

**М.В. РОГОЗА**

**Е Л Е К Т Р И Ч Н І   А П А Р А Т И**

*Дніпроперовськ*

**НГУ  
2005**

**У Д К 621.316 (075.8 )**  
**ББК 31.264 я?№**  
**Р59**

Рецензенти :

О.В. Садовой, доктор технічних наук, професор , завідувач кафедри електрообладнання , проректор з наукової роботи ( Дніпродзержинський державний технічний університет );

О.П. Єгоров , кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів ( Національна металургійна академія України);  
Науково-методична комісія з гірництва Міністерства освіти і науки України

**Рогоза М.В.**

**Р59** Електричні апарати : Навч. посібник – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2005. – 212 с.

Розглянуті базові питання основ теорії електричних апаратів, описані будови та принципи роботи електричних апаратів розподільних пристроїв високої та низької напруги та апаратів електроприводу, а також конструкції вузлів апаратів, режими їх роботи, експлуатаційні характеристики. Дані рекомендації щодо вибору електричних апаратів.

Навчальний посібник призначений для підготовки студентів , які навчаються на спеціальностях, пов'язаних з напрямом „Гірництво”, може бути використаний також для інших технічних спеціальностей вищих навчальних закладів освіти.

**У Д К 621.316 (075.8 )**  
**ББК 31.264 я73**

С М.В. Рогоза, 2005  
С Національний гірничий університет, 2005

## ЗМІСТ

Передмова .....	8
<b>Глава 1. Основні положення .....</b>	<b>9</b>
1.1 Класифікація електричних апаратів .....	9
1.2. Захисні оболонки електричних апаратів.....	10
1.3. Вплив кліматичних факторів на електричні апарати.....	12
1.4. Вимоги до електричних апаратів.....	14
<b>Глава 2. Електричні контакти .....</b>	<b>16</b>
2.1. Загальні положення. Процес протікання електричного струму між контактами .....	16
2.2. Режими роботи контактів .....	20
2.2.1. Вмикання кола .....	20
2.2.2. Контакти у замкнутому стані.....	22
2.2.3. Вимикання кола.....	25
2.3. Матеріали контактів.....	26
2.4. Конструкції твердо металевих контактів.....	30
2.4.1. Нерухомі розбірні і нерозбірні контакти .....	30
2.4.2. Рухомі контактні з'єднання, що не розмикаються .....	30
2.4.3. Розривні контакти .....	32
2.5. Рідиннометалеві контакти .....	34
<b>Глава 3. Вимикання електричних кіл .....</b>	<b>36</b>
3.1. Умови виникнення і горіння електричної дуги.....	36
3.2 Дуга змінного струму. Процес відновлення напруги .....	39
3.3. Способи гасіння електричної дуги.....	44
3.3.1. Вплив на стовп електричної дуги .....	44
3.3.2. Переміщення дуги під впливом магнітного поля .....	46
3.3.3. Гасіння дуги за допомогою дугогасильної решітки .....	48
3.3.4. Гасіння дуги високим тиском .....	51
3.3.5. Гасіння електричної дуги в потоці стиснутого газу .....	52
3.3.6. Гасіння дуги в трансформаторному маслі .....	54
3.3.7. Гасіння дуги у вакуумному середовищі .....	55
3.3.8. Безконтактна комутація.....	56
3.3.9. Сучасні тенденції розвитку способів гасіння дуги .....	58
<b>Глава 4. Контролери, командоапарати і реостати .....</b>	<b>59</b>
4.1. Контролери.....	59
4.2. Командоапарати .....	61
4.2.1. Кнопки управління.....	61

4.2.2. Командоконтролери .....	62
4.2.3. Шляхові вимикачі і мікрОВимикачі .....	64
4.2.4. Універсальні перемикачі .....	65
4.2.5. Ключі управління .....	66
4.3. Резистори пускових і пускорегулюючих реостатів .....	66
4.3.1. Класифікація резисторів .....	66
4.3.2. Матеріали резисторів .....	67
4.3.3. Конструкція резисторів .....	68
4.4. Реостати .....	70
4.4.1. Конструкція реостатів із природним повітряним охолодженням .....	71
4.4.2. Масляні реостати .....	71
<b>Глава 5. Контактори і магнітні пускачі .....</b>	<b>73</b>
5.1. Загальні положення .....	73
5.2. Контактори постійного струму .....	75
5.2.1. Контактна система .....	75
5.2.2. Дугогасильний пристрій .....	77
5.2.3. Електромагніт .....	77
5.3. Контактори змінного струму .....	77
5.3.1. Контактна система .....	77
5.3.2. Електромагніт .....	79
5.3.3. Контактори серії МК .....	79
5.3.4. Вакуумні контактори .....	81
5.4. Магнітні пускачі .....	82
5.5. Вибір контакторів і пускачів .....	85
<b>Глава 6. Безконтактні комутаційні апарати .....</b>	<b>87</b>
6.1. Можливі схеми реалізації .....	87
6.2. Основні типи сучасних тиристорних пускачів і регуляторів .....	88
6.2.1. Тиристорні пускачі серії ПТ .....	90
6.2.2. Тиристорні станції управління типу БЛЕ .....	90
6.2.3. Тиристорні станції управління серії ПТУ .....	92
6.2.4. Тиристорний регулятор потужності .....	92
<b>Глава 7. Рубильники і перемикачі .....</b>	<b>95</b>
7.1. Загальні положення .....	95
7.2. Конструкція рубильників і перемикачів .....	96
<b>Глава 8. Запобіжники .....</b>	<b>99</b>
8.1. Загальні положення .....	99
8.2. Нагрів плавкої вставки при тривалому навантаженні і короткому замиканні .....	99

8.3. Конструкція запобіжників низької напруги .....	104
8.3.1. Запобіжники з гасінням дуги в закритому обсязі .....	104
8.3.2. Запобіжники з дрібнозернистим наповнювачем.....	104
8.3.3. Запобіжники з рідиннометалевим контактом .....	106
8.3.4. Швидкодіючі запобіжники для захисту напівпровідникових приладів .....	106
8.3.5. Блоки «запобіжник — вимикач» .....	107
8.4. Високовольтні запобіжники .....	107
8.4.1. Запобіжники з дрібнозернистим наповнювачем.....	108
8.4.2. Стріляючі запобіжники.....	109
8.5 Вибір запобіжників .....	110
<b>Глава 9. Автоматичні повітряні вимикачі (автомати) .....</b>	<b>115</b>
9.1. Загальні положення .....	115
9.2. Основні конструктивні вузли автоматів .....	118
9.2.1. Струмоведуче коло.....	118
9.2.2. Дугогасильна система.....	118
9.2.3. Приводи.....	119
9.2.4. Механізм передачі зусилля від привода до контактів .....	120
9.2.5. Розчепителі автоматів .....	120
9.3. Основні типи сучасних автоматів.....	122
9.3.1. Автомати серії А-3700 .....	122
9.3.2. Автомати серії «Електрон» .....	124
9.3.3. Швидкодіючі автомати .....	125
9.4. Вибір автоматичних вимикачів.....	127
<b>Глава 10. Вимикачі змінного струму високої напруги .....</b>	<b>129</b>
10.1. Загальні положення .....	129
10.2. Бакові (багатооб'ємні) масляні вимикачі.....	133
10.3. Маломасляні (малооб'ємні) вимикачі .....	135
10.4. Повітряні вимикачі.....	139
10.5. Елегазові вимикачі .....	144
10.6. Електромагнітні вимикачі .....	146
10.7. Вакуумні вимикачі .....	149
10.8. Вибір вимикачів.....	154
<b>Глава 11. Роз'єднувачі, віддільники і короткозамикачі .....</b>	<b>157</b>
11.1. Загальні положення .....	157
11.2. Конструкція роз'єднувачів .....	158
11.3. Віддільники і короткозамикачі .....	161
<b>Глава 12. Обмежуючі апарати .....</b>	<b>164</b>
12.1. Реактори .....	164

12.1.1. Загальні положення.....	164
12.1.2. Конструкція реакторів .....	166
12.1.3. Здвоєні реактори.....	168
12.2. Розрядники .....	171
<b>Глава 13. Апарати для вимірів .....</b>	<b>176</b>
13.1. Трансформатори струму .....	176
13.2. Трансформатори напруги .....	182
<i>Додаток 1</i>	
Умовні графічні позначення, що використовуються в електричних схемах відповідно до єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) .....	188
<i>Додаток 2</i>	
Буквені коди електричних елементів і пристроїв, що використовуються у електричних схемах відповідно до Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) .....	198
<i>Додаток 3</i>	
Нагрівостійкість електроізоляційних матеріалів .....	200
<i>Додаток 4</i>	
Припустимі перевищення температури елементів апаратів низької напруги (для температури навколишнього повітря +40° С).....	201
<i>Додаток 5</i>	
Припустимі температури нагріву елементів високовольтних електричних апаратів .....	203
<i>Додаток 6</i>	
Технічні дані вакуумних контакторів .....	204
<i>Додаток 7</i>	
Технічні дані гібридних контакторів серії КТ.....	204
<i>Додаток 8</i>	
Технічні дані головних контактів контакторів серії КТ-6000 .....	205
<i>Додаток 9</i>	
Технічні дані по електромагнітам Контакторів серії КТ-6000 та КТ-7000.....	205

<i>Додаток 10</i>	
Технічні параметри магнітних пускачів .....	206
<i>Додаток 11</i>	
Автоматичні повітряні вимикачі серії А-3100 та А-3700 .....	207
<i>Додаток 12</i>	
Межа міцності $\sigma_{см}$ різних металів на зминання.....	208
Бібліографічний список.....	209

## ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник призначено для бакалаврів напряму 0903 „Гірництво”, які вивчають нормативну дисципліну „Основи електротехніки, електричне обладнання”.

Завдання діяльності бакалавра передбачають виконання робіт відповідно із заданим алгоритмом. Рівень професійної діяльності бакалаврів згідно Закону України „Про вищу освіту” – експлуатаційний. Бакалавр, зокрема, повинен уміти аналізувати роботу системи та її елементів з метою підтримування її працездатності у процесі експлуатації.

Аналіз функціонування електричного обладнання гірничих підприємств базується на знаннях головних положень теорії, принципів дії та конструкцій електричних апаратів, які здійснюють управління потоком електроенергії від джерела до електроприймача. Поряд з електричними машинами електричні апарати є основними засобами електрифікації і автоматизації гірничих виробництв.

Головна навчальна ціль посібника – введення до засвоєння загальних головних положень теорії електричних апаратів, принципів дії, області використання та вибору комутаційних, пускорегулюючих, обмежувальних апаратів та апаратів для вимірювання.

Посібник складається з 13 глав, кожна з яких містить анотацію, основний текст, резюме та контрольні запитання для самоперевірки.

У анотаціях до глав сформульовані навчальні цілі, які дають представлення про вимоги щодо необхідних умінь студента після вивчення розділу і згідно яких можна однозначно о ступені їх досягнення.

Основний текст являє собою блоки модулів самостійного змістового значення, які підлягають контролю засвоєння.

У резюме до кожної глави відображаються пов’язані з навчальними цілями основні її положення.

У тексті після формул та символів фізичних величин позначення їх одиниць у системі СИ поминуті.

Навчальний посібник спирається на основоположні праці О.А. Чуніхіна, І.С. Таєва, Б.К. Буля, П.В. Сахарова, Л.А. Родштейна, М.О. Жаворонкова, О.О. Васильєва, Л.Д. Рожкової, В.С. Козуліна та інш.

Автор з вдячністю прийме зауваження та побажання, що будуть сприяти подальшому покращенню змісту посібника.



# ГЛАВА 1

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

*Навчальні цілі глави – ознайомити студента із класифікацією електричних апаратів, позначенням захисних властивостей їх оболонок згідно міжнародним стандартам, кліматичним виконанням, категоріям розміщення, структурою скорочених позначень та загальними вимогами до апаратів.*

Електричний апарат — це електротехнічний пристрій, що використовується для вмикання і вимикання електричних кіл, контролю, виміру, захисту, керування і регулювання установок, призначених для передачі, перетворення, розподілу і споживання електроенергії.

Під електричними апаратами розуміється широке коло всіляких пристроїв, які застосовуються у побуті, промисловості та енергетиці.

### 1.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Проводиться по ряду ознак:

- призначенню (основної функції, яка виконується);
- області застосування;
- принципу дії;
- роду струму;
- виконанню захисту від впливів навколишнього середовища;
- конструктивним особливостям і ін.

Основною є класифікація по призначенню, що передбачає розподіл електричних апаратів на 6 базових груп.

**А. Комутаційні апарати розподільних пристроїв.** Призначені для вмикання і вимикання електричних кіл. До цієї групи відносяться рубильники, пакетні вимикачі, вимикачі навантаження, вимикачі високої напруги, роз'єднувачі, віддільники, короткозамикачі, автоматичні вимикачі низької напруги, запобіжники. Для апаратів цієї групи характерно відносно рідке їхнє вмикання і вимикання. Можуть бути й окремі випадки, коли такі апарати досить часто вмикаються і вимикаються (наприклад, вимикачі високої напруги в мережах живлення електричних печей).

**В. Обмежуючі апарати.** Призначені для обмеження струмів короткого замикання (реактори) і перенапруги (розрядники). Режимми короткого замикання і перенапруг є аварійними, і ці апарати рідко підпадають під дію найбільших навантажень.

**С. Пускорегулюючі апарати.** Призначені для пуску, регулювання частоти обертання, напруги і токи електричних машин чи яких-небудь інших споживачів електричної енергії. До цієї групи відносяться контролери, командокон-

тролери, контактори, пускачі, резистори і реостати. Для апаратів цієї групи характерні часті вмикання і вимикання, число яких досягає 3600 у годину і більш.

**Д. Апарати для контролю заданих електричних чи неелектричних параметрів.** До цієї групи відносяться реле і датчики. Для реле характерна плавна зміна вхідної (контрольованої) величини, що викликає стрибкоподібну зміну вихідного сигналу. Вихідний сигнал звичайно впливає на схему автоматики. У датчиках безупинна зміна вхідної величини перетвориться в зміну якої-небудь електричної величини, що є вихідною. За допомогою датчиків можуть контролюватися як електричні, так і неелектричні величини.

