8.8) застосовуються в апаратах з поворотною рухомою системою. Для надійності контактної з'єднання кінематика апарата здійснюється таким чином, що контакти стикаються раніше, ніж рухома система досягає кінцевого положення. Рухомий контакт кріпиться до якоря через систему важелів і пружину. Завдяки цьому після з'єднання з нерухомим контактом рухомий контакт зупиняється, а рухома система продовжує переміщатись до упору, стискаючи при цьому контактну пружину (рис. 8.8).

Як правило, осі обертання контакту  $O_1$  і рухомої системи  $O_2$  (рис. 8.8) не збігаються. При розмиканні та замиканні відбувається перекочування та проковзування рухомого контакту по нерухомому, у результаті чого початкова точка (при замиканні), вона ж остання точка дотику і точка виникнення дуги (при розмиканні), опиняється зміщеною по відношенню до точки 2 кінцевого дотику контактів.

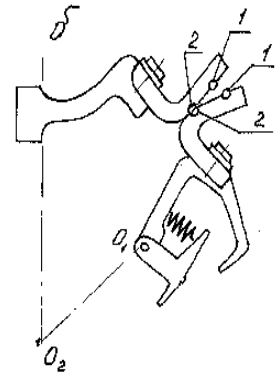
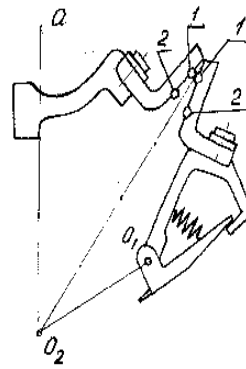
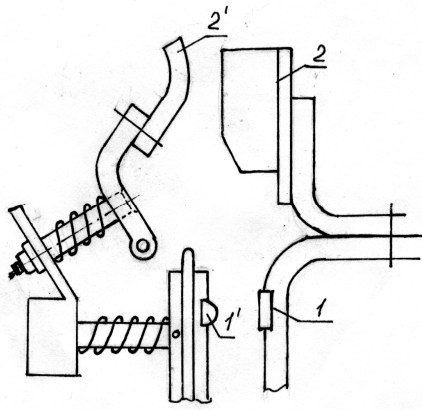


Рис. 8.7 - Двоступеневі контакти

Рис. 8.8 - Кінематика руху пальцевих контактів

Таким чином робоча поверхня віддалена від місця виникнення дуги. Проковзування контактів приводить до стирання окисної плівки та бруду з поверхні контакту.

Проковзування при тій жорсткості, яку звичайно мають поверхні контактів (особливо тих, що працювали), викликає додаткову вібрацію контактів при їх замиканні, а отже, і їх підвищений знос. Тому з'явилась тенденція виключати проковзування, зберігаючи перекочування. Відмова від проковзування вимагає підвищення контактного натиснення для руйнування окисної плівки.

В останні роки знаходять застосування пальцеві контактні системи, в яких відсутнє як перекочування, так і проковзування. При великій частоті вмикань контакти самоочищуються від окислів електричною дугою, що дозволяє застосовувати мідні контакти. При малій частоті вмикань мідні контакти будуть окислятися, і в цьому разі потрібні контакти із срібла або сполук на основі срібла.

Контактні пари у пальцевих контактів виготовляються головним чином у вигляді плоскість – циліндр, циліндр – циліндр. Приклади конструктивних форм пальцевих контактів наведені на рис 8.9.

Місткові контакти (рис. 8.10) застосовуються головним чином в апаратах з прямоходовою рухомою системою. У місткових контактів теоретично перекочування і проковзування відсутні. Тому мідні контакти тут застосовуватись не можуть, а застосовуються контакти із срібла або металокераміки на основі срібла. Контактні пари виконуються у вигляді плоскість – сфера, сфера – сфера (при малих струмах). Рухомий контакт з'єднується з якорем через пружину.

Таким чином, якщо при кінцевому положенні рухомої системи прибрати нерухомий контакт, то рухомий контакт зміститься на деяку відстань, що називається провалом.

Найкоротша відстань між розімкнутими контактними поверхнями рухомого і нерухомого контактів називається розхилом.

Врубні контакти складаються з нерухомого контактного стояка, в який входить контактний ніж. Натиснення здійснюється за рахунок пружних властивостей матеріалу стояків, яким надається відповідна форма. Прикладом врубного контакту є рубильник. У врубних контактах, розрахованих на великі струми, для отримання більш високих, стійких натиснень застосовують сталеві пружини, що стискають контактні стояки. Дотик контактних поверхонь у врубних контактів відбувається по

поверхні або по лінії, тому перекіс контактних поверхонь викликає збільшення перехідного опору.

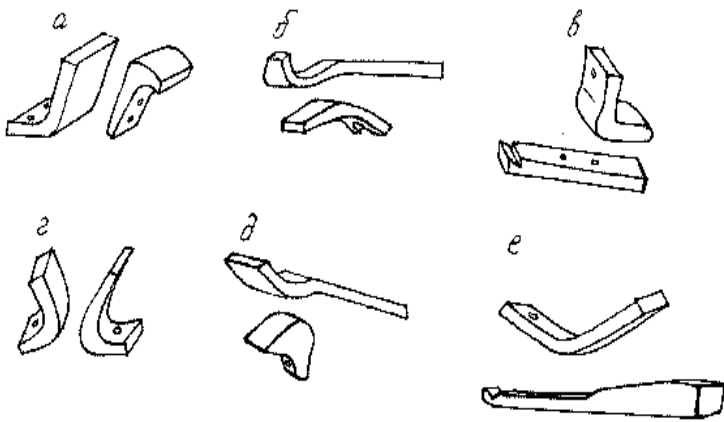


Рис. 8.9 - Пальцеві контакти

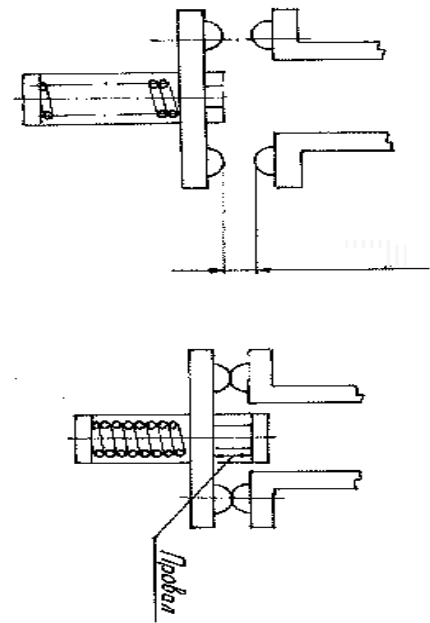


Рис. 8.10 - Місткові контакти

Розеткові контакти є різновидом врубних. Вони складаються з контактної стрижня (рухомий контакт) і ряду сегментів (ламель), що утворюють нерухомий контакт. Розеткові контакти застосовуються переважно як головні.

У роликів контактах між двома нерухомими контактами вкачується рухомий ролик, який перемикає нерухомі контакти. Ролик може мати циліндричну або сферичну поверхню. Відповідно до цього будемо мати лінійний або точковий контакт. Шляхом паралельного ввімкнення отримується багатоточковий контакт, розрахований на великі струми. Роликовий контакт застосовується як головний. Для вимкнення струму через обгоряння роликів він непридатний, тому застосовується разом з дугогасильним.

## 8.6 Знос контактів

Знос або руйнування контактів викликається механічними, хімічними та фізичними факторами.

Механічний знос контактів відбувається внаслідок тертя при ковзанні і ударах контактних поверхонь при замиканні контактів. Механічний знос залежить від міцності контактних матеріалів, форми контактних поверхонь, сили удару й тиску в контактах. Однак практично механічний знос навіть у часто працюючих апаратів складає 1 – 3 % електричного зносу.

У процесі роботи контактні з'єднання, що розмикаються, підлягають корозії більше, ніж ті, які не розмикаються. Це викликається великою можливістю для проникнення корозійних агентів до контактних точок при розімкнутих контактах. Крім того, окислення розімкнутих контактів може бути досить інтенсивним внаслідок впливу підвищеної температури, викликаній збільшенням перехідного опору в момент розмикання.

Слід також мати на увазі, що у контактних з'єднань розмикання та замикання



супроводжуються проковзуванням однієї поверхні по іншій, що призводить до їх зносу за рахунок зрізу, задирання і молекулярного зчеплення і руйнування значної частини окисного шару. Свіжозачищений метал має велику схильність до окислення.

Електричні розряди, що виникають при розмиканні та замиканні контактів, призводять до їх руйнування внаслідок так званого електричного зносу. Електричний знос, або ерозія, пов'язаний з явищем фізичного характеру (плавлення, розшарування, розпилення металу), що відбувається на робочих поверхнях контактів і звичайно супроводжується перенесенням металу з одного контакту на інший. Найбільш яскраво він виражений при постійному струмі.

При замиканні контактів може мати місце вібрація контактів, відхилення рухомих контактів від нерухомих, що пов'язане з механічними й електродинамічними силами в контактних з'єднаннях.

Механічна вібрація відбувається при замиканні контактів, коли останні, замкнувшись, відскакують, розходяться, потім знову сходяться і т. д. Пояснюється це явищем удару і пружністю контактів. Контактні матеріали мають достатню пружність, тому навіть теоретично уникнути вібрації контактів при їх замиканні неможливо.

Явище відскакування контактів може бути викликане й електродинамічними силами, які діють у самому місці утворення контактів. Це буде зрозумілим, якщо подивитись на картину розподілу струму через контактну поверхню (рис. 8.2). Лінії струму в місцях звуження мають напрямок, майже паралельний, але протилежний у правій і лівій частині, у результаті чого контакти будуть відштовхуватись один від одного. Якщо, наприклад, електродинамічні сили будуть більші, ніж сила натяжки контактної пружини, то контакти будуть відкинуті один від одного і будуть мати місце автоколивання контактів, характер яких аналогічний механічній вібрації.

Вібрація контактів є дуже небажаною, оскільки внаслідок частих розривів мережі виникає обгоряння контактів. Крім того, при вібруючих контактах немає чіткості роботи деяких контакторів, пускачів та інших апаратів. За певних умов вібрації контактів приводять до їх зварювання. Щоб уникнути вібрації контактів, застосовують різні заспокоювачі, пов'язані з рухомих контактом (наприклад повітряні, масляні та інші контакти).

В апаратах, що розраховані на великі струми, зокрема в автоматичних вимикачах, прагнуть так виконати контактну схему, щоб компенсувати чи послабити дію електродинамічних сил. Наприклад, у містковій системі (рис. 8.11, *a*) електродинамічна сила  $Q_2$  контуру  $abcd$ , що діє на контактний місток, спрямована назустріч електродинамічним силам  $Q_1$  в перехідних контактах.

У контактній системі, яка показана на рис. 8.11, *б*, електродинамічна сила відсутня, а в системі, що зображена на рис. 8.11, *в* сила  $Q_2$  додається до сили  $Q_1$ . З точки зору електродинамічної стійкості ця система є найменш стійкою. Тому найбільш вигідною щодо стійкості є конструкція, що показана на рис. 8.11, *а*.

Найбільш важким моментом роботи контактів є процес розмикання кола зі струмом. При розмиканні контактів зменшується або площа дотику, або зусилля на контактах. Це призводить до різкого зростання перехідного опору контакту, викликаючи посилене її нагрівання. Остання контактна ділянка розігрівається до розплавлення й утворення містка з розплавленого металу. При подальшому

розходженні контактів місток руйнується, внаслідок чого розривається контакт. При багатократному повторенні цього процесу відбувається руйнування контактів.

Для кінцевих моментів часу, близьких до часу розмикання контактів, падіння напруги на контактах при певних параметрах кола може бути дуже великим і достатнім для виникнення газового розряду у формі іскри чи дуги.

Для контактів, що розраховані на середні чи великі струми, коли напруга і струм більше від границь дугоутворення, руйнування контактів при їх розмиканні є наслідком головним чином термічної дії дуги, тобто випаровування і розбризкування матеріалів контактів.

Знос контактів має місце і при ввімкненні кіл. Замикання контактів при відстані між ними порядку  $10^{-5}$  см викликає збільшення напруженості електричного поля до кількох мільйонів вольт на сантиметр. Під впливом електричного поля виникає автоелектронна емісія електронів з поверхні катода, що є причиною появи іскри. Через те, що в наступний момент часу контакти замикаються, іскра звичайно не встигає розвинути в інші форми газового розряду. Однак дуга може виникнути і при замиканні контактів у результаті їх вібрації.

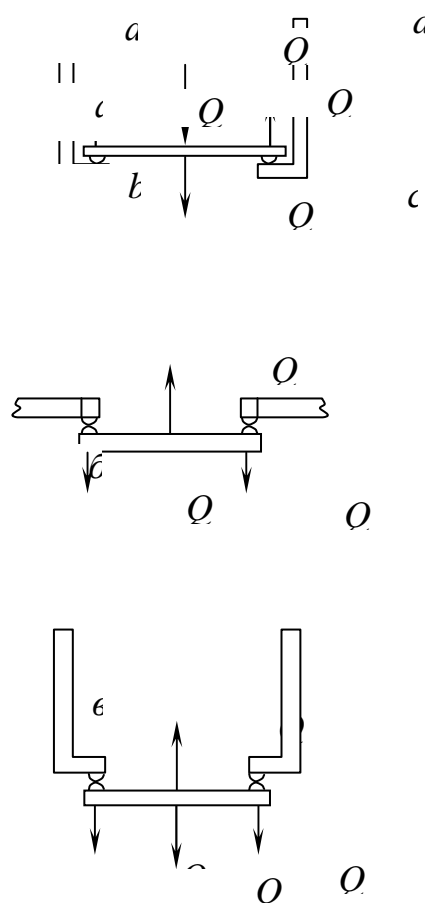


Рис. 8.11 - Електродинамічні сили в контактних з'єднаннях

Таким чином, знос контактів у більшій мірі пов'язаний з формою розрядів, що утворюються між ними, і в основному залежить від властивостей електричного кола, в якому працюють контакти.

## 8.7 Матеріали для контактних з'єднань

Від матеріалу контакту у великій мірі залежить строк його служби, надійність роботи. До цих матеріалів ставляться такі основні вимоги: вони повинні мати високу електропровідність і теплопровідність, бути стійкими проти корозії та мати струмопровідну окисну плівку, бути дугостійкими, механічно міцними і легко піддаватись механічній обробці, мати невисоку вартість.

Переліченим вимогам в тому чи іншому ступені задовольняє велика кількість різних матеріалів, що знайшли застосування для контактних з'єднань.

Мідь задовольняє майже всім вимогам, за виключенням корозієтривкості.

Окисли міді мають низьку провідність. Застосовується мідь як для розмикаючих, так і для нерозмикаючих контактних з'єднань. У нерозмикаючих з'єднаннях застосовують антикорозійні покриття (сріблення, лудіння та інші).

У розмикаючих контактах мідь застосовується при натисненнях вище 300 Н для всіх режимів роботи, крім довготривалого. Мідь може застосовуватись і для дугогасильних контактів при вимкненні струмів до 30 000 А і вище. При цьому дуга спалює окисли, що утворились.

Срібло – дуже хороший контактний матеріал, що задовольняє усім вимогам, за виключенням дугостійкості при значних струмах. Окисли срібла мають майже таку ж провідність, як і чисте срібло. Срібло застосовується для головних контактів в апаратах, розрахованих на великі струми, для всіх контактів довготривалого режиму роботи, для слабкострумових контактів при малих натисненнях. Срібло звичайно застосовують у вигляді накладок – уся деталь виготовляється з міді або іншого матеріалу, а в місці контакту приварюється накладка зі срібла.

Алюміній порівняно з міддю має значно меншу провідність і механічну міцність, утворює погано провідну тверду окисну плівку, що суттєво обмежує його застосування. Зараз алюміній рекомендується до широкого застосування і повинен замінити мідь майже в усіх нерухомих контактних з'єднаннях (шинопроводи, монтажні проводи). Для цього контактні ділянки вкриваються сріблом або міддю. Для розривних контактів алюміній непридатний.

Платина, золото, молібден застосовуються для контактів, що розраховані на малі струми при малих натисненнях. Платина й золото не мають окисних плівок. Контактне з'єднання з цих металів має малий перехідний опір. Для підвищення стійкості проти спрацьовування застосовують сплави з платини з іридієм.

Вольфрам і сплави з вольфраму при великій твердості й високій температурі плавлення мають високу електричну стійкість проти спрацьовування. Вольфрам і сплави вольфрам – молібден, вольфрам – платина та інші застосовуються при малих струмах для контактів з великою частотою вимкнення. При струмах до 100 кА і більше такі контакти використовуються як дугогасильні.

Металокераміка – це механічна суміш двох практично несплавлюваних металів, що отримується методом спікання суміші з порошків або просоченням порошку одного металу іншим розплавленим металом. При цьому один з металів має хорошу електропровідність, а інший має велику механічну міцність, є тугоплавким і дугостійким. Найбільш розповсюдженими сумішами є срібло – вольфрам, срібло – молібден, мідь – вольфрам, мідь – молібден та інші суміші, їх стійкість визначається

тим, що при розплавленні менш тугоплавкого компонента електричною дугою він утримується в порах більш тугоплавкого матеріалу, що перешкоджає зварюванню контактів.

Тугоплавкий компонент металокерамічного контакту може бути утворений не тільки металами, але й карбідами, нітридами й окислами металів. Прикладами таких сумішей є срібло – карбід вольфраму, срібло – окис кадмію.

Металокераміка з срібла й окису кадмію знайшла широке застосування в електричних апаратах низької напруги завдяки тому, що окис кадмію при температурах електричної дуги вибухоподібно розкладається на кисень і пари кадмію. Це сприяє видуванню дуги та деіонізації дугового проміжку.

## ЛЕКЦІЯ 9

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА. ВИМОГИ ДО ЗАПОБІЖНИКІВ. ПОГРАНИЧНИЙ СТРУМ. СТРУМОЧАСОВА ХАРАКТЕРИСТИКА

#### 9.1. Запобіжники

Запобіжник – це комутаційний електричний апарат, призначений для вимкнення електричного кола, яке захищається, руйнуванням спеціально передбачених для цього струмоведучих частин під дією струму, що перевищує певні значення.

В більшості запобіжників вимкнення кола виконується розплавленням плавкої вставки, яка нагрівається струмом, що проходить по ній. Після вимкнення кола необхідно замінити вставку, що перегоріла, на нову. Ця операція виконується вручну або автоматично заміною всього запобіжника.

Запобіжник вмикається послідовно в коло, яке захищається (рис. 9.1). Для створення видимого розриву в електричному колі використовується неавтоматичний вимикач (рубильник).

Основними елементами запобіжника є корпус, плавка вставка (плавкий елемент), контактна частина, дугогасильний пристрій та дугогасильне середовище.

*Запобіжники напругою до 1кВ* виготовляються на номінальні струми до 1000 А. Запобіжники виготовляються на напругу змінного струму 220, 380, 600 В і постійного струму 24, 110, 220, 440 В.

Запобіжники характеризуються номінальним струмом плавкої вставки, тобто струмом, на який розрахована плавка вставка для тривалої роботи. В один і той же корпус запобіжника можуть бути вставлені плавкі елементи на різні номінальні струми, тому сам запобіжник характеризується номінальним струмом запобіжника (основи), який дорівнює найбільшому з номінальних струмів плавких вставок, призначених для даної конструкції запобіжника.

В нормальному режимі тепло, яке виділяється струмом навантаження в плавкій вставці, передається в навколишнє середовище, і температура всіх частин запобіжника не перевищує допустиму. При перевантаженнях або КЗ температура вставки збільшується, і вона розплавляється. Чим більший струм, що протікає, тим менший час плавлення. Ця залежність називається захисною (часо-струмовою) характеристикою запобіжника (рис. 9.1, б).

Запобіжники не повинні вимикати електричне коло при проходженні умов-

ного струму неплавлення і мають вимикати коло при проходженні умовного струму плавлення протягом певного часу, який залежить від номінального струму (ДЕСТ 17242–79Е). Наприклад, при номінальних струмах 10–25 А плавка вставка не повинна розплавлятися протягом 1 години при струмах 130% від номінального і повинна розплавлятися протягом того ж часу при струмах 175% від номінального.

Для того, щоб зменшити час спрацювання запобіжника, використовуються плавкі вставки з різного матеріалу, спеціальної форми, а також використовується металургійний ефект.

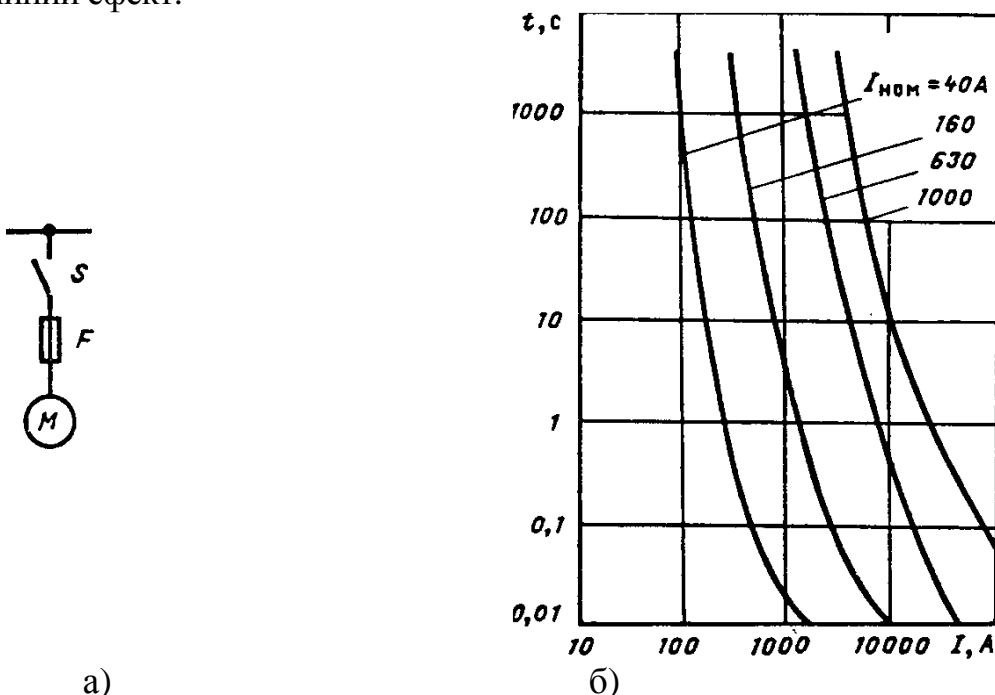


Рис. 9.1 - Схема увімкнення (а) та захисна характеристика (б) запобіжника при різних номінальних струмах плавкої вставки.

Найбільш широко розповсюдженими матеріалами плавких вставок є мідь, цинк, алюміній, свинець та срібло.

Цинк і свинець мають низьку температуру плавлення (419–327°C), що забезпечує невелике нагрівання запобіжників в тривалому режимі. Такі плавкі вставки зазвичай застосовуються в запобіжниках без наповнювачів. Запобіжники зі вставками з цинку і свинцю мають великі витримки часу при перевантаженнях.

Мідні вставки зазнають окислення; їх переріз з часом зменшується, і захисна характеристика запобіжника змінюється. Для зменшення окислення звичайно використовують луджені мідні вставки. Температура плавлення міді 1080°C.

Срібні вставки не окислюються, і їх характеристики найбільш стабільні.

Алюмінієві вставки використовуються в запобіжниках у зв'язку з дефіцитом кольорових металів.

При великих номінальних струмах плавка вставка виконується з паралельних дротів або тонких мідних смуг.

Для прискорення плавлення вставок з міді і срібла використовується металургійний ефект – явище розчинення тугоплавких металів в розплавлених, менш тугоплавких. Якщо, наприклад, на мідний дріт діаметром 0,25 мм напаяти кульку олов'яно-свинцевого сплаву з температурою плавлення 182°C, то при температурі

дроту  $650^{\circ}\text{C}$  вона розплавиться протягом 4 хв., а при  $350^{\circ}\text{C}$  – протягом 40 хв. Той же дріт без розчинника плавиться при температурі не меншій  $1000^{\circ}\text{C}$ . Зазвичай для створення металургійного ефекту на мідних і срібних вставках застосовують чисте олово, яке має більш стабільні властивості. В нормальному режимі роботи кулька практично не впливає на температуру вставки.

Прискорення плавлення вставки досягається також застосуванням плавкої вставки спеціальної форми (рис. 9.2, б). При струмах КЗ вузькі ділянки нагріваються настільки швидко, що відведення тепла практично не відбувається. Вставка перегоряє одночасно в декількох звужених місцях (перетин В–В, рис 9.2, б), перш ніж струм КЗ досягне свого усталеного значення в колі постійного струму або ударного струму в колі змінного струму (рис. 9.3). Таке явище називається струмообмежувальною дією запобіжника. Електродинамічні сили в колі, захищеному таким запобіжником, настільки зменшуються, що в деяких випадках струмоведучі частини і апарати не потребують перевірки за електродинамічною стійкістю.

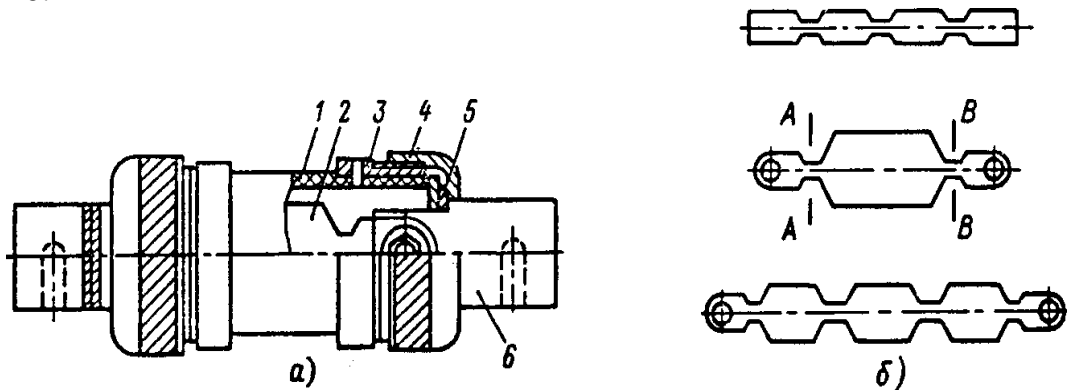


Рис. 9.2 - Запобіжник типу ПР-2: а – патрон на номінальні струми 100–1000 А; б – форми плавких вставок

Гасіння електричної дуги, яка виникає після перегорання плавкої вставки, має здійснюватись якнайшвидше. Час гасіння дуги залежить від конструкції запобіжника.

Найбільший струм, який плавкий запобіжник може відключити без будь-яких пошкоджень або деформацій, називається граничним струмом вимкнення.

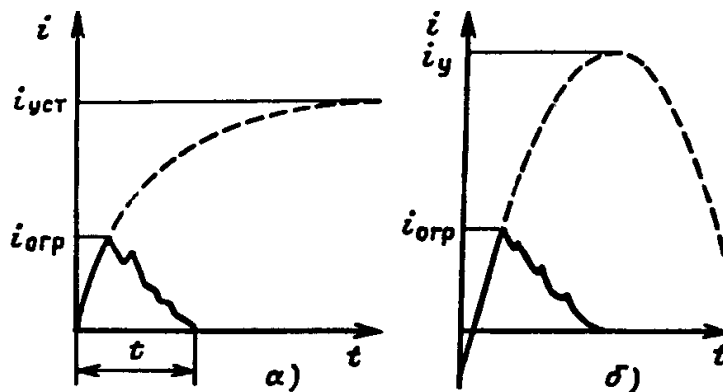


Рис.9.3 - Струмообмежувальний ефект плавких запобіжників: а – при постійному струмі; б – при змінному струмі

Запобіжники отримали широке застосування в промислових електроустановках, на електростанціях, підстанціях, в побуті та мають різну конструкцію. Розглянемо конструкцію запобіжників, які отримали найбільш широке застосування в електричних установках.

Запобіжники з закритими розбірними патронами без наповнювача типу ПР-2 (рис. 9.2, а) виготовляються на напруги 220 В і 500 В, номінальні струми 100–1000 А; граничні струми, що вимикаються, при напрузі 380 В і  $\cos\varphi \geq 0,4$  становлять 6–20 кА.

Патрон запобіжника ПР-2 (рис. 9.2, а) на струми 100 А і вище складається з товстостінної фібрової трубки 1, на яку щільно насаджені латунні втулки 3, що запобігають розриву трубки. На втулки нагвинчуються ковпачки 4, які закріплюють плавку вставку 2.

Патрон вставляється в нерухомі контактні стойки, закріплені на ізоляційній плиті. Необхідне контактне натискання забезпечується кільцевою або пластинчатою пружиною.

Плавкі вставки виготовляються з цинку у вигляді пластини з вирізами. На звужених ділянках виділяється більше тепла, ніж на широких. При номінальному струмі надлишкове тепло завдяки теплопровідності цинку передається широким частинам, тому вся вставка має приблизно однакову температуру. При перевантаженнях нагрівання вузьких ділянок відбувається скоріше, і вставка плавиться в найбільш нагрітому місті (переріз А–А, рис. 9.2, б).

При КЗ вставка плавиться у вузьких перерізах А–А та В–В. Дуга, що виникла, викликає утворення газів (50%  $\text{CO}_2$ , 40%  $\text{H}_2$ , 10% парів  $\text{H}_2\text{O}$ ). Тиск в залежності від струму, що вимикається, може досягати 10 МПа та більше, що забезпечує швидке гасіння дуги та струмообмежувальну дію запобіжника. Для зменшення перенапруги, що виникає при вимкненні струмів коротких замикань, плавка вставка має декілька звужених місць. При їх почерговому плавленні повна довжина дугового проміжку вводиться в коло не одразу, а ступенями.

Запобіжники насипні типу ПН-2 (рис. 9.4) широко застосовуються для захисту силових кіл до 500 В змінного та 440 В постійного струму і виконуються на номінальні струми 100-600 А.

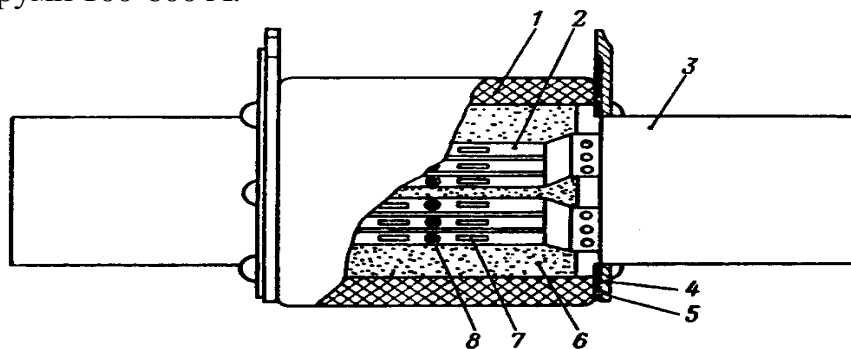


Рис. 9.4 - Запобіжник типу ПН-2

Фарфорова, квадратна зовні та кругла зсередини, трубка 1 має чотири різьбових отвори для гвинтів, за допомогою яких встановлюються кришка 4 з ущільнювальною прокладкою 5. Плавка вставка 2 приварена електроконтактним точковим зварюванням до шайб врубних контактних ножів 3. Кришки з азбестовими проклад-

ками герметично закривають трубку. Трубка заповнена сухим кварцовим піском 6. Плавка вставка виконана з одної або декількох мідних смуг товщиною 0,15–0,35 мм і шириною до 4 мм. На вставці виконані прорізи 7, які зменшують переріз вставки в 2 рази. Для зниження температури плавлення вставки використовується металургійний ефект – на смужки міді напаяні кульки олова 8. Температура плавлення в цьому випадку не перевищує 475°C.

Для зменшення перенапруг, що виникають, плавка вставка має по довжині прорізи, при чому їх кількість залежить від номінальної напруги запобіжника (з розрахунку на 100-150 В на ділянку між прорізами). Оскільки вставка згоряє у вузьких місцях, то довга дуга ділиться на ряд коротких дуг, сумарна напруга на яких не перевищує суми катодних і анодних падінь напруги. Наповнювачем в запобіжниках ПН є чистий кварцовий пісок (99% SiO<sub>2</sub>). Замість кварцу може бути використана крейда (CaCO<sub>3</sub>), іноді пісок змішують з азбестовим волокном. При гасінні дуги крейда розкладається з виділенням вуглекислого газу CO<sub>2</sub> та CaO – тугоплавкого матеріалу. Реакція відбувається з поглинанням енергії, що сприяє гасінню дуги. Іноді використовують для наповнення гіпс (CaSO<sub>4</sub>) та борну кислоту.

Запобіжники серії ПП-31 з алюмінієвими вставками на номінальні струми 63–1000 А (граничний струм вимкнення до 100 кА при напрузі 660 В) розроблені замість запобіжників серії ПН-2.

Запобіжники серії ПП-17 виготовляються на струми 500–1000 А, напругу змінного струму 380 В та постійного струму 220 В. Їх гранична вимикальна здатність 100–120 кА. Запобіжник складається з плавкого елемента, що знаходиться в керамічному корпусі, заповненому кварцовим піском, показчика спрацьовування і вільного контакту. При розплавленні плавкого елемента запобіжника перегоряє плавкий елемент показчика спрацьовування, вивільняючи зведений при збиранні показчика бойок, який перемикає вільний контакт. Останній замикає коло сигналізації положення запобіжника.

Швидкодіючі запобіжники для захисту напівпровідникових приладів ПП-41, ПП-57, ПП-71, ПП-59 виконуються з плавкими вставками зі срібної фольги в закритих патронах з наповненням кварцовим піском.

Вони розраховані на встановлення в колах змінного струму напругою 380–1250 В і постійного струму 230–1050 В; номінальні струми 100–2000 А, граничні струми вимкнення до 200 кА. Ці запобіжники мають помітну струмообмежувальну дію. Залежність обмеженого струму I<sub>обм</sub> в мережі з напругою 660 В від розрахункового струму КЗ I<sub>к</sub> при різних номінальних струмах плавкої вставки I<sub>ном</sub> для швидкодіючого запобіжника ПП-57 показано на рис. 9.5. Чим менший номінальний струм вставки, тим менше парів металу в дузі, тим більший опір дуги і вищий ступінь обмеження струму в колі, що вимикається.

В розглянутих вище запобіжниках необхідна заміна плавкої вставки (плавкого елемента) після її перегорання, що ускладнює експлуатацію. Такого недоліку немає у рідиннометалевих запобіжниках, які розробляються в останні роки. В ізоляційній трубці 8 (рис. 9.6) канал 2 малого діаметру, заповнений рідким металом (галій, сплав Ga–In, Sn та ін.) з резервуарів 1 та 3, виконує роль плавкої вставки. При струмі КЗ стовпчик металу в каналі 2 вибухає і дуга в ньому гасне.



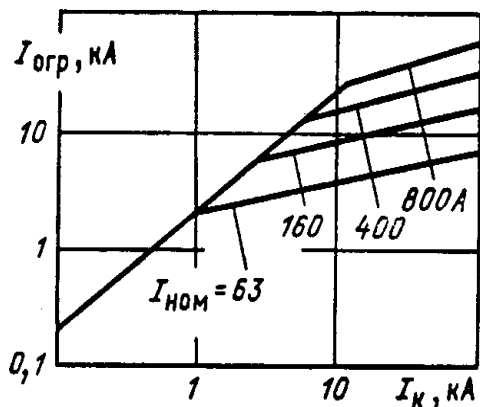


Рис. 9.5 - Характеристика обмеження струму КЗ запобіжником ПП-57

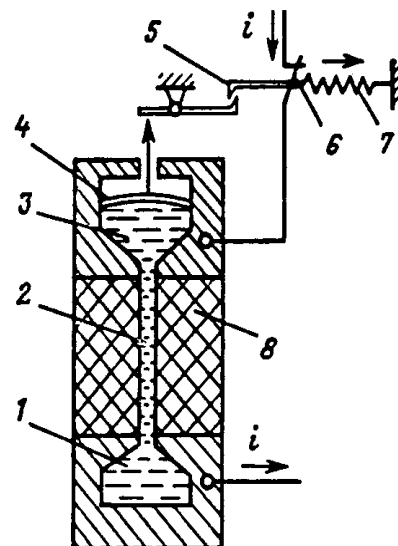


Рис. 9.6 - Конструктивна схема рідиннометалевого запобіжника

Тиск, що виникає в трубці, діє на мембрану 4, яка діє на зачіпку 5 і розчіплює її. Пружиною 7 розмикаються контакти 6, забезпечуючи розрив кола. Метал заповнює канал 2 і запобіжник знову готовий до роботи. Для увімкнення запобіжника в електричне коло необхідно вручну або приводом дистанційно увімкнути контакт 6.

## 9.2 Вибір запобіжників

Вибір запобіжників виконується:

- за напругою  $U_{уст} \leq U_{ном}$ ;
- за струмом запобіжника (основи)  $I_{ном} \leq I_{ном}; I_{max} \leq I_{ном}$ ;
- за номінальним струмом плавкої вставки.

Номінальний струм плавкої вставки вибирається так, щоб у нормальному режимі і при допустимих перевантаженнях вимкнення запобіжника не відбувалося, а при довготривалих перевантаженнях і КЗ коло вимикалося б якомога швидше. При цьому виконуються умови селективності захисту. Номінальний струм запобіжника узгоджується з вибраним номінальним струмом плавкої вставки.

Запобіжники, обрані за нормальним режимом, перевіряються за граничним струмом вимкнення :

$$I_{г.в} \leq I_{відм}$$

## ЛЕКЦІЯ 10

### ПРИВОДИ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

Привод вимикача призначений для операції вмикання, для утримання у увімкненому положенні і для вимкнення вимикача.

Привод – це спеціальний пристрій, що створює необхідне зусилля для здійснення перерахованих операцій. У деяких вимикачах привод конструктивно пов'язаний в одне ціле з його контактною системою (повітряні вимикачі).

Основними частинами приводу є механізм увімкнення, механізм запирання (засувка, собачка), який утримує вимикач у увімкненому положенні, і розчіплювальний механізм, який звільняє засувку при вимиканні.

Найбільша робота в існуючих конструкціях вимикачів відбувається приводом при вмиканні, оскільки при цій операції переборюється власна маса рухомих контактів, опір пружин, що відключають, тертя і сили інерції в рушійних частинах. При вмиканні на існуюче КЗ механізм привода, крім того, має перебороти електродинамічні зусилля, які відштовхують контакти один від одного.

Операція вмикання, щоб уникнути приварювання контактів вимикача, має проводитись швидко. Чим менший час вмикання, тим менша пауза при АПВ.

При вимиканні робота привода зводиться до звільнення засувки, що утримує механізм у включеному положенні. Саме відключення відбувається за рахунок сили стиснутих або розтягнутих пружин, що вимикають. У залежності від джерела енергії, що затрачається на вмикання і вимикання, є ручні, пружинні, вантажні, електромагнітні та пневматичні приводи.

Ручні приводи застосовуються для малопотужних вимикачів, коли мускульної сили оператора достатньо для здійснення роботи вмикання. Вимкнення може бути автоматичним за допомогою реле, вмонтованих у привод.

Приклад ручного приводу – привод ПРА-17 призначений для керування вимикачами навантаження ВВП-16, ВВП-17. Привод споряджений механізмом вільного розчіплювання і має електромагніт для дистанційного вимкнення вимикача. Якщо дистанційне вимкнення не передбачається, то застосовують привод без електромагніта вимкнення типу ПР-17.

### 10.1 Пружинні приводи

Пружинний привод є приводом непрямої дії. Енергія, необхідна для вмикання, запасється в потужній пружині, що заводиться від руки або електродвигуном невеликої потужності. Після кожного вмикання необхідно знову завести пружину.

Зазвичай привод доповнюється спеціальним електродвигуном, що здійснює заведення пружини. Такий привод дозволяє здійснювати АПВ.

Недоліком пружинних приводів є зменшення тягового зусилля наприкінці ходу вмикання внаслідок зменшення деформації пружин. Щоб усунути цей недолік, пружинні приводи доповнюються маховиком, який поглинає надлишкову енергію на початку вмикання і віддає накопичену енергію наприкінці вмикання. Приводи подібного типу ППМ-10 застосовуються для вимикачів ВМГ-10 і ВМП-10.

Основними частинами привода ППМ-10 (рис. 10.7) є спіральна пружина, вмонтована в коробці, і обід штурвала 10. Зведення пружини проводиться електродвигуном 4 потужністю 350 В·А через редуктор 5. Рух від редуктора передається шестірні зводу 8, яка вільно обертається на передньому підшипнику. Головна собачка впирається роликком 7 у зуб важеля 1 і заводить спіральну пружину 9. Запірно-пусковий механізм привода утримує пружини в заведеному стані. Для автоматичного вмикання необхідно звільнити важіль зводу, після чого енергія заведеної спіральної пружини повертає вал вимикача на вмикання. Дистанційне й автоматичне вимкнення вимикача проводиться за допомогою реле, вмонтованих у нижній частині привода, які через планку вимкнення впливають на механізм вільного розчіплювання. Привод допускає механічне АПУ. Імпульс для роботи такого АПУ дається при вимкненні завдяки звільненню механізму увімкнення привода. Якщо повторне

вмикання відбудеться на КЗ, то вимикач знову вимкнеться, але повторного АПУ не відбудеться, оскільки пружина, що вмикає, не встигне завестися. Механічне АПУ можна вивести з роботи при ручному або дистанційному вимиканні, для цього в приводі є спеціальний пристрій.

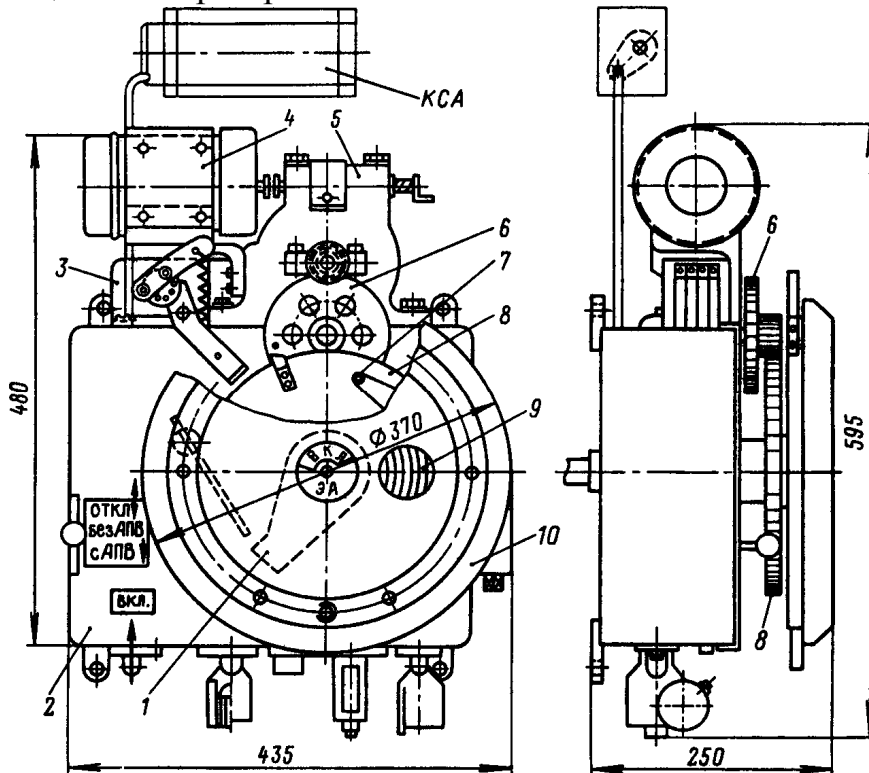


Рис. 10.7 - Пружинний привод з моторним редуктором ППМ-10:

1 – заводний важіль; 2 – корпус; 3 – кінцевий вимикач; 4 – електродвигун; 5 – редуктор; 6 – велика шестерня зубчастої передачі; 7 – ролик головної собачки; 8 – шестерня зводу, 9 – спіральна пружина; 10 – штурвал

Пружинні приводи можуть оснащуватися схемами електричного АПУ із необхідною витримкою часу.

Аналогічну будову має привод ПП-67, застосовуваний для вимикачів ВМГ-10. Малоливні вимикачі ВМПП і електромагнітні ВЭ-10 для КРП мають вмонтований пружинний привод.

Пружинні приводи не потребують для свого керування джерела постійного струму, що є істотною перевагою перед іншими приводами. Недоліком привода є його мала потужність, тому він застосовується в основному для малооливних вимикачів напругою 6–10 кВ.

## 10.2 Електромагнітні приводи

Електромагнітні приводи відносяться до приводів прямої дії: енергія, необхідна для вмикання, передається приводу в процесі самого вмикання від джерела великої потужності.

Зусилля, необхідне для вмикання вимикача, створюється сталевим осердям 2, що втягується в котушку електромагніта 3, при проходженні по ній струму (рис. 10.8).

Шток осердя *1* впирається в ролик *5* важільного механізму, піднімає його нагору разом із двома шарнірно-пов'язаними важелями. Останні через приводний важіль передають рух валу вимикача *7*. При підйманні ролика засувка *4* відсувається вліво, а наприкінці ходу осердя, коли вимикач увімкнувся, зріз засувки заскакує під ролик і утримує механізм у увімкненому положенні.

Наприкінці процесу вмикання сигнальні допоміжні контакти *6* розривають коло електромагніта вмикання і осердя падає вниз. На рис.8.2 привод показаний в увімкненому положенні вимикача.

При вимиканні струм подається в електромагніт вимкнення *11*, його бойок ударяє у важіль механізму вільного розчіплювання *9*, завдяки чому “ламаються” важелі механізму вільного розчіплювання і ролик *5* зіскакує з засувки. Вал вимикача під дією пружини, що вимикає, повертається проти годинникової стрілки – відбувається вимикання вимикача. У приводі передбачені допоміжні контакти керування *8*.

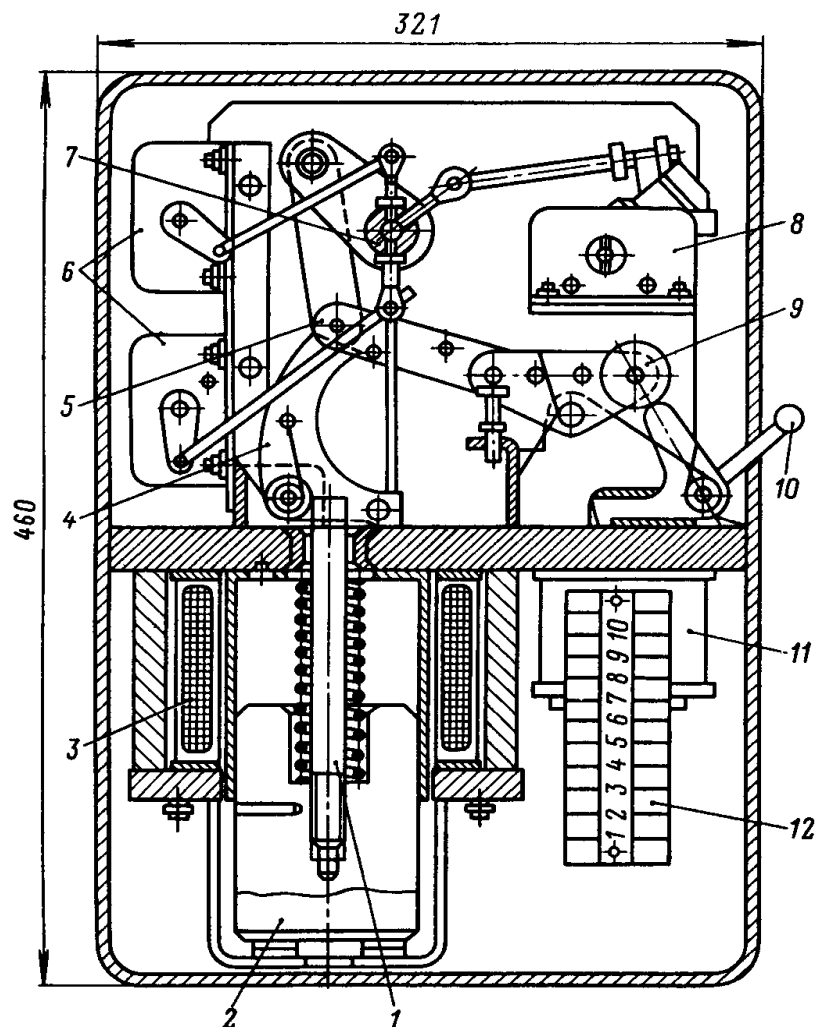


Рис. 10.8 - Привод електромагнітний ПЭ-11

Електромагніти увімкнення та вимкнення живляться від акумуляторної батареї через збірку затискачів *12*. У приводі є також важіль ручного вимикання *10*.

Струм, який споживається електромагнітом вмикання приводу ПЭ-11, досягає величини 58 А, електромагнітом вимкнення – 1,25 А при напрузі 220 В.

Привод типу ПЭ-11 застосовується для маломасляних вимикачів типів ВМП-

10 та ВМГ-10.

Для більш потужних вимикачів внутрішньої установки застосовуються електромагнітні приводи типів ПЭ-2, ПЭ-21, ПС-31, а для вимикачів зовнішньої установки - ШПЭ-44, ШПЭ-38, ШПЭ-46 і ін.

Перевагами електромагнітних приводів є простота конструкції і надійність роботи в умовах суворого клімату.

Недоліки – великий споживаний струм і внаслідок цього необхідність потужної акумуляторної батареї (для вмикання вимикача МГГ-10-3200 потрібний струм 155 А, а вимикача У-220-40 – 500 А при напрузі 220 В), а також значний час вмикання (до 1 с).

### 10.3 Пневматичні приводи

Пневматичний привод забезпечує швидке вмикання вимикача за рахунок енергії стиснутого повітря. Кінематична схема його подібна кінематичній схемі електромагнітного привода, але замість електромагніта застосовується пневматичний циліндр із поршнем (рис. 10.9).

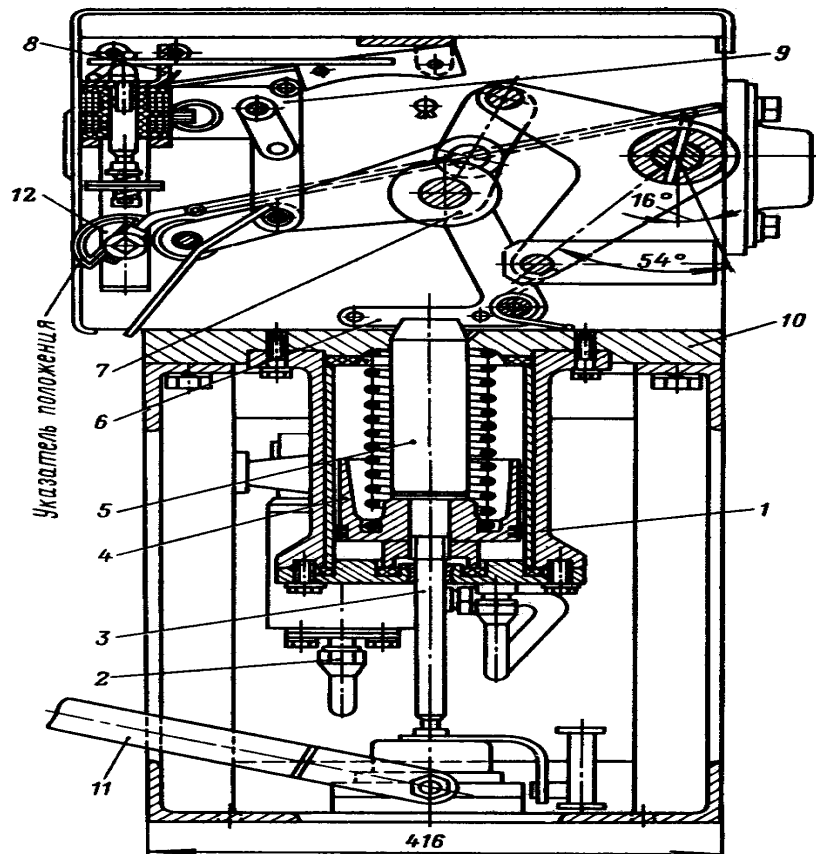


Рис. 10.9 - Привод пневматичний ПВ-30:

1 – пневматичний циліндр; 2 – фланець повітряпроводу; 3 – шток демпфера; 4 – поршень; 5 – шток; 6 – утримуюча засувка; 7 – піднімальний ролик; 8 – електромагніт відключення; 9 – система важелів вільного розчіплювання; 10 – корпус привода; 11 – домкрат для ручного вмикання; 12 – покажчик положення

При вмиканні вимикача відкривається клапан, що подає стиснуте повітря з резервуара в робочий циліндр 1. Поршень 4 із штоком 5 піднімається вгору і, діючи

на рухомий ролик та систему важелів, здійснює вмикання вимикача. Пружина над поршнем при цьому стискається, згладжуючи удар при вмиканні вимикача.

При вимиканні подається імпульс на електромагніт вимкнення, який діє на механізм вільного розчіплювання

Стиснуте повітря (2 МПа) подається від загальної компресорної установки, що обслуговує повітряні вимикачі, або на кожному приводі встановлюються балони зі стиснутим повітрям, що забезпечують п'ять-шість операцій без підкачування повітря. Для підкачування повітря використовуються невеличкі компресори з електродвигуном потужністю до 1 кВт.

Пневматичні приводи ПВ-30 застосовуються для вимикачів МГ-10, МГ-20. Бакові вимикачі серії "Урал" споряджаються пневматичними приводами типу ШПВ. Пневматичні приводи не потребують установки потужної акумуляторної батареї, тому що струм, який споживається електромагнітним клапаном вмикання, не перевищує декількох ампер. Переріз проводів від схеми дистанційного керування до приводу значно менший, ніж при електромагнітному приводі.

У повітряних вимикачах пневматичний привод є органічною частиною самого вимикача. На рис. 10.10 зображений у включеному положенні привод, застосований в повітряних вимикачах серії ВНВ.

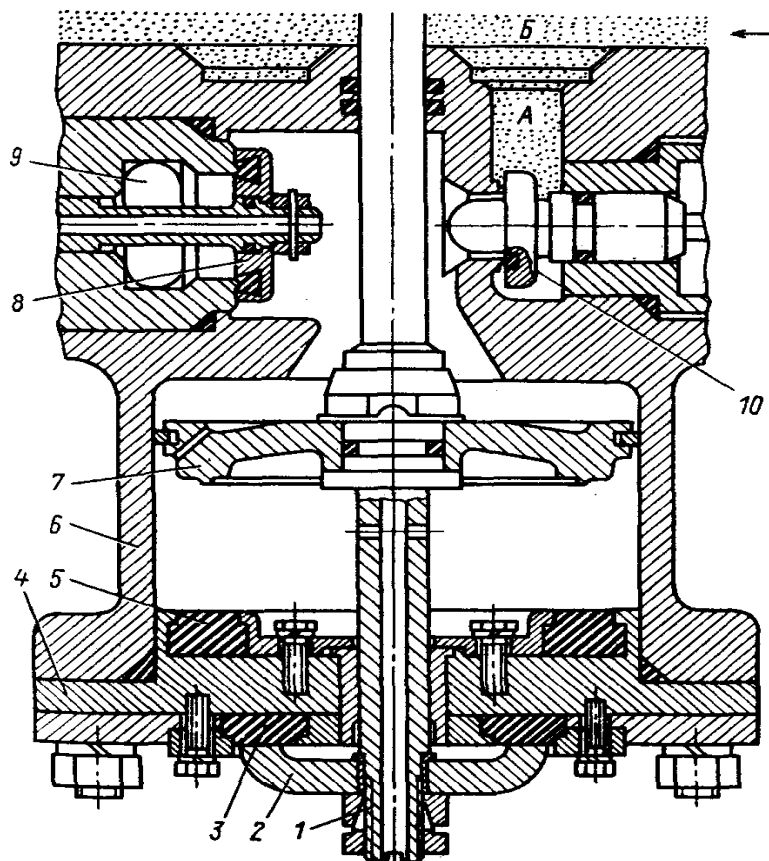


Рис. 10.10 - Пневматичний привод повітряних вимикачів серії ВНВ

При вимиканні електромагніт вимкнення переміщає клапан вимкнення 10 зліва направо. Стиснуте повітря з каналу А, сполученого з основним резервуаром В, надходить у простір над поршнем 7 і опускає його разом із штоком 1, верхній ізоляційний кінець якого з'єднаний із рухомими контактами вимикача. Наприкінці

процесу вимикання поршень сідає на ущільнювальне кільце 5 у крищі 4, а клапан 10 закривається.

Для вмикання вимикача подається імпульс на електромагніт вмикання, що пересуває тарілку клапанна 8 зліва направо і тим самим відчиняє вихід стиснутому повітрю, що знаходиться над поршнем 7, в атмосферу через отвір 9. Поршень піднімається в корпусі 6 під дією пружин вимкнення поки тарілка 2 не дійде до гумового буфера 3. Наприкінці операції вмикання тарілка 8 сідає на сідло і клапан увімкнення закривається. Пневматичні приводи знаходять також широке застосування в елегазових вимикачах.

Подальшим удосконаленням пневматичних приводів є пневмогідравлічні приводи типу ППГ, в яких рухомій системі вимикача рух передається від гідроциліндра з поршнем. Поршень рухається стиснутою рідиною, зазвичай оливою. Високий тиск рідини (12 МПа) створюється в акумуляторі енергії приводу за рахунок стиснутого газу. Енергії стисненої рідини вистачає на шість циклів вмикань. Такими приводами ППГ обладнуються бакові масляні вимикачі. Пневмогідравлічні приводи забезпечують час вмикання не більше 0,25 с.

#### 10.4 Гідравлічні приводи

В сучасних типах елегазових вимикачів останнім часом віддають перевагу гідравлічним приводам. Так наприклад, силові елегазові вимикачі з гідравлічним приводом виробництва фірми Сіменс мають такі переваги:

- здатні забезпечувати приводною енергією великої потужності;
- дозволяють проводити подвійну послідовність комутаційних операцій;
- дозволяють у будь-який час проводити надійний контроль запасів енергії;
- гарантують збереження комутаційного положення за відсутності допоміжної напруги;
- знижують вимоги до фундаменту;
- включаються з малим шумом;
- оливонепроникні і, таким чином, екологічно нешкідливі;
- не вимагають технічного обслуговування.

Всі гідравлічні приводні системи для силових високовольтних вимикачів виконані в компактній формі по методу блокового виконання і зібрані з взаємозамінних однакових частин (рис. 10.11, рис.10.12).

До основних конструктивних елементів відносяться:

- циліндр привода;
- клапанная коробка;
- оливний бак;
- розчіплював;
- блок управління з пристроєм контролю тиску оливи;
- гідравлічний акумулятор.

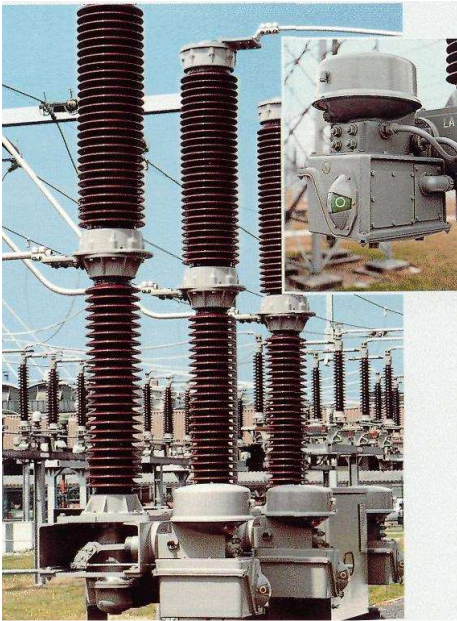


Рис. 10.11 – Елегазовий вимикач з гідравлічним приводом



Рис. 10.12 – Загальний вигляд гідравлічного приводу вимикача ЗАР

Головною складовою частиною гідравлічного приводу (рис.10.12) є металевий циліндр. У ньому рухається диференціальний поршень з поршневим стержнем, керованим за допомогою блоку клапанів. Привод керується блоком клапанів, головний клапан і клапани розчіплювача скомбіновані. Запатентована система з кульковою клямкою у вигляді подвійного гідравлічного запобіжника, що самозатримується, забезпечує надійне положення комутації і при тиску, значення якого нижче за робоче. Потрібна для приводної системи гідравлічна олива поступає в оливний бак без тиску. Для запобігання конденсації води оливний бак виготовлений з подвійними стінками. Вентиляційні отвори забезпечують необхідну циркуляцію повітря, фільтр запобігає попаданню пилу і інших забруднень.

За допомогою магнітних розчіплювачів, які регулюються механічно, можна електричним шляхом керувати гідравлічними клапанами з випередженням.

Блок керування має всі вузли, необхідні для керування і контролю гідравлічною приводною системою і для контролю газу силового вимикача. Тут також розташовані електричні виводи для з'єднання з системою керування підстанцією.

У пристрій керування силового вимикача вбудований двигун з оливнонасосом (рис. 10.13). Він призначений для перекачування оливи з оливного бака назад в акумулятор після завершення операцій увімкнення та вимкнення силового вимикача.

Робочий тиск гідравлічного приводу підтримується автоматично за допомогою насоса. Не дивлячись на малу потужність насоса - живлення двигуна може проводитися від надійної автономної мережі - акумулятор за короткий час знову заповнюється. Контроль за тиском оливи, потрібним для перемикачів, проводиться автоматично: як мінімум два реле тиску контролюють тиск оливи в гідравлічній системі. При падінні тиску спрацьовує попереджувальний сигнал. Силовий вимикач зберігає здібність до перемикачів. Якщо ж тиск падає нижче за мінімальне значення, то спрацьовує автоматичне блокування: будь-яке перемикачів блокується. Окрім



тиску контролюється і необхідна для перемикання енергія в акумуляторі. Такий контроль може проводити виключно гідравлічний привод.

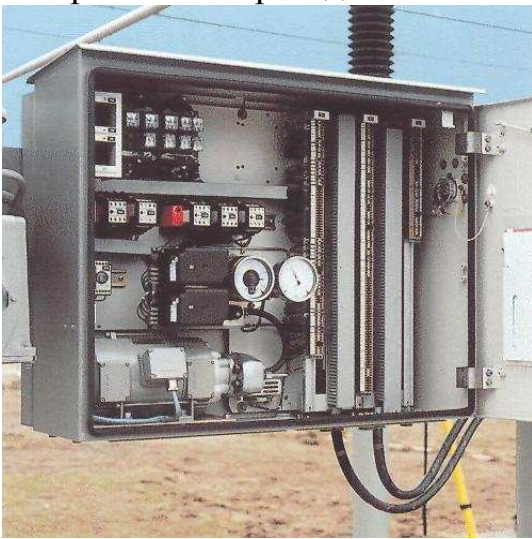


Рис. 10.13 – Загальний вигляд шафи керування гідравлічним приводом

Завдяки застосуванню спеціальних систем ущільнювачів гідравлічні приводи не вимагають технічного обслуговування протягом всього терміну служби.

## ЛЕКЦІЯ 11

### **РУБИЛЬНИКИ І ПЕРЕМИКАЧІ. ПАКЕТНІ ВИМИКАЧІ. КОМАНДОАПАРАТИ ( КОНТРОЛЕРИ, КНОПКИ УПРАВЛІННЯ, КЛЮЧІ УПРАВЛІННЯ, ПУТЬОВІ І КІНЦЕВІ ВИМИКАЧІ). КОНТАКТОРИ І МАГНІТНІ ПУСКАЧІ**

#### **11.1 Неавтоматичні комутаційні апарати**

Неавтоматичні вимикачі призначені для відокремлення від окремих знеструмлених частин від напруги або для включення та виключення електричного кола вручну в нормальних режимах роботи при струмах, що не перевищують 0,2-1 номінального струму вимикача. До них відносяться неавтоматичні вимикачі рублячого типу (рубильники) і пакетні вимикачі та перемикачі.

##### *Перемикачі та рубильники*

Перемикач – це контактний комутаційний апарат, який призначений для перемикання 5електричних кіл.

В розподільних пристроях до 1 кВ і в слабкострумівих колах автоматики широке застосування отримали пакетні перемикачі та вимикачі, що замінили стару конструкцію рубильників. На рис. 11.1 показаний пакетний кулачковий вимикач.

На основі вимикача закріплені два пакети I, II, всередині яких розміщено по три полюси контактних систем. При повороті рукоятки 9 обертається вал 2 і кулачок 3. Якщо шток 5 потрапляє у виїмку кулачка, то контакти 7, 8 замикаються під дією пружини 6. Якщо шток 5 потрапляє на виступ кулачка, то контакти розмикаються. Дуга, що виникає, гаситься в закритому об'ємі герметизованого корпусу 4 з ізоляційного матеріалу. Зовнішня мережа приєднується до виводів 1.

Пакетні вимикачі і перемикачі серій ПВ та ПМ випускаються одно-, дво- та триполюсними на номінальні струми 20–400 А постійного струму при напрузі 220 В

і 63–250А змінного струму при напрузі 380 В. Найбільша частота вимкнень за годину – 300.

Пакетні перемикачі мають малі розміри, зручні при монтажі; при перемиканні викид полум'я і газів виключений. Контактна система дозволяє керувати одночасно великою кількістю кіл. Такими перемикачами дозволяється відключати номінальні струми.

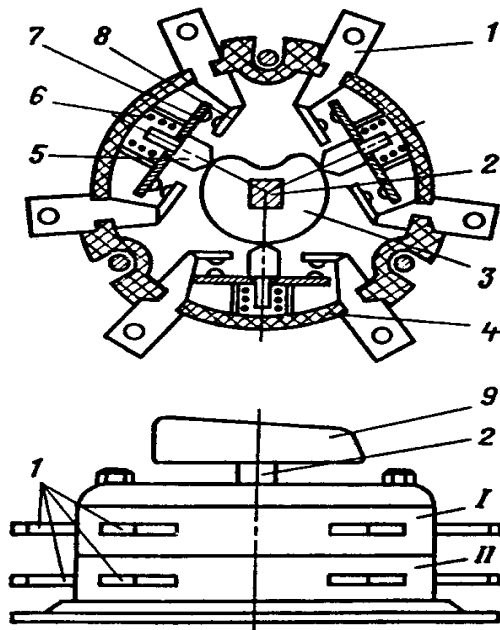


Рис. 11.1 - Пакетний кулачковий вимикач

Пакетні вимикачі не забезпечують видимого розриву кола, тому в деяких колах встановлюють рубильники.

*Рубильники і вимикачі призначені для ручного безпосереднього чи дистанційного замикання, розмикання або переключення електричних кіл.*

Вони розраховані на вимкнення незначних струмів і при наявності відповідних дугогасильних пристроїв допускають вимкнення струму до  $(1 \div 1,25) I_{\text{ном}}$ .

Рубильники і перемикачі виконуються на струми від 100 А і вище. Окремі серії, головним чином постійного струму, випускаються на струми до 10 кА. Виготовляються рубильники також і на малі струми (5–10 А). Рубильники і перемикачі виконуються одно-, дво- і триполюсними (рис. 11.2).

Основними елементами їх є: нерухомі врубні контакти 4, рухомі контакти 5, які закріплені шарнірно в інших нерухомих контактах 6, дугогасильний пристрій та привод. Монтуються рубильники на ізоляційних плитах 7. Конструктивно рубильник може виконуватись для приєднання проводів позаду або спереду.

Приведення в дію може здійснюватися за допомогою центральної рукоятки, бокової рукоятки 3 через вал 2 або центральної рукоятки 9 через систему важелів 10.

Найважливішою частиною рубильника є контакти. Майже виключне застосування в цих апаратах знаходять врубні контакти. В рубильниках на малі струми контактне натиснення забезпечується пружними властивостями матеріалу губок, а на струми від 100 А і вище – сталевими пружинами. Зі збільшенням натиску зменшується перехідний опір, але збільшується зношення контактів через тертя, і це обмежує натиск.

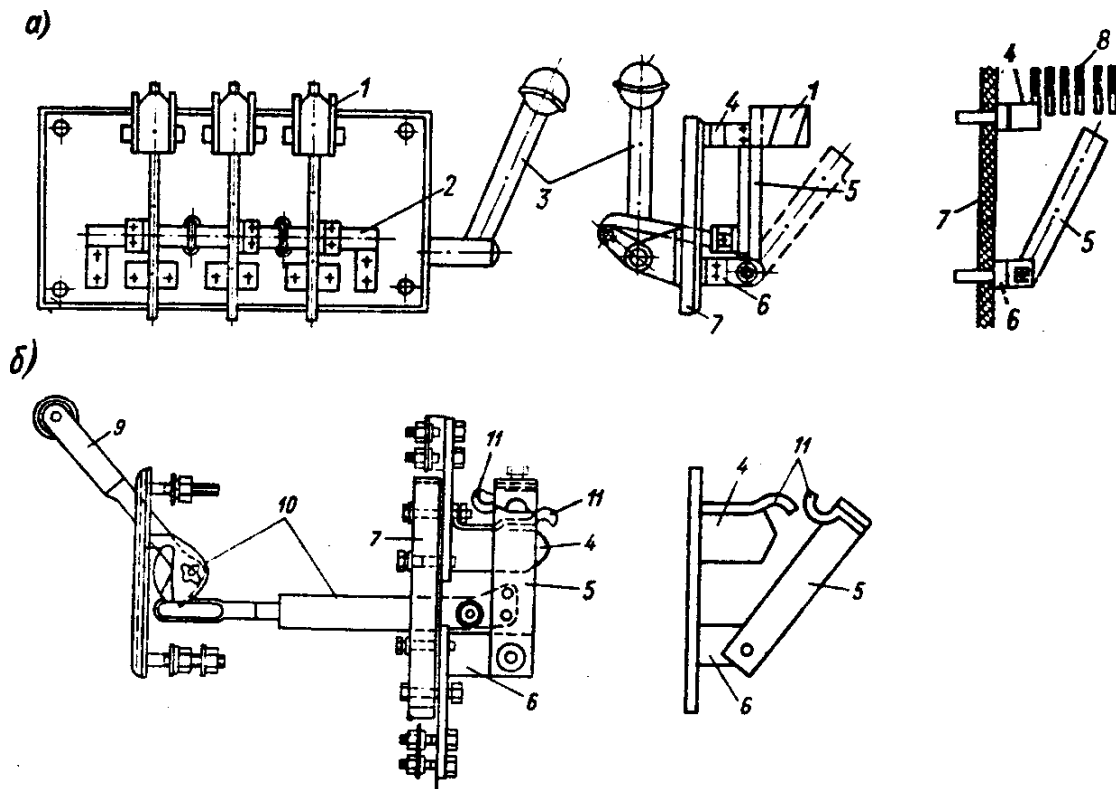


Рис. 11.2 - Будова рубильників: а – рубильник з боковою рукояткою і дугогасильними камерами; б – рубильник з центральним важільним приводом і дугогасильними контактами

Гасіння дуги постійного струму при малих струмах (до 75 А) відбувається за рахунок її механічного розтягнення ножами, що розходяться. При більших струмах гасіння виконується в основному пересуванням дуги під дією електродинамічних сил контура струму (деталі рубильника, дуга). Скорочення довжини ножа призводить до збільшення напруженості магнітного поля і електродинамічних сил, що значно підвищує вимикальну здатність рубильника. Граничним значенням раціонального скорочення довжини ножа є така довжина, при якій забезпечується надійне гасіння струму до 75А.

Гасіння електричної дуги при однофазному струмі напругою 220 В і при трифазному струмі напругою 380 і 500 В виконується в основному за рахунок біякатодних явищ, які мають місце при переході струму через нуль. Вже при відстані біля 2 мм між контактами дуга надійно гасне. Довжину ножа в рубильниках змінного струму через це треба обирати не з умов гасіння дуги, а з механічних умов.

При монтажі рубильників в розподільних ящиках або закритих розподільних пристроях малого об'єму досить актуальним стає питання обмеження розмірів дуги. Необхідно, щоб іонізовані гази, які лишилися після погасання дуги, не спричинили перекриття на корпус або між струмоведучими частинами. В таких випадках рубильники обладнуються різноманітними дугогасильними камерами.

Дослідження та досвід показали, що для створення малогабаритних рубильників та перемикачів, які мають надійну комутаційну здатність в межах своїх номінальних струмів, необхідне застосування дугогасильних камер. Достатньо ефективною можна вважати камеру з дугогасильною решіткою 8.

Дугогасильні контакти 11 можуть застосовуватись в рубильниках постійного

струму при струмах вище 100 А і в усіх рубильниках змінного струму, де швидкість розходження контактів та їх зазор помітно не впливають на умови гасіння дуги. Дугогасильні контакти, вимикаючись останніми, служать тут для захисту головних ножів від обгоряння.

На більші струми (вище 1000 А) рубильники виконуються з декількома паралельними ножами. Перевага такого способу блочного конструювання полягає в тому, що потребує відпрацювання тільки одного блока. Набором відповідної кількості блоків компонується рубильники на більші струми. При змінному струмі треба враховувати, що внаслідок ефекту близькості струм між окремими пластинами розподіляється нерівномірно. Номінальний струм рубильника росте при цьому не пропорційно кількості пластин, а повільніше. Наприклад, при трьох паралельних елементах, кожен на 1000 А, номінальний струм рубильника буде 2500 А.

Вітчизняна промисловість випускає декілька серій рубильників і перемикачів. Рубильники і перемикачі без гасіння охоплюють діапазон струмів від 100 А до 5000 А при напрузі до 500 В.

Рубильники і перемикачі з дугогасильними камерами випускаються на струми 100–630 А, окремі типи – до 1500 А, напругу 220 і 440 В постійного струму та 380–500 В змінного струму. При напрузі 220 В постійного струму і 380 В змінного струму рубильники і перемикачі допускають відключення струму до номінального. При 440 і 500 В струми, які вимикаються, складають половину номінального. Механічна зносостійкість – до 5000 циклів увімкнення-вимкнення для рубильників на номінальні струми до 630 А та до 2000 циклів – при більших номінальних струмах.

## 11.2 Вибір рубильників

*Вибір рубильників виконується:*

за напругою установки

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}};$$

за струмом навантаження

$$I_{\text{ном}} \leq I_{\text{ном}}; I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}};$$

за конструктивним виконанням;

за електродинамічною стійкістю

$$i_y \leq i_{\text{гр, с}};$$

за термічною стійкістю

$$B_k \leq I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}}.$$

Номінальний струм  $I_{\text{ном}}$ , граничний наскрізний струм  $i_{\text{гр, с}}$ , струм і час термічної стійкості  $I_{\text{тер}}$ ,  $t_{\text{тер}}$  наводяться в каталогах і довідниках.