**Е. Апарати для вимірювання.** За допомогою цих апаратів кола первинної комутації (головного струму) ізолюються від кіл вимірювальних і захисних приладів, а вимірювана величина здобуває стандартне значення, зручне для вимірів. До них відносяться трансформатори струму, трансформатори напруги, ємкісні подільники напруги.

**Ф. Електричні регулятори.** Призначені для регулювання заданого параметра по визначеному закону. Принцип їхньої дії і характеристики зв'язані з теорією автоматичного регулювання, що у дійсній книзі не викладається.

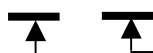
Розділення апаратів по областях застосування більш умовно. Апарати для електричних систем і електропостачання поєднують у групу апаратів розподільних пристроїв низької і високої напруги. Апарати, що застосовуються в схемах автоматичного керування електроприводами і для автоматизації виробничих процесів, зручно об'єднати в групу апаратів керування. Ті самі апарати можуть бути віднесені як до групи апаратів розподільних пристроїв, так і до групи апаратів керування, наприклад рубильники, пакетні вимикачі, контактори, трансформатори струму, реле й ін. Класифікація електричних апаратів по області застосування прийнята в дійсній комінв'язальній напрузі електричні апарати розділяються на дві групи: апарати низької напруги (з номінальною напругою до 1000 В) і високої напруги (з номінальною напругою більш 1000 В).

## 1.2. ЗАХИСНІ ОБОЛОНКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Служать для запобігання зіткнення обслуговуючого персоналу зі струмоведучими або обертовими частинами і виключення проникнення в апарати сторонніх тіл. Відповідно до міжнародних стандартів [13] захисні властивості оболонки позначаються літерами IP International Protection и двома цифрами. Перша цифра позначає ступінь захисту від дотику персоналу до небезпечних деталей апарата і від проникнення усередину апарата сторонніх предметів; друга цифра характеризує захист від проникнення усередину апарата рідин (табл. 1.1).

## Позначення захисних властивостей оболонок електричних апаратів

**I P 2 3**



**ступінь захисту від дотику і  
влучення усередину сторонніх  
предметів та пилу:**

0 – захист відсутній.

1 - захист від випадкового дотику і проникнення усередину предметів  $\varnothing > 51,5$  мм (тобто 2").

2 - захист від випадкового дотику і проникнення усередину предметів  $\varnothing > 12,5$  мм (0,5").

3 - захист від проникнення предметів  $\varnothing > 2,5$  мм (0,1").

4 - захист від проникнення усередину дрібних предметів  $\varnothing > 1$  мм.

5 - захист від шкідливого впливу (осідання) пилу на струмоведучих і обертових частинах.

6 - оболонка повністю перешкоджає проникненню пилу.

**ступінь захисту від проникнення  
води:**

0 – відсутність захисту.

1 – захист від краплин вологи, що сконденсувалася, падаючих на оболонку вертикально.

2 - захист від шкідливого впливу крапель рідини, що падають на оболонку під кутом не більш ніж 15 град. до вертикалі.

3 – захист від дощу, що падає на оболонку під кутом не більш 60 град. до вертикалі.

4 – захист від бризів рідини любого напрямку.

5 – захист від впливу струменю води любого напрямку.

6 - захист від впливів води, які характерні для палуби корабля (морське виконання).

7 - захист від потрапляння води під тиском всередину оболонки, зануреної у воду на певний час.

8 - теж на невизначений час.

Нижче приводяться захисні властивості деяких виконань захисних оболонок електричних апаратів і машин.

IP00. Відкрите виконання.

IP20, IP22, IP23, IP40, IP42, IP44. Захищене виконання.

IP50. Оболонка апарату захищає від шкідливого впливу пилу (допускається влучення усередину невеликої кількості пилу, що не порушує нормальної роботи апарату).

IP60, IP65. Пилозахищене виконання.

IP66. Пиловодонепроникне виконання.

IP67. Герметичне виконання.

### **1.3. ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ**

Під кліматичними факторами зовнішнього середовища розуміються температура і вологість оточуючого апарат повітря, тиск повітря (висота над рівнем моря), сонячне випромінювання, дощ, вітер, пил (у тому числі і сніжний), сольовий туман, іній, гідростатичний тиск води, дія цвілевих грибків, зміст у повітрі коррозійно-активних реагентів. У технічній документації на електричний апарат завжди обмовляються значення кліматичних факторів, у межах яких забезпечується нормальна експлуатація виробів. Ці значення прийнято називати номінальними. Розрізняють також робочі і граничні значення факторів. Значення кліматичних факторів, при яких забезпечується збереження номінальних параметрів і гарантований термін служби апаратів, називаються робочими. Значення кліматичних факторів: а) при який зберігається працездатність апарату при припустимих відхиленнях точності і номінальних параметрів, б) після припинення дії яких точність і номінальні параметри апарату відновлюються, прийнято називати **граничними**. Залежно від впливу кліматичних факторів уся поверхня земної кулі умовно поділяється на ряд *макрокліматичних* районів. Кожен макрокліматичний район характеризується однорідністю географічних факторів і кількісних показників кліматичних факторів на своїй території.

У табл. 1.2 приведені *кліматичні виконання* електричних апаратів, призначених для експлуатації на суші, озерах і ріках. Виконання для морського клімату приводяться в спеціальній довідковій літературі [15].

У залежності від місця розміщення в умовах експлуатації електричні апарати поділяються на *категорії розміщення*, зазначені в табл. 1.3.

Слід зазначити, що на роботу апаратів впливає також атмосферний тиск. Від щільності атмосферного повітря залежать міцність зовнішньої електричної ізоляції й охолодження електричних апаратів. Більшість електричних апаратів виготовляють для роботи на нормальній висоті 1000 м над рівнем моря, при якій апарати працюють з номінальними параметрами. Однак апарати можуть працювати на висотах, що перевищують нормальну. При цьому у відповідних стандартах чи технічних умовах указується зменшення номінального навантаження на кожні 100 чи 1000 м висоти, що перевищує нормальну. Аналогічно

враховується зменшення електричної міцності повітряних проміжків (повітряна ізоляція).

Таблиця 1.2

**Виконання для мікрокліматичних районів**

Виконання для макрокліматичних районів	Позначення		
	літерні		цифрові
	російські	латинські	
З помірним кліматом.	У	N	0
З помірним та холодним кліматом	УХЛ	NF	1
З вологим тропічним кліматом.	ТВ	ТН	2
З сухим тропічним кліматом	ТС	ТА	3
З сухим и вологим тропічним кліматом	Т	Т	4
Для всіх макрокліматичних районів на суші, крім районів з дуже холодним кліматом (загальнокліматичне виконання)	0	U	5

Таблиця 1.3

**Категорії розміщення**

Категорії розміщення для експлуатації	Позначення
▪ На відкритому повітрі	1
▪ Під навісом чи у приміщеннях, де коливання температури і вологості несуттєво відрізняються від їхніх коливань на відкритому повітрі і є порівняно вільний доступ зовнішнього повітря	2
▪ У закритих приміщеннях із природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов, де коливання температури і вологості повітря і вплив піску і пилу істотно менше, ніж на відкритому повітрі	3
▪ У приміщеннях зі штучно регульованими кліматичними умовами	4
▪ У приміщеннях з підвищеною вологістю (наприклад у не опалювальних і не вентильованих підземних приміщеннях) у шахтах, рудниках, підвалах та ін.	5

У залежності від змісту корозійно-активних реагентів навколишня атмосфера поділяється на чотири типи відповідно до табл. 1.4.

При замовленні апарата необхідно вказувати його виконання (табл. 1.2), категорію розміщення (табл. 1.3) і граничну висоту місця установки апарата

## Типи атмосфери

Тип атмосфери		Зміст корозійно-активних реагентів
Позначення	Найменування	
I	Умовно чиста	Сірчистий газ - ні більш 20 мг/(м <sup>2</sup> · добу), не більш 0,025 мг/м <sup>3</sup> ; хлориди — менш 1 мг/ (м <sup>2</sup> · добу)
II	Промислова	Сірчистий газ — від 20 до 110 мг/(м <sup>2</sup> · добу), від 0,025 до 0,13 мг/м <sup>3</sup> ; хлориди — менш 0,3 мг/(м <sup>2</sup> · добу)
III	Морська	Сірчистий газ ні більш 20 мг/(м <sup>2</sup> · добу), не більш 0,025 мг/м <sup>3</sup> ; хлориди — від 30 до 300 мг/(м <sup>2</sup> · добу)
IV	Приморсько-промислова	Сірчистий газ — від 20 до 110 мг/(м <sup>2</sup> · добу), від 0,025 до 0,13 мг/м <sup>3</sup> ; хлориди — від 0,3 до 30 мг/(м <sup>2</sup> · добу)

над рівнем моря. Кліматичне виконання і категорія розміщення вказуються наприкінці скороченого позначення електричних апаратів. Так, наприклад, позначення ВЭ-10-1250-20-УЗ означає вимикач електромагнітний на номінальну напругу 10 кВ, номінальний струм 1250 А, номінальний струм вимикання 20 кА, для помірного клімату (У), і для експлуатації в закритих приміщеннях (категорія розміщення 3).

Підприємства, що розробляють і виготовляють електричні апарати, керуються стандартами, що передбачають норми механічних іспитів (на удари, вібрацію, механічні навантаження на виводи апарату), акустичних іспитів, кліматичних іспитів (теплостійкість, холодостійкість, грибостійкість, водонепроникність, брызгозахищеність, сонячна радіація й ін.).

#### 1.4. ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Вимоги до апаратів дуже різноманітні і залежать від призначення, умов експлуатації, необхідної надійності і т.д. Однак існує ряд вимог, що є загальними для всіх електричних апаратів.

1. У номінальному режимі роботи температура струмоведучих елементів апарату не повинна перевершувати значень, що рекомендуються відповідним державним стандартом чи іншим нормативним документом.

При короткому замиканні (КЗ) струмоведучі елементи апарату піддаються значним термічним і динамічним навантаженням, які викликаються великим значенням струму. Ці навантаження не повинні викликати залишкових явищ, що порушують працездатність апарату після усунення КЗ.

2. Апарати, призначені для частого вмикання і вимикання, повинні мати високу зносостійкість.
3. Контакти апаратів, призначених для вимикань струмів КЗ, повинні бути розраховані на цей режим.
4. Ізоляція електричних апаратів повинна витримувати перенапруги, що мають місце в експлуатації, і мати визначений запас, що враховує погіршення властивостей ізоляції з часом і внаслідок осадження пилу, бруду і вологи.
5. У зв'язку із широкою автоматизацією виробничих процесів, застосуванням складних схем автоматики збільшується число апаратів, що беруть участь у роботі. Можливість відмовлення в роботі електричних апаратів вимагає їх резервування і створення спеціальної системи пошуку несправностей. У зв'язку з цим електричні апарати повинні мати високу надійність. Вихід з ладу апаратів високої напруги приводить до великих руйнувань і значних матеріальних втрат. Електричні апарати, що відповідають сучасним вимогам, за термін служби 25 років не повинні мати потребу в ремонті і складній ревізії.
6. Маса, габаритні розміри, вартість і час, необхідні для установки й обслуговування електричних апаратів, повинні бути мінімальними.
7. До кожного апарата пред'являється ряд специфічних вимог, обумовлених його призначенням. Так, наприклад, вимикач високої напруги повинний вимикати струм КЗ за можливо малий час (0,04—0,06 с), трансформатор струму повинний давати струмову і кутову погрішності, не перевищуючі визначеного значення та ін.
8. Конструкція електричних апаратів повинна забезпечувати можливість автоматизації в процесі їхнього виготовлення й експлуатації.

#### *Запитання для самоперевірки*

1. *За якими ознаками проводиться класифікація електричних апаратів?*
2. *Класифікація електричних апаратів по призначенню.*
3. *Позначення захисних властивостей оболонок електричних апаратів відповідно міжнародних стандартів.*
4. *Які існують кліматичні виконання електричних апаратів?*
5. *Категорії розміщення електричних апаратів.*

## ГЛАВА 2

### ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ

*Розглянута фізика процесу протікання електричного струму між контактами, природа виникнення перехідного опору та нагріву контактів, їх режими роботи. Приведений аналіз матеріалів і конструкцій контактів електричних апаратів.*

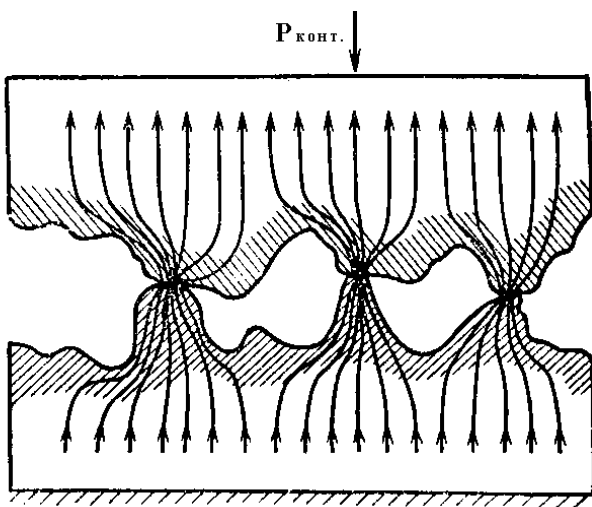
*Навчальна ціль глави – формування умінь, які необхідні при виборі і експлуатації електричних апаратів з урахуванням особистостей конструкцій їх контактних систем.*

#### 2.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ. ПРОЦЕС ПРОТІКАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ МІЖ КОНТАКТАМИ

Електричним контактом називається з'єднання двох провідників, що дозволяє проводити струм між ними. Дотичні провідники називаються контакт-деталлями, або просто контактами.