## 11.3 Контактори та магнітні пускачі

Контактори постійного струму виготовляються, як правило, однополюсними, проте на струми 40 А, а в окремих серіях і на струми до 100 – 150 А виконуються й багатопольсними з нормально замикаючими та нормально розмикаючими головними контактами.

Головні контакти в більшості конструкцій – пальцевого типу. Обертання контакту виконується на призмі, рідше на осі (рис. 11.3), струмопровід виконується гнучким зв'язком, зробленим або з переплетених тонких мідних проволочок, або набраних з мідних шинок завтовшки 0,1 мм. Характерним для контакторів постійного струму є розташування контактів на плечі, більшому, ніж плече якоря

магнітної системи. Розхил контактів складає 8 – 20 мм. Хід магнітної системи, відповідний цьому розхилу, 3 – 8 мм.

На великі струми контакти в багатьох серіях виконуються двоступінчастими та складаються з головних дугогасильних контактів.

В останні роки в окремих серіях контакторів, зокрема для суден, знаходять застосування прямохідні електромагнітні системи й мостові контактні системи.

Найширше застосовується електромагнітна система клапанного типу з обертанням якоря на призмі, але зустрічаються конструкції з обертанням якоря на осі (рис. 11.4). Системи складаються з таких основних деталей: скоби 1, осердя 2, полюсного наконечника 3, якоря 4, втягуючої котушки 5. Обертання на призмі забезпечує самоустановку якоря та істотно вищу стійкість проти спрацювання порівняно з обертанням на осі.

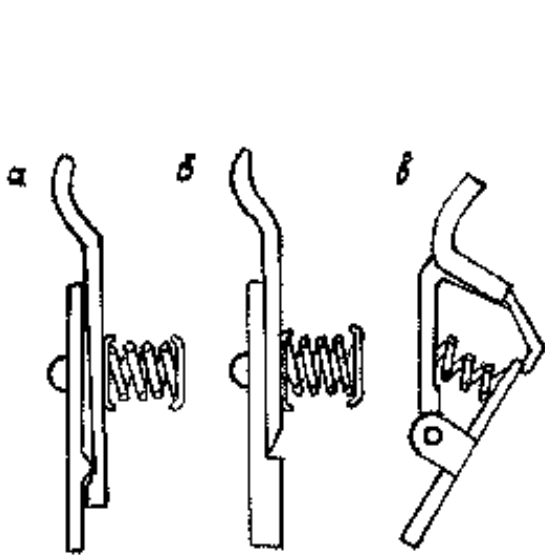


Рис. 11.3 - Приклад кріплення рухомого контакту

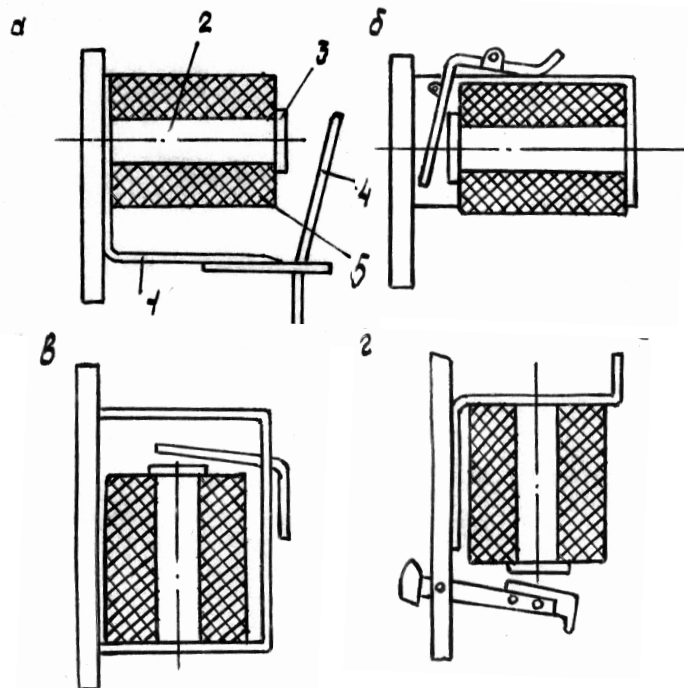


Рис. 11.4 - Приклад систем контакторів клапанного типу

Поряд з клапанними системами в умовах серійного виробництва знаходять застосування і єдині для постійного та змінного струму магнітні системи. Застосування таких систем передбачає наявність додаткового опору в колі котушки (рис. 11.5, а). При ввімкненні котушка працює у форсованому режимі, опір вводиться в кінці ходу магнітної системи, обмежуючи струм у котушці. Перевага системи – її малі розміри та швидкодія. Недоліки – додаткові елементи в колі котушки (опір і блок-контакт) і втрати потужності в додатковому опорі, які складають 200 – 400 % від потужності, яка споживається котушкою. Останній недолік може бути усунений застосуванням двосекційних котушок, які вмикаються за схемами (рис. 11.5, в), де в першій ампервитки ввімкнення створюються вмикальною секцією, а ампервитки затримання – обома секціями, а в другій ампервитки ввімкнення створюються обома секціями, ампервитки затримання – затримувальною секцією. При одних і тих же ампервитках затримання котушки за схемами (рис. 11.5, б, в) споживають у 3 – 5

разів меншу потужність, ніж ввімкнені за схемою рис. 11.5, *а*. Ця обставина досить суттєва для апаратів, що вмонтовані в закриті комплексні пристрої. При рівних розмірах котушки ступінь форсування у схемах (рис. 11.5, *б, в*) вище, ніж у схемі рис. 11.5, *а*. Отже, максимально допустима частота роботи для перших менша. При цьому виконання котушок, що ввімкнені за схемами (рис. 11.5, *б, в*) на частоту ввімкнень до 1 500 за годину, не становить особливих труднощів.

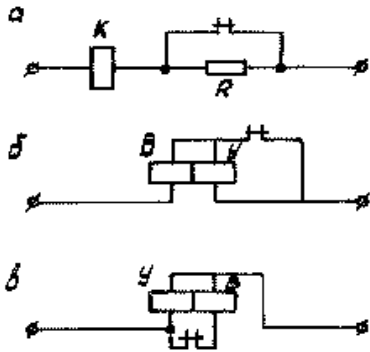


Рис. 11.5 - Схеми вмикання котушок у форсованому режимі

Конструктивне компонування контактора повинне забезпечувати: отримання врівноваженої рухомої системи без додаткових противаг, заміну котушки без розбирання апарата, добрий доступ до контактів для їх огляду та заміни без вимкнення монтажних проводів та високу стійкість проти спрацьовування опор якоря.

Конструкції контакторів постійного струму повинні розвиватися в напрямі підвищення:

1) механічної стійкості проти спрацьовування шляхом переходу на призматичні самовстановлювальні опори для рухомих частин і поліпшення співвідношень між механічною і тяговою характеристиками;

2) електричної стійкості проти спрацьовування шляхом зменшення або повного виключення проковзування і притирання пальцевих контактів при їх замиканні (при збереженні перекочування), зниження моменту інерції рухомих частин, засосування металокераміки й досягнення безвібраційного замикання контактів;

3) вимикальної здатності за рахунок удосконалення систем дугогасіння.

Контактори серії КП і КПМ (рис. 11.6) для нормальних умов роботи виготовляються на напругу 220 В і струми 40 і 80 А у загально-промисловому виконанні.

Реостатне виконання відзначається вкороченою магнітною системою та котушкою з форсуванням (див. рис. 11.5, *а*). Контактори на 40 А випускаються з різним виконанням контактів і з різною кількістю полюсів (на великі струми – однополюсні) з клапанною магнітною системою і обертанням якоря на призмі. Контакти виконуються пальцевими з обертанням на призмі. Гасіння дуги здійснюється в камерах з широкими щілинами. Конструкція виконується на ізоляційних панелях комплектного пристрою. Механічна стійкість проти спрацьовування контакторів становить до 2 – 5 млн. циклів, електрична стійкість проти спрацьовування мала. Пуск електродвигунів постійного струму може здійснюватися у функції струму, протиелектрорушійної сили та незалежної витримки часу. Апарати, які здійснюють закорочення ступенів пускового опору в функції вибраного параметра, носять назву контакторів прискорення.

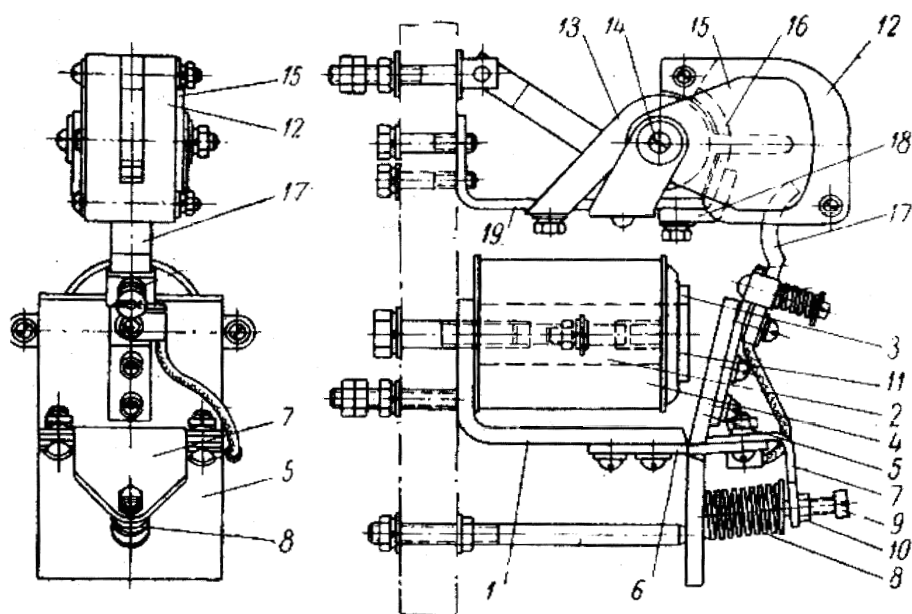


Рис. 11.6 - Контактор типу КП-2:

I – магнітна система, яка забезпечує витримку часу; II – магнітна система, яка замикає головні контакти; 1 – скоба магнітної системи I; 2 – стримувальна котушка; 3 – демпфер (мідні кільця); 4 – відривна пружина; 5 – штифт дистанційного упору; 6 – якір; 7 – немагнітна прокладка; 8 – скоба магнітної системи (стінка, спільна з системою I); 9 – вмикаюча котушка; 10 – вимикаюча пружина; 11 – власний блок-контакт; 12 – рухомий контакт; 13 – контактна пружина; 14 – гнучкий зв'язок; 15 – нерухомий контакт; 16 – дугогасильна камера; 17 – дугогасильна котушка; 18 – магнітопровід дугогасіння; 19 – основа

Зараз в основному застосовується пуск у функції незалежної витримки часу. Тому нижче розглянуті тільки контактори з прискоренням у функцію часу. Ці контактори виконуються двокотушковими (рис. 11.7) з двома магнітопроводами та однокотушкові (рис. 11.8) з одним магнітопроводом.

Зображений на рис. 11.8 контактор працює таким чином. Його котушки вмикаються за схемою (рис. 11.9). При знеструмлених котушках якір 6 перебуває в нейтральному положенні, відривна пружина 4 за допомогою штифта 5 не дає вимикаючій пружині 10 притиснути якір до утримуючої магнітної системи. У цьому положенні якоря власний блок-контакт 11 в колі котушки 9 замкнутий.

При підготовці до пуску схеми управління електродвигуном спочатку замикається коло до осердя системи I. Відривна пружина стискується. Блок-контакт 11 розмикається і перешкоджає збудженню вмикаючої котушки 9. При ввімкненні лінійного контактора  $L$  коло стримуючої котушки розривається. Якір, однак, відпадає не відразу, оскільки демпфер 3 затримує спадання потоку в системі I, чим створюється витримка часу. Коли потік у цій системі знизиться до величини, за якої створювана ним сила притягання стане менше за силу відривної пружини, остання поверне якір у нейтральне положення. Замкнеться коло вмикаючої котушки (блок-контакт  $L$  у цьому колі замикається при ввімкненні лінійного контактора, а блок-контакт 11 замикається при поверненні якоря в нейтральне положення). Втягуюча котушка збудиться і притягне якір, нормально відкриті головні контакти замкнуться і

зашунтують ступінь пускового опору.

Регулювання витримки часу здійснюється зміною товщини немагнітної прокладки 7 і натягуванням відривної пружини.

Будова і схема вмикання однокотушкового контактора показані на рис. 11.8, 11.9.

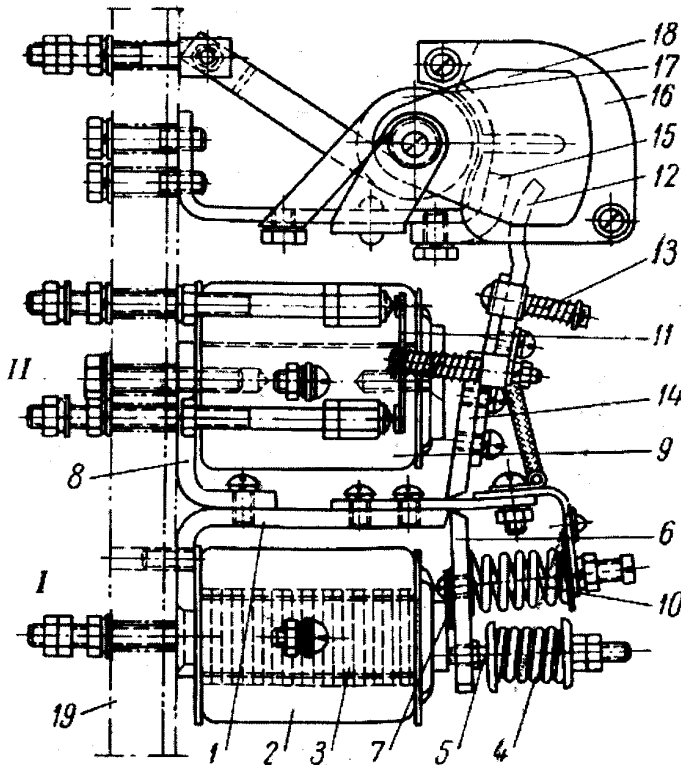


Рис. 11.7 - Контактор прискорення з витримкою часу (двокотушковий) типу ТЕ2 на 80 А

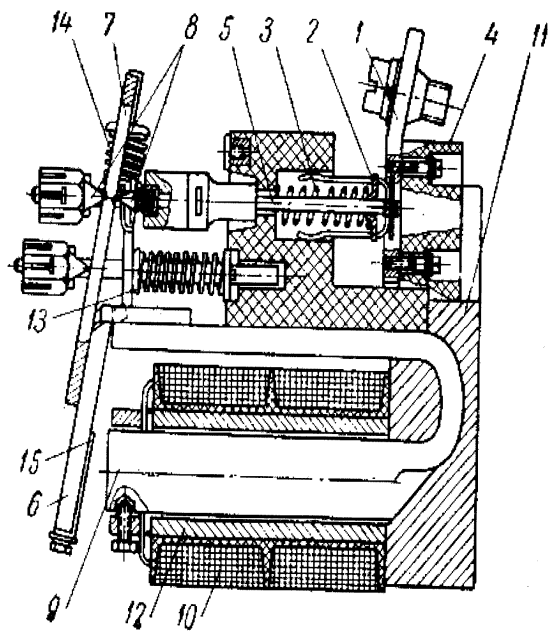


Рис 11.8 - Будова однокотушкового контактора прискорення

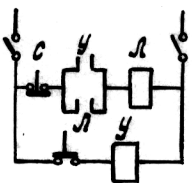


Рис. 11.9 - Схема вмикання однокотушкового контактора

Електромагнітна система клапанного типу складається з осердя 9, яке має U-подібну форму, якоря 6 і втягуючої котушки 10. Осердя залите в силумінову основу 11, яка служить одночасно демпфером для одержання витримки часу. Котушка намотана на пластмасовий каркас, в який може бути впресована мідна гільза 12, що служить додатковим демпфером. Рухома система фіксується у вимкненому положенні вимикаючою пружиною 13 (вона ж і регульовальна) і двома перекидними пружинами 14. Мостовий рухомий контакт 2 з обіймою і контактною пружиною 3 з'єднані з якорем 6 за допомогою скоби 7, тяги 5 і призматичних шайб 8. Струмopовід 1 закріплений на ізолювальній колонці 4.

#### 11.4 Контактори змінного струму та магнітні пускачі промислової частоти

Контактори змінного струму та магнітні пускачі промислової частоти виготовляються, як правило, триполюсними з нормально замикаючими головними



контактами.

Електромагнітні системи виконуються шихтованими, тобто набираються з ізольованих одна від одної пластин завтовшки 0,35; 0,5; 2 мм. Котушки низькоомні з малою кількістю витків. Основну частину опору котушки складає її індуктивний опір, який залежить від величини зазору. У зв'язку з цим струм у котушці при розімкненій магнітній системі (пусковий струм) у 5 – 10 разів перевищує струм при замкнутій системі (робочий струм). Застосовуються магнітні системи як поворотного (Е-подібні, П-подібні, клапанні та ін.), так і прямохідного (Ш-подібні, Т-подібні, соленоїдні) типу, перші – в контакторах важкого режиму роботи, другі – в контакторах нормального режиму роботи.

Електромагнітна система незалежно від типу складається з осердя та якоря, короткозамкнутого витка, котушки і кріпильних деталей. Слабким місцем з точки зору стійкості проти спрацьовування є короткозамкнутий виток. Удари якоря об осердя викликають вібрацію консольно виступаючих ділянок витка і поломку його після певної кількості вмикань. Високу стійкість проти спрацьовування витка забезпечує таке кріплення, за якого немає незакріплених консольних ділянок.

Боротьба з розклепуванням полюсів і „розпушуванням” пластин магнітопроводу ведеться шляхом застосування товстих пластин (до 1 мм для середніх і до 2 – 3 мм для крайніх зв'язувальних). Однак це призводить до збільшення втрат і більш високого нагрівання системи. Тому застосування товстих пластин можливе за умови покращання магнітних характеристик матеріалів.

При жорсткому кріпленні магнітної системи кінетична енергія рухомих частин гаситься при ударі якоря об осердя, що приводить до розклинування та спрацьовування як якоря, так і осердя.

Удар передається контактам і приводить до їх вібрації („вторинна” вібрація). Для підвищення механічної стійкості магніту систему амортизують (рис. 11.10).

Амортизується або рухома частина, або нерухома, або і та й інша. При амортизованому кріпленні кінематична енергія частин, які рухаються, витрачається на переміщення осердя або якоря і гаситься амортизуючими пружинами. Механічна стійкість системи різко зростає, зникає „вторинна” вібрація контактів і підвищується їх електрична стійкість.

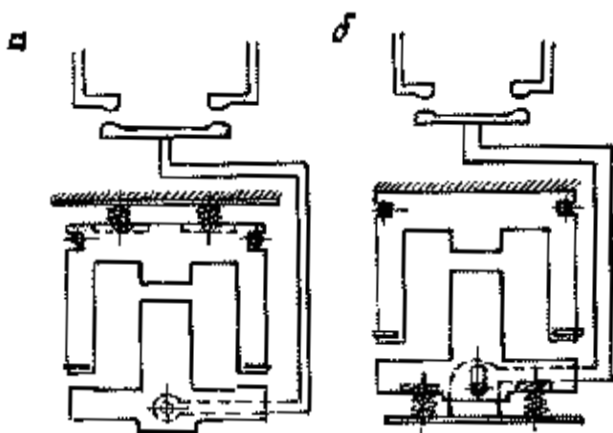


Рис. 11.10 - Схема амортизації магнітної системи

Кінематичні схеми сучасних контакторів змінного струму для нормальних режимів роботи характеризуються надзвичайною різноманітністю (рис. 11.11, б). Якір переміщується в направляючих, де парою, яка третяся, є метал – пластмаса.

Відсутність будь-яких шарнірних з'єднань і підшипників дозволяє одержати високу механічну стійкість. Однак за рахунок ударів у магнітній системі, які безпосередньо передаються контактами, тут має місце додаткова „вторинна” вібрація контактів, для усунення якої треба вжити спеціальних заходів. Не можна також одержати потрібне співвідношення між тяговою і механічною характеристиками.

Поряд з прямоходовою досить широке розповсюдження отримали схеми, в яких передача руху від електромагніта до контактів здійснюється через шарнірно-важільні з'єднання. Думка, яка існувала раніше, що шарнірні з'єднання (осі, втулки і т.п.) не забезпечують достатньої стійкості проти спрацьовування, практично спростована. Висока стійкість проти спрацьовування – до  $10^7$  і вище циклів – шарнірних з'єднань досягається правильним їх розрахунком і конструкцією, яка виключає удари та забезпечує правильний підбір пари, що треться, наприклад, застосування деталей, що труться, у вигляді пари метал – пластмаса тощо.

Передача руху від електромагніта до контактів через важільну систему дозволяє підібрати бажане співвідношення плечей і досягти найбільш сприятливого співвідношення між механічною і тяговою характеристиками.

Наприклад, схема (рис. 11.11, з), яка являє собою об'єднання поворотної магнітної системи з прямоходовою контактною системою, дозволяє одержати зниження швидкості контактів у момент їх замикання і відповідно підвищення тиску на контакти.

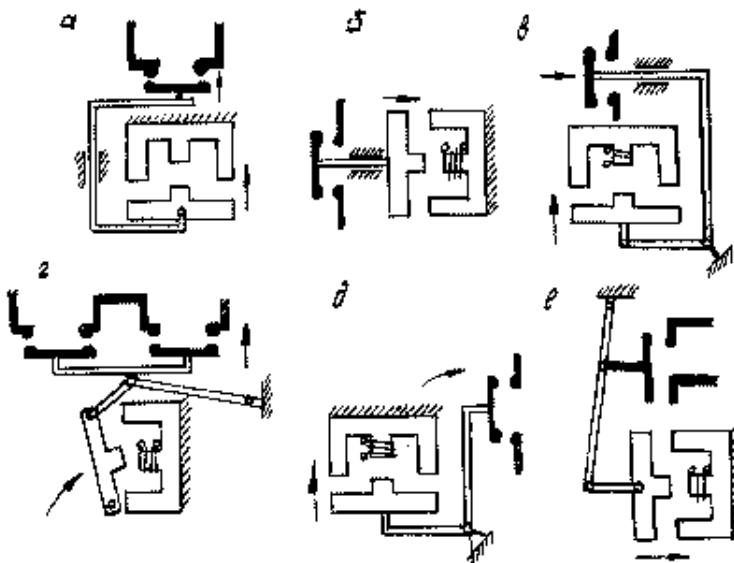


Рис. 11.11 - Кінематичні схеми сучасних контакторів змінного струму для нормальних режимів роботи

Така кінематика дозволила застосувати багатоступінчасту контактну систему при чотирикратному розриві на полюс без істотного збільшення розмірів магнітної системи. Прямоходові (рис. 11.11, е) або поворотні (рис. 11.11, д) контактні та магнітні системи, які рухаються у взаємоперпендикулярних площинах, приводять до зниження ступеня взаємної дії ударів у кожній із систем. Кінематична схема (рис. 11.11, е) дозволяє забезпечити за рівної по відношенню до схем (рис. 11.11, а і б) магнітної системи більш високий контактний тиск. Однак у схемі (рис. 11.11, е) слід очікувати більш сильних ударів, для усунення шкідливої дії яких доцільно вживати спеціальних заходів.

Характерною рисою контакторів, яка відрізняє їх від магнітних пускачів, є те, що останні забезпечуються захистом від струмів перевантаження. Крім того, магнітні

пускатчі, як правило, стоять у силових (вхідних) колах електроприймачів і призначені для нечастих вмикань і захисту електроприймачів від струмів перевантаження. Контактори використовуються в системах автоматичного керування електроприймачами й призначені для частих спрацьовувань.

## ЛЕКЦІЯ 12

### АВТОМАТИЧНІ ПОВІТРЯНІ ВИМИКАЧІ (АВТОМАТИ)

#### 12.1 Автоматичні повітряні вимикачі

Автоматичний повітряний вимикач (автомат) – це електричний апарат, призначений для автоматичного розімкнення електричних кіл. Повітряним він називається тому, що електрична дуга гаситься в середовищі навколишнього повітря на відміну від вимикача, в якому дуга гаситься в маслі або в іншому середовищі.

Автомати виготовляються на номінальні струми до 6 000 А, а окремі серії – на струми до (20 000 – 30 000) А і на номінальні напруги до 660 В змінного струму. Швидкодіючі автоматичні вимикачі виготовляються на номінальну напругу до 3 300 В постійного струму. Вимикаюча здатність сучасних автоматичних вимикачів досягає 200 – 300 кА.

За кількістю полюсів автомати виконуються одно-, дво- і триполюсними.

Як правило, автоматичні вимикачі виконують функції захисних автоматів при коротких замиканнях, перенавантаженнях, зниженні або зникненні напруги, зміні напрямку передачі потужності або струму тощо.

При цьому незалежно від функцій, які вони виконують, їх можна підрозділити за власним часом спрацьовування на нормальні, селективні та швидкодіючі, оскільки їх конструктивні особливості визначаються, головним чином, даним параметром. В окрему групу слід виділити автомати гасіння магнітного поля.

Під власним часом спрацьовування розуміють час  $t_{cn}$  (рис. 12.1) від моменту, коли контрольований параметр перевищив установлену для нього величину (на рис. 12.1  $I_{cn}$ ), до моменту початку розходження контактів (на рис. 12.1  $I_{відкл}$ ), або час від подачі імпульсу на вимкнення до моменту початку розходження контактів. Цей час залежить від способу розчеплення та конструкції механізму розімкнення автомата, від сили вимикаючих пружин, маси рухомої системи та величини шляху цієї маси до моменту розімкнення контактів. Під повним часом вимкнення автомата розуміють власний час спрацьовування плюс час гасіння дуги  $t_2$ , який залежить, головним чином, від ефективності дугогасильного пристрою.

У нормальних автоматів власний час спрацьовування, залежно від величини номінального струму і конструкції, лежить у межах 0,02 – 0,1 с. Селективні автомати після отримання імпульсу на спрацьовування, тобто перед вимкненням, здійснюють витримку часу до 1 с. Вони потрібні для селективного захисту, тобто такого захисту, за якого вимикається найближча до місця аварії ділянка (рис. 12.2). Досягається це за рахунок різної витримки часу ( $t_1 < t_2 < t_3$ ).

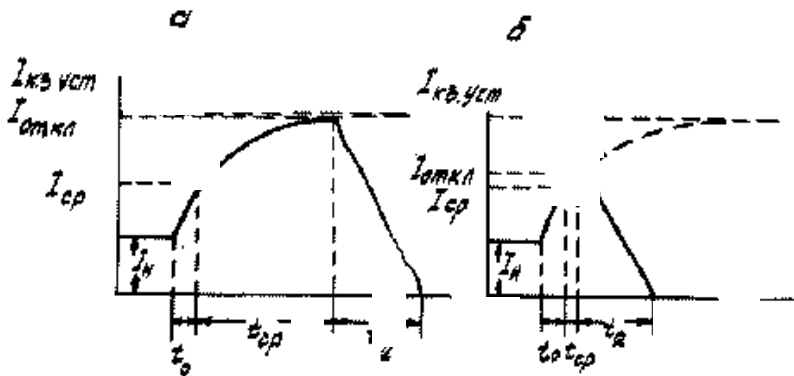


Рис. 12.1 - Крива залежності часу спрацьовування автоматичного вимикача від струму: *a* – нормального; *б* – швидкодіючого

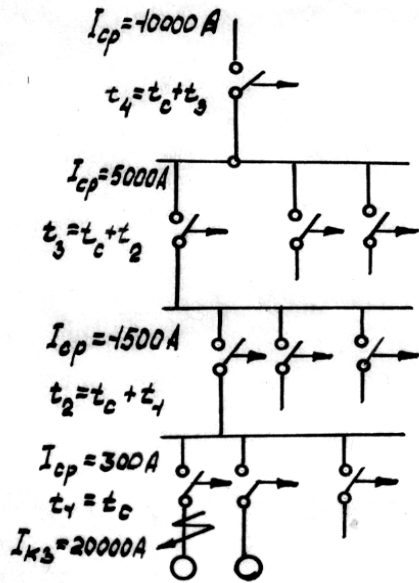


Рис.12.2 - Схема селективного захисту

У швидкодіючих автоматів, час спрацьовування не повинен перевищувати 0,005 с. В окремих конструкціях досягнений час спрацьовування близько 0,001 с. Ці автомати мають струмообмежувальний ефект, а тому можуть застосовуватися для захисту кіл з будь-якими практично можливими струмами короткого замикання.

Наприклад, у колі з усталеним струмом короткого замикання в 400 000 А при початковій швидкості нарощування струму в  $4,5 \cdot 10^6$  А/с автоматичному вимикачу з часом спрацьовування 0,08 с доводиться вимикати струм 280 000 А. При  $t_{cn} = 0,04$  с струм вимикання складе 160 000 А, а швидкодіючому вимикачу при  $t_{cn} = 0,005$  с доведеться вимикати струм, який дорівнює 22 000 А.

Електродинамічні сили таким чином обмежуються в 50 – 150 разів.

Швидкодіючі вимикачі застосовуються у всіх випрямних установках для захисту анодних кіл при зворотних запалюваннях, на електрифікованих залізницях, лініях метрополітену і трамваю, а також у багатьох потужних установках з короткими лініями передачі.

Автомати гасіння поля застосовуються в колах збудження великих машин. Якщо в результаті порушення ізоляції всередині машини виникло коротке замикання, то єдиним способом, який дозволяє обмежити розміри аварії, є швидке зведення збудження до нуля, тобто гасіння магнітного поля обмотки збудження. Це завдання виконують автомати гасіння поля.

## 12.2 Пристрій вимикачів

Незалежно від призначення та швидкодії автомати складаються з таких основних елементів: контактної системи, дугогасильної системи, приводу, механізму вільного розчеплення, розчеплювачів і комутатора з блок-контактами.

Контактна система автоматів повинна перебувати під струмом, не вимикаючись досить тривалий час, і бути здатною вимикати великі струми короткого замикання. Для задоволення вимог, що виникають в даних умовах, широкого розповсюдження отримали двоступінчасті (головні та дугогасильні) і триступінчасті (головні, проміжні та дугогасильні) контактні системи. В автоматах на малі струми, а також у зв'язку із застосуванням металокераміки, в автоматах на середні струми до 600 А і в швидкодіючих до 6 000 А застосовуються одноступінчасті контактні системи (рис. 12.3).

У вимикачах на великі номінальні струми застосовують декілька паралельних контактних систем на полюс.

Дугогасильна система повинна забезпечувати вимкнення великих струмів короткого замикання в обмеженому просторі. Під дією електродинамічних сил, що виникають, дуга швидко розтягується й гасне, але її полум'я займає дуже великий простір. Завдання дугогасильного пристрою полягає в тому, щоб обмежити розміри дуги і забезпечити її гасіння в малому об'ємі.

Широкого розповсюдження отримали камери з широкими щілинами (однією або декількома паралельними) і камери з дугогасильними решітками (див рис. 12.3). В останні роки застосовуються камери з вузькими щілинами і навіть повністю закриті камери. Комбіновані дугогасильні пристрої – камери з вузькими щілинами в сполученні з дугогасильними решітками – здатні забезпечити гасіння електричної дуги в обмеженому об'ємі при дуже великих струмах (30 – 40 кА). Однак у ряді випадків при струмах понад 40 – 50 кА та великих електродинамічних силах лише контуру струму буває недостатньо, щоб загнати дугу в камеру. Потрібна додаткова сила, яка може бути створена або зовнішнім магнітним полем (магнітне дуття), або повітряним дуттям.

Система з послідовною дугогасильною котушкою (рис. 12.4, а) в колі дугогасильних контактів виявляється тут небажаною (у колі головних контактів її неможливо виконати), тому що внесене котушкою підвищення індуктивності кола дугогасильних контактів може привести до появи дуги на головних контактах у момент їх розходження. Система з послідовною дугогасильною котушкою (рис. 12.4, б) у розсіканні рогів, яка вмикається самою дугою після того, як дуга досягне рогів і перемкне розсікання, вільна від зазначеного вище недоліку й дозволяє значно підвищити вимикальну здатність.

Послідовні стадії горіння дуги на рогах показані на рисунку 12.4.

Повітряне дуття дозволяє створити сили, які діють на дугу в декілька разів сильніше, ніж магнітне дуття. Однак здійснення повітряного дуття потребує значного ускладнення конструкції автомата й тому до теперішнього часу даний спосіб гасіння у вимикачах низької напруги не застосовується. У вимикачах на високу напругу повітряне дуття використовується широко.

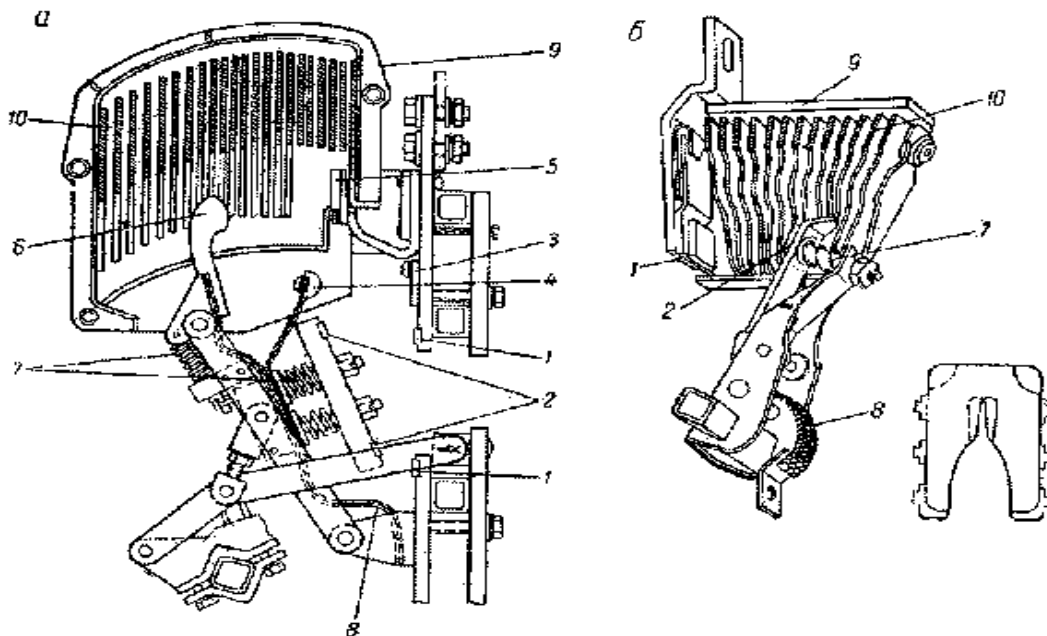


Рис. 12.3 - Контактні та дугогасильні системи деяких автоматичних вимикачів:  
*a* – триступінчасті; *б* – одноступінчасті;  
 1 – головний нерухомий; 2 – головний рухомий; 3 – проміжний нерухомий;  
 4 – проміжний рухомий; 5 – дугогасильний нерухомий; 6 – дугогасильний рухомий;  
 7 – контактні пружини; 8 – гнучкий зв’язок; 9 – дугогасильна камера;  
 10 – дугогасильна решітка

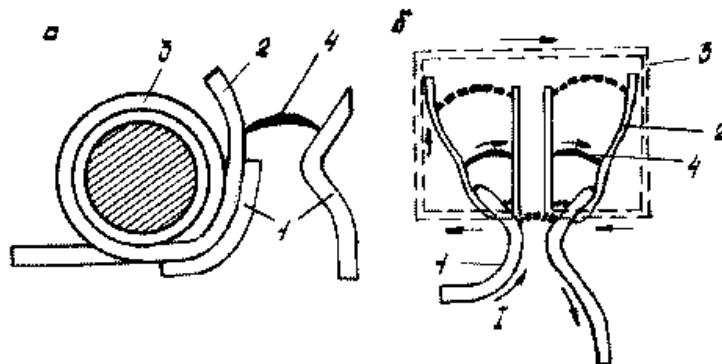


Рис. 12.4 - Схема ввімкнення дугогасильної котушки:  
 1 – контакти; 2 – дугогасильні роги; 3 – дугогасильна котушка; 4 – дуга

Підвищення вимикальної здатності автоматів може бути отримане застосуванням низки паралельних контактних систем з одночасним існуванням і штучним підтриманням горіння електричних дуг на їх дугогасильних контактах. Розімкнення паралельно ввімкнених контактів відбувається неодноразом, дуга виникає на тих контактах, які розмикаються останніми. Можна, однак, створити такі умови, за яких дуга виникне й буде одночасно існувати на всіх паралельних контактах. У такому разі вимикальна здатність вимикача підвищиться пропорційно до кількості паралельно ввімкнених дугогасильних контактів.

Умови, які треба тут забезпечити, визначаються таким чином. Припустимо, що ми маємо два паралельно ввімкнені контакти 1 і 2 (рис. 12.5). Для рівномірного

розподілу струму в замкнутому положенні контактів треба, щоб опори  $r_1$  і  $r_2$  паралельних гілок  $ab$  і  $cd$  були однакові. Це може бути досягнуто відносно просто (підбором відповідної довжини підвідних шин або іншим способом).

Виникнення та одночасне горіння дуги на паралельних контактах можна отримати при певних величинах  $L_1$ ,  $L_2$  і  $M_{12}$ . Припустимо, що контакти  $I$  розімкнуться першими, тоді весь струм гілки  $ab$  піде через гілку  $cd$ , і на контактах  $I$  виникне напруга

$$U_{\kappa} = (L_1 + L_2 + 2M_{12}) \frac{di}{dt} \quad (12.1)$$

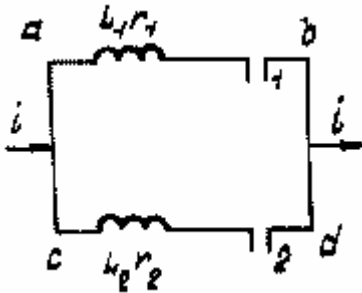


Рис. 12.5 - До визначення умов одночасного горіння електричної дуги на паралельних контактах

Щоб на контактах  $I$  виникла дуга, напруга  $U_{\kappa}$  повинна бути не менше 24 – 30 В. Звідси визначиться величина потрібної індуктивності:

$$(L_1 + L_2 - 2M_{12}) \geq \frac{U_{\kappa}}{di/dt} \quad (12.2)$$

При ідентичних контактних системах індуктивність їх однакова, тоді

$$L_1 = L_2,$$

а

$$(L_1 - M_{12}) \geq \frac{U_{\kappa}}{2(di/dt)} \quad (12.3)$$

На рис. 12.6 наведена осцилограма вимкнення струму макетом автомата, в якому виконані зазначені вище умови. Автомат вимкнув струм 70 000 А. На кожний з паралельних контактів (їх було два) прийшло по 35 000 А. Дуги на обох контактах горіли одночасно й одночасно погасли.

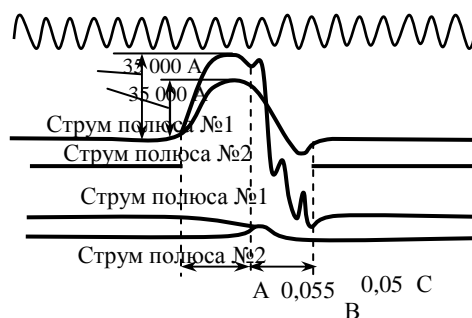


Рис. 12.6 - Осцилограма вимкнення струму автоматом з паралельними контактами

Підвищення вимикальної здатності автоматичних вимикачів пов'язане також із забезпеченням бездугового розімкнення головних контактів. При розімкненні головних контактів струм, що по них протікав, переходить у дугогасильні контакти. При цьому на контактах виникає напруга

$$U_{\kappa} = (L_2 + L_0 - 2M_{2,0}) \frac{di_2}{dt}, \quad (12.4)$$

де  $L_2, L_0, 2M_{2,0}$  – відповідно індуктивність головних і дугогасильних контактів і взаємодукація між ними;  $\frac{di_2}{dt}$  – швидкості зміни струму в колі головних контактів. Для виключення можливості появи дуги на головних контактах необхідно, щоб індуктивність кола

$$L_2 + L_0 - 2M_{2,0} \rightarrow 0. \quad (12.5)$$

Ідеальним випадком було б

$$L_2 + L_0 = 2M_{2,0}. \quad (12.6)$$

Отже, при конструюванні контактної системи треба прагнути знизити індуктивності головних і дугогасильних контактів і збільшити магнітний зв'язок між цими гілками.

Дуже серйозним питанням є також вимкнення малих струмів при оперативних перемиканнях. Автоматичні вимикачі на номінальний струм понад 100 – 200 А, як правило, не постачаються дугогасильними котушками. При номінальному струмі, струмах перенавантаження, а тим більш при струмах короткого замикання магнітне поле, яке створене струмопроводом до нерухомого контакту, що являє собою одновиткову котушку, забезпечує швидке переміщення дуги і надійне гасіння її. При малих струмах  $I < 0,5 I_{ном}$  це поле стає недостатнім для забезпечення руху дуги. Для гасіння малих струмів доводиться йти на збільшення розхилу контактів (механічне розтягування) і вживати інших спеціальних заходів.

Багато конструкцій не забезпечують гасіння дуги при струмах, менших 25 – 10 відсотків від номінального.

Привод служить для ввімкнення автомата за командою оператора. Автомати виконуються:

- а) з ручним приводом безпосередньої дії;
- б) з дистанційним приводом: ручним, соленоїдним, моторним, пневматичним.

Вимкнення автоматів здійснюється вимикальними пружинами.

Механізм вільного розчеплення призначений:

- а) для забезпечення можливості утримання контактів автомата у ввімкненому положенні (рукояткою, дистанційним приводом) при наявності ненормального режиму роботи в захищеному колі;
- б) для забезпечення негайного відключення, тобто для забезпечення незалежної від роду й маси приводу швидкості розходження контактів.

Механізм являє собою систему шарнірно зв'язаних важелів, які з'єднують привод вмикання з системою рухомих контактів, з'єднаних з вимикальною пружиною. Принцип роботи механізму вільного розчеплення може бути пояснений рис. 12.7 і рис. 12.8.

На рис. 12.7 показана схема механізму вільного розчеплення, який виконаний у вигляді системи важелів 1 і 2, що зламуються. При введеному стані (стані готовності до ввімкнення автомата, рис. 12.7, а) центр 0 лежить дещо нижче мертвого положення важелів – нижче прямої, яка з'єднує шарніри 3 і 4. Нижче важелі опуститися не можуть, цьому перешкоджає упор 5. Отже, при ввімкненні (рис. 12.7,



б) система важелів жорстка. Якщо під дією штовхача важелі 1 і 2 будуть повернуті так, що центр  $O$  опиниться дещо вище мертвого положення, то система важелів стане гнучкою й контакти 6 і 7 будуть розімкнуті під дією вимикальної пружини 8 незалежно від того, що рукоятка утримується в положенні "ввімкнено" (рис. 12.7, в).

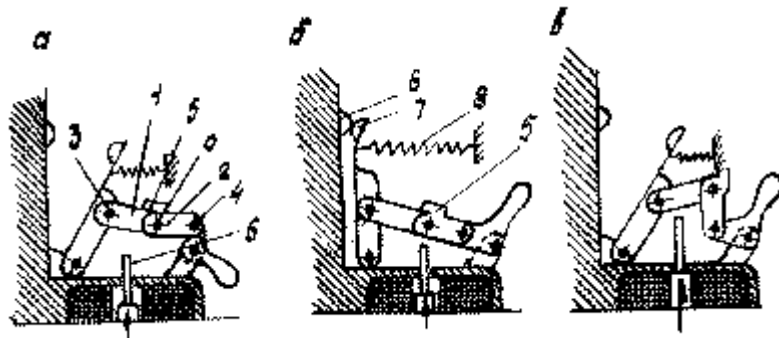


Рис. 12.7 - Схема механізму вільного розчеплення із важелів, що ламаються:  
а – підготовлено до вмикання; б – ввімкнено; в – вимкнено автоматично

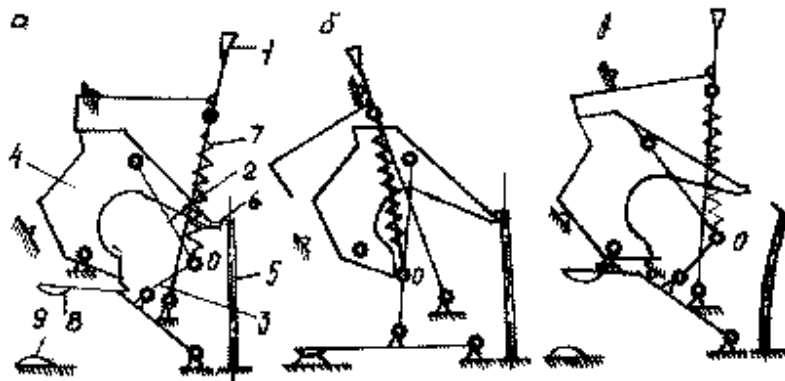


Рис. 12.8 - Схема механізму вільного розчеплення вимикачів серії А3000

Щоб знову ввімкнути автомат, треба рукоятку перевести в положення, яке відповідає вимкненому автомат (рис. 12.7, а). Якщо автомат має декілька розчеплювачів, які працюють у функції різних параметрів, то всі вони діють на вимикальний валик, а вимикальний валик уже діє на механізм вільного розчеплення.

Схема іншого механізму вільного розчеплення наведена на рис. 12.8: рис. 12.8, а відповідає положенню „ввімкнено вручну” і „автомат введений”. „Введений” означає, що контакти 8 і 9 розімкнуті, а фігурний важіль 4 поставлений під зачеплення б вимикального валика 5, це здійснюється поворотом рукоятки 1 праворуч.

При повороті рукоятки праворуч вимикальна пружина 7 переведе важелі 2 і 3, що ламаються, через мертве положення до упору шарніра  $O$  у важіль 4 і замкне контакти. Положення „ввімкнено” показане на рис. 12.8, б.

У разі виникнення ненормальних умов роботи в захищуваному колі відповідно розчеплювач поверне вимикальний валик і виведе його із зчеплення з фігурним важелем. Під дією вимикальної пружини фігурний важіль повернеться та іншим своїм кінцем переведе важелі, що ламаються, праворуч через мертве положення. Вимикальна пружина зломить важелі та розімкне контакти. Автомат опиниться в положенні „вимкнено автоматично” (рис. 12.8, в). Для повторного ввімкнення треба рукоятку відвести праворуч і ввести в зчеплення фігурний важіль з вимикальним

валиком.

Конструкції механізмів вільного розчеплення дуже різноманітні, однак дія їх подібна описаним. У подальшому механізм вільного розчеплення будемо зображати схематично у вигляді двох зчеплених важелів.

Слід зазначити одну дуже важливу обставину. Вимикальні та контактні пружини в автоматичних вимикачах розвивають сили в десятки, сотні й навіть тисячі ньютон. Система важелів механізмів вільного розчеплення будується так, що для розчеплення потрібні зусилля в десятки, максимум у сотні грамів. Це дозволяє мати легкі та високочутливі розчеплювачі.

Розчеплювачі – елементи, які контролюють заданий параметр кола і діють через механізм вільного розчеплення на вимкнення автомата при порушенні заданого параметра.

Залежно від функцій захисту в розчеплювачах використовують струмовий захист або захист по мінімальній напрузі.

Струмовий захист має миттєву або уповільнену дію, останній варіант використовується як розчеплювач перевантаження або селективний.

Захист по напрузі використовується для вимкнення автомата при зниженні напруги нижче певного рівня. Захист спрацьовує в разі дистанційного вимкнення автомата.

Зворотний захист спрацьовує при зміні напрямку струму.

Тепловий захист – працює в залежності від значення струму й часу його протікання, застосовується звичайно для захисту від перевантажень.

Схема автомата з розчеплювачем струмовим максимальним миттєвої дії показана на рис. 12.9, *a*.

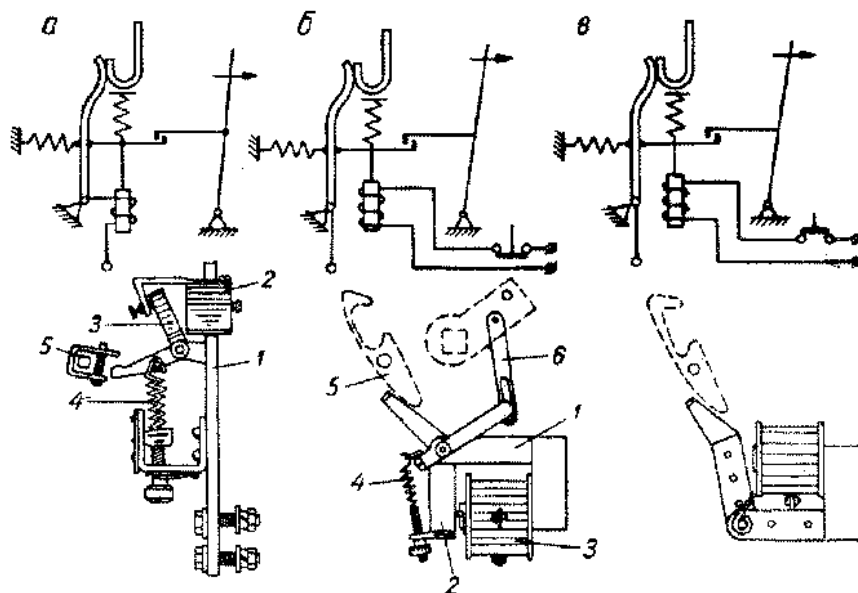


Рис. 12.9 - Приклади виконання деяких розчеплювачів

Шину 1 полюса вимикача охоплює магнітопровід, який складається з осердя 2 і якоря 3. Коли струм стане вище за певне значення, тягове зусилля перевищує зусилля пружини 4, яркі притягнеться і поверне вимикальний валик 5. Механізм вільного розчеплення звільниться. Вимикач вимкнеться. Регулювання струму спрацьовування здійснюється натяганням пружини 4.

Розчеплювач напруги мінімальний (рис. 12.9, б) складається з електромагніта: осердя 1, якоря 2 і котушки 3, яка підключена на контрольовану напругу. При нормальних режимах якір притягнутий. При зниженні контрольованої напруги нижче певної величини якір під дією регулювальної (вона ж і вимикальна) пружини 4 відпадає і, діючи на механізм вільного розчеплення через заціпку 5, вимкне вимикач.

Магнітна система розчеплювача виконується так, що МРС котушки при номінальній напрузі недостатня для притягання якоря, але достатня для затримання. Якір замикається при підготовці вимикача до ввімкнення за допомогою важелів 6, з'єднаних з валом вимикача.

Розчеплювач напруги вимикальний (рис. 12.9, в) являє собою електромагніт, який притягає свій якір при ввімкненні котушки на відповідну напругу. Своїм кінцем якір діє на механізм вільного розчеплення і вимикає вимикач.

Приклад виконання комбінованого струмового максимального й теплового розчеплювача наведений на рис. 12.10. При перевантаженні спрацьовує тепловий розчеплювач: біметалева пластинка 1 внаслідок нагрівання вигинається і гвинтом 2 повертає вимикальний валик 3. При короткому замиканні спрацьовує струмовий максимальний розчеплювач, який складається з осердя 4 і якоря 5, що охоплюють струмопровід 6. Максимальний розчеплювач діє на той же вимикальний валик. Для обмеження струму через біметалеву пластинку служить шунт 7.

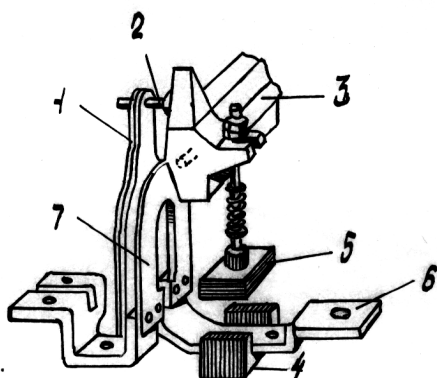


Рис. 12.10 - Комбінований струмовий максимальний і тепловий розчеплювач

Автоматичний вимикач поєднує функції рубильника та плавкого запобіжника. Крім того, він здатний виконувати ще низку функцій захисту, які не можуть бути здійснені плавкими запобіжниками. Автомат може дистанційно управлятися й забезпечувати швидке відновлення живлення (повторне ввімкнення). Тому зараз як у виробничих, так і в сільськогосподарських і побутових установках плавкі запобіжники та рубильники у багатьох випадках замінюються автоматами. Автомат з тепловим і максимальним захистом здатний замінити рубильник, запобіжник і магнітний пускач у схемах електродвигунів з малою частотою вмикання.

У зв'язку з викладеним зростає потреба в автоматичних вимикачах на малі та середні струми. Ці автомати повинні мати малі габарити й вагу, високопродуктивну технологію, яка забезпечує масове виробництво й низьку собівартість.

Вони повинні мати достатню електричну стійкість на спрацьовування та вимикальну здатність, припускати встановлення у виробничих приміщеннях і обслуговування неелектротехнічним персоналом.

Особливостями конструкцій сучасних автоматів на малі та середні струми є їх

монтаж в ізоляційних (пластмасових) кожухах, які закривають повністю всі струмоведучі частини. Основа кожуха є конструкційною деталлю, на якій збирається весь вимикач. Застосування ізоляційних кожухів з ребрами між полюсами й гасіння дуги в об'ємі камери дозволили дуже зблизити полюси й одержати вимикачі малих розмірів. Контактні системи на малі струми в більшості випадків – мостові, а на середні струми – пальцеві. Застосування металокераміки дозволяє виконувати контактні системи одноступінчастими й легкими. У поєднанні з іншими вдосконаленнями досягається малий час спрацьовування – десь 0,02 с. Вимикачі, як правило, оснащуються тепловими й максимальними електромагнітними або комбінованими розчеплювачами. Привод ручний. Розширення сфери застосування автоматів і функцій, які вони виконують, досягається використанням дистанційних розчеплювачів і блок-контактів.

У зв'язку з подальшим зростанням потужності мереж і приймачів виникає потреба підвищення комутаційної здатності автоматів на середні та великі струми. У сучасних промислових установках струми короткого замикання досягають 75 – 100 кА, а в окремих енергоємних виробництвах з короткими мережами – до 150 – 200 кА, при робочих струмах – до 20 – 30 кА. Розвиток автоматичних вимикачів йде шляхом підвищення електродинамічної стійкості й вимикаючої здатності універсальних і селективних вимикачів, створення вимикачів на великі номінальні струми, а також широкого застосування й створення нових швидкодіючих вимикачів, які мають велику струмообмежувальну здатність.

Підвищення електродинамічної стійкості контактних систем автоматів може бути досягнуте застосуванням електродинамічної компенсації вимикальних зусиль. Електромагнітна компенсація електродинамічних сил в контактах, яка застосовується в багатьох конструкціях, виявляється малодієвою при струмах короткого замикання понад 20 – 25 кА.

Підвищення вимикальної здатності автоматів пов'язане з питанням гасіння дуги й забезпечення бездугового розімкнення головних контактів. Основні положення й деякі шляхи розв'язання даних питань розглянуті вище. Це розробка і впровадження комбінованих дугогасильних пристроїв, повітряного дугтя, паралельних дугогасильних контактів з одночасним виникненням і горінням дуги на них, контактних систем з малими індуктивностями і підвищеним зв'язком між головними і дугогасильними контактами.

Підвищення номінальних струмів вимикачів можна одержати шляхом застосування паралельних контактів, і головним чином впровадженням рідинного, зокрема водяного охолодження.

### **12.3 Швидкодіючі автоматичні вимикачі**

Швидкодіючі автомати утримуються у ввімкненому положенні за допомогою електромагніта або за допомогою механічного пристрою (защіпки). Вимикачі з електромагнітом простіші за будовою, однак потребують джерела постійного струму для живлення котушки утримуючого електромагніта. Ці вимикачі поляризовані, вимикачі із защіпками – неполяризовані.

Швидкодія при вимкненні досягається або за рахунок потужних пружин або за

рахунок електромагнітного вимкнення, що засноване на принципі витіснення магнітного потоку.

На рис. 12.11 наведена принципова схема будови одного з перших швидкодіючих вимикачів типу ШДА, які в нас вироблялись. Автомат має нормально відкриті контакти. Рухомий контакт 1 механічно пов'язаний з якорем 2 утримувального підковоподібного магніту 3. Вмикається автомат за допомогою магніту 12 і важеля 13. У ввімкненому положенні утримується потоком, що створений котушкою 4. Коло головного струму містить послідовну котушку 5, розміщену на осерді 6. Потік, що створений цією котушкою, в якорі направлений назустріч потоку котушки 4. При великих струмах потік в якорі знижується настільки, що сила притягання електромагніта стає недостатньою для утримування якоря. Якір вимикається під дією потужної вимикальної пружини 7. Власний час розімкнення дорівнює 0,005 – 0,01 с.

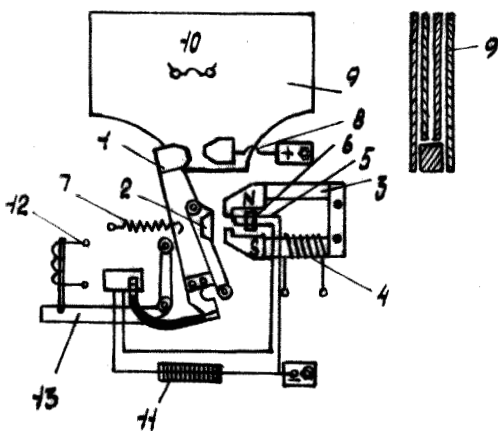


Рис. 12.11 - Схема швидкодіючого вимикача зі стримувальним електромагнітом

Швидкодія тут досягається за рахунок того, що магнітний потік не зникає, а витісняється з частини магнітопроводу. Рухома система всебічно полегшена, застосовані потужні вимикальні пружини. Для прискорення дії розмагнічувального витка застосований магнітний шунт 11, який являє собою струмопровідну шину зі сталевими кільцями. Шина вмикається паралельно до розмагнічувальної котушки. Омичний опір шунта, як правило, менший від омичного опору котушки, а індуктивність шунта більша від індуктивності котушки. При сталому режимі струм розподіляється по паралельних ділянках (витку і шунту) обернено пропорційно до їх омичних опорів. У перехідному режимі (зростанні струму при короткому замиканні) опір шунта за рахунок його індуктивності різко зростає і основна частина струму прямує в розмагнічувальний виток, прискорюючи його дію.

Гасіння дуги здійснюється в камері 9 з декількома паралельними поздовжніми щілинами.

Магнітне поле гасіння створюється послідовною дугогасильною котушкою 8 і додатковою котушкою 10 та вмикається дугою після її входження в камеру.

Швидкодіючі вимикачі типу ШДА були замінені на більш досконалі вимикачі типу ВАБ-2 (розроблені А.І. Голубєвим). Як і вимикачі типу ШДА, вони мають три котушки (рис. 12.12): вмикальну 1, стримувальну 2 і вимикальну 3, але робота потоків тут дещо інша. Вмикальна котушка і тут працює короткочасно тільки на час ввімкнення. Вона притягає якір 4 до середнього стрижня магнітопроводу й замикає

контакти. У цьому положенні якір утримується потоком котушки 2 (суцільна лінія). Потік серієсної вимикальної котушки (пунктирна лінія) в якорі та стрижні 1 направлений назустріч стримувальному потоку. При великих струмах сумарний потік знижується, сила притягання падає і якір під дією вимикальних пружин відходить від стрижня. При відході якоря від стрижня потоки котушок 2 і 3, які раніше діяли зустрічно, починають діяти узгоджено, сприяючи швидкому руху якоря. Магнітний потік стримувальної котушки 2 виконує роль потужних пружин 7 автомата типу ШДА. Власний час автоматичного вимикача ВАБ-2 складає 0,003 – 0,004 с, а повний час до 0,015 – 0,02 с.

Автомати, що побудовані за принципом автоматів типів ШДА і ВАБ-2, можуть виконувати функції захисту як максимальні вимикачі та як вимикачі зворотного струму.

На рис. 12.13 зображена магнітна система швидкодіючого вимикача типу ВАБ-10 для анодних кіл ртутних вимикачів. Вимикач має нормально закриті контакти 4 і 5, які утримуються в замкнутому стані пружиною 3. При нормальному режимі роботи магніторушійна сила шини 1 головного кола дещо більша за магніторушійну силу котушки 2 і направлена їй назустріч. У зв'язку з цим якір притягнутися не може. При виникненні зворотного запалення змінюється напрям струму в шині 1. Обидві МРС додаються, якір швидко притягається до осердя, контакти розмикаються. Власний час цього вимикача 0,0025 – 0,0030 с.

Схема швидкодіючого автомата з механічною заціпкою (у даному випадку – роликовим замком) наведена на рис. 12.14.

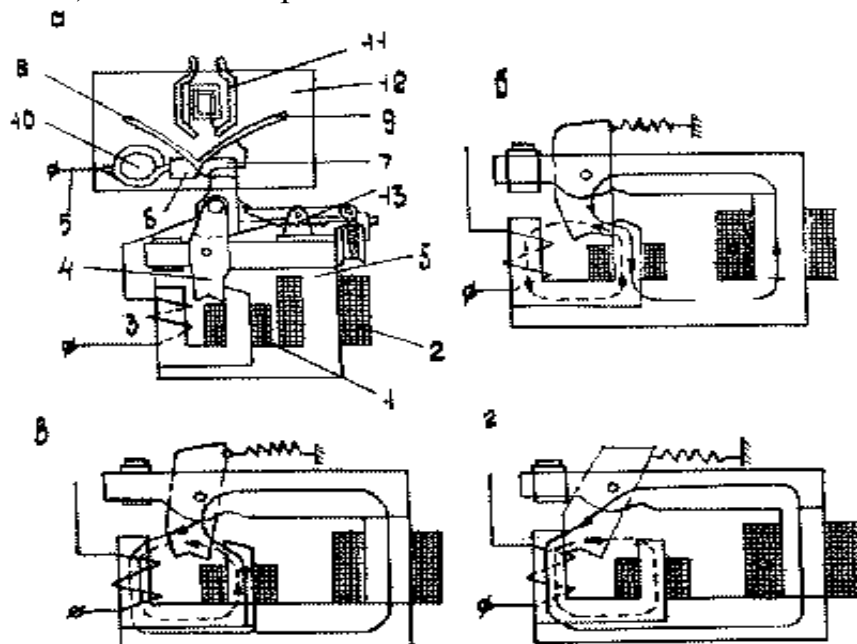


Рис. 12.12 - Швидкодіючий вимикач ВАБ-2: а – загальний вигляд;

б, в, г – перерозподіл потоків при автоматичному ввімкненні:

1 – вмикальна котушка; 2 – стримувальна котушка; 3 – вимикальна котушка; 4 – якір; 5 – магнітопровід з відповідними осерддями і ярмом; 6, 7 – рухомий і нерухомий контакти; 8, 9 – дугогасильні роги; 10 – послідовна дугогасильна котушка; 11 – додаткова дугогасильна котушка, яка вмикається дугою; 12 – дугогасильна камера; 13 – вимикальна пружина

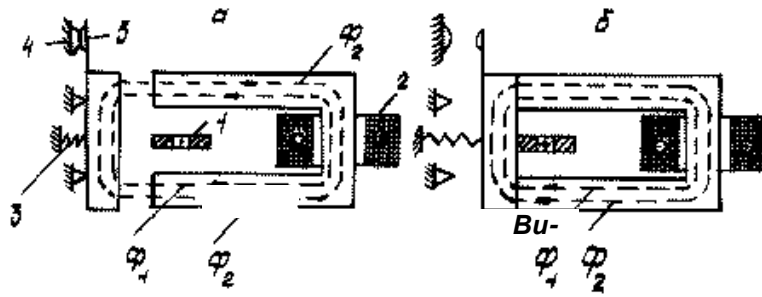


Рис. 12.13 - Магнітна система швидкодіючого вимикача типу ВАБ-10

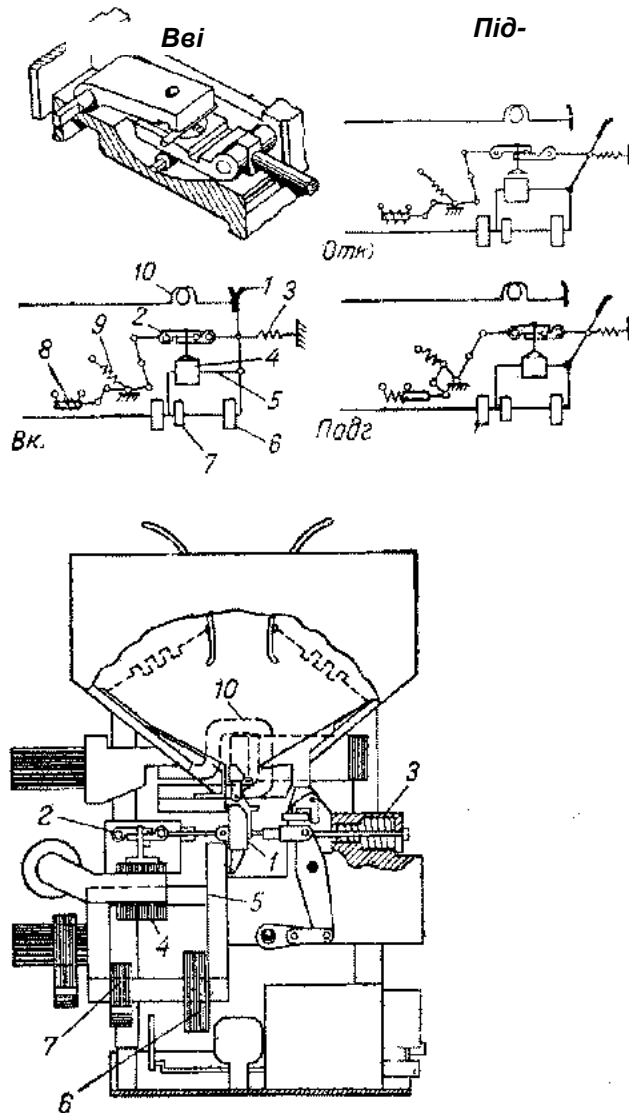


Рис. 12.14 - Схема і загальний вигляд швидкодіючого вимикача з роликним замком: 1 – контакти; 2 – замок; 3 – вимикальні пружини; 4 – стримувальний електромагніт; 5 – розмагнічуючий виток; 6 – уставка струму; 7 – уставка часу; 8 – вмикальний соленоїд; 9 – пружина важеля, що ламається; 10 – дугогасильна котушка

Тут контакти 1 утримуються в замкнутому положенні замком 2, який, у свою чергу, утримується електромагнітом 4. Шина 5 кола головного струму проходить

через електромагніт і створює МРС, зустрічну МРС котушки магніту 4. При короткому замиканні потік електромагніта різко знижується. Електромагніт 4 відпускає свій якір і звільнює замок. Під дією сильних вимикаючих пружин вимикач вимикається. Власний час вимкнення 0,004 – 0,008 с.

У вимикачах з механічними заціпками електромагніти управляють заціпками, і тому вони набагато менші, ніж у вимикачів електромагнітних. У цих вимикачів немає якоря, який пов'язаний з контактною системою. Малі електромагніти, полегшена рухома система і потужні вимикальні пружини забезпечують добру швидкодію.

Прагнення отримати якомога більшу швидкодію у вимикачах на великі струми привело до створення швидкодіючого вимикача з вибуховим розчеплювачем (рис. 12.15). Цей вимикач, на відміну від розглянутих вище, має головні і дугогасильні контакти. Нерухомі головні контакти 1 з'єднуються з поворотним рухомих контактом 2 коливальними мостами 3. Потужні контактні пружини 4 і можливість самоустановки контактних мостів забезпечують добрий контакт. Пружина у вигляді закрученого стрижня 5 прагне повернути поворотний контакт 2 за годинниковою стрілкою. Цьому перешкоджає штанга 6, яка утримує контакт за виступ 7. У штангу 6 вмонтований вибуховий патрон 8. За допомогою пускаючого імпульсу протягом  $2 \cdot 10^{-5}$  с може бути викликана детонація патрона і руйнування штанги 6.

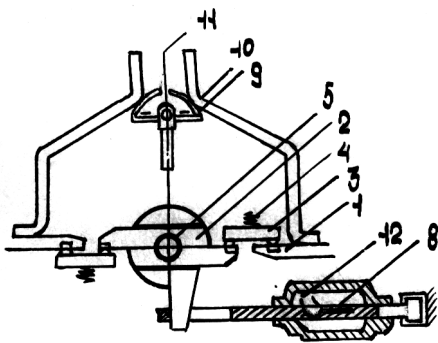


Рис. 12.15 - Схема будови швидкодіючого автоматичного вимикача з вибуховим розчеплювачем

Пружина 5 дуже швидко поверне рухому систему і розімкне головні, а через 0,3 мс і дугогасильні 9 контакти.

Власний час спрацьовування такого автомата становить десь 1 мс. За такого малого часу слід урахувувати також інерцію самих вимикальних пружин. Пружина у вигляді стрижня, закрученого по осі, має суттєво меншу інерцію, ніж спіральні та пластинчасті пружини.

Гасіння електричної дуги здійснюється в закритій камері 11 з вузькою поздовжньою щілиною. Крім того, для прискорення гасіння дуги можуть використовуватися гази, що отримуються у вибуховій камері 12, за допомогою яких створюється потік стислого повітря для обдуву дуги.

На розглянутому принципі побудовані вимикачі на номінальні струми 5 000 і 12 000 А при напрузі до 4 000 В. На рис. 12.16 показаний один з таких вимикачів. Перезарядження після спрацьовування відбувається автоматично. Розглянутий принцип досить прогресивний і може забезпечити побудову автоматичних вимикачів з необмеженою вимикальною здатністю для мереж будь-якої потужності.



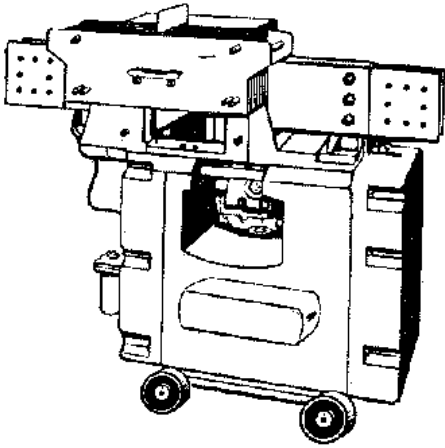


Рис. 12.16 - Загальний вигляд швидкодіючого автоматичного вимикача постійного струму з вибуховим розчеплювачем на 5 000 А 1 000 В

#### 12.4 Автоматичне гасіння магнітного поля

Найпростішим способом гасіння поля є вимкнення обмотки збудження. Однак при цьому внаслідок великої індуктивності кола на затискачах обмотки виникають дуже високі напруги, які здатні викликати пробій ізоляції. Тому при гасінні поля вдаються до замикання обмотки збудження на розрядний опір або на зустрічну діючу ЕРС.

Гасіння поля за допомогою постійного розрядного опору отримало широке розповсюдження. Автомати, які застосовуються (рис. 12.17), мають дві пари головних контактів – нормально відкриті 3 і нормально закриті 4. Нормально відкритими контактами підключалось коло обмотки збудження 1 до джерела живлення (збуджувача 2), а нормально закритими вимикався розрядний опір  $R$  від обмотки збудження. При короткому замиканні в машині автомат гасіння поля вимикався, підключаючи розрядний опір і вимикаючи коло обмотки збудження та розрядного опору від генератора. Обмотка збудження розряджалась на розрядний опір.

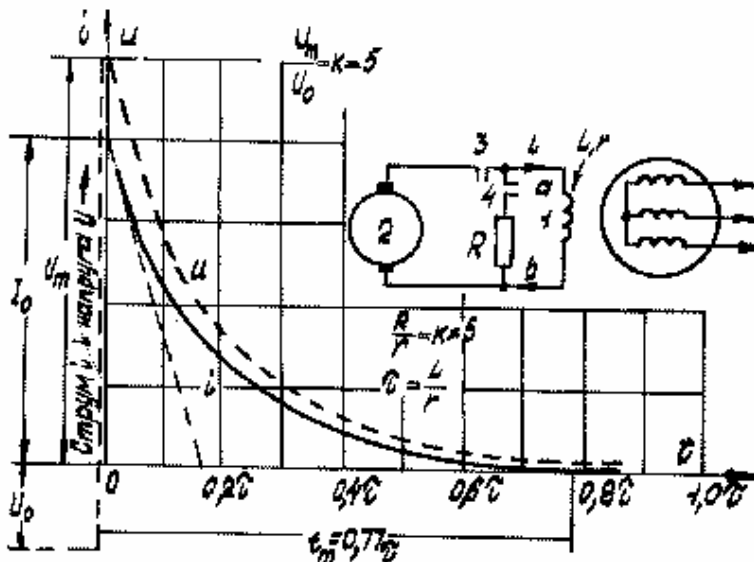


Рис. 12.17 - Розрядження обмотки збудження на активний опір і схема відповідного автомата гасіння поля

Процес гасіння показаний кривими  $I$  і  $U$ .

При гасінні поля на розрядний опір час гасіння виявляється відносно великим. Для скорочення часу гасіння поля треба підвищувати величину розрядного опору. Однак тут швидко досягається границя. Максимальна величина напруги  $U_m$  на

обмотці збудження в перший момент дорівнює  $I_0 R_p$ ,  $I_0$  – струм в обмотці збудження в момент початку гасіння поля, а  $R_p$  – величина розрядного опору. Необхідно, щоб ця величина була не більшою за допустиму за умовами міцності ізоляції величини  $U_{iz}$ . Звідси величина розрядного опору не може перевищувати величину

$$R_p \leq \frac{U_{iz}}{I_0}, \quad (12.7)$$

а час гасіння  $t_z$  не може бути знижений нижче за певну величину.

Існували й інші способи гасіння поля, але всі вони були відносно складні й не давали оптимального вирішення.

Оптимальною умовою гасіння поля є такий процес гасіння, за якого струм падає від  $I_0$  до нуля, а напруга залишається постійною під час усього процесу гасіння. Здійснити такий процес можливо, якщо використовувати електричну дугу як нелінійний опір.

Запропонований спосіб гасіння ґрунтується на тому, що спад напруги на короткій дузі (довжина 2 – 3 мм) між двома металевими електродами залишається практично незмінним при зміні струму в широких границях.