Оскільки одержати абсолютно гладку поверхню контактів неможливо, електричний струм при зіткненні контактів, проходить між ними тільки в окремих точках, у яких ці поверхні дотикаються. Приблизна картина зіткнення контактів показана на рис. 2.1. Завдяки силі контактного натискання одного контакту на інший  $P_{\text{конт}}$  вершини виступів деформуються й утворюються площадки дійсного торкання контактів радіусом  $a$  (рис. 2.2,  $a$ ). Розглянемо процес переходу струму з одного контакту в інший при торканні двох циліндричних контактів по торцях. Радіус  $a$  при пластичній деформації можна визначити як

$$a = \sqrt{P_{\text{конт}} / \pi \sigma} \quad (2.1)$$



**Рис. 2.1. Зіткнення поверхонь контактів**

де  $P_{\text{конт}}$  — сила контактного натискання, Н;  $\sigma$  — тимчасовий опір на зминання матеріалу контактів, Н/м<sup>2</sup>.

У результаті стягування ліній струму до площадки торкання їхня довжина збільшується, а переріз провідника, через яке фактично проходить струм, зменшується, що викликає збільшення опору. Опір в області площі торкання, обумовлений явищами стягування ліній струму, називається перехідним опором стягування конта-



кту  $R_{ст}$ .

З урахуванням того, що область стягування ліній струму мала в порівнянні з розмірами контакту, реальні контакти можна замінити напівнескінченими тілами з питомим опором  $\rho$ . Для двох напівнескінчених тіл, що контактують по одній круглій площадці торкання, картина ліній струму й електричних потенціалів представлена на рис. 2.2 б.

Еквіпотенційні поверхні є напівеліпсоїдами обертання, лінії струму — гіперболами з загальним фокусом. Для такої ідеалізованої картини перехідний опір визначається вираженням [13]

$$R_{ст} = \rho / (2a) \quad (2.2)$$

З точністю до 5 % ця формула справедлива, якщо діаметр контакту перевершує в 15 і більш раз діаметр площадки торкання. У більшості практичних випадків остання умова дотримується, тому що розміри площадки торкання звичайно не перевершують частки міліметра.

Тоді на підставі (2.1) і (2.2) перехідний опір стягування

$$R_{ст} = \frac{\rho \sqrt{\pi \sigma}}{2 \sqrt{P_{конт}}} = \frac{\kappa_1}{P_{конт}^{1/2}}, \quad (2.3)$$

де  $\kappa_1$ -експериментальний коефіцієнт, який залежить від матеріалу контакту, і приводиться в довідковій літературі [13].

Таким чином, перехідний опір, обумовлений стягуванням ліній струму, пропорційний питомому опору матеріалу контакту, кореню квадратному з тимчасового опору на зминання цього матеріалу  $\sigma$  і назад пропорційно кореню квадратному із сили контактного натискання  $P_{конт}$ . З ростом контактного натискання перехідний опір зменшується (рис. 2.3).

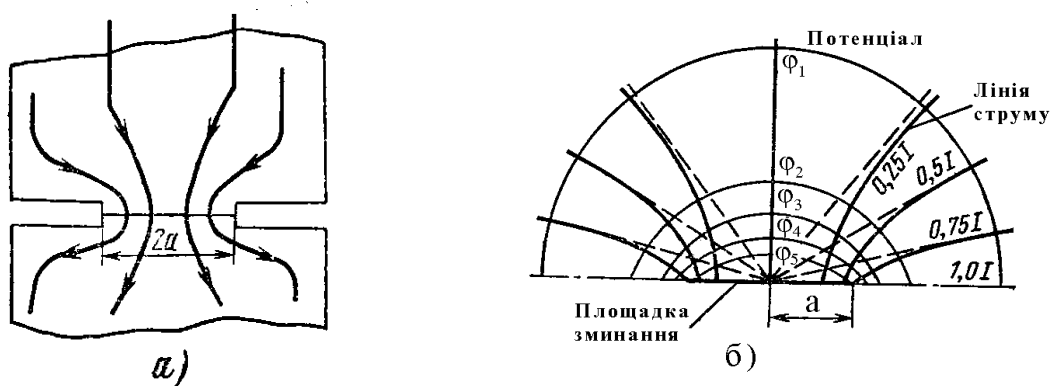
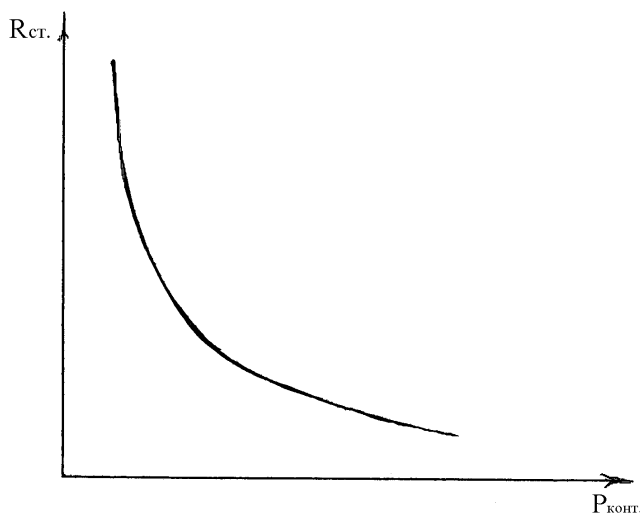


Рис. 2.2. Ідеалізована картина розтікання струму у точковому контакті

Нижче приводяться отримані експериментально значення коефіцієнта  $k_1$  для одноточкових тільки що зачищених контактів [15].

Матеріал контактів	Для сильноточкових контактів, $10^{-4}$ Н ½, Ом	Для слабкоточкових контактів (реле) Н ½, Ом
Мідь	3,16	0,014-0,0175
Срібло	1,58	0,006
Олово	15,8	-
Латунь	21,2	-
Сталь	24	-
Алюміній	5,05	-

Одноточковий контакт застосовується в основному тільки при малих струмах (до 20 А). При великих струмах (100 А и більш) застосовується багатоточковий контакт. У багатоточковому контакті струм проходить через кілька контактних переходів, з'єднаних паралельно. Тому його перехідний опір при незмінному натисканні менше, ніж в одноточкового контакту. Однак натискання в кожній контактній площадці зменшується. Кількість контактних переходів збільшується з ростом натискання по дуже складному закону. Перехідний опір багатоточкового контакту виражається рівнянням, отриманим експериментально [13]:



**Рис. 2.3 Залежність перехідного опору від сили контактного натискання**

$$R_{ст} = k/P_{конт}^m, \quad (2.4)$$

де  $m = 0,7 \dots 1$ ;  $k$  - постійна, яка залежна від конструкції контакту.

Експериментальні формули для визначення  $R_{ст}$  контактів, застосовуваних в апаратах високої напруги, приведені в [15].

Опір  $R_{ст}$  залежить і від обробки поверхні. При шліфуванні поверхня виступів більш положиста з великою площею. Змінання таких виступів можливо тільки при великих силах натискання. Тому опір шліфованих контактів вище, ніж контактів з більш грубою обробкою.

Перехідний опір контактів обумовлений не тільки явищем стягування ліній струму. Контактуючі поверхні покриті адсорбованими молекулами газу, у якому розташовувалися контакти до їхнього замикання. Дуже часто молекули

газу вступають у хімічну реакцію з матеріалом контактів, у результаті чого на їхніх поверхнях можуть виникнути плівки з високим питомим опором (до  $10^4$  Ом·м). Таким чином, результуючий перехідний опір контактів  $R_{\text{конт}}$  може бути представлений як сума опору  $R_{\text{ст}}$  і опору плівок  $R_{\text{пл}}$ :

$$R_{\text{конт}} = R_{\text{ст}} + R_{\text{пл}} \quad (2.5)$$

Вплив плівок у значній мірі залежить від радіуса площадки  $a$ . При  $a \geq 10^{-3}$  см. впливом плівок можна зневажити. При  $a = 10^{-4}$  см опір плівок у 10 разів може перевищувати опір  $R_{\text{ст}}$ . При  $a = 10^{-4} \div 10^{-3}$  см величини  $R_{\text{ст}}$  і  $R_{\text{пл}}$  порівнянні. Тому плівки особливо небезпечні для контактів на малі струми, коли сили натискання і розмір площадки  $a$  малі. Процес утворення плівки починається відразу після зіткнення зачищеної поверхні контактів з навколишнім повітрям. Перехідний опір при цьому може зрости в десятки тисяч разів. У зв'язку з цим контакти на малі струми (малі натискання) виготовляються зі шляхетних металів, що не піддаються окислюванню (золото, платина й ін.). Звичайно експериментальні дослідження і розрахунок перехідного опору ведуться для свіжозачищених контактів.

У потужнострумових контактах плівка руйнується або завдяки великим натисканням, або за рахунок прослизання одного контакту щодо іншого.

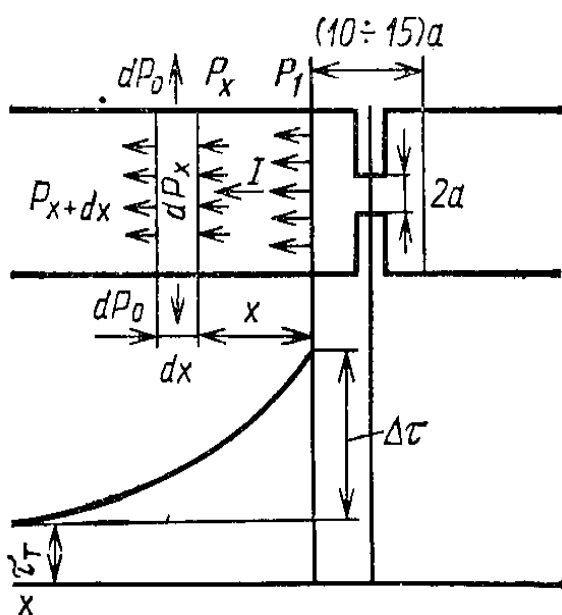


Рис. 2.4 До розрахунку температури контактів

У процесі роботи перехідний опір контактів не залишається постійним. Під впливом кисню, інших агресивних газів, підвищеної температури інтенсивність утворення плівки росте. При цьому перехідний опір контакту, спадання напруги на ньому і його температурі зростають. При визначених значеннях напруг і температури відбувається електричний пробій плівки, після чого опір контакту падає. Це явище називається фрітінгом.

Для захисту контактів від впливу навколишнього середовища вони можуть бути розміщені в герметичному балоні з інертним газом або вакуумом. Ці контакти одержали назву герконів (герметичний контакт).

При проходженні струму через область стягування його ліній контакт нагрівається. Згідно [15] пере-

вищення температури в області стягування  $\Delta t_{\text{конт}}$  може бути знайдене прибли-

$$\Delta\tau_{\text{конт}} = U_{\text{конт}}^2 / 8\lambda\rho \quad (2.6)$$

де  $U_{\text{конт}} = IR_{\text{ст}}$  - падіння напруги на перехідному опорі, В,  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С);  $\rho$  — питомий електричний опір матеріалу контактів, Ом·м.

Найбільшу температуру має площадка торкання. В міру видалення від її температура контакту швидко падає. Довжина області стягування невелика і складає  $(5\div 6)a$  (рис. 2.4).

При збільшенні струму через контакт збільшується падіння напруги  $U_{\text{конт}} = IR_{\text{ст}}$ . Згідно (2.6) зростає перевищення температури контактної площадки  $\Delta\tau_{\text{конт}}$ , що у свою чергу викликає збільшення опору  $R_{\text{конт}}$ . Залежність опору  $R_{\text{конт}}$  від напруги  $U_{\text{конт}}$ , називана  $R(U)$ -характеристикою контакту, показана на рис. 2.5.

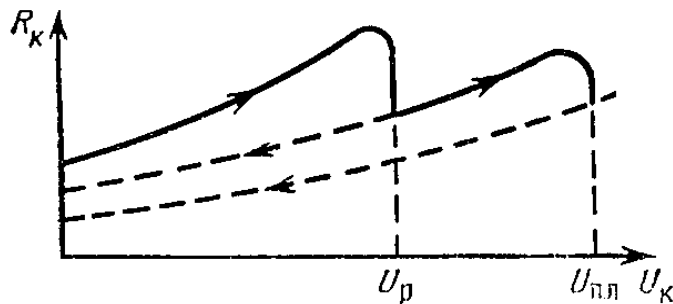


Рис. 2.5  $R(U)$  – Характеристика контакту

Тут  $U_p$  — напруга рекристалізації чи розм'якшення матеріалу. Якщо температура продовжує рости, то площадка торкання може розплавитися, чому відповідає напруга плавлення  $U_{\text{конт}} = U_{\text{пл}}$ . Температура контакту не повинна досягати температури розм'якшення матеріалу.

## 2.2. РЕЖИМИ РОБОТИ КОНТАКТІВ

### 2.2.1. Вмикання кола

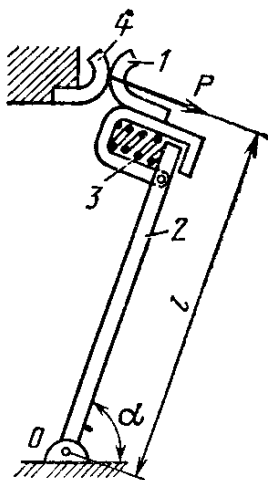


Рис. 2.6. Контактна система контактора в процесі вмикавання

При вмиканні електричних апаратів у їхніх контактних системах можуть мати місце наступні процеси: 1) вібрація контактів; 2) ерозія на поверхні контактів у результаті утворення електричного розряду між ними.

Розглянемо контактну систему контактора (рис. 2.6). Рухомий контакт 1 зв'язаний з контактним важелем 2 і контактною пружиною 3. Нерухомий контакт 4 жорстко закріплений на опорі. При вмиканні контактора його електромагніт впливає на важіль 2, переміщення якого приводить до зіткнення контактів 1 і 4. У момент зіткнення контактів відбувається удар, у результаті якого відбуваються деформація (змінання) контактів і відкидання контакту 1

вправо. Між контактами утвориться зазор і під впливом прикладеної до них напруги загоряється електрична дуга. Рух контакту  $I$  вправо припиниться тоді, коли енергія, отримана їм при ударі, перейде в енергію стиску пружини  $3$ . Після цього контакт  $I$  під дією пружини  $3$  почне переміщатися вліво. Відбудеться новий удар і нове відкидання контакту.