Схема такого гасіння наведена на рис. 12.18. У ній замість розрядного опору паралельно до обмотки збудження й контактів 4 підключена дугогасильна решітка 7. При нормальній роботі генератора головні контакти 3 замкнуті, а контакти 4 розімкнуті. Обмотка збудження 1 підключена до джерела струму (збудження 2). При гасінні поля спочатку замикаються контакти 4, паралельно до обмотки збудження підключається коло з обмежувальним опором 5. Потім розмикаються контакти 3, а через дуже короткий проміжок часу після цього розмикаються контакти 4. На них виникає дуга, яка магнітним полем заганяється в дугогасильну решітку. У решітці дуга горить під час усього процесу гасіння. Напруга на решітці залишається постійною й дорівнює

$$U_d = n U_k \leq U_{iz}, \quad (12.8)$$

де  $U_k$  – напруга на короткій дузі між двома пластинами;  $n$  – кількість послідовно ввімкнених дуг.

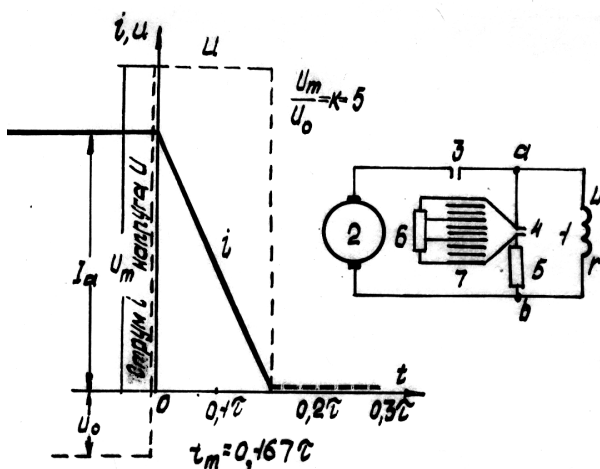


Рис. 12.18 - Оптимальні умови гасіння поля. Розрядження обмотки збудження на дугогасильну решітку. Схема паралельного ввімкнення автомата гасіння з дугогасильною решіткою

На дугогасильній решітці в момент погасання дуги (струм прямує до нуля) спостерігається різке підвищення напруги. Випадкове погасання дуги на одному з проміжків веде до погасання всієї дуги. Для того щоб запобігти шкідливим перенапругам, паралельно решітці вмикається відносно великий опір 6. Опір розбиваєть-

ся на частини, кожна з яких шунтує тільки одну певну групу пластин. За такої схеми дуга в решітці гасне не вся відразу, а по секціях, що сприяє зменшенню перенапруг.

Здійснення гасіння поля за схемою (рис. 12.18) потребує складної кінематики гасіння поля. Більш простою схемою, яка дає ті самі результати, є схема автомата гасіння поля (рис. 12.19), яка має кінематику звичайного автоматичного вимикача.

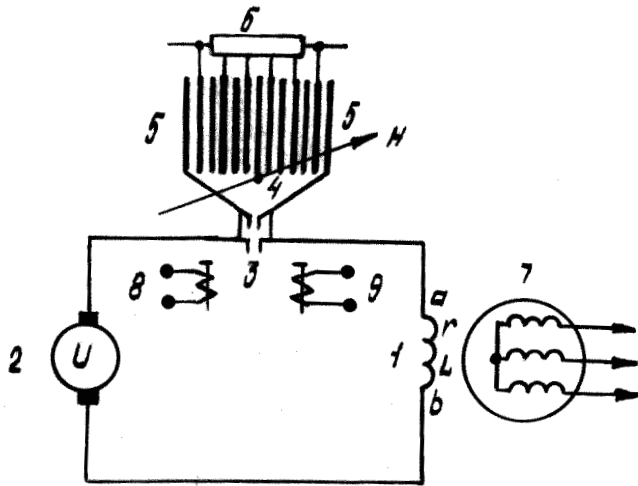


Рис. 12.19 - Принципова схема гасіння поля автоматами серії АГП з дугогасильною решіткою

Автомат цей має головні 3 і дугогасильні 4 контакти, які шунтовані дугогасильною решіткою 5. Порядок розмикання контактів тут такий самий, як у звичайному автоматі. Першими розмикаються головні контакти, а потім дугогасильні, на яких виникає електрична дуга. Зовнішнім магнітним полем дуга заганяється у решітку 5, де вона гасне. Опір 6, який шунтує решітку, служить тій самій меті – зниженню перенапруг. При паралельному ввімкненні дугогасильної решітки напруга на обмотці збудження дорівнює

$$U_m = U_\delta = nU_\kappa \quad (12.9)$$

При послідовному ввімкненні решітки ця напруга дорівнює:

$$U_m = U_\delta - U_2 = nU_\kappa - U_2, \quad (12.10)$$

де  $U_2$  – напруга на збуджувачі.

Отже, при однакових напругах на обмотці збудження генератора послідовне вмикання потребує більшої на величину  $U_2/U_\kappa$  кількості пластин дугогасильної решітки, ніж паралельне вмикання. Це недолік послідовного вмикання.

Однак можливість застосування автоматів і відсутність потреби в додатковому опорі 5 (див. рис. 8.18), які дають спрощення схеми і підвищення надійності роботи, послужили основою для розробки автоматів з послідовним вмиканням. Автомати гасіння поля послідовного вмикання дозволяють, крім того, здійснювати двополосне вимкнення.

## ЛЕКЦІЯ 13. РЕЛЕ НАПРУГИ І СТРУМУ

### 13.1 Індукційне реле струму

Індукційне реле струму і напруги виконується на базі індукційних механізмів з короткозамкнутими витками ( див. рис. 13.1). При ненасиченому магнітопроводі магнітні потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  в розщеплених полюсах можна вважати пропорційними

струму, що протікає в обмотці реле. Кут  $\psi$  для даної конструкції реле є величиною постійною, тому  $\sin \psi$  можна врахувати в коефіцієнті пропорційності. Виходячи з цього, вираз обертального моменту (7.1) можна записати у вигляді

$$M_{ep} = KI^2, \quad (13.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, відмінний від коефіцієнта у виразі (7.1).

На тій же підставі для гальмівного моменту з виразу (7.2) одержимо

$$M_{Г} = K'\omega I^2. \quad (13.2)$$

В індукційних реле струму для збільшення витримки часу та зменшення інерційного вибігу диска використовується постійний магніт. При обертанні диска в полі постійного магніту в ньому наводиться додаткова ЕРС обертання. Струми обертання при взаємодії з потоком постійного магніту створюють гальмівний момент, що дорівнює

$$M_{ГМ} = K'\omega_o \Phi_M^2, \quad (13.3)$$

де  $\Phi_M$  – потік постійного магніту.

Нехтуючи моментом тертя, рівняння руху диска можна записати у вигляді

$$M_{ep} - M_{ГМ} = J \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J$  – момент інерції диска.

При рухові, що встановився, використовуючи вирази (7.3), (7.4), (7.5), одержимо

$$KI^2 = \omega_o (K'I^2 + K''\Phi_M^2),$$

звідки

$$\omega_o = \frac{K}{K'I^2 + K''\Phi_M^2}. \quad (13.4)$$

З виразу (13.4) виходить, що кутова швидкість обертання диска залежить від струму в обмотці реле. Отже, таке реле є струмовим.

Витримка часу при спрацьовуванні індукційного реле залежить від кута повороту, на який повинен повернутись диск для замикання контактів і кутової швидкості диска. Якщо прийняти швидкість диска постійною, то

$$t = \frac{\alpha}{\omega_o}.$$

Витримка часу в реле задається кутом повороту за допомогою відповідного важеля, пов'язаного з диском через черв'ячну передачу з передаточним числом  $n$ . Витримка часу з урахуванням виразу (7.6) визначається з рівняння

$$t = \frac{\alpha_1 (K'I^2 + K''\Phi_M^2)}{KnI^2}.$$

Прикладом індукційного реле струму з обмеженою залежною характеристикою витримки часу може служити реле серії РТ-80 (рис. 13.1), яке випускається нашою промисловістю.

Реле серії РТ-80 являє собою комбінацію індукційного й електромагнітного елементів. Індукційний елемент забезпечує витримку часу, а електромагнітний елемент миттєвої дії – захист від струмів короткого замикання.

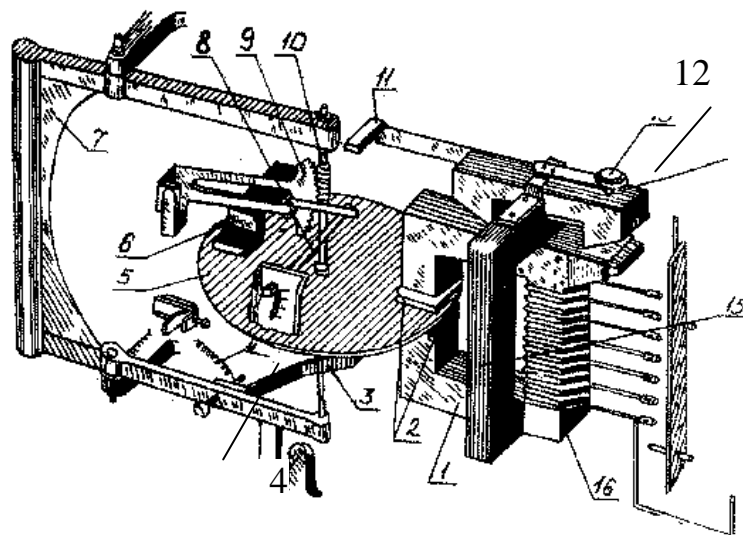


Рис. 13.1 - Індукційне реле струму РТ-80

Магнітопровід *1* індукційного елемента виготовлений з розщепленими полюсами. Між полюсами з двома короткозамкнутими витками *2* поміщений алюмінієвий диск *5*, вісь якого закріплена в рухомій рамі *7*. Рама *7* разом з диском *5* відтягнута пружиною *4* до упору, черв'як *10*, насаджений на осі диска, виходить із зачеплення із зубчатим сегментом *9*. Тому при струмах в обмотці *16* реле, менших за струм спрацювання, диск обертається вхолосту. На рамі закріплена сталевна пластина *3*, яка за рахунок потоків розсіяння може притягуватись до магнітопроводу *1*, забезпечуючи надійне зчеплення черв'яка *10* із сегментом *9*. При досягненні струмом значення струму спрацювання рама *7* з диском повертається і черв'як входить у зчеплення із зубчатим сегментом. Сегмент починає підніматись і своїм важелем піднімає коромисло *11*, яке закріплене на якорі *14*. Коромисло, піднімаючись угору, повертає якор на своїй осі й правий кінець якоря опускається. За певної величини повітряного зазору правий кінець якоря притягується до магнітопроводу *1* і коромисло *11* замикає контакти.

Із зменшенням струму в обмотці реле до струму повороту під дією пружини *4* рамка *7* повертається у вихідне положення, розчіпляючи черв'як із сегментом. Диск продовжує обертатись, не переміщуючи сегмент *9*. Отже, за обертанням диска можна судити про несправність реле. Постійний магніт *6* створює гальмуючий момент і тим самим збільшує витримку часу і зменшує інерційний вибіг диска після вимикання реле.

Витримка часу індукційного елемента реле залежить від початкового положення зубчатого сегмента і швидкості обертання диска. Початкове положення сегмента можна змінювати переміщенням вздовж шкали витримки часу упору *8*, на якому лежить важіль зубчатого сегмента. Положення упору *8* фіксується головкою гвинта.

Обмотка *16* і магнітопровід *1* є спільними для індукційного й електромагнітного елементів. Крім них, у магнітне коло електромагнітного елемента входять якор *14* і ярмо *15*. Ліва половина якоря з коромислом *11* має більшу вагу й у вихідному положенні якор повернутий проти годинникової стрілки. Права частина якоря при цьому впирається в регульовальний гвинт *13*, який змінює положення упору *12* якоря *14*. Електромагнітний елемент миттєвої дії забезпечує відсічку при великих

кратностях струму. Кратність струму відсічки по відношенню до струму спрацьовування регулюється зміною повітряного зазору за допомогою гвинта 13. Струм спрацьовування реле регулюється шляхом змінювання кількості витків секціонованої обмотки.

Залежність витримки часу від струму в обмотці реле називається часовою або захисною характеристикою (рис. 13.2). При протіканні в обмотці реле струму, більшого, ніж струм спрацьовування, але меншого, ніж струм відсічки, індукційний елемент спрацьовує з певною витримкою часу. Якщо струм в обмотці значно перевищить величину струму спрацьовування (від 2 до 8 разів), відбудеться миттєве спрацьовування електромагнітного елемента. Отже, дія розглянутого реле забезпечується спільною роботою індукційного й електромагнітного елементів.

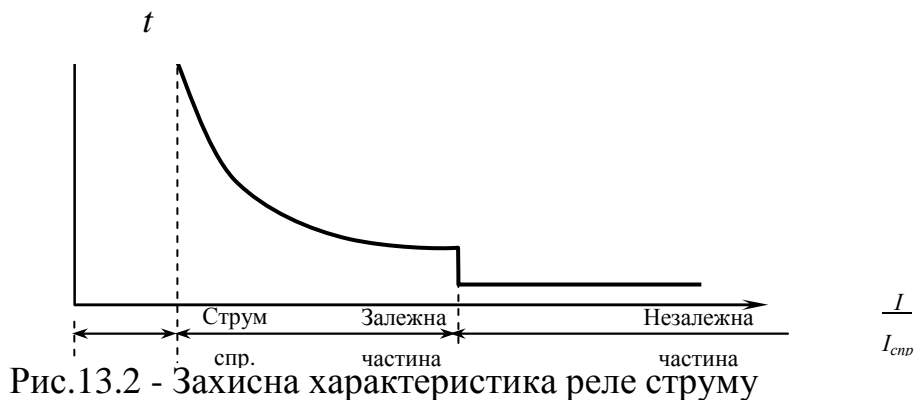


Рис.13.2 - Захисна характеристика реле струму

Індукційний елемент забезпечує залежну частину захисної характеристики (рис. 13.1), а електромагнітний – незалежну.

Змінюючи витримку часу, можна отримати сім'ю захисних характеристик, які при зміні струму спрацьовування не змінюються. Це пояснюється тим, що, наприклад, збільшення струму спрацьовування досягається зменшенням кількості витків, а отже, намагнічувальна сила залишається незмінною.

При різних струмах спрацьовування, але при одних і тих же кратностях часу спрацьовування характеристика реле буде визначатись тільки витримкою часу. При протіканні струму струмоведучі частини електрообладнання будуть нагріватись. Кількість тепла, що виділяється при цьому, а отже, нагрівання визначається звичайно величиною квадрата струму. Перевантажувальна характеристика ряду електрообладнання має приблизно такий же вигляд, що й залежна частина захисної характеристики реле (рис. 13.2).

Індукційні реле струму широко застосовуються для захисту електрообладнання від перевантажень і коротких замикань, тому що захисна характеристика реле легко узгоджується з перевантажувальною характеристикою об'єкта, який захищається.

Наша промисловість випускає індукційні реле РТ-81, РТ-82, РТ-83, РТ-84, РТ-85, РТ-86, РТ-91 і РТ-95, які відрізняються одне від одного в основному межами регулювання струмів спрацьовування і витримки часу.

### 13.2 Індукційне реле потужності

Розрізняють індукційні реле та реле напряду потужності. Конструктивно

обидва ці реле максимальної потужності, вони мають дві обмотки, одна з яких живиться напругою  $U_p$ , а інша – струмом  $I_p$ . За конструкцією рухомої системи реле потужності виконуються з диском із циліндричним ротором.

Реле максимальної потужності застосовуються відносно рідко в спеціальних схемах захистів і автоматики. Реле напрямку потужності є чутливим елементом, що реагує на величину та знак потужності й застосовується в схемах направлених захистів. Такі реле забезпечують селективний захист мереж з двостороннім живленням і кільцевих (замкнених) мереж навіть з одним джерелом живлення.

Реле напрямку потужності повинні бути високочутливими, тому що при короткому замиканні поблизу місця установки захисту напруга різко знижується, у результаті цього потужність, що підводиться до реле, виявляється дуже малою та при недостатній чутливості реле може не спрацювати.

Чутливість реле оцінюється мінімальною потужністю, за якої воно спрацює. Виготовляються реле напрямку потужності з мінімальним часом спрацювання, завдяки чому вони можуть застосовуватись у схемах швидкодіючих захистів.

Вітчизняною електропромисловістю випускаються швидкодіючі індукційні реле напрямку потужності серій ІМБ та РМБ з циліндричним ротором (барабанчиком). Конструктивно реле цих типів мають невеликі відмінності. Реле має замкнутий магнітопровід  $1$  з чотирма виступаючими всередину полюсами (рис. 13.3). Для зменшення магнітного опору міжполюсного простору між полюсами розташоване нерухоме стальне осердя  $2$ . Між полюсами та сталеним осердям виникає рівномірний зазор  $1 - 2$  мм.

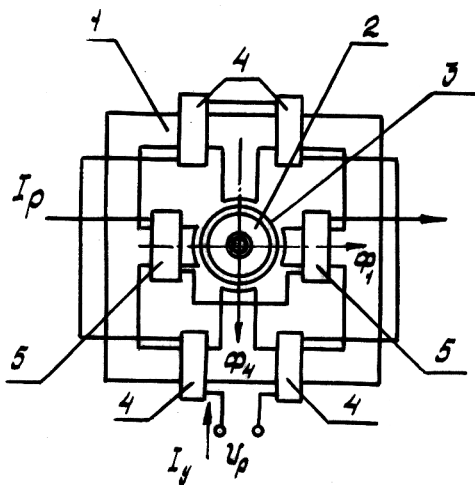


Рис. 13.3 - Індукційні реле потужності

У зазорі розташований алюмінієвий ротор (барабанчик)  $3$ , який укріплений на осі. Величина повітряного зазору для реле типу ІМБ становить  $2$  мм, а для реле РМБ –  $1$  мм, внаслідок чого реле РМБ виявляється трохи чутливішим.

Магнітні потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_U$  створюються двома обмотками: обмоткою струму і обмоткою напруги. Струмова обмотка реле складається з двох секцій (котушок)  $5$ , які розташовані на протилежних полюсах і з'єднані послідовно. Котушки з'єднані таким чином, що магнітний потік  $\Phi_I$ , який створюється струмом  $I_p$ , пропорційний йому й проходить через одну пару полюсів. Живлення обмотки здійснюється від трансформатора струму, встановленого в колі лінії, яка захищається.

Обмотка напруги реле виготовляється з чотирьох секцій (котушок)  $4$ , з'єднаних послідовно і розташованих на ярмі  $1$ . Таке розташування в порівнянні з розташу-

ванням обмотки на полюсах дозволяє збільшити загальну кількість витків обмотки напруги, а отже, і намагнічувальну силу. Це приводить до збільшення магнітного потоку і підвищення чутливості реле. Живлення обмотки напруги здійснюється від трансформатора напруги, встановленого на лінії, яка захищається. Котушки обмотки напруги з'єднані між собою таким чином, що магнітні потоки від них проходять через іншу пару полюсів і створюють спільний потік  $\Phi_U$ , пропорційний напрузі  $U_p$ .

Таким чином, струми, що проходять по обмотці реле, створюють магнітні потоки, зсунуті в просторі на  $90^\circ$  за рахунок розташування обмоток і відповідного з'єднання секцій. По фазі магнітні потоки зсунуті на деякий кут  $\varphi$ .

Векторна діаграма потоків  $\Phi_I$  і  $\Phi_U$  зображена на рис. 13.4. За вихідний для її побудови приймається вектор  $U_p$ . Струм  $I_U$ , що викликається напругою  $U_p$ , зсунутий відносно неї по фазі на кут  $\alpha$ , який визначається співвідношенням активного і реактивного опорів обмотки напруги. Цей кут називається кутом внутрішнього зсуву реле. Струм  $I_p$ , що протікає по струмовій обмотці, зсунутий відносно напруги  $U_p$  на кут  $\varphi_p$ , який залежить від зовнішніх параметрів мережі та схеми приєднання реле. Потоки  $\Phi_I$  і  $\Phi_U$  на діаграмі зображені збіжними із струмами  $I_p$  і  $I_U$ , тому що кути втрат малі й ними можна знехтувати. Кут зсуву між потоками змінюється із зміною кута  $\varphi_p$  і дорівнює

$$\psi = \alpha - \varphi_p \quad (13.5)$$

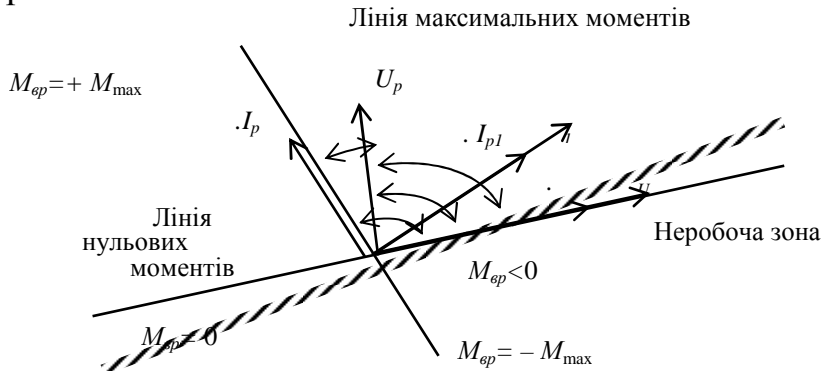


Рис. 13.4 - Векторна діаграма реле потужності при  $\alpha > 0$

Магнітні потоки  $\Phi_I$  і  $\Phi_U$  пронизують циліндричний ротор і наводять в ньому вихрові струми. За рахунок взаємодії магнітних потоків з індукованими вихровими струмами створюється обертальний момент, який визначається виразом

$$M_{ep} = K' \Phi_I \Phi_U \sin \psi \quad (13.6)$$

За відсутності насичення магнітної системи потік  $\Phi_I$  можна замінити через струм  $I_p$ , а потік  $\Phi_U$  – через напругу  $U_p$ . Враховуючи вираз (13.5), одержимо

$$M_{ep} = K' U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p) = K S \sin(\alpha - \varphi_p) \quad (13.7)$$

де  $S$  – потужність, яка підведена до реле.

З виразу (7.9) витікає таке:

- обертальний момент пропорційний потужності на затискачах реле;
- знак моменту визначається знаком  $\sin(\alpha - \varphi_p)$  і залежить від знака кута  $\varphi_p$ . За позитивний напрямок моменту прийнята дія на замикання контактів.

Реле не діє ( $M_{ep} = 0$ ), коли немає напруги або струму (реле напрямку потужності) або  $\alpha - \varphi_p = 0$  і  $\alpha - \varphi_p = 180^\circ$ .

У залежності від значення кута внутрішнього зсуву реле  $\alpha$  визначають три



типи реле напрямку потужності:

1) реле активної потужності (косинусне реле) при  $\alpha = 90^\circ$ :

$$M_{ep} = KU_p I_p \cos \varphi_p ;$$

2) реле реактивної потужності (синусне реле) при  $\alpha = 0$ :

$$M_{ep} = -KU_p I_p \sin \varphi_p ;$$

3) реле змішаного типу при  $0 < \alpha < 90^\circ$ . Такі реле реагують як на активну, так і на реактивну потужність; для них

$$M_{ep} = KU_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p)$$

На рис. 13.4 наведена векторна діаграма для реле змішаного типу, з якої виходить, що якщо  $\alpha - \varphi_p = 90^\circ$ , тобто коли вектор струму  $I_p$  випереджує вектор струму  $I_U$  на кут  $90^\circ$  при одних і тих же значеннях струму й напруги, то обертальний момент реле найбільший (напрямок вектора струму  $I_p$  для даного випадку показаний пунктиром):

$$M_{ep} = KU_p I_p \sin 90^\circ = M_{ep \max}$$

Кут  $\varphi_p$ , за якого створюється максимальний обертальний момент, називається кутом максимальної чутливості й позначається  $\varphi_{pMЧ}$ , а лінія, що проходить під цим кутом по відношенню до вектора напруги, називається лінією максимальних моментів.

Величина кута  $\alpha$  визначається тільки параметрами кола обмотки напруги і для кожного типу є незмінною. Тоді в залежності від положення вектора  $I_p$  по відношенню до вектора  $U_p$  створюються дві зони – робоча та неробоча, які характеризуються позитивними і негативними значеннями моменту.

При кутах  $\psi = 0$  і  $\psi = 180^\circ$  (рис. 13.4), як виходить з виразу (13.7), величина обертального моменту виявляється рівною нулю:

$$M_{об} = K' \Phi_2 \Phi_U \sin \psi = 0$$

Тому лінія зміни знака моменту називається лінією нульових моментів.

Вітчизняною промисловістю серійно виготовляються індукційні реле напрямку потужності змішаного типу з кутами внутрішнього зсуву  $\alpha > 0$  і  $\alpha < 0$ . У другому випадку для забезпечення від'ємного кута  $\alpha$  в коло обмотки напруги включається ємність. Вираз обертового моменту таких реле має вигляд

$$M_{ep} = KU_p I_p \sin(\varphi_p - \alpha)$$

Векторна діаграма реле з кутом  $\alpha < 0$  зображена на рис. 13.5. Суттєвою є можливість появи самоходу. Самоходом називається явище, за якого реле спрацьовує за наявності живлення тільки однієї обмотки. Розрізняють самохід від струму та від напруги. У цьому разі реле працює як реле струму або як реле напруги. Причиною самоходу є асиметрія магнітної системи. При ідеально виготовленому реле, коли величина повітряного зазору між усіма полюсами та осердям однакова і осердя розташоване точно в центрі, магнітна система симетрична та самоходу немає.

Усунення самоходу здійснюється поворотом сталюого осердя, на якому передбачений зріз для вирівнювання магнітних опорів повітряних зазорів полюсами навколо його осі.

Основними характеристиками індукційного реле напрямку потужності є кутова характеристика і характеристика чутливості.

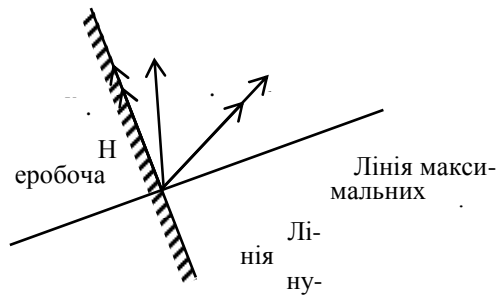


Рис. 13.5 - Векторна діаграма реле потужності при  $\alpha < 0$

Кутова характеристика – це залежність

$$U_{cn} = f(\varphi_p)$$

при незмінному значенні струму  $I_p = \text{const}$ , де  $U_{cn}$  – мінімальна напруга, що підводиться до обмотки напруги, при цьому реле спрацьовує. Ця залежність для реле з  $\alpha < 0$  може бути отримана з виразу

$$M_{ep} = KU_{cn} I_p \sin(\varphi_p - \alpha) = KS_{cn},$$

звідки

$$U_{cn} = \frac{S_{cn}}{I_p} \sin(\varphi_p - \alpha),$$

де  $S_{cn}$  – потужність спрацьовування.

На рис. 13.6 показана кутова характеристика реле змішаного типу, в якого кут внутрішнього зсуву  $\alpha > 0$ .

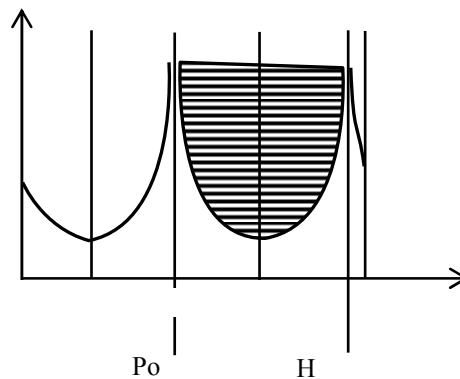


Рис. 13.6 - Кутова характеристика

Кутова характеристика дозволяє визначити:

- зміну чутливості реле ( $U_{cn}$ ) при різних значеннях кута  $\varphi_p$ ;
- мінімальну величину напруги спрацьовування  $U_{cn \text{ min}}$  (при заданому струмі) і найбільш вигідну зону кутів  $\varphi_p$ , на границях якої напруга спрацьовування близька до мінімальної;
- кут максимальної чутливості реле  $\varphi_{pMЧ}$ ;
- при яких кутах  $\varphi_p$  змінюється знак обертового моменту і границі зон позитивних і негативних моментів.

При перевірках релейного захисту, як правило, користуються характеристикою, подібною характеристикам, зображеним на рис. 13.4 і 13.5. Для її побудови не

потрібно вимірювати напругу спрацьовування, а достатньо лише визначити кути зміни знаків моменту обертання. Крім того, на цій характеристиці більш наочно виділяється робоча й неробоча зони реле і вона зручно суміщається з векторними діаграмами струмів і напруг.

Знак оберտального моменту реле залежить від відносного напрямку струмів  $I_p$  і  $I_U$  в його обмотках. Реле напрямку потужності виготовляється так, що при однаковому напрямку струмів в обмотках напруги і струму обертальний момент діє на замикання контактів. Початок обмотки заводом-виготовлювачем позначається зірочкою на схемі реле.

Чутливість реле характеризується величиною потужності, за якої воно спрацьовує. У сучасних індукційних реле потужність спрацьовування розташовується в границях

$$S_{cn} = (5 \dots 20) \text{ ВА.}$$

Чутливість реле прийнято зображати вольт-амперною характеристикою  $S_{cn} = f(I_p)$  при незмінному куті  $\varphi_p = \text{const}$ , що дорівнює куту максимальної чутливості реле  $\varphi_{pMЧ}$  (рис. 13.7), де  $U_{cn}$  – найменша напруга, необхідна для спрацьовування реле при даних значеннях струму й кута.

Залежність  $S_{cn} = f(I_p)$  може бути одержана з виразу обертального моменту. При куті максимальної чутливості  $\sin(\alpha - \varphi_{pMЧ}) = 1$ . Тоді

$$M_{ep} = KU_{cn}I_p = KS_{cn};$$

$$U_{cn} = \frac{S}{K}.$$

З одержаного виразу витікає, що теоретично характеристика чутливості зображається гіперболою. В дійсності за рахунок насичення сталі магнітопроводу при великих струмах мають місце зони нечутливості (мертві зони) (рис. 13.7). При коротких замиканнях поблизу місця установки реле напруга різко падає. Якщо напруга буде меншою за деяке мінімальне значення  $U_p < U_{cn \text{ min}}$ , реле не спрацьовує.

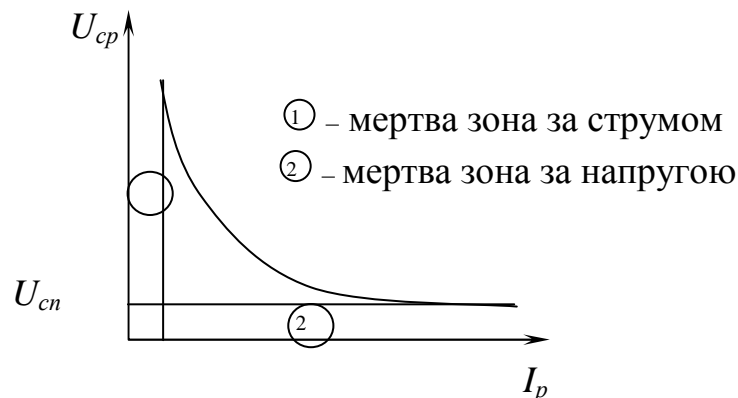


Рис. 13.7 - Характеристика чутливості

Маючи характеристику чутливості реле, можна визначити напругу спрацьовування і обчислити зону, в границях якої реле не буде діяти внаслідок недостатньої величини напруги та струму, тобто мертву зону за напругою та струмом.

## ЛЕКЦІЯ 14. МАСЛЯНІ ВИМИКАЧІ

Вимикачі з оливним гасінням електричної дуги розділяються на дві великі групи – вимикачі з великим об'ємом оливи – бакові, та вимикачі з малим об'ємом оливи – малооливні або малооб'ємні.

### 14.1 Оливні бакові вимикачі

В оливних бакових вимикачах олива служить для гасіння дуги і ізоляції струмоведучих частин.

При напрузі до 10кВ (в деяких типах вимикачів до 35кВ) вимикач має один бак, в якому знаходяться контакти всіх трьох фаз, при більшій напрузі для кожної фази передбачено свій бак.

На рис.14.1 схематично показаний баковий вимикач без спеціальних пристроїв для гасіння дуги.

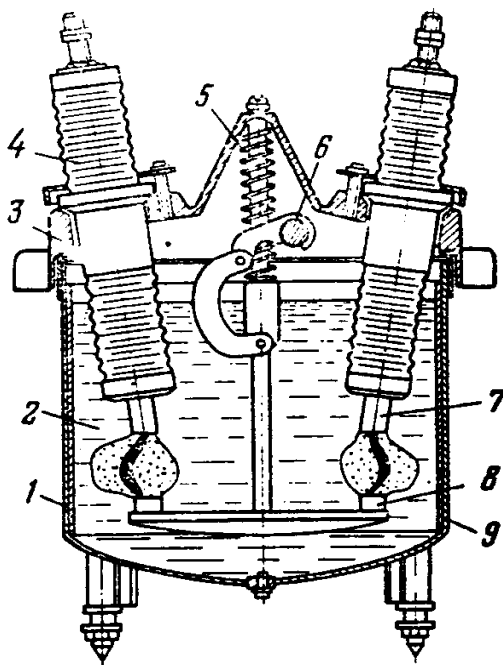


Рис. 14.1 - Схематичний переріз оливного бакового вимикача

Стальний бак вимикача підвішаний до відлітої чавунної кришки 3 за допомогою болтів. Через кришку проходять шість фарфорових ізоляторів 4, на нижніх кінцях струмоведучих стержнів закріплено нерухомо контакти 7. Рухомі контакти 8 знаходяться на контактному мості або траверсі. Рух їм передається за допомогою ізолювальної тяги від приводного механізму, який знаходиться під кришкою вимикача. У ввімкненому стані траверса піднята і контактний міст замикає коло між нерухомими контактами. При цьому вимикаюча пружина 5 стиснута. Вимикач у ввімкненому стані утримується задвижкою привода, з яким він зв'язаний валом 6.

При вимиканні вимикача автоматично або вручну звільнюється заціпка і під дією пружини траверса швидко опускається вниз (швидкість руху досягає 1,5-2,7 м/с), при цьому виникає розрив кола в двох точках на кожному полюсі вимикача. Дуги, які виникають, нагрівають і випаровують оливу 2, виникає газопаровий шар, який вміщує до 70% водню. Тиск всередині шару досягає 0,5–1 МПа, що підвищує

деіонізуючу здатність газів. Дуга гасне через 0,08–0,1с. На стінках бака є захисні ізоляційні покриття 9.

Як показано на рис. 2.1, олива в бак вимикача заливається не повністю, під кришкою залишається повітряна подушка. Це необхідно, щоб зменшити силу удару в кришку вимикача, зумовлену високим тиском, який виникає в процесі гасіння дуги.

Якщо рівень оливи буде неприпустимо низьким, то газу попадуть під кришку надто нагрітими, що може викликати вибух суміші водню з повітрям.

В вимикачі на рис. 14.1 немає ніяких спеціальних пристроїв для гасіння дуги, тому вимикальна здатність його невелика. Вимикачі такої конструкції (ВМБ-10, ВМЕ-6, ВМЕ-10, ВС-10) використовуються в установках 6-10кВ, але в наш час вони витісняються малооливними вимикачами.

Для зовнішніх установок напругою 35 кВ і вище бакові оливні вимикачі завдяки простоті конструкції використовуються достатньо широко і в наш час. Вони мають спеціальні пристрої для гасіння дуги – дугогасильні камери.

За принципом дії дугогасильні пристрої можна розділити на 3 групи:

- з автодутьям, в яких високий тиск і велика швидкість руху газу в зоні дуги утворюються за рахунок виділеної в дузі енергії;
- з примусовим оливним дутьям, в яких до місця розриву дуги олива подається за допомогою спеціальних гідравлічних механізмів;
- з магнітним гасінням в оливі, в яких дуга під дією магнітного поля переміщається в вузькі канали і щілини.

Найбільш ефективним і простим є дугогасильний пристрій з автодутьям. Пристрої з автодутьям працюють тим ефективніше, чим більший струм у дузі. При відключенні малих струмів тиск газів може бути незначним, внаслідок чого дуття буде неенергійним, що приведе до збільшення часу гасіння дуги. З цієї причини деякі гасильні пристрої з автодутьям доповнені примусовим оливним дутьям, яке забезпечує ефективне гасіння малих струмів.

Дугогасильні пристрої у вигляді жорстких камер закріплюються на нижньому кінці струмоведучого стержня вводу високої напруги (див. рис. 14.3). В деяких вимикачах дугогасильна камера закріплюється на нижній частині штанги (рис.14.2). В камері може бути один або декілька розривів в залежності від номінальної напруги вимикача.

Чим вища напруга, тим більше необхідно розривів. Для рівномірного розподілу напруги між основними розривами паралельно до них вмикається шунтувальний опір. Після гасіння дуги на основних розривах струм, який проходить через шунтувальний опір, гаситься на допоміжних розривах, звичайно поза камерою.

В дугогасильних пристроях за допомогою ізоляційних пластин і вихлопних щілин утворюються робочі канали, по яких відбувається рух оливи і газів (дуття). В залежності від розміщення каналів розрізняють камери з поперечним, з повздовжнім і зустрічно-поперечним дутьям.

В бакових вимикачах на 35 кВ типу С-35-630-10 на кожний полюс є одна дворозривна рухома камера. Кожний полюс зібраний на масивній чавунній кришці (рис.14.2,а). До кришки підвішується бак, внутрішні стінки якого ізолювані електрокартоном. Під кришкою встановлений привідний механізм з системою важелів, які забезпечують прямолінійний рух штанги. Механізми всіх трьох полюсів

з'єднані тягами між собою із приводом вимикача. Через отвір в кришках пропущені вводи, на кінцях яких закріплені нерухомі Г-подібні контакти з металокерамічними напайками. На кожному вводі під кришкою встановлений влаштований трансформатор струму. До нижньої частини штанги, яка виконана з ізолювального матеріалу, прикріплена дугогасильна камера, що складається з двох корпусів, з'єднаних стяжними болтами.

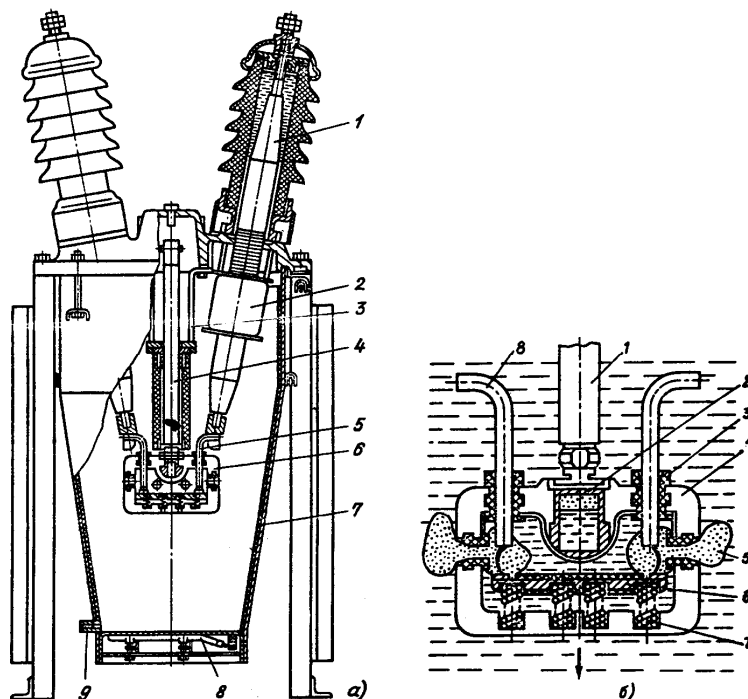


Рис. 14.2 - Вимикач баковий оливний С-35-630-10:

*а* – переріз полюса: 1 – ввід; 2 – трансформатор струму; 3 – корпус приводного механізму; 4 – штанга; 5 – нерухомий контакт; 6 – дугогасильна камера; 7 – внутрішньобакова ізоляція; 8 – нагрівальний пристрій; 9 – оливоспускний пристрій;  
*б* – дугогасильна камера в процесі вимикання: 1 – штанга; 2 – металева камера з повітряною подушкою; 3,5 – вихлопні отвори; 4 – дугогасильна камера; 6 – рухомий контакт; 7 – контактні пружини; 8 – нерухомий контакт.

На рис. 14.2,*б* показано корпус дугогасильної камери. Внутрішня поверхня камери покрита дугостійким ізоляційним матеріалом. В камері встановлено рухомий контакт у вигляді перемички, яка опирається на чотири контактні пружини 7. В місцях дотику до нерухомого контакту 8 напаяні металокерамічні пластинки. При підключенні штанги 1 опускається вниз разом з камерою 4, в результаті чого виникає два розриви і загоряється дуга в камері (рис. 14.2,*б*). Тиск в камері різко підвищується, і як тільки відкриваються вихлопні отвори 5, виникає поперечне дуття. При відключенні великих струмів це дуття енергійне, і дуга гасне. При відключенні малих струмів, після виходу нерухомих контактів із камери через вихлопні отвори 9, виникає поздовжнє дуття, яке забезпечує гасіння дуги. В дугогасильному пристрої є повітряна подушка — невелика металева камера 2, яка заповнена повітрям і зв'язана з основним об'ємом дугогасильної камери, заповненої оливою. В поздовжньому розрізі камери каналів, по яких здійснюється цей зв'язок, не видно. В перший момент запалення дуги, коли тиск різко підвищується, частина оливи стискує повітря, це



Вимикач працює за двоступеневим циклом: спочатку розмикаються контакти дугогасильних камер, відбувається гасіння дуг і переривається коло основного струму, потім у відкритому розриві контактів траверси 3 і контактів дугогасильних камер переривається струм, що тече через шунти. Траверса 3 приводиться в рух ізолювальною тягою 5, зв'язаною з приводним механізмом 8.

На дні бака встановлено кригоуловлювальний пристрій 1, який запобігає процесу спливання замерзлого конденсату. Для нагріву оливи при низьких температурах до дна кріпиться пристрій електропідігріву 10, який вмикається при температурі повітря нижчій  $-15^{\circ}\text{C}$ . Це необхідно, щоб не знижувалась швидкість переміщення рухомих частин вимикача при збільшенні в'язкості оливи.

У вимикачі серії У-220 на три полюси маса оливи становить 27000 кг.

Основні переваги бакових вимикачів:

- простота конструкції;
- висока вимикальна здатність;
- придатність для зовнішнього установа;ння;
- можливість встановлення влаштованих трансформаторів струму.

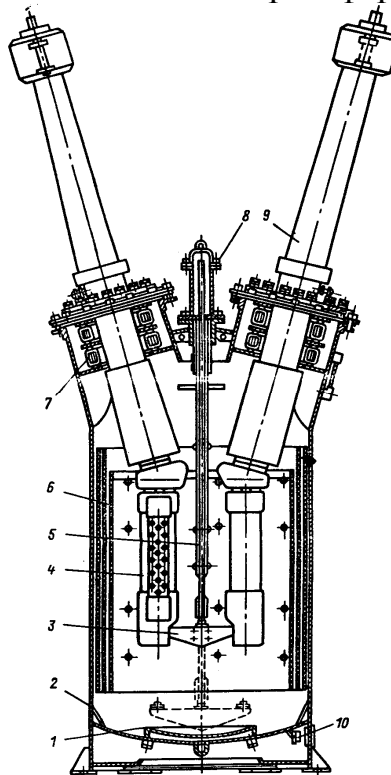


Рис. 14.4 - Поліус оливного бакового вимикача У-220-2000-40У1

Недоліки бакових вимикачів:

- вибухо- і пожежонебезпека;
- необхідність періодичного контролю за станом і рівнем оливи;
- великий об'єм оливи;
- необхідність великих запасів оливи;
- непридатність до розміщення всередині приміщень;
- непридатність для виконання швидкодіючого АПУ;
- велика затрата металу;



- велика маса;
- незручність транспортування, монтажу і наладки.

Переважним застосуванням бакових оливних вимикачів є розподільчі мережі напругою 35 кВ та 110-220 кВ, де їх останнім часом поступово витісняють нові типи елегазових вимикачів.

## 14.2 Оливні малооб'ємні вимикачі розподільних установок

Оливні малооб'ємні (малооливні) вимикачі знайшли використання в закритих і відкритих розподільних пристроях всіх класів напруг. Олива в цих вимикачах в основному служить в ролі дугогасильного середовища і тільки частково ізоляцією між розімкненими контактами. Ізоляція струмоведучих частин між собою і від заземлених конструкцій здійснюється фарфором або іншими твердими ізоляційними матеріалами.

Контакти вимикачів внутрішньої установки знаходяться в сталевому баку (горшку), звідки й пішла одна із назв вимикачів - "горшкові". Малооливні вимикачі напругою 35 кВ і вище мають фарфоровий корпус. Найбільш широке застосування мають вимикачі 6-10 кВ підвісного типу (рис. 14.5, а, б). В цих вимикачах корпус закріплений на фарфорових ізоляторах на загальній рамі для всіх трьох полюсів.

За конструктивною схемою, показаною на рис.14.5 а, виготовляють вимикачі типу ВМГ-10 (вимикач оливний горшковий) і типу ВМП-10, а раніше виготовлялися вимикачі ВМГ-133. За конструктивною схемою, наведеною на рис. 14.5, б, виготовляються вимикачі серії ВМП (вимикач малооливний підвісний).

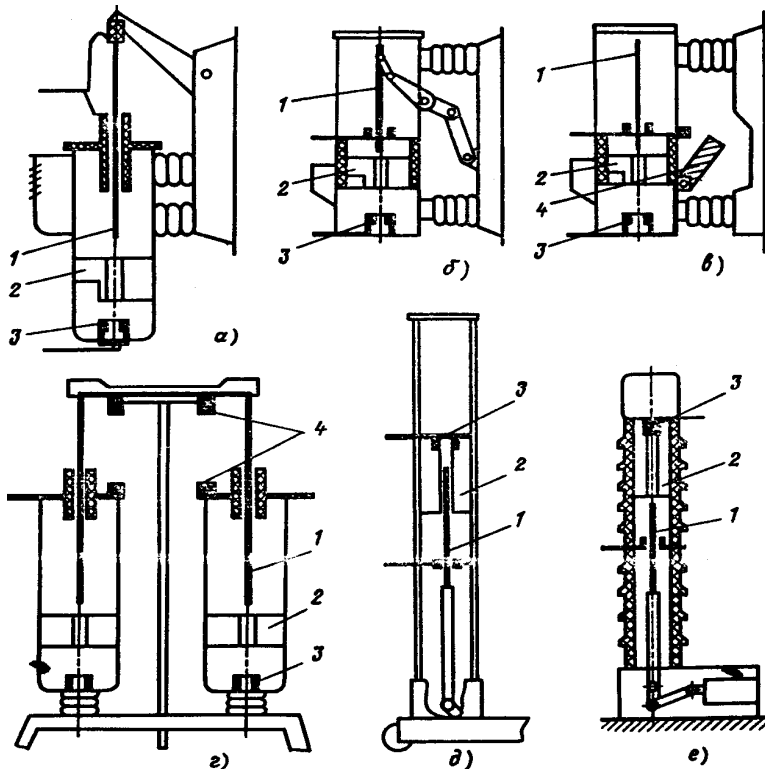


Рис. 14.5 - Конструктивні схеми малооливних вимикачів: 1 – рухомий контакт; 2 – дугогасильна камера; 3 – нерухомий контакт; 4 – робочі контакти

При значних номінальних струмах обійтись однією парою контактів (які виконують роль робочих і дугогасильних) важко, тому передбачено робочі контакти зовні вимикача, а дугогасильні — всередині металевого бачка (рис. 14.5, в). При великих струмах, які вимикаються, на кожний полюс передбачено два дугогасильних розрива (рис. 14.5, з). За такою схемою виконуються вимикачі серій МГТ і МГ (оливні генераторні) на напругу до 20 кВ включно. Масивні зовнішні робочі контакти 4 дозволяють використовувати вимикач при вимиканні значних номінальних струмів (до 12000 А).

Спеціально для комплектних розподільних пристроїв (КРП) розроблені колонкові малооливні вимикачі серії ВК за схемою рис. 14.5, д.

Для установок 35 кВ і вище, корпус колонкових малооливних вимикачів фарфоровий, заповнений оливою (рис. 14.5, е). У вимикачах напругою 35 кВ та 110 кВ передбачений один розрив на фазу, при більш високих напругах — два і більше розривів в одній фазі.

Розглянемо особливості конструкцій деяких найбільш поширених малооливних вимикачів.

Вимикачі серії ВМП широко застосовуються в закритих (ЗРП) і комплексних (КРП) розподільних пристроях напругою 6-10 кВ. Вимикачі КРП мають влаштований пружинний або електромагнітний привод (типи вимикачів ВМПП і ВМПЕ). Вимикачі цих серій розраховані на номінальні струми 630-3150 А і струми вимкнення 20 та 31,5 кА.

На рис. 14.6 показано загальний вигляд вимикача ВМПЕ-10 на номінальні струми 2500 і 3150 А.

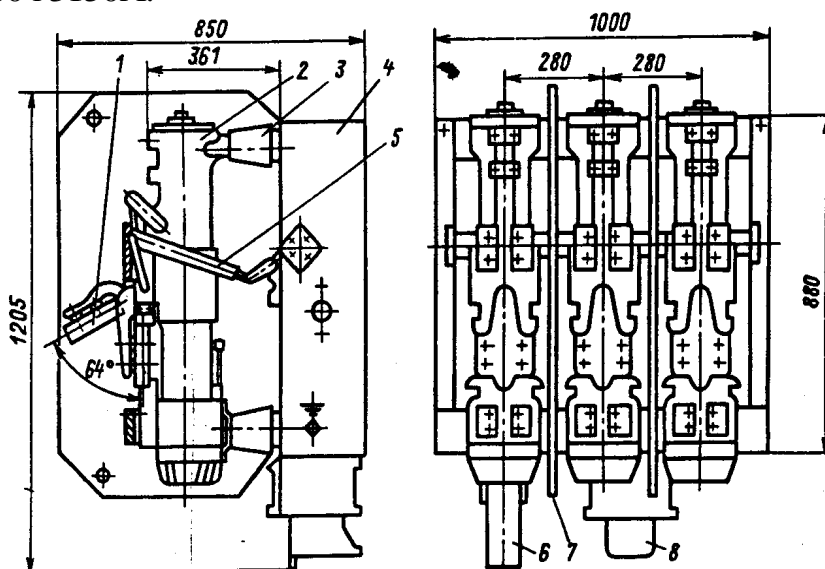


Рис. 14.6 - Загальний вигляд вимикача ВМПЭ-10 на номінальні струми 2500 і 3150 А:

1 – робочий рухомий контакт; 2 – корпус вимикача; 3 – ізолятор; 4 – сталевая рама; 5 – ізоляційна тяга; 6 – контактор; 7 – ізоляційна перегородка; 8 – привод

Цей вимикач має два паралельних контури струму – робочий та дугогасильний. Робочі контакти 1 знаходяться зовні, дугогасильні – всередині корпусу. Внутрішня будова полюса для вимикачів усієї серії однакова. Кількість

оливи в вимикачах на струми 630-1600 А – 5,5 кг, в вимикачах на 3150А - 8 кг.

Полнос вимикача на рис. 14.7 це є вологостійкий ізоляційний циліндр 5 (скло-епоксидний пластик), торці якого армуються металевими фланцями. На верхньому фланці ізоляційного циліндра закріплений корпус з алюмінієвого сплаву, всередині якого знаходиться приводний випрямляючий механізм, рухомий контактний стержень, роликострумознімальний пристрій і олиовідділювач. Нижній фланець із силуміну закривається кришкою, всередині якого вмонтований розетковий контакт, а зовні - пробка для зливу оливи. Всередині циліндра над розетковим контактом є гасильна камера, зібрана із ізоляційних пластин з фігурними отворами. Набір пластин створює три поперечних канали і оливні кармани. У ввімкненому положенні контактний стержень знаходиться в розетковому контакті (рис. 14.7, б). При вимиканні привод звільнює вимикальну пружину, яка знаходиться на рамі вимикача, і під дією її сили вал вимикача повертається, рух передається ізоляційній тязі, а від неї приводному механізму 10 і контактному стержню, який рухається вгору. При розмиканні контактів виникає дуга, яка випаровує і розкладає оливу.

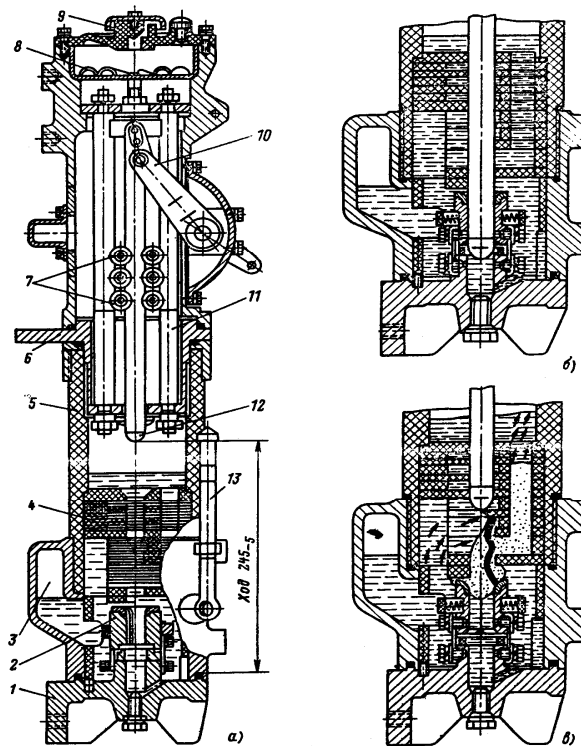


Рис. 14.7 - Переріз полюсу вимикача ВМП-10:

- а* – положення “Вимкнено”; *б* – положення “Увімкнено”; *в* – процес вимикання;  
 1 – нижній вивід і кришка вимикача; 2 – нерухомі контакти; 3 – повітряна подушка;  
 4 – гасильна камера; 5 – ізоляційний циліндр; 6 – верхній вивід; 7 – роликострумознімальний контакт; 8 – олиовідділювальний пристрій; 9 – кришка;  
 10 – приводний механізм; 11 – направляючий стержень; 12 – рухомий контакт;  
 13 – оливопоказник

В перші моменти контактний стержень закриває поперечний канал дугогасильної камери, тому тиск різко підвищується, частина оливи заповнює буферний об’єм, стискуючи в ньому повітря. Як тільки стержень відкрив перший поперечний

канал, створюється поперечне дуття газами і парами оливи. При переході струму через нуль, тиск в газопаровому пазирі знижується і стиснене повітря буферного об'єму, що діє подібно до поршня, витісняє оливу в зону гасіння дуги (рис.14.7, в).

При вимиканні великих струмів виникає енергійне поперечне дуття, дуга гасне в нижній частині камери. При вимкненні малих струмів дуга тягнеться за стержнем, і у верхній частині камери випаровується олива в спеціальних карманах, створюючи зустрічно-радіальне дуття, а потім при виході стержня із камери — повздовжнє дуття. Час гасіння дуги при вимкненні великих і малих струмів не перевищує 0,015-0,025 с.

Для підвищення стійкості контактів до дії електричної дуги і збільшення терміну їх роботи знімальний наконечник рухомого контакту та верхні торці ламелів нерухомого контакту виконуються з дугостійкої металокераміки.

Після гасіння дуги пари і газу, які утворюються в процесі гасіння дуги, потрапляють в верхню частину корпусу вимикача, де пари оливи конденсуються, а газ виходить зовні через отвір в кришці. Коли камера заповниться оливою, вимикач готовий до виконання наступного циклу операцій. Безструмова пауза при АПВ для цих вимикачів досить велика (0,5с).

Контроль за рівнем оливи в циліндрі проводиться за оливопоказувачем. Якість оливи повинна відповідати звичайним вимогам до ізоляційної оливи. Якщо олива буде надто забруднене, а канали камери обвуглені, то може виникнути перекривання ізоляційної відстані між контактами у вимкненому положенні вимикача.

Малооливні вимикачі колонкового типу ВК-10 з пружинним приводом і ВКЕ-10 з електромагнітним приводом (рис. 14.8) використовуються в КРП внутрішньої і зовнішньої установки.



Рис. 14.8 - Загальний вигляд оливного вимикача ВК-10

Вимикач ВКЕ-10 (рис. 14.9) складається із збірної основи 1, на якій встановлені три полюси 3, привод 2, фасадна перегородка 4, а на вимикачах з номінальним струмом 1250 і 1600 А — ізоляційний кожух на верхній частині вимикача.

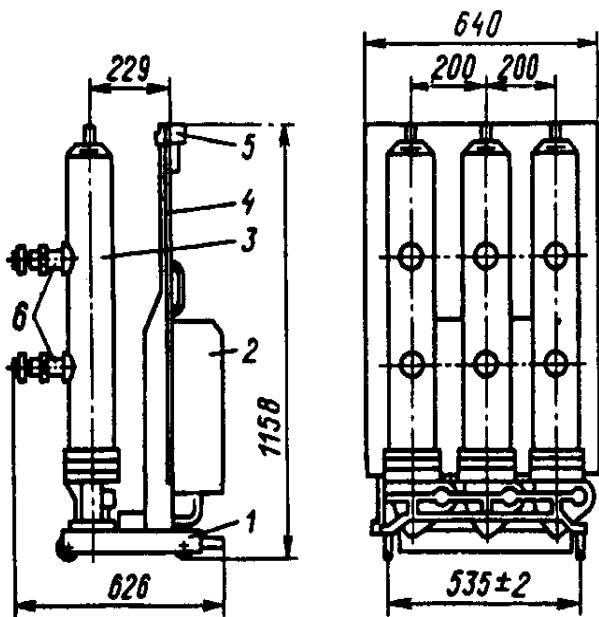


Рис. 14.9 – Конструкція вимикача ВКС-10

Основу вимикача встановлюють на колесах, і вона має пристрій для піднімання шторного механізму в КРП, вкачування та викачування вимикача, його фіксації в крайніх положеннях та стаціонарного заземлення, для встановлення електромагнітних блок-замків та перемикання блокувальних контактів КРП. Полюси вимикача мають штирові виводи первинних з'єднань з розетковими контактами.

Проводи кола управління, сигналізації і блокування розміщені в гнучких металевих рукавах і розпаяні в штепсельні роз'єми 5.

Робота вимикача ґрунтується на гасінні дуги, яка виникає при розмиканні контактів, потоком газооливної суміші, створеної в результаті інтенсивного розкладання трансформаторного оливи, під дією температури дуги. Цей потік має визначений напрямок в спеціальному дугогасильному пристрої, розміщеному в зоні горіння дуги.

Розглянутий вимикач має менші габарити і масу, ніж вимикачі серії ВМП на відповідні параметри, тому він знаходить широке використання в нових типах КРП.

Генераторні вимикачі серій МГГ, МГ і ВГМ виготовляються на великі номінальні струми за конструктивною схемою, показаною на рис. 14.5, з. Вимикачі цих серій мають два сталевих бачки на полюс і по дві пари робочих і дугогасильних контактів. Потужні робочі контакти дозволяють збільшити номінальний струм цих вимикачів, а двоступеневий розрив струму і спеціальні камери гасіння приводять до збільшення вимикальної здатності вимикача.

На рис. 14.10 показано конструкцію вимикача типу ВГМ-20.

Шість бачків цього вимикача кріпляться на ізоляторах до металевої основи 1, всередині якої знаходяться важільний механізм, вимикальні пружини, оливний і пружинні буфери. В кожному бачку є дугогасильні контакти і камера зустрічно-поперечного дугтя. Гази і пари оливи, які утворюються в процесі гасіння дуги, поступають в оливовідділювач 4, заповнений фарфоровими кульками. Олива конденсується і потрапляє назад в бачок, а гази через вихлопний кінець газовідводу 12 викидаються назовні. Шини розподільного пристрою через гнучкі компенсатори приєднуються до виводів коробчатого профілю 7. На крайніх фазах встановлені магнітопроводи 5 із електротехнічної сталі, які забезпечують рівномірний

струморозподіл по контактних системах. Головні контакти (ножі) знаходяться зовні на траверсі 6, і зв'язані ізоляційною штангою 9 з приводним механізмом.

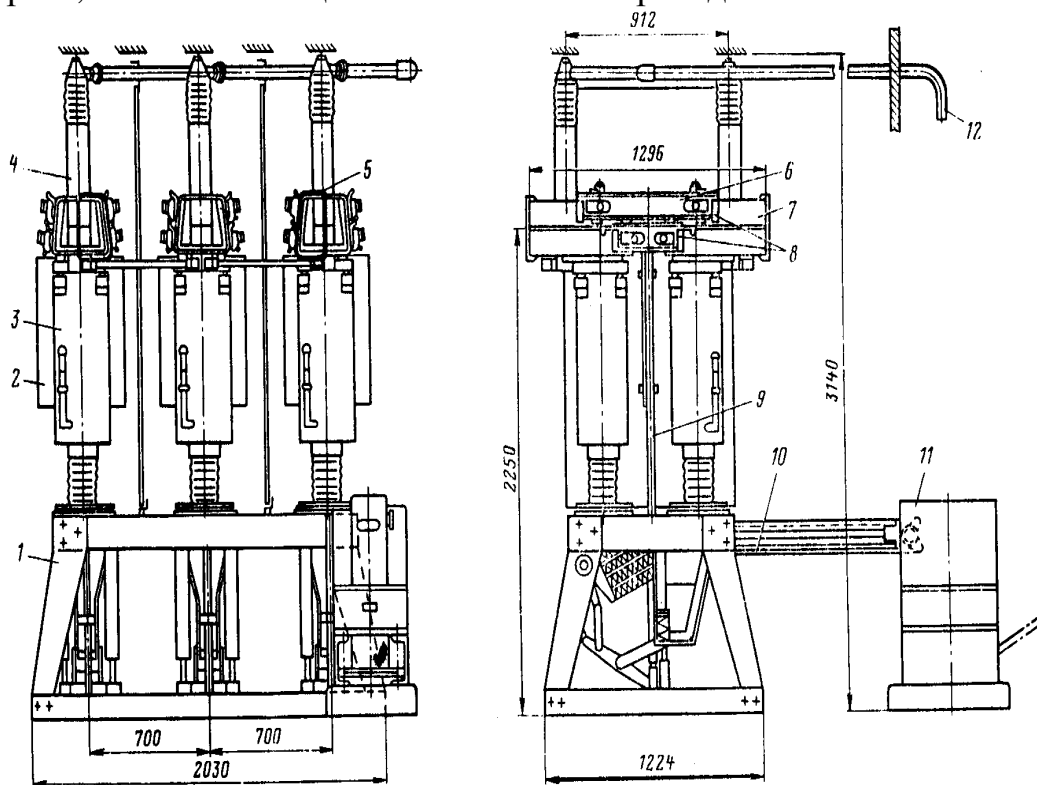


Рис. 14.10 - Вимикач генераторний ВГМ—20/11200УЗ:

1 – основа; 2 – міжполюсна перегородка; 3 – бак; 4 – масловідділювач;  
5 – магнітопровід; 6 – траверса; 7 – вивід для приєднання шин; 8 – ножі  
головних контактів; 9 – штанга; 10 – тяга до приводу; 11 – привод;  
12 – вихлопний кінець газовідводу

У вимикачах цієї серії два контури струму: головний і дугогасильний. Коли вимикач увімкнено, велика частина струму проходить по головному контуру внаслідок меншого опору кола.

При вимкненні вимикача спочатку розмикаються робочі контакти, але дуга між ними не виникає, тому що струм продовжує проходити в дугогасильному контурі. При вмиканні замикаються дугогасильні контакти, а згодом – робочі.

Дугогасильний пристрій (рис. 14.11) складається з трьох відсіків, виконаних з ряду ізоляційних дисків 3 з фасонними вирізами, які закріплені штифтами і шпильками.

На рисунку показані розрізи камери по двох взаємно перпендикулярних площинах. Нижній відсік *H* зібраний з дисків з двома дугтевими і вихлопними отворами в формі сопла (розріз *A-A* на рис. 14.11). Верхній відсік *B* складається з дисків із вирізами, які утворюють кармани 4, в яких знаходиться значна кількість оливи. Цими дисками створюються буферні об'єми 2 і дугтеві канали. Коли всі диски і перегородки між ними зібрані, то створюється два вертикальних канали 5 і дугтеві канали 6, які видно на перерізі рис. 14.11.

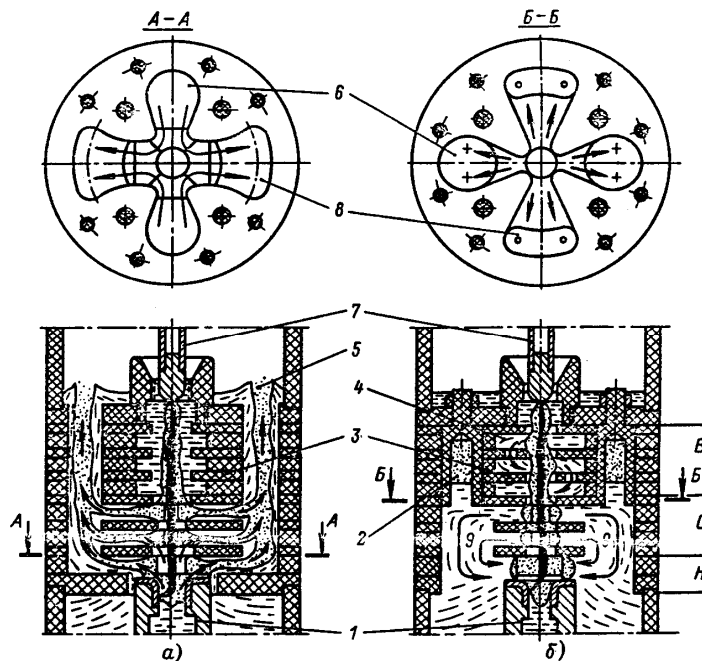


Рис.14.11 - Дугогасильна камера вимикачів МГ-20, ВГМ-20

При вимиканні вимикача під дією потужних пружин, зусилля яких передається через ізоляційну тягу траверсі, контактний стержень 7 виходить з розетки нерухомого контакту 1, і рухається вгору. При розмиканні створюється дуга спочатку в нижньому відсіку, а потім в середньому. Тиск газопарової суміші навколо дуги в середньому відсіку вищий, тому що переріз вихлопних каналів менший, тому створюється оливне дуття з середнього відсіку в нижній по каналам 9 (рис.14.11 б). Одночасно газопарова суміш нижнього відсіку створює дуття в вихлопний канал 8 (рис.14.11 а). Таким чином, напрям дуття оливи в камері зустрічний і поперек стовбурадуги. В місці горіння дуги створюється тиск до 8 МПа, що сприяє інтенсивному дуттю. Для зменшення тиску при вимиканні великих струмів у верхньому відсіку є буферні об'єми 2. При великих і середніх значеннях струмів вимкнення гасіння дуги здійснюється в нижньому і середньому відсіках. При малих струмах гасіння дуги здійснюється в оливних карманах верхнього відсіку. Час горіння дуги в таких вимикачах 0.02-0.05с. Камера зустрічно-поперечного дуття дозволяє вимикати струми КЗ до 105кА.

Для управління вимикачами серії МГ та ВГМ використовуються електромагнітні приводи типів ПС-31, ПЕ-2, ПЕ-21. Загальний вигляд малооливного генераторного вимикача серії МГГ-10 наведено на рис. 14.12.



Рис. 14.12 – Загальний вигляд вимикача серії МГГ-10

### 14.3 Оливні малооб'ємні підстанційні вимикачі

Вимикачі оливні колонкові серії ВМК, ВМУЕ застосовуються в установках 35 кВ. В установках 110 і 220 кВ знаходять застосування вимикачі серії ВМТ (рис.14.13). Три полюси вимикача ВМТ-110 встановлені на загальній основі 4 і керуються пружинним приводом 1. Поліус вимикача це оливонаповнена колона, яка складається з опорного ізолятора 2, дугогасильного пристрою 3, механізму керування 5 і електронагрівальних пристроїв

Дугогасильний пристрій (модуль) складається із струмовідводу 1, зв'язаного через струмознімальні пристрої з рухомим контактом 2, дугогасильної камери 3 зустрічно-поперечного дуття, нерухомого контакту 5. Всі ці елементи знаходяться в пустотілому фарфоровому ізоляторі 4, заповненому трансформаторною оливою і закритому зверху ковпаком 6. Ковпак має манометр для контролю залишкового тиску в дугогасильному пристрої, пристрій для заповнення стисненим газом, випускний автоматичний клапан, показувач рівня оливи 8. В процесі гасіння дуги рівень оливи піднімається, займаючи частково об'єм 7. Всередині опорного ізолятора 2 (рис. 14.13, а) розміщені ізоляційні тяги, які зв'язують рухомий контакт з механізмом управління.

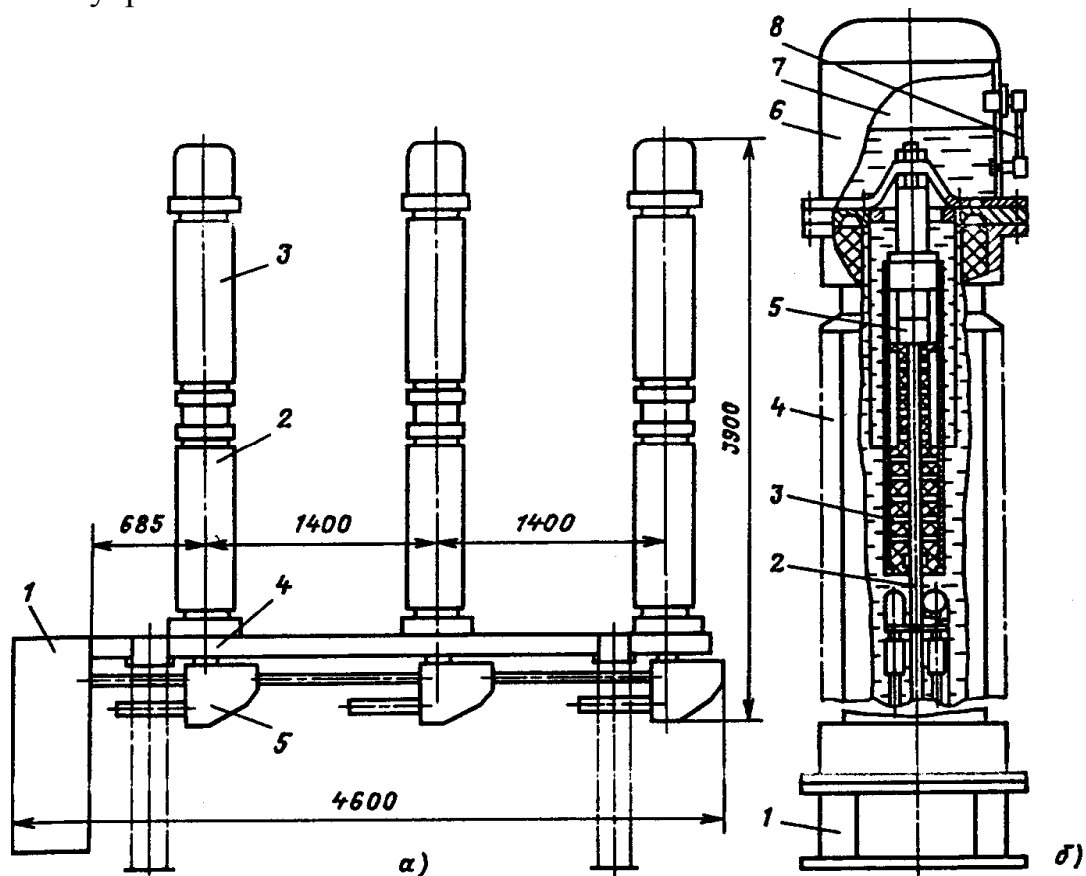


Рис.14.13 - Вимикач малооливний ВМТ-110: а – загальний вигляд; б – дугогасильний модуль

Дугогасильний пристрій (модуль) складається із струмовідводу 1, зв'язаного через струмознімальні пристрої з рухомим контактом 2, дугогасильної камери 3 зустрічно-поперечного дуття, нерухомого контакту 5. Всі ці елементи знаходяться в



пустотілому фарфоровому ізоляторі 4, заповненому трансформаторною оливою і закритому зверху ковпаком 6. Ковпак має манометр для контролю залишкового тиску в дугогасильному пристрої, пристрій для заповнення стисненим газом, випускний автоматичний клапан, показувач рівня оливи 8. В процесі гасіння дуги рівень оливи піднімається, займаючи частково об'єм 7. Всередині опорного ізолятора 2 (рис. 14.13, а) розміщені ізоляційні тяги, які зв'язують рухомий контакт з механізмом управління.

Дугогасильний пристрій (модуль) складається із струмовідводу 1, зв'язаного через струмознімальні пристрої з рухомим контактом 2, дугогасильної камери 3 зустрічно-поперечного дугтя, нерухомого контакту 5. Всі ці елементи знаходяться в пустотілому фарфоровому ізоляторі 4, заповненому трансформаторною оливою і закритому зверху ковпаком 6. Ковпак має манометр для контролю залишкового тиску в дугогасильному пристрої, пристрій для заповнення стисненим газом, випускний автоматичний клапан, показувач рівня оливи 8. В процесі гасіння дуги рівень оливи піднімається, займаючи частково об'єм 7. Всередині опорного ізолятора 2 (рис. 14.13, а) розміщені ізоляційні тяги, які зв'язують рухомий контакт з механізмом управління.

Оливонаповнені колони герметизовані і знаходяться під залишковим тиском газу (азоту або повітря). Залишковий тиск підтримує високу електричну стійкість міжконтактного проміжку, підвищує стійкість контактів, забезпечує надійне відключення як струмів КЗ, так і ємнісних струмів ненавантажених ЛЕП. Залишковий тиск створюється стисненим газом, який подається від балонів або компресора перед вводом вимикача в експлуатацію і зберігається без поновлення до чергової ревізії.

Вимикач типу ВМТ-220 (рис. 14.14) складається з трьох різних полюсів, встановлених на різних рамах. Кожний полюс керується пружинним приводом. Полюс вимикача має дві оливонаповнені колони, на яких встановлені дугогасильні модулі тієї ж конструкції, що і у вимикачі ВМТ-110. Всі деталі ВМТ-220 максимально уніфіковані з вимикачем ВМТ-110, що дозволяє взаємозамінити змінні частини.