При вібрації контактів відбувається багаторазове утворення електричної дуги, що приводить до їх сильного зносу через оплавлення і розпилення матеріалу контактів. У зв'язку зі зносом контактів зменшується зусилля їхнього натискання у замкненому положенні, що приводить до підвищення перехідного опору. При великому числі вмикань і вимикань можливий швидкий вихід контактів з ладу [13].

Для зменшення вібрації створюється попередня деформація (натяг) контактної пружини при розімкнутих контактах  $P_{\text{поч}}$ .

При замкненому положенні на контакти діє кінцеве натискання  $P_{\text{конт}}$ . З ростом початкового зусилля натискання  $P_{\text{поч}}$  вібрація контактів різко скорочується. Однак при надмірно великому початковому зусиллі вібрація може зрости через недостатню потужність електромагніта, що вмикає контакти. Збільшення твердості контактної пружини також впливає на зменшення вібрації. Однак цей вплив слабкіше впливу попереднього натягу.

Іноді (характерно для слабкострумівих апаратів) між контактним важелем і рухомих контактом уводиться протівібраційний вкладиш з пористого матеріалу, наприклад у виді губчатої гуми [6]. Цей матеріал сприяє загасанню коливань контакту і зменшенню його вібрації.

Зі збільшенням стискального зусилля електромагніта чи тягового моменту привода контактора відкидання контактів спочатку зменшується, а потім зростає.

При подальшому зростанні тягового моменту збільшуються розгін рухомого контакту і його швидкість у момент удару, що веде до росту амплітуди відкидання. У зв'язку з цим велике перевищення тягової характеристики над протидіючої неприпустимо [13].

Вібрація контактів підсилюється з ростом їхнього моменту інерції. Через це маса контактів повинна бути мінімальною.

При вмиканні на існуюче КЗ вібрація контактів підсилюється через виникнення сил, що відкидають, у крапці торкання [13]. Для того щоб не було оплавлення контактів у момент їхнього зіткнення, зусилля попереднього натягу контактної пружини повинне компенсувати електродинамічні сили відкидання і створювати таке натискання, при якому спадання напруги на перехідному опорі не приводить до плавлення точки торкання [рівняння (2.6)].

Напруга на контакті в цьому режимі  $U_{\text{конт}} = I_{\text{к}} R_{\text{конт}}$ .

Цій напрузі відповідає перепад температури на контактах  $\Delta\tau_{\text{конт}} = (I_{\text{к}} R_{\text{конт}})^2 / 8\lambda\rho$ . Цей перепад повинний бути менше, ніж температура плавлення матеріалу  $\Theta_{\text{пл}}$ .

В апаратах на великі струми КЗ електродинамічні зусилля у торцевих контактах (рис. 2.6) дуже великі і зусилля контактних пружин повинні досягати

декількох тисяч ньютон. У подібних випадках необхідно переходити до конструкції контактів з меншою електродинамічною силою відкидання [13].

У процесі вмикання в міру наближення рухомого контакту до нерухомого зростає напруженість електричного поля між ними. При визначеній відстані між контактами відбудеться пробій міжконтактного зазору. В апаратах низької напруги пробій виникає при дуже малій відстані між контактами (соті частки міліметра). Електрична дуга при пробіі не виникає, тому що рухомий контакт продовжує рухатися і, замикаючи проміжок, припиняє розрядні процеси. Однак при пробіі електрони бомбардують контакт із позитивним потенціалом — анод, і його матеріал переходить на катод, відкладаючись на ньому у виді тонких голок. Знос контактів у результаті переносу матеріалу з одного контакту на інший, тобто випар у навколишнє простір без зміни складу матеріалу, називається фізичним зносом чи ерозією. Ерозія при замиканні контактів невелика, але при малих натисканнях і малих міжконтактних зазорах вона може привести до їх приварювання.

В апаратах високої напруги при зближенні контактів пробій відбувається при великих відстанях. Виникаюча дуга горить відносно довго, при цьому можливо зварювання контактів, особливо при вмиканні на існуюче КЗ. За рахунок застосування великого числа послідовно з'єднаних розривів зменшується напруга, що приходить на розрив [13], що дає можливість знизити час попереднього пробію до 0,005 с, що визнане безпечним, наприклад, для масляних вимикачів.

### 2.2.2. Контакти у замкненому стані

У цьому режимі варто розрізняти два випадки: через контакти проходить тривалий номінальний струм і через контакти проходить струм КЗ.

У табл. 2.1 приведені температури і падіння напруги в контакті для двох характерних точок — точки розм'якшення матеріалу  $\Theta_1$ ,  $U_{\text{конт } 1}$  і точки плавлення матеріалу  $\Theta_2$ ,  $U_{\text{конт } 2}$ .

Для надійної роботи контактів необхідно, щоб при номінальному струмі  $I_{\text{ном}}$  падіння напруги на перехідному опорі  $R_{\text{конт}}$  було менше  $U_{\text{конт } 1}$ :

$$I_{\text{ном}} R_{\text{конт}} = (0,5 \div 0,8) U_{\text{конт } 1} \quad (2.7)$$

Для розрахунку контактів на малі струми використовується формула (2.7). По заданому струмі  $I_{\text{ном}}$  і спаданню напруги  $U_{\text{конт } 1}$  визначається перехідний опір  $R_{\text{конт}}$  для даного матеріалу. Після цього знаходиться необхідне контактне натискання за допомогою (2.3).

Для одноточкових контактів на великі струми рекомендується формула [1]

$$P_{\text{конт}} = I_{\text{ном}}^2 \frac{B \pi H V}{16 \lambda^2 \left( \arccos \frac{T_0}{T_k} \right)^2} \quad (2.8)$$

де  $P_{\text{конт}}$  — контактне натискання, Н;  $I_{\text{ном}}$  — діюче значення номінального струму, А;  $B$ -число Лоренца;  $HV$ — твердість по Віккерсу, Н/м<sup>2</sup>;  $\lambda$ -питома теплопровідність, Вт/(м·°С);  $T_{\text{к}}$ —температура точки торкання, К;  $T_0$ — температура тіла контакту, К. Для найбільш розповсюджених металевих матеріалів при температурі 100 °С число Лоренца  $B$  міняється в досить вузькій межі  $2,33 \div 2,49 \cdot 10^8 \text{В}^2/\text{°С}^2$ . Твердість по Віккерсу в залежності від температури для мідного контакту приведена в табл.2.1. Твердість по Віккерсу близька до твердості по Брінеллю.

Таблиця 2.1

**Температура і падіння напруги в контактi для точки розм'якшення i точки плавлення матеріалу**

Матеріал	$\Theta_1, \text{°C}$	$U_{\text{конт } 1}, \text{В}$	$\Theta_2, \text{°C}$	$U_{\text{конт } 2}, \text{В}$
Алюміній	150	0,1	658	0,3
Сталь	500	0,21	1530	0,6
Нікель	520	0,22	1455	0,65
Мідь	190	0,12	1083	0,43
Срібло	150	0,09	960	0,35
Кадмій	-	-	321	0,15
Вольфрам	1000	0,4	3370	1,0
Олово	100	0,07	232	0,13
Платина	540	0,25	1773	0,7
Графіт	-	-	4700	5

Формула (2.7) дозволяє по заданому струму  $I_{\text{ном}}$  відразу знайти необхідне контактне натискання  $P_{\text{конт}}$  по відомому відношенню  $T_0/T_{\text{конт}}$ . Температура тіла контакту  $T_0$  може бути знайдена як

$$T_0 = \tau + \Theta_0 + 273 = \frac{I^2 \rho}{\kappa_T r q} + \Theta_0 + 273 \quad (2.9)$$

де  $I$ —діюче значення струму, А;  $\rho$  - питомий опір матеріалу контактів, Ом·м;  $\kappa_T$ —питомний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $r$ —периметр перерізу контакту, м;  $q$  - переріз контакту, м<sup>2</sup>;  $\Theta_0$  - температура навколишнього середовища, °С, звичайно  $\Theta_0 = 40^\circ \text{C}$ . Температуру  $T_{\text{конт}}$  можна визначити, скориставшись тим, що в більшості випадків  $T_{\text{конт}} - T_0 \leq 5 \div 10^\circ \text{C}$ .

При КЗ через контакти проходять струми, у 10—20 разів перевищуючі номінальні значення. Через малу постійну часу нагрівання температура контакт-

ної площадки піднімається практично миттєво і може досягти температури плавлення.

Слід зазначити, що з точки зору нагрівання контакти є найбільш навантаженим місцем струмоведучого кола. При великих струмах (2 кА і вище) йдуть по шляху підвищення температури контактної точки до 200 °С (при срібних контактах) і застосування рідинного охолодження. У цьому випадку вдається значно полегшити контактну систему, зменшити габаритні розміри апарату й одержати високу швидкодію [13].

Аналітичний розрахунок струму, що плавить, при КЗ утруднений, тому що існуючі формули не враховують розм'якшення матеріалу при високій температурі. Тому при розрахунках доцільно користатися дослідними даними, які безпосередньо пов'язують струм зварювання і контактне натискання. При розрахунках електродинамічної стійкості контактів досить точна експериментальна формула [13]

$$i \leq k_2 \sqrt{P_{\text{конт}}}, \quad (2.10)$$

де  $i$ —струм електродинамічної стійкості (амплітуда ударного струму), А;  $P_{\text{конт}}$  — контактне натискання, Н. Значення коефіцієнта  $k_2$  приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Коефіцієнт  $k_2$  для розрахунку динамічної стійкості контактів**

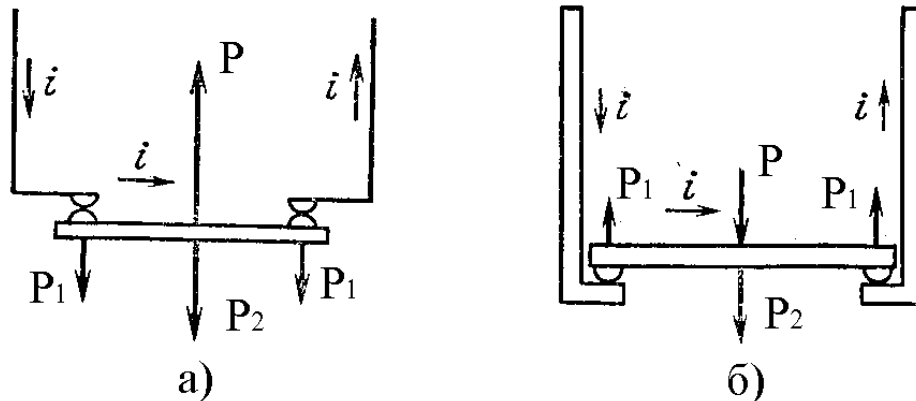
Тип контакту	Матеріал	$k_2, \text{А/Н}^{1/2}$ ,
Щітковий	Мідь — латунь	950-1270
Пальцевий несамоустановлювальний	Мідь — мідь	1300
Пальцевий несамоустановлювальний	Латунь — мідь	1200
Пальцевий несамоустановлювальний	Латунь — сталь	1520
Пальцевий несамоустановлювальний	Латунь — латунь	1600
Пальцевий самоустановлювальний	Мідь — латунь	1820
Розеточний (на один елемент розетки)	Мідь — латунь	1740
Розеточний (на один елемент розетки)	Мідь — мідь	1900

Імовірність приварювання контактів залежить від їхньої конструкції і від усього струмоведучого кола апарату [13]. Електродинамічні сили, що діють між струмоведучими деталями, необхідно використовувати для підвищення електродинамічної стійкості контактів. Так, наприклад, при кінематичній схе-



мі апарату по рис. 2.7, а контактна пружина  $P$  повинна створювати зусилля  $2P_1$  яке розраховується по (2.10), і зусилля  $P_2$ , створюване вертикальними струмоведучими деталями.

При кінематичній схемі по рис. 2.7, б електродинамічне зусилля  $P_2$ , що діє на перемичку, дозволяє вибрати контактну пружину з меншим зусиллям натискання.



**Рис. 2.7 Використання електродинамічних зусиль контуру для підвищення динамічної стійкості контактів**

### 2.2.3. Вимикання кола

У процесі розмикання контактів контактне натискання зменшується, перехідний опір зростає, і за рахунок цього росте температура точок торкання. У момент роз'єднання контакти нагріваються до температури плавлення і між ними виникають містки з рідкого металу. При подальшому русі контактів містки обриваються й у залежності від параметрів кола, що вимикається, виникає дуговий (табл. 2.3) або тліючий розряд.

Таблиця 2.3

#### Мінімальні значення напруги і струму, необхідні для підтримки дугового розряду

Матеріал контактів	$U_0$ , В	$I_0$ , А	Матеріал контактів	$U_0$ , В	$I_0$ , А
Платина	17	0,9	Вольфрам	17,0	0,9
Золото	15	0,38	Мідь	12,3	0,43
Срібло	12	0,4	Вугілля	18—22	0,03

Висока температура дуги приводить до інтенсивного окислювання і розпилення матеріалу контактів у навколишнім просторі, переносу матеріалу з одного електрода на іншій і утворенню плівок. Усе це спричиняє швидкому зносу контактів. Знос, зв'язаний з окислюванням і утворенням на електродах плі-

вок хімічних сполук матеріалу контактів із середовищем, називається хімічним зносом чи корозією.

Перенос матеріалу з одного електрода на іншій найбільш шкідливий при постійному струмі. Напрямок переносу в цьому випадку постійний, що веде до швидкого виходу з ладу контактів. Перенос матеріалу з анода на катод називається позитивною ерозією, перенос у зворотну сторону — негативною. Мірою ерозії є втрата маси чи обсягу контакту. Напрямок ерозії і форма зносу контактних поверхонь залежить від виду розряду і значення струму [15].

Для існування дугового розряду необхідно, щоб значення напруги і струму перевищували мінімальні значення  $U_0$  й  $I_0$ , приведені в табл. 2.3.

Якщо  $I < I_0$  (табл. 2.3), то при напрузі кола 270—330 В виникає тліючий розряд або іскра.

Для боротьби з ерозією контактів на струми від 1 до 600 А:

- \* скорочують тривалість горіння дуги за допомогою дугогасильних пристроїв (ДП);
- \* усуваються вібрації контактів при вмиканні;
- \* застосовуються дугостійкі матеріали контактів;
- \* застосовують спеціальні схемні методи зменшення впливу дуги на контакти, наприклад, шунтування RC-колом та ін. [13].