Рис. 14.14 – Загальний вигляд малооливого вимикача ВМТ- 220

Конструкції малооливних вимикачів напругою 35 кВ і вище вдосконалювались з метою збільшення величини номінальних струмів і їх вимикальної здатності, але останнім часом в розподільних мережах їх все інтенсивніше витісняють елегазові вимикачі. В світовій практиці малооливні вимикачі виготовляються на напруги до 420 кВ.

Переваги малооливних вимикачів :

- невелика кількість оливи;
- відносно мала маса;
- зручний доступ до дугогасильних контактів;
- можливість створення серії вимикачів на різні напруги з застосуванням уніфікованих вузлів.

Недоліки:

- вибухо- і пожежонебезпека, яка є значно меншою, ніж в бакових оливних вимикачах, але більшою ніж в повітряних;
- неможливість здійснення швидкодіючого АПВ;
- необхідність періодичного контролю та заміни оливи в дугогасильних камерах;
- труднощі при встановленні вмонтованих трансформаторів струму;
- відносно мала вимикальна здатність.

Переважне застосування малооливних вимикачів це закриті розподільні пристрої електростанцій і підстанцій напругою 6, 10, 35 кВ, комплектні розподільні пристрої напругою 6, 10, і 35 кВ та відкриті розподільні пристрої напругою 35, 110 та 220 кВ.

## **ЛЕКЦІЯ 15. ПОВІТРЯНІ ВИМИКАЧІ**

### **15.1 Конструктивні схеми виконання повітряних вимикачів**

Застосування стисненого повітря для гасіння електричної дуги в вимикачах високої напруги почалося в 20-х роках минулого століття. Використання повітряних вимикачів в розподільних установках високої напруги досить поширене. Перевага повітряних вимикачів перед оливними, малооливними і елегазовими визначається такими якостями:

1. Великі струми вимкнення на напругах вище 35 кВ (до 100 кА).
2. В районах з холодним кліматом не потребується спеціального підігріву, в той час як оливним, малооливним і елегазовим вимикачам необхідний електропідігрів для підтримання герметичності ущільнювачів при низьких температурах.
3. Можливість вимкнення струмів короткого замикання поблизу потужних джерел енергії.

Для більш чіткого уявлення про вимоги, що пред'являються до сучасних повітряних вимикачів і їх параметрів, доцільно привести їх класифікацію за призначенням, категорією розміщення та кліматичним виконанням.

За призначенням виконуються:

1. Мережеві - напругою від 6 кВ до 1150 кВ для комутації електричних кіл в нормальних та аварійних умовах роботи електричних мереж.
2. Генераторні напругою від 6 до 20 кВ для комутації електричних ланок генераторних установок електричних станцій.

3. Вимикачі для електротермічних установок (на напругу від 6 до 220кВ) для комутації електричних ланок в електротермічних установках.
4. Вимикачі спеціального призначення:
  - а) напругою від 500 до 1150 кВ;
  - б) захисні вимикачі напругою від 6 до 20 кВ;
  - в) вимикачі навантаження напругою від 110 до 500 кВ;
  - г) вимикачі напругою від 6 до 35 кВ, які застосовуються в комплектних розподільних установках (КРУ).

По типу встановлення вимикачі виконуються:

- а) опорними;
- б) підвісними;
- в) настінними;
- г) викатними;
- д) вбудованими.

За категорією розміщення і кліматичним виконанням:

1. п'ять категорій розміщення (ззовні і всередині приміщення з різними умовами обігріву і вентиляції);
2. шість кліматичних виконань (У, ХЛ, ТВ, ТС, Т і О).

В повітряних вимикачах гасіння дуги відбувається стисненням повітрям, а ізоляція струмоведучих частин і дугогасильного пристрою здійснюється фарфором або іншими твердими ізоляційними матеріалами.

Конструктивні схеми повітряних вимикачів досить різні і залежать від їх номінальної напруги, способу створення ізоляційного проміжку між контактами у вимкненому положенні та способу подачі стисненого повітря в дугогасильний пристрій. Відмінною рисою сучасних потужних повітряних вимикачів є модульність їхнього конструктивного виконання, що дає можливість використати однотипні укрупнені елементи (модулі) для побудови вимикача даної серії на всі класи напруг, зберігаючи параметри кожного з них по напрузі практично незмінними. Не менш важлива й можливість оснащення кожного із цих дугогасильних модулів шунтувальними резисторами, призначеними як для зниження амплітуди й швидкості наростання напруги, що відновлюється, так і для обмеження небезпечних перенапруг при увімкненні або вимкненні. Тому принцип модульності конструктивної побудови вимикачів на високі класи напруг виявляється вигідним і з економічної точки зору.

У вимикачах на великі номінальні струми (рис. 15.1, а,б) є головний і дугогасильний контури, як і в малооливових вимикачах типів МГ і ВГМ.

Основна частина струму в увімкненому положенні вимикача проходить по головних контактах 4, які розташовані відкрито. При вимиканні вимикача головні контакти розмикаються першими, після чого весь струм проходить по дугогасильних контактах, які розташовані в камері 2. До моменту розмикання цих контактів в камеру подається стиснене повітря із резервуара 1, створюючи при цьому сильне повітряне дуття, яке і гасить дугу. Дуття може бути поздовжнім або поперечним. Необхідний ізоляційний проміжок між контактами у вимкненому положенні створюється в дугогасильній камері шляхом розведення контактів на достатню відстань або спеціальним віддільником 5, який знаходиться відкрито. Після вимкнення віддільника 5 припиняється подача стисненого повітря в камери і

дугогасильні контакти замикаються.

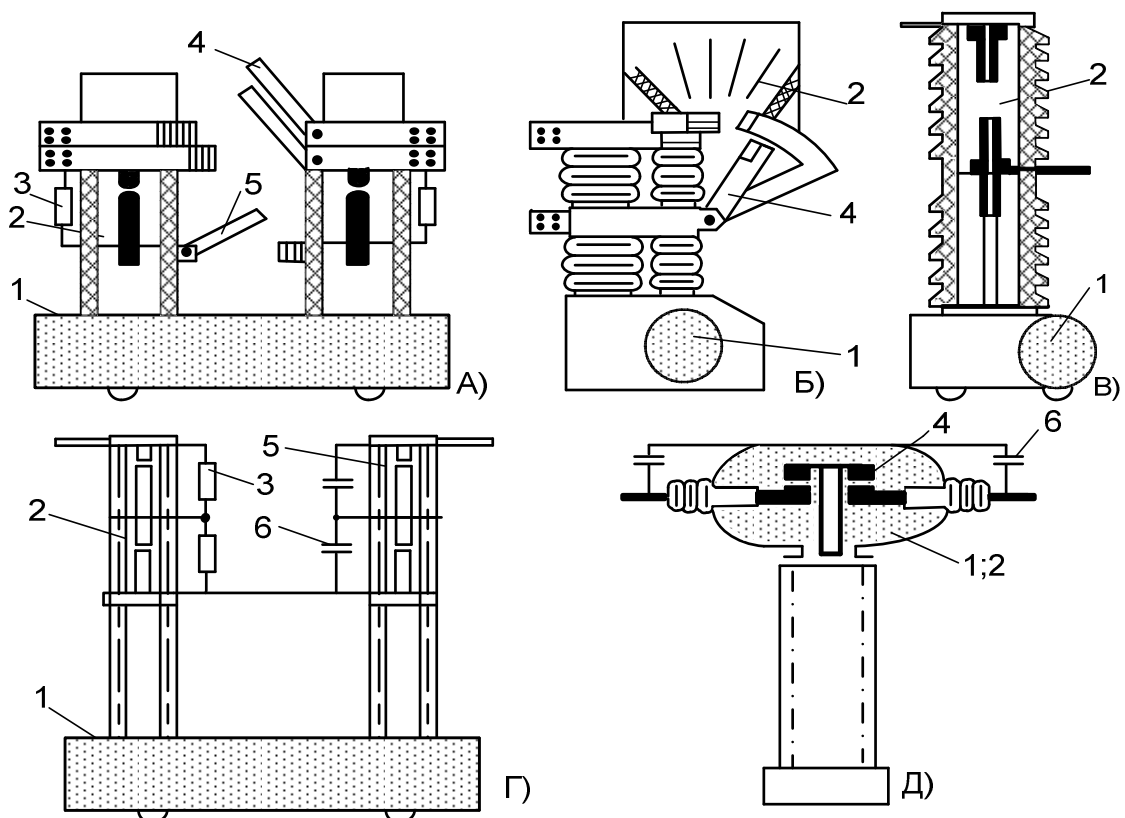


Рис. 15.1 – Конструктивні схеми виконання повітряних вимикачів:  
1 - резервуар; 2 – камера; 3- резистор; 4 – головні контакти; 5 – віддільник;  
6 – смінь.

Вимикачі, виконані за такою конструктивною схемою виготовляються для внутрішнього встановлення на напруги 15 та 20 кВ і номінальні струми вимкнення до 2000 А (серія ВВГ), а також на напругу 35 кВ (серія ВВЕ-35-20/1600УЗ).

У вимикачах для відкритого виконання дугогасильна камера знаходиться всередині фарфорового ізолятора, причому на напрузі 35 кВ достатньо мати один розрив на фазу (рис. 15.1, в), на 110 кВ – 2 розриви на фазу (рис. 15.1, г).

Різниця між цими конструкціями полягає в тому, що у вимикачах напругою 35 кВ ізоляційний проміжок утворюється в дугогасильній камері 2, а у вимикачах напругою 110 кВ і вище після гасіння дуги розмикаються контакти віддільника 5 і камера віддільника залишається заповненою стисненим повітрям на весь час вимкненого положення. При цьому в дугогасильну камеру стиснене повітря не подається і контакти в ній не замикаються.

За конструктивною схемою рис. 15.1, г виготовляють вимикачі серії ВВ напругою до 500 кВ. Чим вища номінальна напруга і чим більша потужність вимкнення, тим більше розривів необхідно мати в дугогасильній камері і в віддільнику (на 330 кВ – вісім розривів, на 500 кВ – десять).

У розглянутих конструкціях повітря подається в дугогасильні камери із резервуара, який знаходиться біля основи вимикача. Якщо контактну систему розмістити в резервуарі з стисненим повітрям, який ізолювано від землі, то швидкість

гасіння дуги значно збільшиться. Такий принцип поставлено в основу серії вимикачів ВВБ (рис. 15.1, д). В цих вимикачах немає віддільника. При вимиканні вимикача дугогасильна камера 2, яка є одночасно резервуаром стисненого повітря, зв'язується з атмосферою через дугтеві клапани, завдяки чому створюється дугтя, яке гасить дугу. У вимкненому положенні контакти знаходяться в середовищі стисненого повітря. За такою конструктивною схемою виготовляють вимикачі до 750 кВ. Кількість дугогасильних камер залежить від напруги: 110 кВ – одна; 220, 330 кВ – дві; 550 кВ – чотири; 750 кВ – шість (в серії ВВБК).

Основними типами вимикачів, які в даний час експлуатуються в електричних мережах, є вимикачі серії ВВБ номінальною напругою 35-500 кВ, які призначені для увімкнень і вимкнень електричних ланок, за заданих умов в нормальних і аварійних режимах роботи, ліній електропередачі з приєднаним електроустаткуванням частотою 50 Гц.

Основні типи виконання та умови експлуатації найбільш поширених типів повітряних вимикачів наведено в таблиці 15.1.

Таблиця 15.1 – Типи виконання та умови експлуатації повітряних вимикачів

Тип вимикача	Промислова частота мережі, Гц	Максимальна висота установки над рівнем моря, м	Допустима температура в районі установки, °С	Розподільна шафа
ВВШ-110Б ВВШ-150Б	50; 60	1000	Від –40 до +35, епізодично від-45 до +45	Тип ШРАМ
ВВ-330Б ВВ-500Б	50; 60	1000; 500	Від –40 до +35, епізодично від-45 до +40	Спеціальної конструкції
ВВУ-35А ВВУ-110Б ВВБК-110Б ВВБМ-110Б ВВЭ-110Б ВВБ-220Б ВВЭ-220Б ВВБК-220Б ВВД-220Б ВВДМ-330Б ВВБК-330 ВВБ-500А ВВБК-500 ВВБ-750	50	1000	Від –40 до +45, інші кліматичні фактори по ГОСТ 5543-70 і 15150-69	Тип ШР
ВНВ-220 ВНВ-330 ВНВ-500 ВНВ-750	50	1000	Від –45 (від –60 для виконання ХЛ) до +40	Спеціальної конструкції
ВНВ-1150	50	500	Від –45 до +40	

Основні умови експлуатації цих вимикачів – температура оточуючого повітря (робоче значення) від –45 до +45°С для вимикачів кліматичного виконання У1, від –60 до +45°С для УХЛ1, від –60 до +40°С для ХЛ1.

Експлуатуються також і вимикачі ВВС, призначені для роботи в сейсмічних районах, здатні виконувати свої функції і зберігати параметри після сейсмічної дії інтенсивністю до 8 балів включно за шкалою MSK-64 при встановленні вимикачів на рівні нульової відмітки.

Повітряні вимикачі серій ВВББ ВВБК та ВНВ, що експлуатуються в розподільних установках і донині, випускаються об'єднанням «Уралелектротяжмаш» (Росія). Основними виробниками повітряних вимикачів закордонного виробництва є фірми ВВС (Швейцарія) та «Делль» (Франція). Основні характеристики вимикачів наведено в таблиці 15.2.

Таблиця 15.2. – Основні характеристики вимикачів фірм ВВС та «Делль»

Серія вимикачів	Номінальна напруга, кВ										
	72,5	123	138	145	170	245	300	360	420	525	765
Номінальний струм вимкнення, кА											
DLF	20-50	20-80	–	20-80							
PK	–	–	30-80	–	30-80	–	30-80				
Номінальний струм, А											
DLF	2000, 3150, 4000		–	2000, 3150, 4000							
PK	–	–	2500; 4000	–	2500; 4000	–	2500; 4000				
Номінальний тиск стисненого повітря, МПа											
DLF	1,6;2,3	2,6;3,1 15/3	–	1,6; 2,6; 3,1; 15/3							
PK	–	–	2,2; 3,5	–	2,2; 3,5	–	2,2; 3,5				
Час вимкнення, с											
DLF	0,033-0,04		–	0,033-0,04							
PK	–	–	0,05	–	0,05	–	0,05				
Кількість дугогасильних розривів											
DLF	1; 2		–	2; 4			4; 6		4; 6; 8	6; 8	8
PK	–	–	2	–	2	4	–	6	6; 8	8 10	12

Фірма ВВС є одним з найстаріших виробників повітряних вимикачів і досягла в цій царині значних успіхів. Наприкінці 80-х років фірма повністю перейшла на випуск повітряних вимикачів серій DLF і DLFK на напруги 72,5 – 800 кВ. Головною перевагою цих вимикачів є висока ступінь уніфікації при великій кількості типовиконань по класам напруг, струмам вимикання, номінальним струмам і тиску повітря. Основою серії є дворозривний модуль з контактами двостороннього дуття

розміщені безпосередньо в високоміщній керамічній покришці.

Фірма «Делль» займає поряд з фірмою ВВС одне з провідних місць в галузі розробки й виготовлення повітряних вимикачів. Вона освоїла випуск повітряних вимикачів серії РК на напругу 138-765 кВ, які експлуатуються в багатьох країнах світу. Струми комутації цих вимикачів доходять до 80 кА і тиск повітря в баку до 3,5 МПа. Фірма випускає нові вимикачі з часом вимкнення рівним одному періоду.

Фірмою GE (США) освоїла в 1957 р. випуск вимикачів серії АТВ на напруги 115- 460 кВ з двофазним модулем 138 кВ, робочим тиском 3,1 МПа. А в наступні роки без суттєвих конструктивних змін фірма підвищила робочий тиск до 5,5 МПа, що дозволило підвищити напругу модуля до 245 кВ і створити 2-3-модульні вимикачі на напруги 550 і 765 кВ, підвищивши струми вимкнення з 45 до 55 кА.

Англійська фірма «Рейролл» в 1972 році освоїла випуск вимикачів з металеву гасильною камерою типу OIBR на напруги 132-400 кВ, струм вимкнення 50 кА і тиск 3 МПа. А в 1979 році після підвищення тиску до 6 МПа, напруги модуля до 150 кВ вдалося створити вимикачі на 1100 кВ і підвищити струми до 4000 А з 2500 А.

## 15.2 Повітряні вимикачі з закритими віддільниками

Повітряні вимикачі з закритими віддільниками серії ВВ напругою 110, 150, 220, 330 і 500 кВ, виконані за схемою рис. 15.1, а, були першими вітчизняними підстанційними вимикачами. Загальний вигляд вимикачів напругою 330 кВ підстанції Ладжинської ТЕС наведено на рис. 15.2.

Їх виробництво було почато в 1949 році і припинене в 1957-1958 роках. Основою вимикача ВВ служать два циліндричних резервуари, розташовані на деякій відстані один від одного і жорстко з'єднані між собою. Вимикачі ВВ напругою 110 кВ мають два дугогасильні модулі, на 150 кВ – три модулі, на 220 кВ – чотири модулі і на 500 кВ – вісім модулів. У вимикачах на 150–500 кВ паралельно кожному модулеві підключений лінійний шунтувальний резистор (ШР) з опором 180 кОм для вирівнювання розподілу напруги між окремими модулями. Номінальний тиск стиснутого повітря 2 МПа. Загальний вигляд вимикача серії ВВ напругою 220 кВ наведено на рис. 3.5.

Вимикачі з наповненими повітрям віддільниками типів ВВ компонуються з уніфікованих блоків, тому нижче приводиться тільки опис конструкції вимикача ВВШ-220У.

Нижні фланці гасильної камери і віддільника з'єднані двома трубчастими шинами, що є струмоведучим колом і опорною конструкцією для установки стовпчиків конденсаторів і шунтувальних резисторів. Трубчасті шини виконані з алюмінію. Кожен опорний стовпчик оснащено двома розтяжками, що підвищують стійкість полюса вимикача.

Гасильна камера (рис. 15.3) складається з чотирьох однакових елементів, розташованих вертикально в одну колонку. Кожен елемент містить механізм 8 рухомого контакту 2 і нерухомий контакт 5, прикріплені до фланців 3, 7, 1 і поміщені всередину порцелянових ізоляторів 9. Кріплення фланців до ізоляторів еластичне. Механізм рухомого контакту кріпиться до фланця шляхом нагвинчування до упора нерухомого контакту. Механізм верхнього елемента камери кріпиться до фланця за допомогою натискного кільця і шпильок.



Рис. 15.2 – Загальний вигляд повітряного вимикача ВВ-330

До фланців кріпляться вихлопні клапани 4, положення яких щодо осі вимикача може регулюватися поворотом фланця на ізоляторі при ослаблених гайках еластичного кріплення. Нерухомий контакт нижнього розриву кріпиться до нижнього фланця за допомогою вкладиша, конічна частина якого служить розсіювачем, що запобігає появі відбитих хвиль і завихрінь у потоці стиснутого повітря. Нерухомі контакти утримуються болтами і гайками, усередині кожного нерухомого контакту встановлене сопло 6. Контактний натиск між рухомим і нерухомим контактами створюється пружиною механізму камери. Аксіальний канал у рухомому контакті має форму сопла, розширення якого забезпечує оптимальне витікання продуктів горіння дуги при вимкненні струму короткого замикання. Контактні поверхні рухомого і нерухомого контактів корпусу, що ковзають, срібляться, завдяки чому перехідний опір струмоведучого кола в процесі експлуатації збільшується незначно.

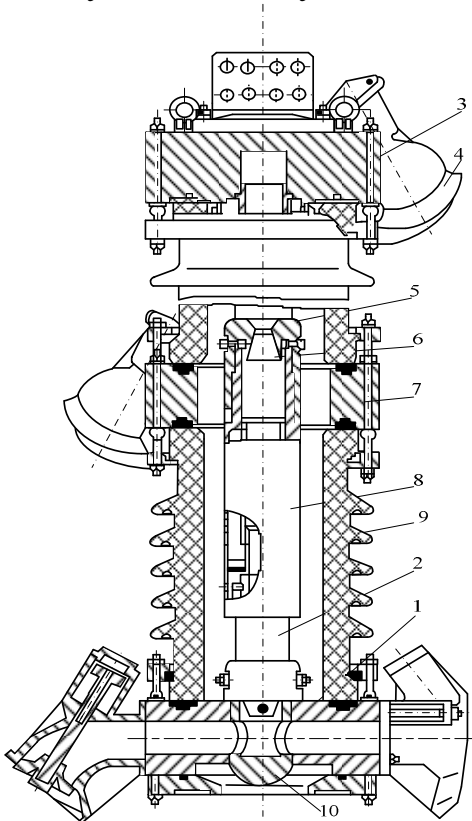


Рис. 15.3 – Гасильна камера повітряного вимикача ВВШ-220У:

1, 3, 7 – фланці; 2 – рухомий контакт; 4 – вихлопні клапани; 5 – нерухомий контакт; 6 – сопло; 8 – механізм рухомого контакту; 9 – ізолятор



Кожен розрив гасильної камери зашунтований блоком резисторів. Опір блоку 150 Ом набрано з дисків, що представляють собою керамічні плити, у пази яких вкладена металева спіраль.

Віддільник вимикача ВВШ напругою 220 кВ (рис.15.4) складається з чотирьох однакових елементів, розташованих вертикально в одну колонку. Корпуси нерухомого 6 і рухомого 8 контактів приєднані до фланців 5, 9 за допомогою шпильок і гайок і поміщені усередину ізолятора 4. Кріплення фланців до ізоляторів еластичне, герметичність з'єднання фланця з ізолятором досягається установкою комбінованого ущільнення 11. Порожній нерухомий контакт 6 з'єднується каналом з додатковим об'ємом 10, завдяки якому забезпечується рух повітря в проміжку між рухомим 7 і нерухомим контактами при вимкненні супровідного струму дуги. До верхнього фланця приєднаний апаратний вивід 1, на фланці містяться болти 2 для стропування зібраного стовпчика при монтажі чи ремонті.

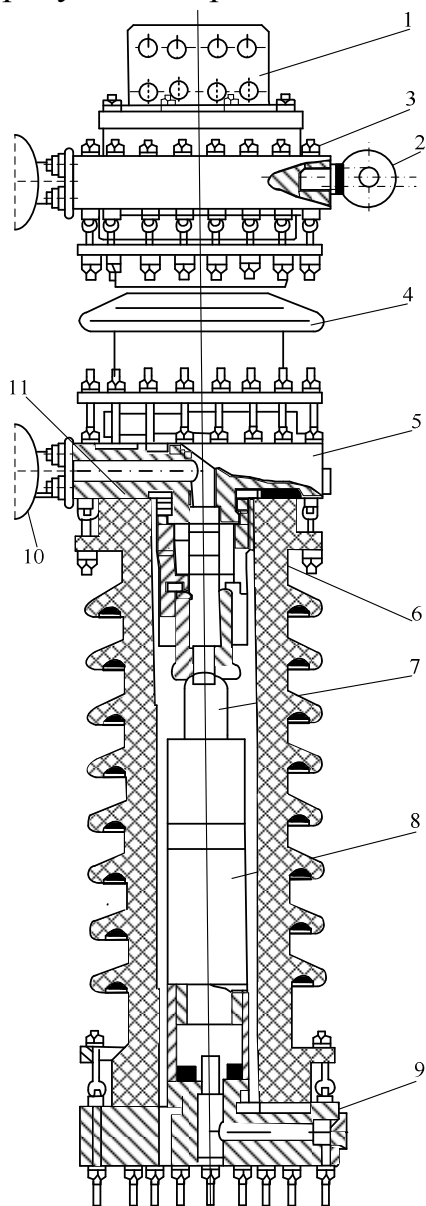


Рис. 15.4 – Віддільник повітряного вимикача ВВШ-220У:

1 – апаратний вивід; 2 – рими-болти; 3 – болти; 4 – ізолятор; 5,9 – фланці; 6 – нерухомий контакт; 7, 8 – рухомий контакт; 10 – канал; 11 – комбіноване ущільнення.

Механізм рухомого контакту зібраний у мідному корпусі. Рухомий контакт 8, виконаний з міді, припаяний до сталевого поршня. Контактне натискання здійснюється пружинами. Наприкінці ходу при вимкненні, рухомий контакт

віддільника утримується за рахунок різниці тисків по обидві сторони поршня рухомого контакту. Рухомий контакт має тугоплавку напайку з металокерамічної композиції. Електричне коло між рухомим контактом і його корпусом створюється двома рядами ковзних Z-подібних контактів. Усі контактні поверхні срібляться. Контактне натискання ламелей здійснюється пружинками, між ними і ковзними контактами передбачені ізоляційні прокладки.

Вимикачі серій ВВШ і ВВН з закритим наповненим повітрям віддільником є удосконаленням попередньої серії ВВ. Вони виконані за схемою рис. 3.1, з. Номінальний тиск повітря 2 МПа. Серія ВВШ (Ш – із шунтувальним резистором) складається з вимикачів на 110, 150 і 220 кВ, серія ВВН – вимикачів на 330 і 500 кВ. Вимикачі ВВШ на 110 кВ мають два дугогасильні модулі і два модулі віддільників; ВВШ на 150 кВ – по три модулі і ВВШ на 220 кВ – по чотири модулі. До кожного дугогасильного модуля підключений лінійний ШР 3 з опором 150 Ом, а до модулів віддільника підключено конденсатор ємністю 330 пФ (крім ВВШ на 110 кВ, що не має ШР і шунтувальних конденсаторів).

Вимикачі повітряні високовольтні триполюсні типу ВВ-220Б-31,5/2000У1, ВВ-500Б-31,5/2000У1 і ВВ-330Б-31,5/2000У1 призначені для комутації електричних кіл при нормальних і аварійних режимах в мережах трифазного змінного струму частоти 50 Гц з номінальною напругою 500 і 330 кВ. Позначення ВВ-500Б-31,5/2000У1 розшифровується наступним чином: вимикач повітряний на номінальну напругу 500 кВ, категорії Б по довжині шляху стікання зовнішньої ізоляції, з номінальним струмом вимкнення 31,5 кА, з номінальним струмом 2000 А, кліматичного виконання У, категорії розміщення 1.

Основою полюса вимикача (рис. 15.5) служить резервуар стиснутого повітря 1, на якому змонтовані дуттеві клапани гасильної камери 2 і віддільниками 12, шафа керування 11, стовпи опорної ізоляції камери 3 і віддільники 10, гасильна камера 5, віддільник 8, система вентиляції полюса, шунтувальний резистор 6, ємнісний дільник напруги 7, розтяжки 4, шини 9. Резервуар має люки з кришками для огляду і ремонту його внутрішніх поверхонь. До резервуара приварені патрубки з фланцями для установки дуттевих клапанів камери і віддільника, кронштейни для кріплення шафи керування й опорних лап. На правій передній опорній лапі передбачений болт для кріплення заземлювальної шини. У нижній частині бака уварено два спускних клапани, призначених для випуску з резервуара вологи, що сконденсувалася при періодичній продувці. На резервуарі містяться фланці для кріплення повітропроводу (звичайно використовується один із фланців), ніпелі для приєднання трубки місцевого пневматичного вимкнення і трубки подачі повітря на вентиляцію.

Стовпчики опорної ізоляції гасильної камери і віддільника набираються з двох порожнистих ізоляторів, з'єднаних між собою за допомогою фланця. Ізолятори опори камери мають внутрішній діаметр приблизно 160 мм, опори віддільника – 100 мм. Припустиме відхилення осі стовпчика від вертикалі для вимикачів на 220 кВ не повинно перевищувати 100 мм, на 110-150 кВ – 50-70 мм.

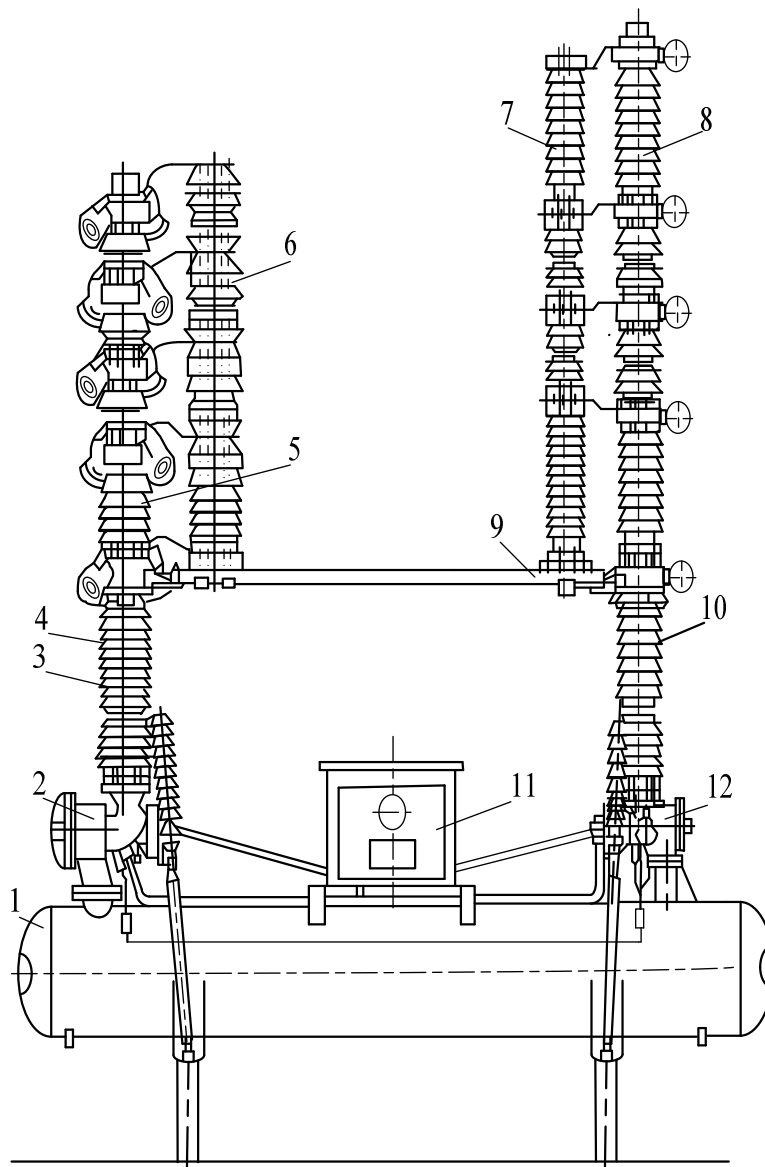


Рис. 15.5 – Загальний вигляд повітряного вимикача ВВШ-220У  
 1 – резервуар стиснутого повітря; 2 – дуттєві клапани гасильної камери; 3 – стовпи опорної ізоляції камери; 4 – розтяжки; 5 – гасильна камера; 6 – шунтувальний резистор; 7 – ємнісний дільник напруги; 8, 10, 12 – віддільники; 9 – шини; 11 – шафа керування.

## ЛЕКЦІЯ 16. ВАКУУМНІ ВИМИКАЧІ

Останнім часом ідуть дискусії про переваги застосування вакуумної або елегазової комутаційної техніки в мережах середньої напруги в східноєвропейських країнах. Застосування того або іншого виду комутаційного устаткування в Західній Європі, на відміну від Східної, вже давно визначило свої напрямки розвитку комутаційного устаткування для застосування в мережах середнього класу напруги. По параметрах високої надійності, екологічності, простоти обслуговування і експлуатації, діапазонам номінальних параметрів і економічності для всіх комутаційних операцій найбільш доцільними є застосування:

- у мережах середньої напруги – вакуумних вимикачів,

– у мережах високої напруги - елегазових вимикачів.

Як показує аналіз ринку електротехнічного обладнання, попит на вакуумні вимикачі на світовому ринку досяг 64-65%. Очікуваний попит ринку на вакуумну комутаційну техніку до 2020 року складе 85% усього ринку комутаційної техніки середньої напруги.

## 16.1 Загальна характеристика

Як основні переваги вакуумних вимикачів перед іншими типами вимикачів на середній клас напруги можна відзначити наступні:

### 1. Висока надійність

До показників надійності елементів схем електричних з'єднань відносять частоту відмов, час відновлення, частоту і тривалість капітального і поточного ремонтів. За інших рівних умов, тобто, якщо навіть врахувати, що частота відмов і час відновлення після аварії рівні для вакуумних і традиційних вимикачів, то частота і тривалість ремонту останніх поза сумнівом вище.

Наприклад, для малооливного вимикача ВК-10, оливу необхідно замінити після 10 операцій вимкнення струму 20 кА. Після здійснення вимикачем 2000 циклів операцій увімкнення-вимкнення (У-В), необхідно проводити технічне обслуговування приводу. Після здійснення вимикачем 3000 циклів операцій УВ необхідно проводити капітальний ремонт. А середній ремонт вимикача повинен проводитися не рідше як один раз в 4 роки.

Вакуумні вимикачі є такими, що практично не потребують обслуговування. Огляд і періодичні перевірки рекомендується проводити один раз в 3-5 років. Під час цих перевірок необхідно провести високовольтні випробування вакуумної дугогасильної камери і ізоляції вимикача, а також перевірити перехідний опір контактів.

### 2. Низькі експлуатаційні витрати

Цей пункт безпосередньо витікає з попереднього. Низькі експлуатаційні витрати визначаються відсутністю оливного (для оливних вимикачів) та компресорного (для повітряних вимикачів) господарств. Крім того вакуумна дугогасильна камера (ВДК) не вимагає поповнення дугогасильного середовища (surroundings). Висока комутаційна зносостійкість дозволяє значно скоротити витрати по обслуговуванню, а також перерви в електропостачанні, пов'язані з виконанням регламентних робіт.

### 3. Високий комутаційний і механічний ресурс

Кількість вимкнень номінальних струмів, що допускається без ревізій і ремонту ВДК, досягає 50 тисяч, а номінальних струмів вимкнення (струмів короткого замикання) - від 20 до 200 залежно від типу ВДК і значення струму. При експлуатації малооливних вимикачів необхідно проводити ревізію після 1000-2000 вимкнень номінального струму або 3-12 вимкнень номінального струму вимкнення. Високий механічний ресурс вакуумних вимикачів обумовлений в першу чергу тим, що хід контактів ВДК складає від 6 до 12 мм на напругу 6-10 кВ. Для оливних і електромагнітних вимикачів на цю ж напругу хід контактів досягає 100-200 мм, а, отже, застосовується складніша конструкція приводу, що вимагає великих витрат

енергії на увімкнення та вимкнення вимикача, що призводить до необхідності постійного контролю і перевірок стану деталей приводу. Це також підвищує експлуатаційні (exploitation) витрати на утримання вимикача.

Високий комутаційний і механічний ресурс дозволяють застосовувати вакуумні вимикачі в схемах з частими комутаціями - для трансформаторів сталеплавильних печей, комутацій насосів, компресорів тощо

#### 4. Безпека експлуатації і екологічність

Для вакуумних вимикачів характерні мала енергія приводу, малі ніжче за масу і габарити традиційних вимикачів при однакових номінальних параметрах струму і напруги. Все це забезпечує безшумність роботи і запобігає забрудненню довкілля.

Герметичність виконання ВДК і відсутність середовища, що підтримує горіння, забезпечує високу пожежо- і вибухобезпечність і можливість роботи в агресивних середовищах.

За динамічні навантаження і відсутність викиду газів, оливи. Їх маса і габарити значно даними фірми «Дженерал Електрик» проектується вимикач напругою 242 кВ з п'ятьма дугогасильними камерами на полюс і струмом вимкнення до 40 кА. Компоновка вимикача така ж як у бакових елегазових вимикачів. У Японії побудовано і введено в експлуатацію вакуумний вимикач на напругу 160 кВ, струм вимкнення 40 кА, що має всього два розриви на полюс. Роботи та дослідження по вдосконаленню методів гасіння дуги у вакуумній та конструкції дугогасильних камер інтенсивно продовжуються і в Україні, в першу чергу на Рівненському заводі високовольтної апаратури "РЗВА–Електрик".

## 16.2 Дугогасильні камери вакуумних вимикачів

Основою конструкції та основним найбільш відповідальним елементом вакуумного вимикача є вакуумна дугогасильна (extinguishing) камера.

Камери мають певні конструктивні особливості в залежності від напруги, струмів вимкнення та конструкції вимикача. Разом з тим вони будуються на загальних принципах умов гасіння електричної дуги в вакуумному середовищі.

В загальному вигляд і розріз дугогасильного пристрою камери вакуумного вимикача представлено на рис. 16.1. У циліндричній посудині 1 з ізоляційного матеріалу розташований нерухомий контакт 2, закріплений в металевому фланці 3, що герметично сполучений з циліндром.

Там же знаходиться рухомий контакт 4, сполучений з фланцем 5 за допомогою сільфона 6. Сільфон - циліндрична гармоніка, виконана з нержавіючої сталі, яка забезпечує герметичність усієї камери. Камера має достатню механічну міцність і дозволяє рухомому контакту мати переміщення до 20 мм.

Для захисту стінок ізоляційного корпусу 1 (рис. 16.1) від парів металу електродів служать екрани 7 і 8. За відсутності екранів пари металу електродів осідають на поверхні циліндра, що згодом приводить до перекриття ізоляції між контактами 2 і 4. Екрани служать також для вирівнювання електричного поля між контактами, що підвищує надійність роботи вимикача.

У сучасних вимикачах тиск всередині дугогасильної камери дорівнює  $10^{-4} \div 10^{-6}$  Па.