### 2.3. МАТЕРІАЛИ КОНТАКТІВ

До матеріалів контактів сучасних електричних апаратів пред'являються такі наступні вимоги:

- 1) висока електрична провідність і теплопровідність;
- 2) висока корозійна стійкість у повітряному або іншому середовищах;
- 3) стійкість проти утворення плівок з високим електричним опором;
- 4) мала твердість для зменшення необхідної сили натискання;
- 5) висока твердість для зменшення механічного зносу при частих вмиканнях і вимиканнях;
- 6) мала ерозія;
- 7) висока дугостійкість (температура плавлення);
- 8) високі значення струму і напруги, необхідні для дугоутворення;
- 9) простота обробки, низька вартість.

Властивості основних контактних матеріалів.

**Мідь.** Позитивні властивості: високі питома електрична провідність і теплопровідність, достатня твердість, що дозволяє застосовувати при частих вмиканнях і вимиканнях досить високі значення  $U_0$  і  $I_0$ , простота технології, відносно низька вартість.

Недоліки: досить низька температура плавлення, при роботі на повітрі покривається шаром міцних оксидів, що мають високий опір, вимагає досить великих сил натискання. Для захисту міді від окислювання поверхня контактів покривається електролітичним способом шаром срібла товщиною 20—30 мкм.

У контактах на великі струми іноді ставляться срібні пластинки (в апаратах, що вмикаються відносно рідко). Застосовується як матеріал для плоских і круглих шин, контактів апаратів високої напруги, контакторів, автоматів і ін. Унаслідок низкою дугостійкості небажане застосування в апаратах, що вимикають потужну дугу і мають велике число вмикань у годину.

У контактах, що не мають взаємного ковзання, через плівку оксидів застосування міді не рекомендується.

**Срібло.** Позитивні властивості: високі електрична провідність і теплопровідність, плівка оксиду срібла має малу механічну міцність і швидко руйнується при нагріванні контактної точки. Контакт срібла стійкий завдяки малій напрузі на зминання  $\sigma_{см}$ . Для роботи достатні малі натискання (застосовується при натисканнях 0,05Н и вище). Стійкість контакту, малий перехідний опір є характерними властивостями срібла.

Недоліки: мала дугостійкість і недостатня твердість перешкоджають використанню його при наявності потужної дуги і частих вмиканнях і вимиканнях.

Застосовується в реле і контакторах при струмах до 20 А. При великих струмах аж до 10 кА срібло використовується як матеріал для головних контактів, що працюють без дуги.

**Алюміній.** Позитивні властивості: досить високі електрична провідність і теплопровідність. Завдяки малій щільності струмоведуча частина круглого перерізу з алюмінію на такий же струм, як і мідний провідник, має майже на 48 % меншу масу. Це дозволяє зменшити масу апарата.

Недоліки: утворення на повітрі й в активних середовищах плівок з високою механічною міцністю і високим опором; низька дугостійкість (температура плавлення значно менше, ніж у міді і срібла); мала механічна міцність; через наявність у навколишньому повітрі вологи й оксидів мідний і алюмінієвий контакти утворюють своєрідний гальванічний елемент. Під дією ЕДС цього елемента відбувається електрохімічне руйнування контактів (електрохімічна корозія). У зв'язку з цим при з'єднанні з міддю алюміній повинний покриватися тонким шаром міді електролітичним шляхом або обидва метали необхідно покривати сріблом.

Алюміній і його сплави (дюраль, силумін) застосовуються головним чином як матеріал для шин і конструкційних деталей апаратів,

**Вольфрам.** Позитивні властивості: висока дугостійкість, велика стійкість проти ерозії, зварювання. Висока твердість вольфраму дозволяє застосовувати його при частих вмиканнях і вимиканнях.

Недоліки: високий питомий опір, мала теплопровідність, утворення міцних оксидних і сульфідних плівок. У зв'язку з утворенням плівок і їх високою механічною міцністю вольфрамові контакти вимагають великого натискання.

**Металокерамічні матеріали.** Розгляд властивостей чистих металів показує, що жоден з них не задовольняє цілком усім вимогам, які пред'являються до матеріалу контактів.

Основні необхідні властивості контактного матеріалу - високі електрична провідність і дугостійкість — не можуть бути отримані за рахунок сплавів та-

ких матеріалів, як срібло і вольфрам, мідь і вольфрам, тому що вони не утворюють сплавів. Матеріали, що володіють необхідними властивостями, одержують методом порошкової металургії (металокераміки). Отримані таким методом матеріали зберігають фізичні властивості вхідних у них металів. Дугостійкість металокераміки забезпечується такими компонентами, як вольфрам, молибден. Низький перехідний опір контакту досягається використанням як другого компоненту срібла чи міді. Чим більше зміст вольфраму, тим вище дугостійкість, механічна міцність і менше можливість приварювання металокерамічних контактів. Але відповідно росте перехідний опір контактів і зменшується їхня теплопровідність. Звичайно металокераміка зі змістом вольфраму вище 50 % застосовується для апаратів захисту на великі струми КЗ.

Композиції з тонко здрібнених порошоків з діаметром зерна менш 10 мкм мають мілкодисперсну структуру і володіють значною механічною міцністю. Їхня зносостійкість у 1,5—2 рази вище, ніж у матеріалів немілкодисперсного типу.

Властивості і склад найбільш розповсюджених матеріалів для металокерамічних контактів приведені в табл. 2.4.

Для контактів апаратів високої напруги найбільш поширена металокераміка КМК-А60, КМК-А61, КМК-Б20, КМК-Б21.

В апаратах низької напруги найчастіше застосовується металокераміка КМК-А10 зі срібла й оксиду кадмію CdO. Відмінною рисою цього матеріалу є дисоціація CdO на пари кадмію і кисень. Газ, що виділяється, змушує дугу швидко переміщатися по поверхні контакту, що значно знижує температуру контакту і сприяє деіонізації дуги. Металокераміка КМК-А20, що складається зі срібла і 10 % оксиду міді, має більшу зносостійкість, чим КМК-А10.

Срібно-нікелеві металокераміки добре обробляються, мають високу стійкість проти електричного зносу. Контакти з цих матеріалів забезпечують низький і стійкий перехідний опір, але більш піддані приварюванню, чим контакти КМК-А60, КМК-Б20, КМК-А10.

Срібно-графітові і мідно-графітові контакти завдяки високій стійкості проти зварювання застосовуються як дугогасильні. Застосування металокераміки збільшує вартість апаратури, однак в експлуатації ці витрати окупаються за рахунок збільшення терміну служби апарату і підвищення його надійності.

Таблиця 2.4

## Склад і властивості металокерамічних матеріалів

Марка матеріалу	Компоненти і їхній зміст, %	Щільність, кг·м <sup>-3</sup>	Число Бринелля	Питомий опір, мкОм·м, не більш	Питома теп- лопро- водимість, Вт/(м·°С)
КМК-А10	Срібло-оксид кадмію, 85/15	9700	75	0,030	325
КМК-А10м	Те ж з мілкодисперсною структу- рою	9900	105	0,028	325
КМК-А20	Срібло-оксид міді, 90/10	9500	60	0,025	350
КМК-А20м	Те ж з мілкодисперсною структу- рою	9600	75	0,024	350
КМК-А41	Срібло-графіт, 97/3	9300	50	0,026	-
КМК-А33мд	Срібло-нікель-графіт, 69/29/2	9500	95	0,035	-
КМК-А60	Срібло-вольфрам-нікель, 47/50,5/2,5	13 500	160	0,041	275
КМК-А61	Срібло-вольфрам-нікель, 27/70/3	15 000	210	0,045	230
КМК-Б10	Мідь-графіт, 97/3	7300	35	0,040	380
КМК-Б20	Мідь-вольфрам-нікель, 48/50/2	12 100	150	0,060	190
КМК-Б21	Мідь-вольфрам-нікель, 27/70/3	13 800	200	0,070	135

## 2.4. КОНСТРУКЦІ ТВЕРДОМЕТАЛЕВИХ КОНТАКТІВ

### 2.4.1. Нерухомі розбірні і нерозбірні контакти

Такі контакти служать для з'єднання нерухомих струмоведучих деталей шин, кабелів і проводів. Ці деталі можуть знаходитися як усередині електричного апарату, так і поза ним. В останньому випадку вони служать для приєднання апарату до джерела енергії чи до навантаження. Контакти з'єднуються за допомогою або різьбових розбірних з'єднань, або гарячого чи холодного зварювання.

При різьбовому з'єднанні мідні шини перед збіркою ретельно зачищаються від оксидів і змазуються технічним вазеліном. Після збірки місця стиків між шинами покриваються вологостійким лаком чи фарбою. При цьому зменшується перехідний опір і підвищується його стабільність у часі.

Покриття дотичних поверхонь контактів оловом (лудіння) декілька збільшує початковий перехідний опір, але завдяки пластичності олова збільшує кількість площадок зминання і перехідний опір стає більш стабільним. Для струмоведучих деталей, від яких потрібна підвищена надійність при великих номінальних струмах, рекомендується сріблення дотичних поверхонь. Описані розбірні контактні з'єднання можуть бути розібрані при ремонті і монтажі і мають малий перехідний опір.

Тиски, що рекомендуються, однієї шини на іншу, при різьбовому з'єднанні приведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

#### Тиски, що рекомендуються, однієї шини на іншу при різьбовому з'єднанні

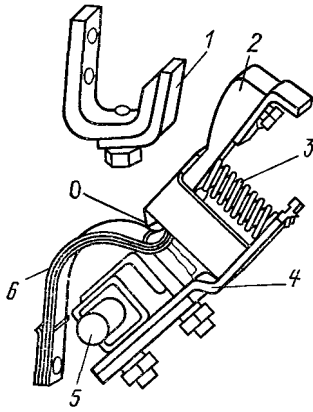
Матеріали з'єднання	Тиски, що рекомендуються, $10^4$ Па
Мідь луджена	500—1000
Мідь, латунь, бронза нелуджені	600—1200 2500
Алюміній	2500

Момент при затягуванні різьблень контролюється спеціальним тарованим моментним ключем. Різьбові з'єднання можуть виявитися недостатньо надійними, особливо при алюмінієвих контактах. Тому в даний час алюмінієві струмоведучі деталі з'єднуються за допомогою холодного чи гарячого (термітного) зварювання і представляють після цього нерозбірний контакт.

У болтовому шинному з'єднанні при КЗ струмоведучий провідник нагрівається до температури 200—300 °С.

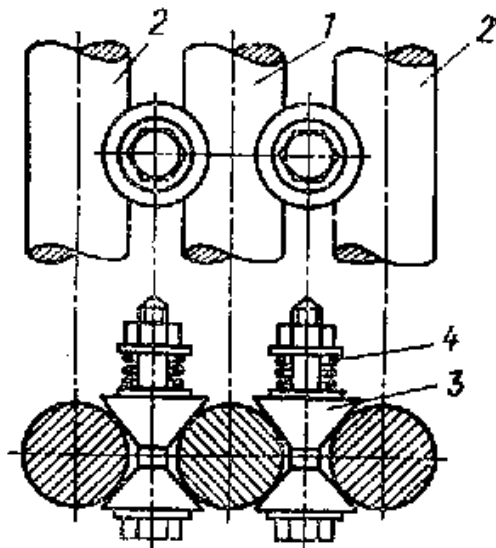
### 2.4.2. Рухомі контактні з'єднання, що не розмикаються

Такі з'єднання використовуються або для передачі струму з рухомого контакту на нерухомий, або при невеликому переміщенні нерухомого контакту під дією рухомого.



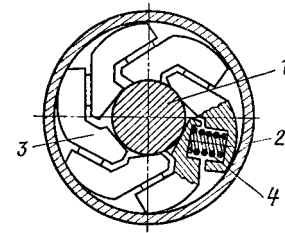
**Рис. 2.8** Передача струму з рухомого контакту на вивід апарату за допомогою гнучкого зв'язку

Найбільш простим з'єднанням такого типу є гнучкий зв'язок (рис. 2.8). Контакт 1 кріпиться до каркаса апарату на ізоляційній підкладці. Рухомий контакт 2 обертається відносно точки 0, розташованої на контактному важелі 4. Цей важіль ізолюваний від вала 5, на який діє електромагніт контактора. Гнучкий зв'язок 6 з'єднує рухомий контакт 2 з виводом апарату. Контактне натискання створюється пружиною 3. Для одержання необхідної еластичності гнучкий зв'язок виготовляється з мідної стрічки товщиною  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м і менш чи із багатожильного джгута, який сплетений з мідних жил ( $0,1 \cdot 10^{-3}$  м і менш). При наявності різких перегинів гнучкий зв'язок швидко руйнується. При великих ходах рухомих контактів довжина гнучкого зв'язку виходить значної, а її надійність зменшується. Тому вона застосовується при переміщеннях рухомого елемента не більш 0,25 м.



**Рис. 2.10** Роликовий струмознімний контакт

Контактування здійснюється по лінії, від чого такий контакт називається лінійним.



**Рис. 2.9** Ковзний струмознімний розеточний контакт

При великих ходах і великих номінальних струмах застосовуються контактні з'єднання у виді ковзних і роликів струмознімних. Принцип дії струмознімання показаний на рис. 2.9 і 2.10. Рухомий контакт 1 ковзного струмознімання (рис. 2.9) виконаний у виді стрижня круглого перерізу. Циліндрична обойма 2 з'єднується з нерухомим виводом апарату. З'єднання контакту 1 і обойми 2 здійснюється пальцями (ламелями) 3. Контактне натискання створюється пружинами 4. Рухомий контакт має можливість переміщатися поступально. Нерухомий контакт має поверхню торкання у виді площини, рухомий — у виді циліндричної поверхні. Контактування здійснюється по лінії, від чого такий контакт називається лінійним.

При великих ходах і великих номінальних струмах застосовуються контактні з'єднання у виді ковзних і роликів струмознімних. Принцип дії струмознімання показаний на рис. 2.9 і 2.10. Рухомий контакт 1 ковзного струмознімання (рис. 2.9) виконаний у виді стрижня круглого перерізу. Циліндрична обойма 2 з'єднується з нерухомим виводом апарату. З'єднання контакту 1 і обойми 2 здійснюється пальцями (ламелями) 3. Контактне натискання створюється пружинами 4. Рухомий контакт має можливість переміщатися поступально. Нерухомий контакт має поверхню торкання у виді площини, рухомий — у виді циліндричної поверхні. Контактування здійснюється по лінії, від чого такий контакт називається лінійним.

Недоліком ковзного струмознімання є велика сила тертя, що вимагає значної потужності приводного механізму. Сила тертя зменшується при роликовому контакті (рис. 2.10). Рухомий контакт *1* роликового струмознімання виконаний у виді стрижня круглого перерізу і має поступальний рух. Токоз'ємні стрижні *2* також мають круглий переріз і з'єднані з виводом апарату. З'єднання стрижня *1* і стрижнів *2* здійснюється за допомогою конусних роликів *3*, що котяться по поверхні стрижнів *1* і *2*. Контактне натискання створюється пружинами *4*.

Число роликів залежить від номінального струму і струму КЗ. Цей контакт для свого переміщення вимагає невеликих зусиль і широко застосовується в сучасній апаратурі високої напруги, наприклад масляних малооб'ємних вимикачах ВМП-10.

### 2.4.3. Розривні контакти

Контакти багатьох апаратів розривають коло зі струмом, більшим, ніж мінімальний струм дугоутворення  $I_0$ . Виникаюча електрична дуга приводить до швидкого зносу контактів.

Для надійного гасіння дуги, що утворюється при вимиканні, необхідно визначена відстань між нерухомим і рухомим контактами, що вибирається з запасом. Відстань між нерухомим і рухомим контактами у вимикненому стані апарату називається проміжком контактів (рис. 2.11).

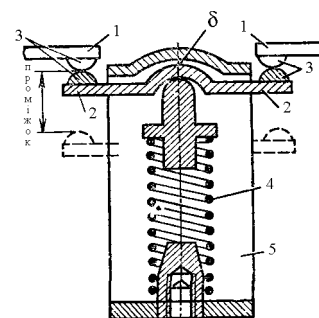


Рис. 2.11 Контактний вузол з самоустановлювальним контактом

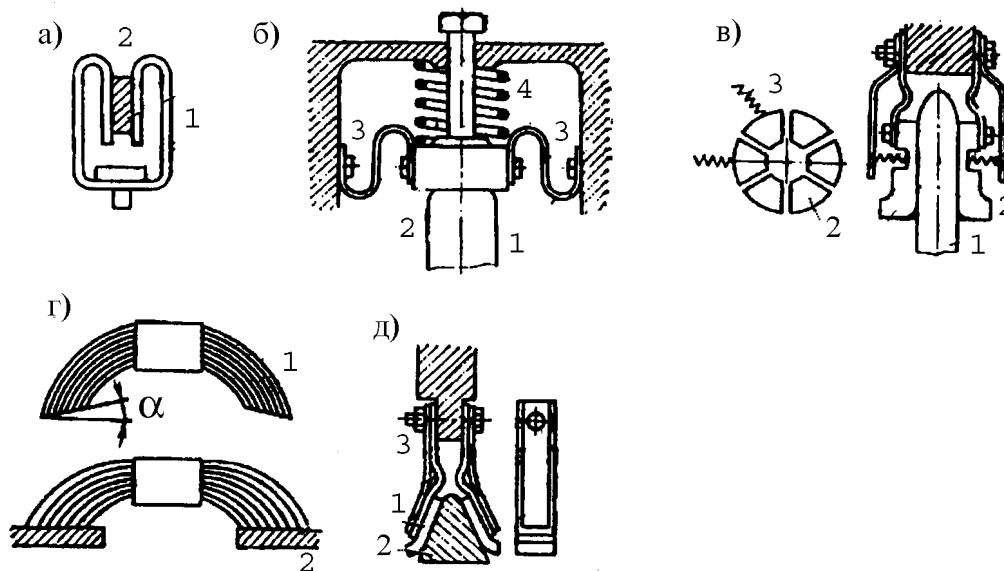


Рис. 2.12. Плоскі (а), торцеві (б), розеточні (в), щіткові (г), пальцеві (д) контакти

Конструкція розривних контактів визначається значеннями номінального струму, номінальної напруги, струму КЗ, режимом роботи, призначенням апарату і розглянута в розділах, присвячених пристрою різних апаратів.



Розмикаючі і замикаючі контакти по конструкції поділяються на рубаючі, торцеві, розеточні, щіткові, пальцеві і ковзні.

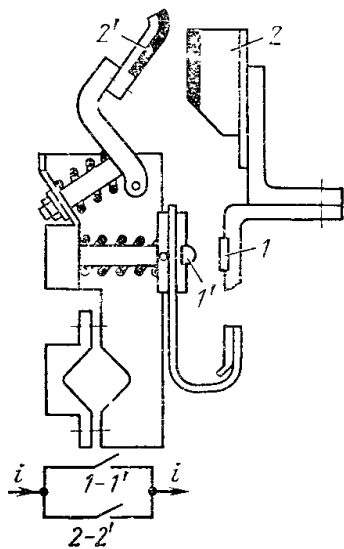
*Плоскі контакти типу, що рубають*, створюють натискання за рахунок пружності пружних площин 1 (рис. 2.12 а) при перебуванні між ними рухомого контакту 2.

*Торцеві контакти* у виді дотичних металевих стрижнів чи труб (рис. 2.12 б) застосовують у багатьох високовольтних вимикачах напругою до 35 кВ. При відкненому положенні вимикача його рухомий контакт 1 у виді суцільного стрижня стикається з рухомим контактом 2, виконаним у виді плоскої деталі з гнучкими з'єднувачами 3. Для усунення ударів і вібрації при вмиканні нерухомі контакти обладнуються пружинами 4.

*Розеточні контакти*, застосовувані в ряді типів високовольтних вимикачів, складаються з рухомого контакту 1 (рис. 2.12 в) і сегментів 2, закріплених на стійках. Пружинами 3 забезпечується необхідне контактне натискання.

*Щіткові контакти* складаються з щіток 1 (рис. 2.12 г), набраних із пружних мідних аркушів, притиснутих до плоского контакту 2. У щіткових контактах більше точок дотику в порівнянні з торцевими контактами. Однак при великих струмах унаслідок нагрівання щітки деформуються, поверхня торкання зменшується і перехідний опір різко зростає. У щіткових контактах не допускається оплавлення, і тому у випадку їхнього застосування необхідні допоміжні дугогасильні контакти.

*Пальцеві контакти* складаються з двох рядів деталей 1, названих пальцями, між якими входить контакт 2 (рис. 2.12 д). Пальці закріплені на скобах 3 і до рухомого контакту 2 притискаються пружинами.



**Рис. 2.13. Двоступінчаста контактна система**

Контактний вузол з самоустановлювальним контактом даний на рис. 2.11. Нерухомі контакти 1 і рухомий містковий контакт 2 у місці торкання мають сферичні (чи циліндричні) пайки 3, виповнені з срібла чи металокераміки. Контактне натискання створюється пружиною 4. Після торкання контактів скоба 5, зв'язана з приводом апарату, продовжує свій рух нагору на величину ходу, рівну провалу. Стосовно до конструкції, показан на рис. 2.11, провалом називається відстань, на яке переміститься рухомий контакт, якщо забрати нерухомий.

На рис. 2.13 показана двоступінчаста контактна система з головними 1—1' і дугогасильними 2—2' контактами. Головні контакти виконуються з міді, а поверхні їхнього зіткнення зі срібла, нанесеного електролітично (шар 20 мкм) чи у виді припаяних пластин. Дугогасильні контакти виконуються з міді і мають наконечники з дугостійкого вольфраму чи металокераміки.

Через те, що перехідний опір кола головних контактів значно менше, ніж дугогасильних, через них проходить 70—80 % тривалого струму. При вимиканні спочатку розходяться головні контакти і весь струм кола замикається по дугогасильних контактах.

Дугогасильні контакти 2—2' розходяться в той момент, коли відстань між головними контактами достатня, щоб витримати найбільшу напругу, що виникає в процесі гасіння дуги на дугогасильних контактах.

При вмиканні двоступінчастої системи спочатку замикаються дугогасильні контакти, а потім головні, що забезпечує відсутність дуги й оплавлення срібних поверхонь головних контактів. Через свою складність двоступінчасті системи застосовуються тільки при великих струмах (більш 2000 А) в автоматах і вимикачах високої напруги. У всіх інших випадках надійна робота контактів забезпечується вибором їхнього матеріалу і конструкції при використанні одноступінчастої системи.

В даний час починають широко застосовуватися електричні апарати з герметизованими контактами і контактами, що працюють у глибокому вакуумі [13].

## 2.5. РІДИННОМЕТАЛЕВІ КОНТАКТИ

Найбільш характерні недоліки твердометалевих контактів такі:

1. З ростом тривалого номінального струму зростають необхідне значення контактного натискання, габарити і маса контактів. При струмах 10 кА і вище різко збільшуються габарити і маса апарату в цілому.

2. Ерозія контактів обмежує зносостійкість апарату.

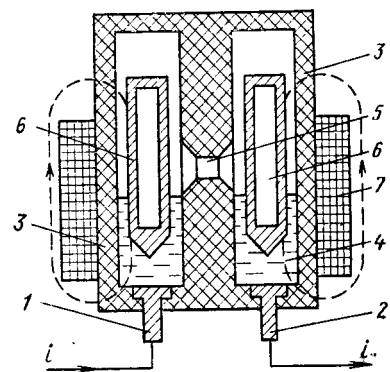
3. Окислювання поверхні і можливість приварювання контактів знижують надійність апарату. При великих струмах КЗ контактні натискання досягають великих значень, що збільшує необхідну потужність приводу, габарити і масу апарату.

Зазначені недоліки значною мірою усуваються при використанні рідиннометалевих контактів (РМК).

Розглянемо принцип дії контактора з рідиннометалевим контактом (РМК) (рис. 2.14). Зовнішнє коло підключається до електродів 1 і 2. Корпус 3 виконаний з електроізоляційного матеріалу. Порожнини корпусу заповнені рідким металом 4 і з'єднуються між собою отвором 5. У середині порожнин корпусу плавають пустотілі феромагнітні циліндри 6. При подачі напруги на котушку 7 циліндри 6 опускаються вниз. Рідкий метал піднімається і через отвір 5 з'єднує електроди 1 і 2, контактор включається.

У порівнянні з твердометалевими РМК мають такі переваги:

1. Малий перехідний опір і високі припустимі щільності струму на поверхні розділу рідкий метал-електрод (до 120 А/мм<sup>2</sup>), дозволяють різко зменшити га-



**Рис. 2.14. Контактор з рідиннометалевим контактом**

баритні розміри контактного вузла і контактне натискання, особливо при великих струмах.

2. Відсутність вібрації, приварювання, залипання й окислювання контактів при їхній комутації.

3. Висока механічна й електрична зносостійкість РМК, що дозволяє створювати апарати з великим терміном служби.

4. Можливість розробки комутаційних апаратів на новому принципі (автоматичний запобіжник, що відновлюється, і ін.) завдяки властивостям плинності рідкого металу.

5. Можливість роботи РМК при високих зовнішніх тисках, високих температурах, у глибокому вакуумі.

До електричних апаратів звичайно пред'являється вимога зберігати працездатність в інтервалі температур  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ . Очевидно, що рідкий метал повинний зберігати свій стан у зазначеному інтервалі. З відомих матеріалів тільки ртуть знаходиться в рідкому виді при температурі нижче  $0^{\circ}\text{C}$  і може бути в чистому виді придатна для РМК. Однак висока токсичність парів ртуті істотно ускладнює технологію її застосування.

У РМК перспективно застосування діелектричного чи металокерамічного твердого каркаса, просоченого рідким металом. У цьому випадку рідкий метал утримується в капілярах каркаса й утворює на його поверхні плівку, з яким відбувається контактування. Такі РМК можуть займати будь-яке положення в просторі [13].

Дуже перспективним є застосування РМК у запобіжниках, що самовідновлюються, (див. § 8.3).

Необхідно відзначити і недоліки РМК:

1. Контактні матеріали на базі галію і його сплавів з іншими металами вимагають підігріву контактів до моменту вмикання, тому що температура навколишнього середовища може бути нижче температури затвердіння цих матеріалів.

2. Більшість апаратів із РМК вимагають визначеного положення в просторі і піддані впливу сторонніх механічних впливів (ударів, вібрацій), що утрудняє їхнє застосування.

#### *Запитання для самоперевірки*

- 1. За рахунок чого виникає і від чого залежить перехідний опір стягування контактів?*
- 2. Які негативні явища виникають при включенні контактів?*
- 3. Як зменшують вібрацію контактів при замиканні?*
- 4. Головні засоби боротьби з ерозією контактів.*
- 5. Основні контактні матеріали.*
- 6. Головні конструкції твердо металевих контактів.*
- 7. Переваги і недоліки рідинно металевих контактів.*

## ГЛАВА 3

### ВИМИКАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

*Навчальні цілі глави – ознайомити студента: із умовами виникнення і горіння та особливостями електричної дуги постійного та змінного струму; процесом відновлення напруги між контактами комутаційних апаратів після гасіння дуги; способами гасіння дуги у сучасних електричних апаратах високої та низької напруги.*

#### 3.1. УМОВИ ВИНИКНЕННЯ І ГОРІННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Велика група електричних апаратів представлена комутаційними пристроями, за допомогою яких замикається і розмикається електричне коло. Електричний розряд, що виникає при розмиканні контактів, приводить до їхнього зносу й у значній мірі визначає надійність і довговічність апарата. Цей розряд у газі, що оточує контакт, є або тліючим розрядом, або електричною дугою. Тліючий розряд виникає при вимиканні струму менш 0,1 А при напрузі на контактах 250—300 В. Такий розряд відбувається на контактах малопотужних реле, а в більш потужних апаратах є перехідною фазою до розряду у виді електричної дуги. Якщо струм і напруга в колі вище значень, зазначених у табл. 2.3, то має місце дуговий розряд, що володіє такими наступними особливостями:

1. Дуговий розряд має місце тільки при відносно великих струмах. Мінімальний струм дуги для різних матеріалів приведений у табл. 2.3 і для металів складає приблизно 0,5 А.
2. Температура центральної частини дуги дуже велика і може досягати 6000—25000 К.
3. При дуговому розряді щільність струму на катоді надзвичайно велика і досягає  $10^2$ — $10^3$  А/мм<sup>2</sup>.
4. Падіння напруги в катоді складає усього 10—20 В і практично не залежить від струму.