Натискання рухомого контакту на нерухомий (stationary) виконується за рахунок атмосферного тиску. При великих номінальних струмах ставиться додаткова контактна пружина. При розходженні контактів в момент виникнення дуги спочатку утворюється рідкий металевий місток з матеріалу електродів. Цей місток швидко нагрівається до високої температури завдяки високій густині струму в ньому і різкому зростанню питомого опору матеріалу в розплавленому стані. Потім місток випаровується і з'являється дуга, яка горить в середовищі пари металу електродів. Така дуга називається вакуумною. Характерною особливістю її є мала напруга 20 – 40 В. Тільки при великих струмах (10 – 100 кА) напруга зростає до 50 – 200 В.

При проходженні струму через нульове значення дуга гасне. Мала густина газу в дугогасильній камері обумовлює виключно високу швидкість дифузії зарядів через велику різницю густини частинок в дузі, що згасає, і навколишньому просторі – вакуумі.

Після проходження струму через нульове значення за час 10 мкс між контактами відновлюється електрична міцність вакууму. У рівномірному полі ця міцність досягає 105 В/мм. На рис. 16.2 показано контактну систему вимикачів на напругу до 13,8 кВ, на номінальний струм до 3 кА, струм вимикання до 100 кА. Струм від стержня 1 спочатку йде в радіальному напрямі, а потім по провіднику 2 у вигляді дуги кола (точки 1 - 4 ). При цьому створюється повздовжнє (осьове) магнітне поле, показане хрестиками і крапками. В кінці дуги кола 2 розташований торцевий контакт 3, через який струм проходить з нижнього контакту у верхній. Контакт має всього чотири точки переходу. Загальна сила натиснення всього контакту досягає 12 000 Н. Конструкцію багатоточкового торцевого контакту вакуумної дугогасильної камери наведено також на рис.16.2.

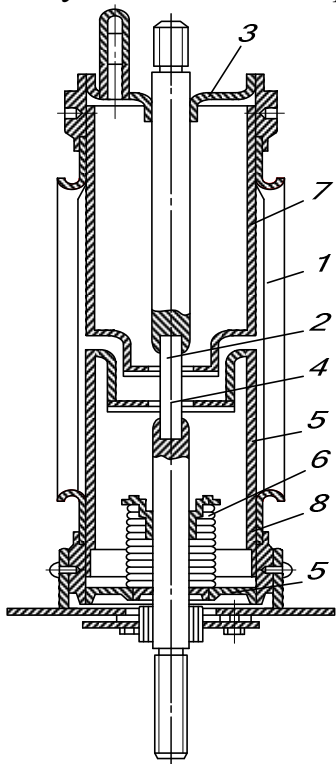


Рис. 16.1 – Загальний вигляд вакуумної дугогасильної камери

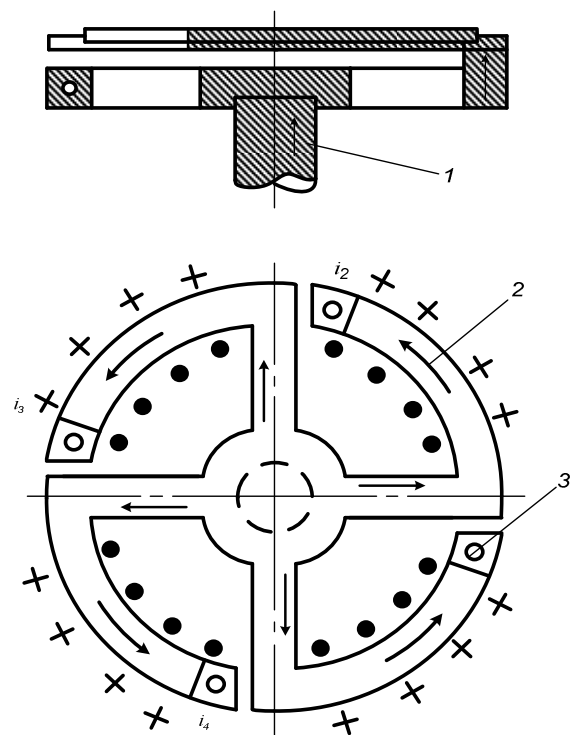


Рис. 16.2 - Контактна система вакуумної дугогасильної камери з повздовжнім магнітним полем

За рахунок такої конструкції камери у порівнянні електромагнітними та оливними вимикачами вакуумний має значно менші габарити та масу, а в порівнянні з повітряним вимикачем на такі ж параметри вакуумний вимикач має меншу масу на 47% і менший об'єм на 46%. Об'єм шафи КРУ при цьому зменшується на 42%, а площа – до 70 %.

В даний час в Україні розгорнені великі роботи із створення нових вакуумних дугогасильних камер та вимикачів. Основна увага приділяється виробництву вакуумних вимикачів для розподільчих установок напругою 6-10 кВ для промислових підприємств, напругою 27,5 кВ для залізничного транспорту та напругою 35-110 кВ для розподільних установок електричних станцій та підстанцій. Одночасно активно продовжуються і роботи з удосконалювання вакуумних вимикачів та їх камер напругою 6-110 кВ та розробка нових серій напругою 220 кВ.

Виготовляються та експлуатуються дугогасильні камери напругою 10 кВ, номінальний струм 400 – 3200 А і номінальний струм вимкнення 4 – 31,5 кА. На рис. 16.3 представлено конструкцію вакуумної дугогасильної камери типу КДВ-10-1600-20, яка використовувалась в конструкціях вимикачів серії ВВТЄ.

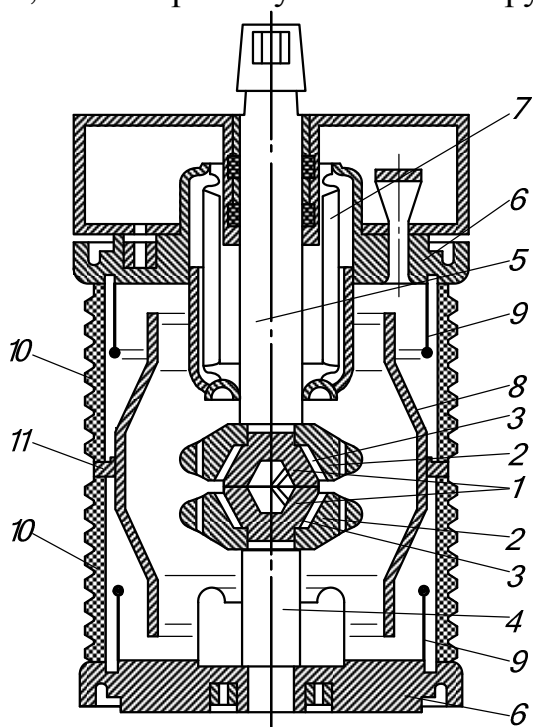


Рис. 16.3 - Вакуумна дугогасильна камера серії КДВ:

$$U_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ,}$$

$$I_{\text{НОМ}} = 630 \div 1600 \text{ А,}$$

$$I_{\text{О.НОМ}} = 20 \text{ кА}$$

Зовні камера представляє собою керамічний циліндр. Фланці 6 сполучені з вакуумноізолюючим ребристим керамічним циліндром 10.

До струмовводу 4 прикріплені нерухомі контакти 1, 2 у вигляді торцевої розетки з шістьма точками дотику. Рухомий контакт укріплений на струмовводі 5, який пов'язаний з сильфоном 7. Завдяки цьому рухомий контакт може переміщуватися по вертикалі. Між частинами контактів є зазор 3. Зовнішні струмовводи приєднуються до фланця 6 (жорстка шина) і струмовводу 5 (за допомогою гнучких шин). Для вирівнювання електричного поля і захисту циліндра 10 від напilenня парами металу служать екрани 8 і 9. Екран 8 кріпиться до ізолятора за допомогою кільця 11. Нижче, в таблиці 16.1, наведено основні технічні характеристики дугогасильної камери типу КДВ.

Таблиця 16.1 – Основні технічні характеристики камери КДВ

Номинальна напруга, кВ	10
Номинальний струм, А	1600
Опір струмоведучого кола при додатковому натисканні 1600 Н, мкОм	16
Номинальний відносний вміст аперіодичної складової, %	0,35
Тривалість дуги, с, не більше	0,02
Граничний струм увімкнення, - амплітудне значення, кА - початкове значення періодичної складової, кА	51 20
Струм термічної стійкості (4 с), кА	20
Амплітуда граничного наскрізного струму, кА	70
Середній струм зрізу, А, не більш	10
Електрична зносостійкість в циклі увімкнення - вимкнення: - при $I_{ном} = 1600$ А - при $I_{вимк. ном} = 20$ кА	100 25
Механічна зносостійкість, операцій	$2 \cdot 10^4$
Хід рухомого контакту, мм	12
Допустиме зношування контактів, мм	4
Швидкість рухомого контакту, м/с: - при вимкненні - при увімкненні	1,7 – 2,3 0,6 – 0,9
Мінімальна безструмова пауза, с	0,3
Середній термін служби камери, років	25

### 16.3 Особливості конструкцій основних типів вакуумних вимикачів

На основі розглянутої вище вакуумної дугогасильної камери КДВ створювались вимикачі напругою 10 кВ з номінальним струмом до 3200 А і струмом вимкнення до 31,5 кА, напругою до 35 кВ з номінальним струмом 1600 А і струмом вимкнення до 20 кА.

На рис. 16.4 показано вакуумний вимикач ВВТЭ-10-10/630У2, призначений для комутації електричних ланцюгів напругою 10 кВ у нормальних і аварійних режимах, який влаштовується в комірці КРУ. На рамі 8 за допомогою ізоляційних каркасів 11 укріплені три дугогасильні вакуумні камери 6. Вивід рухомого контакту 5 за допомогою гнучкого зв'язку 4 пов'язаний з верхнім контактним ножем 1, який укріплений на ізоляційній балці 2. Нерухомий (stationary) контакт камери пов'язаний з нижнім ножем 7. Електромагнітний привод (drive) 13 через систему тяг і ізоляційної плити 14 пов'язаний з рухомими контактами. Кінцеве контактне натискання забезпечують пружини 3. Сталева перегородка 10 призначена для захисту постійних магнітів, що знаходяться в приводі від впливу електромагнітних полів головних ланцюгів вимикача.



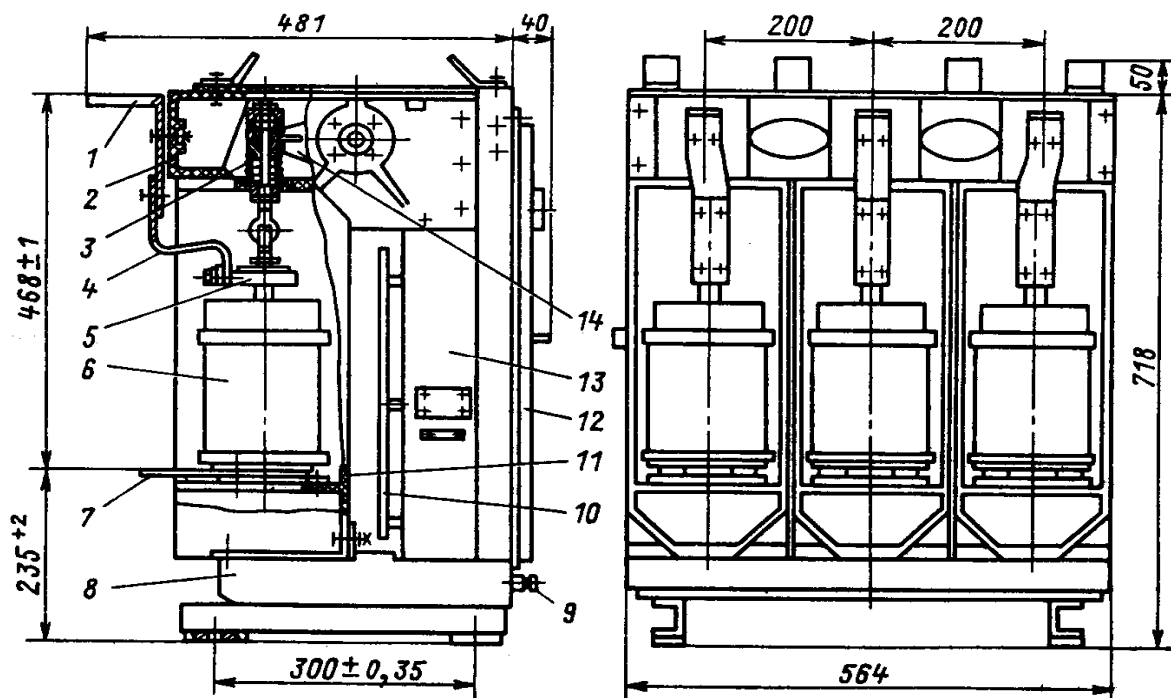


Рис.16.4 - Вимикач вакуумний ВВТЭ-10-10/630У2

Вимикач закритий передньою кришкою 12 з вікнами для спостереження за механічним показувачем увімкненого та вимкненого положень і лічильником кількості циклів УВ. Заземлення здійснюється за допомогою гвинтів 9. Розглянутий вимикач розрахований на 2000 операцій УВ при номінальному струмі і 50 операцій при струмі короткого замикання 10 кА. Повний час вимкнення вимикача 0,05 с. Аналогічну будову мають вимикачі на 1000 і 1600 А. Вимикачі ВВТП, на відміну від наведеного вище ВВТЄ, мають пружинний привод.

На рис. 16.5 представлено загальний вигляд дугогасильної камери фірми «Сіменс» (Німеччина) на напругу 12 кВ, номінальний струм 1250 А і номінальний струм вимкнення 25 кА. Згодом номінальний струм було піднято до 2500 А і напруга до 24 кВ при струмі вимкнення до 16 кА.

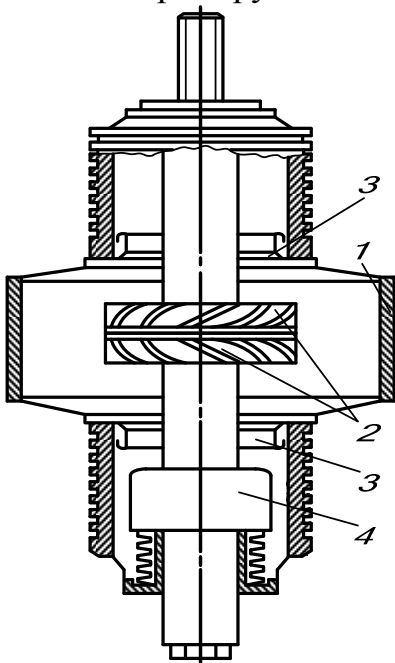


Рис. 16.5 - Вакуумна дугогасильна камера фірми «Сіменс»:

$U_{\text{НОМ}}$  – до 24 кВ,  $I_{\text{НОМ}}$  – до 2500 А,  $I_{\text{О.НОМ}}$  – до 25кА

Особливістю дугогасильної камери є відсутність суцільного ізоляційного корпусу. Середня частина вимикача – це камера гасіння 1, яка виконана металевою. В камері розташовані контакти 2 з спіральними прорізами для розтягування дуги, екрани 3 та сильфон 4. Пари металу, осідаючи на стінці камери, не погіршують ізоляційних властивостей дугогасильної камери. Контакти мають шліци-спіралі 2, що зменшують зношування і підвищує струм вимкнення. Поле усередині дугогасильної камери вирівнюється за допомогою двох екранів 3, сполучених з камерою гасіння, і двох екранів, сполучених з фланцями дугогасильної камери.

На рис. 16.6 представлено вимикач, що використовує вакуумну дугогасильну камеру фірми «Сіменс». Камера закріплена на опорних ізоляторах за допомогою утримувачів 7. Підключення вимикача виконується виводами 2 і 6. Вивід 6 сполучений з рухомих контактом 4 за допомогою гнучкого зв'язку. Нерухомий контакт 3 сполучений з виводом 2. Ізоляція нерухомого 3 і рухомого 4 контактів від металевого корпусу 1 (див. рис. 16.6) здійснюється фарфоровими ізоляторами 5. Переміщення рухомого контакту здійснюється за допомогою ланок 8 і 9. Пружина 10 створює додаткове контактне натиснення. Управління механізмом виконується за допомогою клямки 11.

У вимикачі використовується двигунний привід (drive). Вимикач випускається на напруга 7,2 – 24 кВ, номінальний струм 630 – 2500 А і струм вимкнення 8 – 25 кА. Швидкість відновлення електричної міцності камери  $\mu$  до  $5 \cdot 10^4$  В/мкс. Найбільша тривалість горіння дуги 11 мс. Вимикач може забезпечити 20 000 операцій циклу УВ при номінальному струмі і 100 операцій при номінальному струмі вимкнення. При менших потужностях вимикач виходить ще компактнішим.

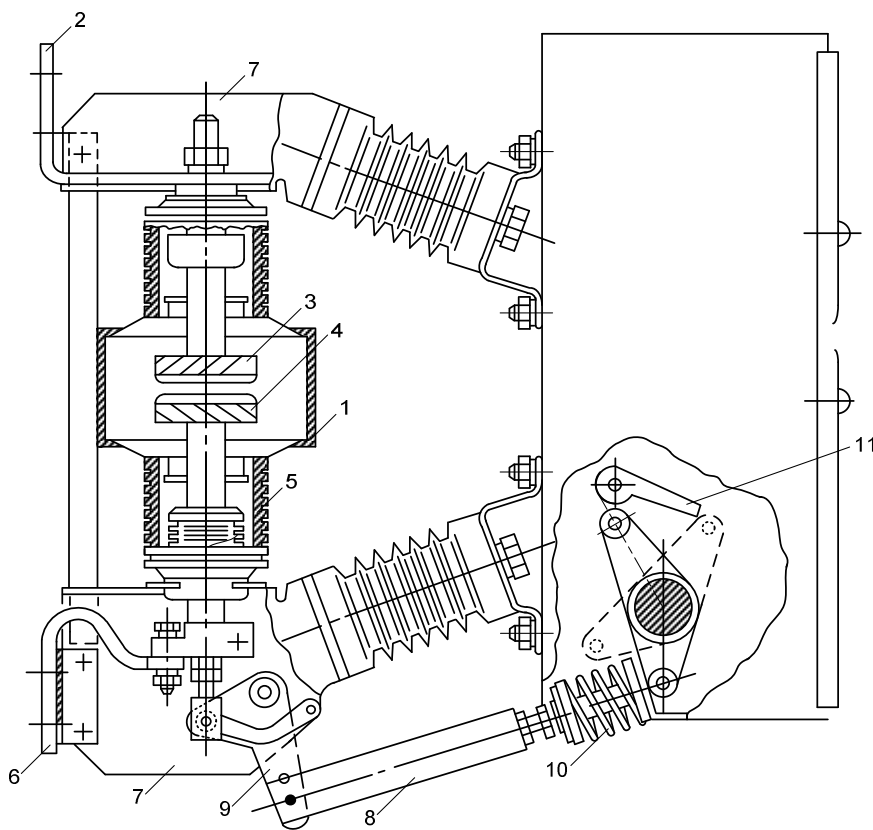


Рис. 16.6 - Вакуумний вимикач фірми «Сіменс»

В розподільчих установках напругою 35 кВ експлуатуються колонкові вакуумні вимикачі серії ВВК та більш сучасні вакуумні вимикачі як вітчизняних виробників, наприклад, вимикач серії ВР35 Рівненського заводу високовольтної апаратури «РЗВА – Електрик», так і закордонних - АВВ, Siemens, Ahlstrom, та ряду російських підприємств, наприклад ВВЕЛ-35 фірми НВП "ЭЛВЕСТ".

На рис. 16.7,а показано загальний вигляд вакуумного вимикача ВВК-35Б-20/1000У1, призначеного для частих комутацій у нормальних і аварійних режимах. Вимикач розрахований на відкриту установку.

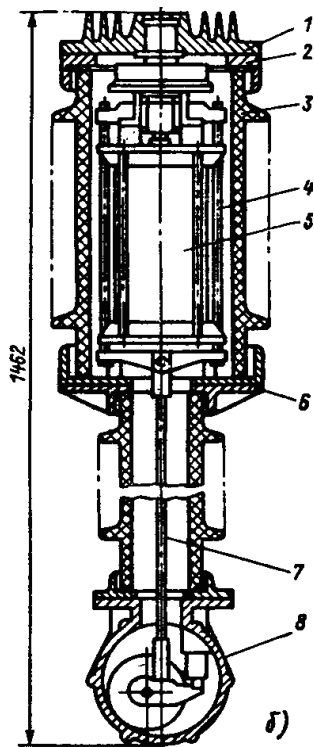
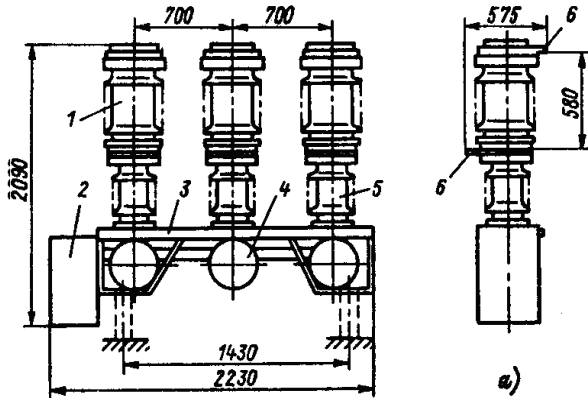


Рис. 16.7– Вакуумний вимикач ВВК-35Б-20/1000У1:

*а* – загальний вигляд: 1 – полюс; 2 – привод; 3 – рама; 4 – механізм приводу полюса; 5 – опорний ізолятор; 6 – струмоведучі шини; б – полюс вимикача: 1 – кришка; 2, 6 – фланці; 3 – фарфоровий ізолятор; 4, 7 – тяги; 5 – вакуумна камера; 8 – механізм приводу

На спільній рамі (carriage) кріпляться за допомогою фарфорових ізоляторів три полюси (pole). У кожному полюсі (рис. 16.7, б) у фарфоровому ізоляторі 3, армованому фланцями 2 і 6, міститься дугогасильна камера 5. Для надійної ізоляції полюси заливаються оливою, а в кришці 1 є оливовказівник. Механізм приводу полюса 8 тягами 7 і 4 пов'язаний з рухомим контактом. Гасіння дуги здійснюється у вакуумній камері 5.

Більш сучасний вакуумний вимикач внутрішньої установки ВВЕЛ-35 (рис. 16.8) напругою 35 кВ і струмами вимкнення 31.5 кА і 40 кА, номінальними струмами

до 2500 А з електромагнітним приводом призначений для комутації електричних ланцюгів в нормальних і аварійних режимах роботи мереж трифазного змінного струму частотою 50 Гц. Вимикач відрізняється зручністю і надійністю в експлуатації за рахунок застосування нової конструкції електромагнітного приводу, що не потребує обслуговування. Завдяки блоковій компоновці передбачено доступ до всіх найважливіших вузлів полюсів і приводу, що дозволяє легко контролювати основні ходові характеристики вимикача.

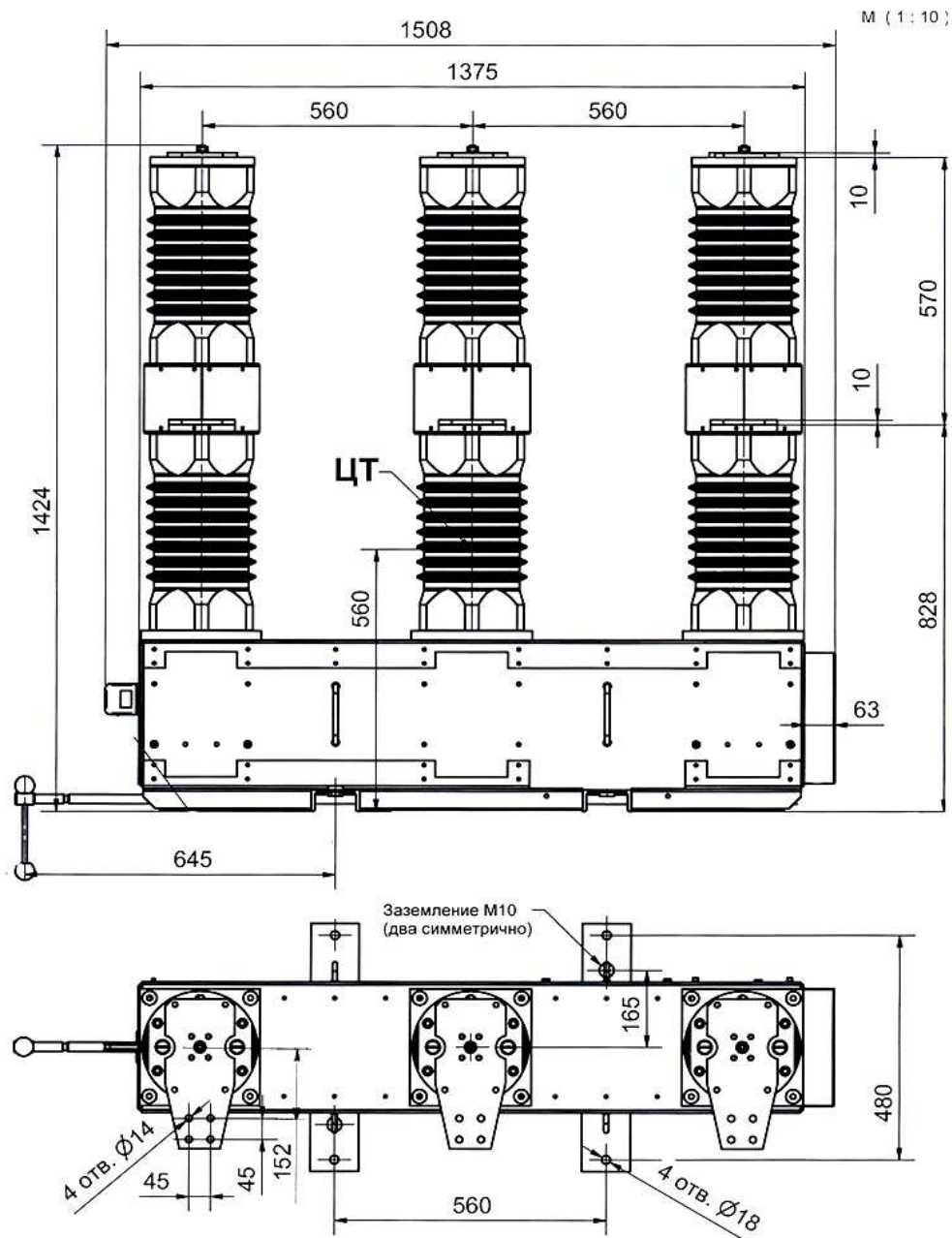


Рис. 16.8 – Габаритні розміри вакуумного вимикача ВВЕЛ-35

Вакуумний вимикач ВВЕЛ-35-40/1600 розроблений в першу чергу для експлуатації на електричних станціях і призначений для заміни застарілих морально та фізично повітряних і оливних вимикачів з аналогічними параметрами. В таблиці 16.2 наведено основні технічні характеристики вимикача ВВЕЛ-35.

Таблиця 16.2 – Основні технічні характеристики вимикача ВВЕЛ-35

Параметр	Норма
Номинальна напруга, кВ	35
Найбільша робоча напруга, кВ	40,5
Номинальний струм, А	1250, 1600, 2000, 2500
Номинальний струм вимкнення, кА	31.5, 40
Ресурс по комутаційній стійкості, циклів В:	
- при номінальному струмі,	10000
- при номінальному струмі вимкнення,	50
Ресурс по механічній стійкості, циклів В	10000
Маса, кг	350

В розподільних установках напругою 110 кВ певний час експлуатувались вакуумні вимикачі типу ВВК-110Б-20/1000У1. У кожному полюсі в фарфоровій покришці цього вимикача містяться чотири послідовно увімкнені дугогасильні камери КДВ. У решті будова цього вимикача подібна до будови вимикача типу ВВК-35 ( див. рис. 16.7).

В даний час в розподільних мережах напругою 110 кВ застосовують вимикачі іноземного виробництва, наприклад, російські вимикачі для внутрішньої установки серії ВБЭ-110 з електромагнітним приводом та вимикачі серії ВВЭЛ-110 як для внутрішньої так і для зовнішньої установки. Розробляються вакуумні вимикачі напругою 110 кВ і на «РЗВА – Електрик».

Вакуумний вимикач внутрішньої установки ВБЭ-110 з електромагнітним приводом - унікальна розробка НВП "ЕЛВЕСТ", що не має аналогів в Росії і країнах СНД. Апарат призначений для виконання частих комутаційних операцій в нормальних і аварійних режимах роботи трансформаторів дугових сталеплавильних печей на номінальну напругу 110 кВ частотою 50 Гц і інших електроустановок в достатньо жорстких режимах (по 50-100 комутацій на добу).

Вимикач ВБЭ-110 (рис. 16.9) складається з трьох окремих полюсів, кожен з яких керується своїм індивідуальним електромагнітним приводом. Кожен полюс вимикача має чотири розриви (вакуумні дугогасительні камери), що шунтуються конденсаторами. Увімкнення відбувається за допомогою ізоляційних тяг, з'єднаних з приводом. Для забезпечення надійної ізоляції простір між вакуумною камерою і корпусом вимикача заповнений спеціальною негорючою і нетоксичною речовиною з високою електричною міцністю, а опорний ізолятор заповнений - пінополіуретаном.

Вимикач ВБЭ-110 має підвищену вибухо- та пожежобезпечність, простішу конструкцію і зручніший в експлуатації порівняно з повітряними, елегазовими і оливними вимикачами класу напруги 110 кВ.

Основні технічні характеристики вимикача ВБЭ-110 наведено в таблиці 16.3.

В даний час вимикачі ВБЭ-110 можуть бути замінені в експлуатації на нові більш сучасні вакуумні вимикачі російського виробництва серії ВВЭЛ-110. Габаритні розміри вакуумного вимикача зовнішньої установки ВВЭЛ-110-У1 наведено на рис. 16.10, основні технічні характеристики в таблиці 16.4, а основні технічні характеристики вимикача внутрішньої установки серії ВВЭЛ-110-У3 в таблиці 16.5.

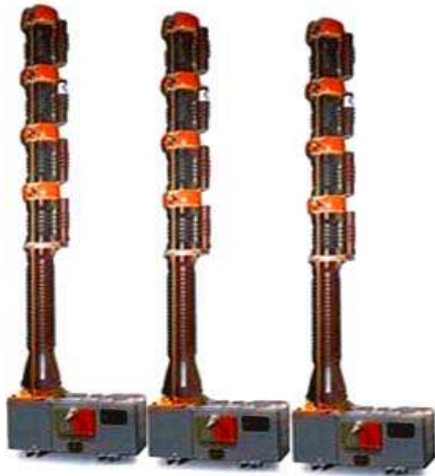


Рис. 16.9 – Загальний вигляд вакуумного вимикача ВБЭ-110

Таблиця 16.3 – Основні технічні характеристики вимикача ВБЭ-110

Параметр	Норма
Номінальна напруга, кВ	110
Найбільша робоча напруга, кВ	126
Номінальний струм, А	1250, 1600
Номінальний струм відключення, кА	5, 20, 31.5
Ресурс по механічній стійкості, циклів В	20000
Ресурс по комутаційній стійкості, циклів В:	
- при номінальному струмі,	20000
- при номінальному струмі вимкнення,	50
Маса, кг	1400

Йде розробка нових способів гасіння електричної дуги в вакуумі, застосовуються більш сучасні електротехнічні матеріали та технології. Передові технології в електроапаратобудованні та сучасне виробництво дозволяють вітчизняним виробникам, в першу чергу компанії «Високовольтний союз» Рівненського заводу високовольтної апаратури «РЗВА – Електрик», в недалекому майбутньому забезпечити розробку промислових зразків більш сучасних вакуумних вимикачів напругою 110 та 220 кВ.

Таблиця 16.4 – Основні технічні характеристики вимикача зовнішньої установки серії ВВЭЛ-110-У1

Параметр	Норма
Номінальна напруга, кВ	110
Найбільша робоча напруга, кВ	126
Номінальний струм, А	630, 1250, 1600, 2000
Номінальний струм відключення, кА	20, 31.5
Ресурс по комутаційній стійкості, циклів В:	
- при номінальному струмі,	10000
- при номінальному струмі вимкнення,	50
Ресурс по механічній стійкості, циклів В	10000
Маса, кг	1000

Таблиця 16.5 – Основні технічні характеристики вимикача внутрішньої установки серії ВВЭЛ-110-У3

Параметр	Норма
Номинальна напруга, кВ	110
Найбільша робоча напруга, кВ	126
Номинальний струм, А	630, 1250, 1600, 2000, 2500
Номинальний струм відключення, кА	5, 20, 25, 31.5, 40
Ресурс по комутаційній стійкості, циклів В:	
- при номінальному струмі,	10000
- при номінальному струмі вимкнення,	50
Ресурс по механічній стійкості, циклів В	10000
Маса, кг	1000

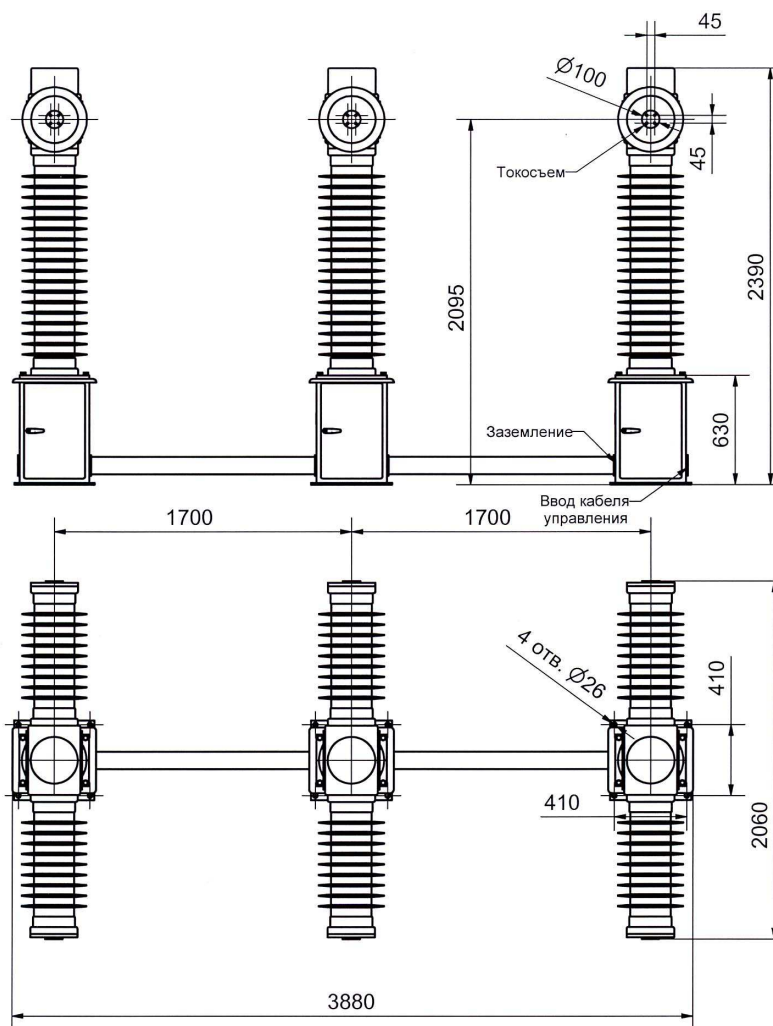


Рис. 16.10 – Габаритні розміри вакуумного вимикача зовнішньої установки ВВЭЛ-110 -У1

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Електрообладнання тягових підстанцій. - Навчально-методичний посібник. – Х.: ХНАМГ, 2005. - 76 с.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Учебное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 397 с.
3. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Визначення струмів короткого замикання в електричних мережах. – Х.: ХНАМГ, 2003. - 88 с.
4. Дейнеко Н.А. Электричні установки, апарати, вторинні кола й електричні проводки напругою до 1000 В. Методичний посібник. – Х.: ХНАМГ, 2004 р. – 128 с.
5. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию, т.1 и т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 560 с. и 592 с.
6. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Контроль технічного стану електрообладнання трансформаторних підстанцій. Навчально-методичний посібник до практичних та лабораторних робіт з дисципліни "Експлуатація електрообладнання тягових підстанцій". – Х.: ХНАМГ, 2005. – 156 с.
7. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Электричні апарати. Навчально-методичний посібник до лабораторного практикуму. – Х.: ХНАМГ, 2008. – 138 с.
8. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Вибір електричних апаратів захисту в мережах до 1000 В. Навчально-методичний посібник до практичних занять та самостійної роботи. – Х.: ХНАМГ, 2007. – 62 с.
9. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Експлуатація високовольтних вимикачів. Навчально-методичний посібник до практичних занять та самостійної роботи. – Х.: ХНАМГ, 2006. – 74 с.



*Навчальне видання*

**ШВЕЦЬ** Сергій Вікторович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ  
з курсу

**«ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ»**

*(для студентів 3,4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання  
за напрямом підготовки 6.050701– "Електротехніка та електротехнології",  
а також для слухачів другої вищої освіти  
за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання")*

Відповідний за випуск: *В.А. Маляренко*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *Н. В. Зражевська*

План 2011, поз. 132-Л

---

Підп. до друку 18.02.2013

Формат 60x84 1/16

Друк на ризографі

Ум.-друк арк. 9,0

Тираж 50 пр.

Зам. № \_\_\_\_\_

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011