У дуговому розряді можна виділити три характерні області: білякатодну, область стовпа дуги й біляанодну. У кожній з цих областей процеси іонізації і деіонізації протікають по різному.

*Білякатодна область* займає дуже невеликий простір довжиною  $10^{-6}$ ...  $10^{-7}$  м. За рахунок автоелектронної емісії електронів з катода виникає додатний об'ємний заряд. Між цим позитивним об'ємним зарядом і катодом створюється електричне поле з високою напруженістю  $E = 10^7$  В/м, у якому рухаються електрони, що вийшли з катода і створюють електричний струм. Електричне поле високої напруженості впливає на електрони, збільшуючи їхню швидкість. При зіткненні такого електрона з нейтральною часткою відбувається іонізація, відома за назвою ударної іонізації. Електрони, що утворилися при цьому, та іони утворюють *плазму стовпа дуги*.

У стовпі дуги проходить великий струм і створюється висока температура. Остання приводить до інтенсивної термоіонізації, що підтримує велику провід-

ність плазми. Чим більше струм у дузі, тим менше її опір, тому потрібно менша напруга для її горіння, тобто дугу з великим струмом погасити сутужніше.

Анод при дуговому розряді не випромінює позитивних іонів які могли б нейтралізувати електрони. Тому поблизу анода створюється від'ємний об'ємний заряд, що викликає появу біляанодного падіння напруги  $U_a$  і підвищення напруженості електричного поля. Анод нагрівається до дуже високої температури, що вище температури катода. При цьому анод і біляанодна область не роблять істотного впливу на виникнення й умови існування дугового розряду. Звичайно вважають, що роль анода зводиться до прийому електронного потоку з дугового стовпа.

Таким чином, дуговий розряд починається за рахунок емісії електронів з катода й ударної іонізації, а після запалювання дуга підтримується термоіонізацією у стовпі дуги.

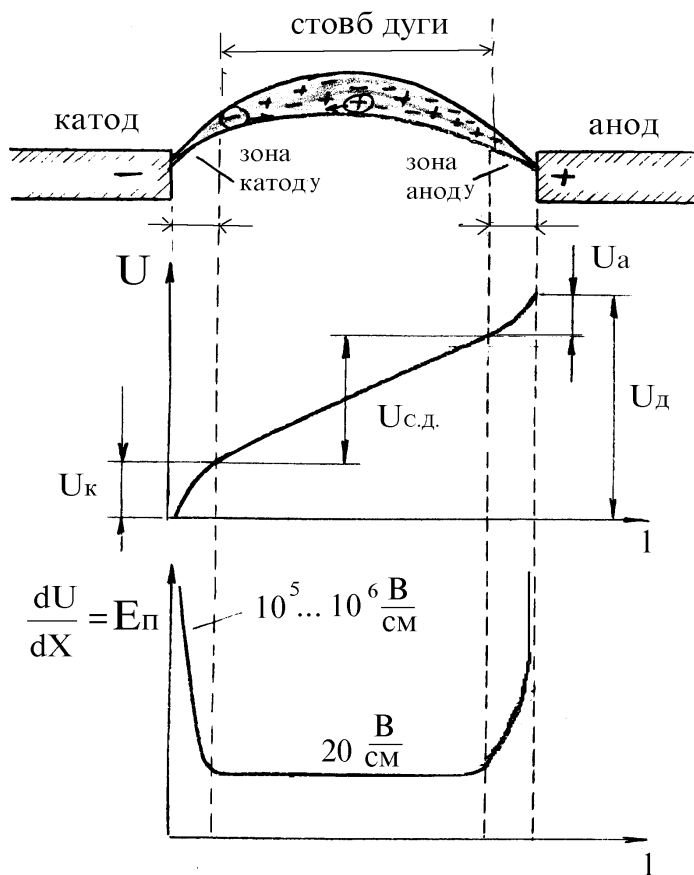
У дуговому стовпі поряд з іонізацією протікають процеси деіонізації за рахунок рекомбінації і дифузії. Рекомбінація - це нейтралізація часток за рахунок з'єднання іонів із зарядами різних знаків. У дуговому стовпі рекомбінація електрона і позитивно зарядженого іона через велике розходження в їхній масі малоймовірна.

Ефект дифузії в дуговому стовпі полягає в тому, що внаслідок теплового руху часток відбувається вирівнювання щільності заряджених часток, число часток у стовпі зменшується, опір останнього збільшується.

Розподіл напруги і напруженості електричного поля (градієнта  $E_{\pi} = dU/dx$ ) представлено на рис. 3.1.

Падіння напруги біля катода складає  $10 \dots 20$  В і залежить від матеріалу катода і властивостей газу, у якому горить дуга. Білякатодне падіння напруги трохи менше потенціалу іонізації газу через наявність біля катода його парів, у яких потенціал іонізації значно нижче.

В області дугового стовпа позитивні і від'ємні об'ємні заряди врівноважують один одного і результуючий заряд дорівнює нулю. Градієнт напруги на дузі залишається постійним і для дуги, що вільно горить у повітрі,



**Рис. 3.1 Розподілення напруги, напруженості електричного поля і об'ємних зарядів в електричній дузі**

напруги на дузі залишається постійним і для дуги, що вільно горить у повітрі,

складає  $(2...3) \cdot 10^3$  В/м. У ДП градієнт напруги сильно зростає, досягаючи  $(2...3) \cdot 10^4$  В/м.

Біляанодне падіння напруги складає 5...10 В. При великих струмах біляанодна напруга зменшується, у той час як білякатодна напруга залишається постійною.

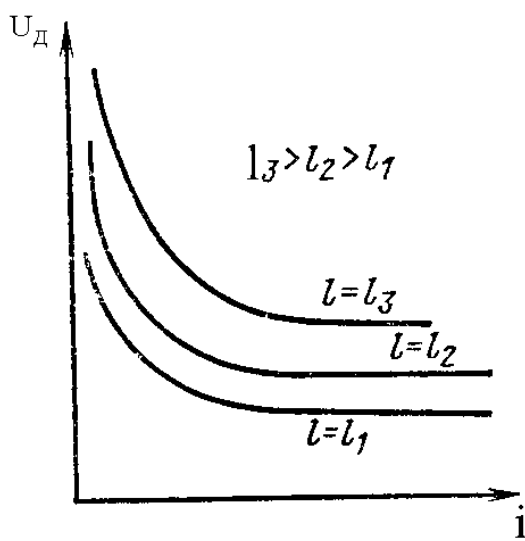
У деяких апаратах низької напруги довжина дуги невелика. Спадання напруги на стовпі дуги мало в порівнянні із сумою спадання напруги біля катода й анода. Такі дуги називаються короткими. Умови гасіння короткої дуги в значній мірі визначаються процесами, що відбуваються у електродів, і умовами їхнього охолодження.

В апаратах високої напруги падіння напруги на стовпі дуги значно більше біляелектродних, і останніми можна зневажити. Умови існування таких дуг, названих довгими, визначаються процесами в стовпі дуги.

Найважливішою характеристикою дуги є вольт-амперна (ВАХ), що представляє собою залежність напруги на дузі від струму. З ростом струму  $i$  збільшується температура дуги, підсилюється термічна іонізація, зростає число іонізованих часток у розряді і падає електричний опір дуги  $r_d$ .

Напруга на дузі дорівнює  $ir_d$ . При збільшенні струму опір дуги  $r_d$  зменшується так різко, що напруга на ній падає, незважаючи на ріст струму. Кожному значенню струму в сталому режимі відповідає свій динамічний баланс числа заряджених часток. При більшому значенні струму збільшується кількість виникаючих зарядів. Однак при цьому зростає число зникаючих зарядів, так що результуюча швидкість зміни числа заряджених часток при новому значенні струму дорівнює нулю.

ВАХ дуги, що знята при повільній зміні струму, називається статичною. Статична характеристика дуги залежить від відстані між електродами (довжини дуги), матеріалу електродів, параметрів середовища й умов охолодження. Напругу на дузі  $u_d$  можна розглядати як суму біляелектродних падінь напруги  $u_e$  і падіння напруги в стовпі дуги:



$$u_d = u_e + E_n l \quad (3.1)$$

де  $E_n$  — напруженість електричного поля в стовпі дуги (градієнт  $E_n$ );  $l$  — довжина стовпа дуги.

Величина  $E_n$  залежить від струму й умов горіння дуги. Статичні ВАХ дуги зображені на рис. 3.2. Чим більше довжина дуги, тим вище лежить її статична ВАХ. З ростом тиску середовища, у якій горить дуга, також збільшується напруженість  $E_n$  і ВАХ піднімається так само, як показано на рис. 3.2.

Охолодження дуги істотно впливає на ВАХ. Чим інтенсивніше охолодження дуги, тим більша потужність від неї відводиться.

**Рис. 3.2.** Статичні вольт-амперні характеристики дуги при різній її довжині

При цьому повинна зрости потужність, яка виділяється дугою. Оскільки при заданому струмі це можливо за рахунок збільшення напруги на дузі, то ВАХ піднімається, що широко використовується в ДУ.

### 3.2. ДУГА ЗМІННОГО СТРУМУ ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ НАПРУГИ

При частоті 50 Гц струм у дузі міняється досить швидко, і процеси, що відбуваються в ній, необхідно розглядати за допомогою динамічної ВАХ. При синусоїдальному струмі напруга на дузі (рис. 3.3) спочатку піднімається до точки 1, а потім у зв'язку з ростом струму падає до точки 2.

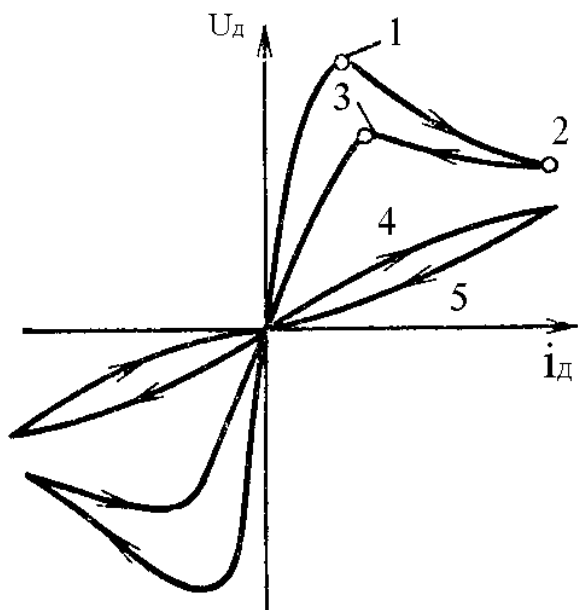


Рис. 3.3. Динамічні характеристики дуги змінного струму

джерела живлення  $U_m$  і струм  $i$  змінюються синусоїдально (рис. 3.4). Напруга на дузі  $U_d$ , що горить між контактами вимикача, при малих значеннях струму у початковий період синусоїди зростає до величини  $U_3$  (напруга запалювання), а потім у міру збільшення струму в дузі і росту термічної іонізації напруга падає. Наприкінці напівперіоду, коли струм  $i$  наближається до 0, дуга гасне при напрузі гасіння  $U_r$ . Якщо дуга погашена тим чи іншим способом, то напруга між контактами вимикача по-

Після проходження струму через максимум динамічна ВАХ піднімається і проходить через точку 3 у зв'язку зі зменшенням струму. У від'ємний напівперіод процес повторюється. При високій частоті динамічна ВАХ описується кривими 4 і 5 (рис. 3.3).

Часові діаграми струмів і напруг дуги змінного струму представлені на рис. 3.4. (ділянка OA).

При перемінному струмі напруга

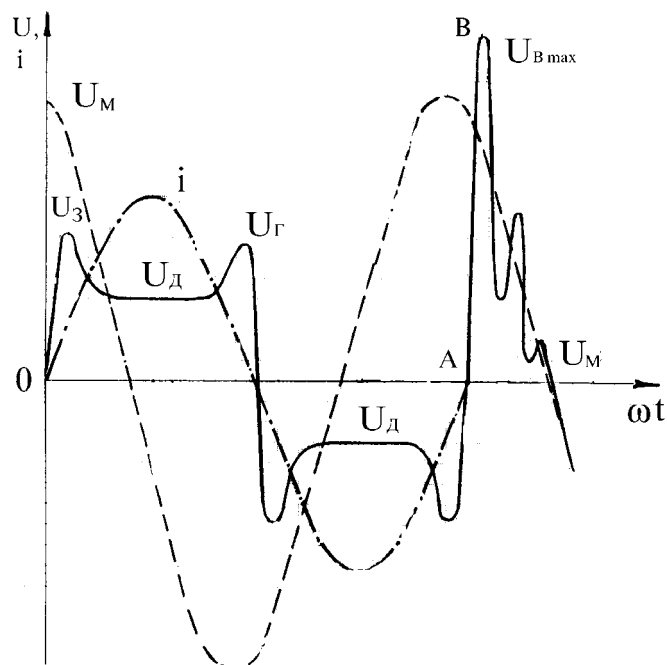


Рис. 3.4 Часові діаграми струмів і напруг дуги змінного струму

винна відновитися до напруги живильної мережі  $U_M$ .

Однак оскільки у вимикаемому колі маються індуктивний, активний і ємкісний опори (рис. 3.5), виникає перехідний процес, з'являються коливання напруги (рис. 3.4), амплітуда яких  $U_{B,max}$  може значно перевищувати нормальну робочу напругу мережі, що вимикається. Для апаратури, що вимикає, важливо, з якою швидкістю відновлюється напруга на ділянці АВ.

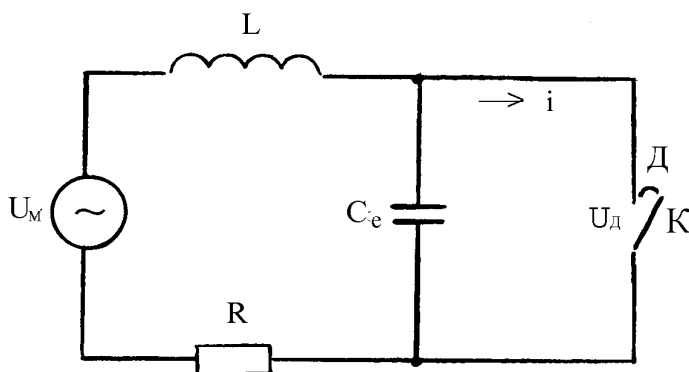
При гасінні дуги змінного струму як низької, так і високої напруги одним з вирішальних факторів є напруга, що відновлюється. Для оцінки кривої напруги, що відновлюється, вводиться поняття швидкості наростання цієї напруги.

Для схеми рис. 3.5 середня швидкість напруги, що відновлюється, на ділянці АВ (рис. 3.4) приблизно, якщо зневажити загасанням, може бути знайдена по формулі

$$v_{cp} = \frac{du}{dt_{\text{пд}}} = \frac{2U_{\epsilon}}{T_0/2} = 4 \frac{U_{\epsilon}}{T_0} = 4U_B f_0, \quad (3.2)$$

де  $U_B$  - миттєве значення ЕДС джерела в момент нуля струму (напруга що повертається);  $T_0/2$ —півперіод власних коливань напруги, що відновлюється, протягом якого напруга досягає максимального піка, рівного  $2U_B$ ;  $f_0$ -власна частота коливань контуру вимикання.

Очевидно, що чим більше  $f_0$  і напруга промислової частоти  $U_B$ , що поверта-



**Рис. 3.5** Схема заміщення контуру, що відключається

ється, тим вище швидкість відновлення напруги. З ростом швидкості відновлення напруги необхідно збільшувати швидкість наростання електричної міцності міжконтактного проміжку. У протилежному випадку або збільшується тривалість горіння дуги, або апарат узагалі не зможе вимкнути коло. Швидкість наростання звичайно дуже велика і вимірюється у вольтах за 1 мкс. Напруга, що відновлю-

ється, так само часто оцінюється власною частотою  $f_0$  і коефіцієнтом піка  $K_a$ , що визначається відношенням максимального піка напруги до напруги промислової частоти, що повертається [13]:

$$K_a = \frac{U_{B,max}}{U_B} = 1 + \exp(-R/2\omega_0 L) \quad (3.3)$$

де  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1 / \sqrt{LC_e}$  - власна кутова частота контуру вимикання.



У високовольтних вимикачах  $K_a=1,4\dots 1,5$  і зменшується з ростом струму, що вимикається. У низьковольтних апаратах він нижче.

Власна частота  $\omega_0$  визначається індуктивністю  $L$  і еквівалентною ємністю  $C_e$ , що залежать від потужності КЗ кола, номінальної напруги мережі, номінальної потужності установки, конструктивного виконання її елементів і ліній передачі [10].

Індуктивність  $L$  і еквівалентна ємність  $C_e$ , як правило, ростуть зі збільшенням номінальної напруги, а тому власна частота  $f_0$  з ростом цієї напруги зменшується. Однак швидкість відновлення напруги, пропорційна номінальній напрузі мережі (3.2), може бути досить високою. Необхідно відзначити, що миттєве значення напруги, що повертається,  $U_B$  залежить від кута зсуву фаз між струмом КЗ і напругою джерела при КЗ, а саме:

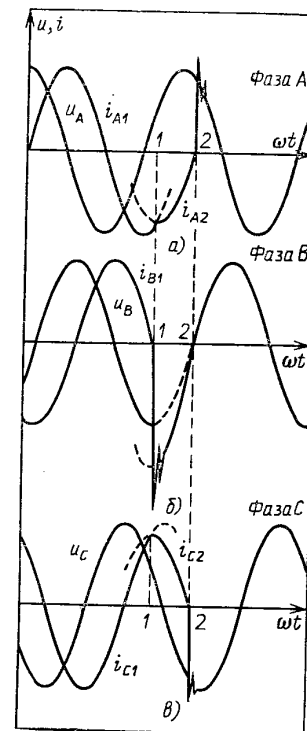
$$U_B = U_{M \max} \sin \varphi_K \quad (3.4)$$

Для чисто індуктивного кола	$\varphi_K = \pi/2$ і $U_B = U_{M \max}$
Для чисто активного кола	$\varphi_K = 0$ і $U_B = 0$

Після проходження струму через нуль в активному колі напруга на проміжку змінюється по синусоїдальному закону, обумовленому ЕДС джерела.

Таким чином, вимикання чисто активного кола відбувається значно легше, ніж індуктивного.

Зупинимося на особливостях вимикання трифазної мережі. При трифазному КЗ у полюсах вимикача течуть струми, зсунуті по фазі на  $120^\circ$ . Тому гасіння дуги не може відбутися одночасно у всіх трьох фазах. Часові діаграми струмів і напруг процесу вимикання показані на рис. 3.6. Допустимо, що у фазі  $B$  при проходженні струму через нуль створилися умови для гасіння дуги. Для цього моменту часу струми фаз  $A$  і  $C$  відмінні від нуля, і дуга в цих фазах погашена бути не може. Після вимикання фази  $B$  трифазна система струмів  $I_A, I_B, I_C$  перетворюється в однофазну, причому у фазі  $A$  напівперіод струму збільшується, а у фазі  $B$  зменшується. У точці 2 обидва струми проходять через нуль, і відбувається вимикання струму в цих фазах. Можна показати, що якщо нульова точка заземлена тільки в одному місці (у джерела в місці КЗ), то напруга промислової



**Рис. 3.6. Струми і напруги на контактах ідеального вимикача в процесі вимикання трифазного кола**

частоти, що відновлюється.

$$U_B = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot 1,5 = 1,23 U_{ном};$$

$$U_A = U_C = U_{ном} \sqrt{2/2} = 0,707 U_{ном} \quad (3.5)$$

Таким чином, умови гасіння дуги для першої фази, що вимикається, набагато важче, чим для двох інших фаз, що залишилися.

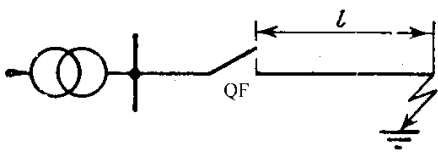
Для випадків трифазних КЗ відношення напруги, що повертається, на першому полюсі, що гасить дугу, до найбільшої фазної напруги називається коефіцієнтом першого полюсу, що гаситься,  $K_{п,г}$ . Для фази *B* коефіцієнт  $K_{п,г}=1,5$ . Коефіцієнт  $K_{п,г}$  залежить від контуру КЗ і коливається від 0,5 до 2 [15]. Напруга, що повертається, визначається рівнянням [13]:

$$U_B = \frac{U_{наиб.н}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \sin \varphi_k K_{п,г} \quad (3.6)$$

де  $U_{наиб.н}$  – найбільше припустиме значення лінійної напруги системи.

Як правило, якщо в комутаційних електричних апаратах забезпечується вимикання першої фази то вимикаються й ті дві, що залишилися.

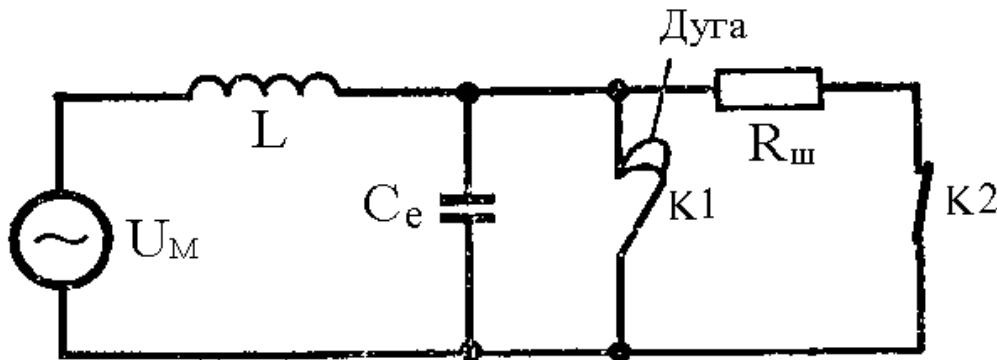
Особливо тяжкі умови відновлення напруги спостерігаються при вимиканні КЗ повітряної лінії поблизу потужної підстанції на відстані  $l$  від збірних шин (декілька сотен метрів — декілька кілометрів) (рис. 3.7).



**Рис. 3.7. Схема для розрахунку напруги, що відновлюється при невіддаленому КЗ**

До невіддалених КЗ дуже чуттєві повітряні вимикачі, в яких у перші моменти часу після проходу струму через нуль електрична міцність відновлюється повільно.

Зростання швидкості відновлення напруги приводить до важких режимів роботи вимикаючих апаратів. Полегшити ці режими можна або збільшенням швидкості наростання електричної міцності в ДП, або штучним зниженням швидкості відновлення напруги. Другий шлях більш економічний і



**Рис. 3.8 Застосування низькоомного шунта**

в даний час широко використовується. Для зниження швидкості відновлення напруги застосовуються низькоомні і високоомні шунти.

Розглянемо принцип дії низькоомного шунта (рис. 3.8). Вимикаючий апарат має два розриви. Розрив  $K1$  шунтований резистором  $R_{ш}$ . Опір  $R_{ш}$  вибирається так, щоб коливальний процес відновлення напруги перевести в аперіодичний.

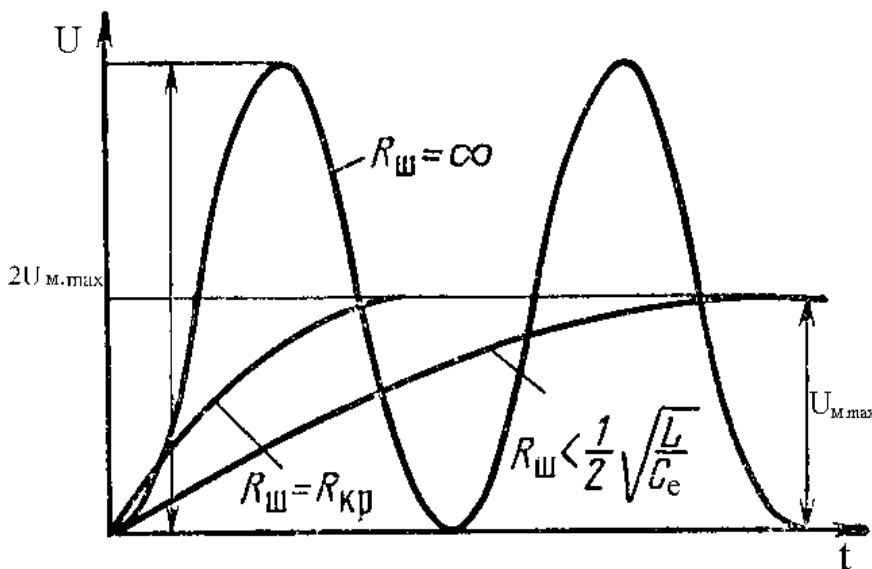
Для цього необхідно дотримувати нерівність  $R_{ш} < \frac{1}{2} \sqrt{L/C_e}$ .

З того, що опір  $R_{ш}$  дуже малий, впливом  $C_e$  можна зневажити. Тоді, процес відновлення напруги можна представити як:

$$U_{M \max} [1 - \exp(-\frac{tR_{ш}}{L})] \quad (3.7)$$

Процес відновлення напруги при наявності шунта і без нього показаний на рис. 3.9.

Шунтуючий резистор з малим опором дозволяє настільки знизити швидкість відновлення напруги, що гасіння дуги в розриві  $K1$  практично не буде залежати



**Рис. 3.9. Процес відновлення напруги при наявності та відсутності шунта**

від власної частоти мережі. Можливий максимальний пік напруги, що відновлюється, при цьому зменшується приблизно в 2 рази. Для зниження швидкості відновлення напруги на розриві  $K1$  бажано мати можливо мале значення  $R_{ш}$ .

Як правило, дуга в розриві  $K1$  гасне при першому проходженні струму через нуль. Після цього розходяться контакти розриву  $K2$  (рис. 3.8), і між ними

також загоряється дуга. Резистор  $R_{ш}$  полегшує роботу і цього розриву, тому що його введення в коло зменшує струм і зсув фаз між струмом і напругою джерела, тобто знижує напругу промислової частоти, що відновлюється.

Для полегшення режиму роботи другого розриву  $R_{ш}$  повинне бути можливо великим. Звичайно  $R_{ш}$  визначається умовами роботи розриву  $K1$ .

Шунтуючі резистори з малим опором застосовуються у вимикачах на всі класи напруги, особливо при напругах до 35 кВ, де струми досягають великих значень.

### 3.3. СПОСОБИ ГАСІННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

#### 3.3.1. Вплив на стовп електричної дуги

Задача ДП полягає в тому, щоб забезпечити гасіння дуги за можливо малий термін із припустимим рівнем перенапруг, при малому зносі частин апарата, при мінімальному обсязі розпечених газів, з мінімальним звуковим і світловим ефектами.

Розглянемо ДП апаратів низької напруги. Для гасіння дуги постійного струму необхідно, щоб ВАХ дуги  $U_d$  йшла вище прямої  $U_M - iR$ .

Тому що  $U_d = E_n l + U_e$ , то підйом характеристики можна одержати за рахунок збільшення довжини дуги  $l$ , напруженості електричного поля в стовпі дуги (градієнта)  $E_n$  і використання біляелектродного падіння напруги  $U_e$ . Збільшити градієнт  $E_n$  можна шляхом ефективного охолодження дуги і підйому тиску середовища, у якій вона горить. Охолодження дуги можна створити за рахунок переміщення дуги в повітрі чи газі, за рахунок їхнього переміщення щодо дуги або шляхом розміщення дуги у вузькій щілині, стінки якої мають високу теплопровідність і дугостійкість.

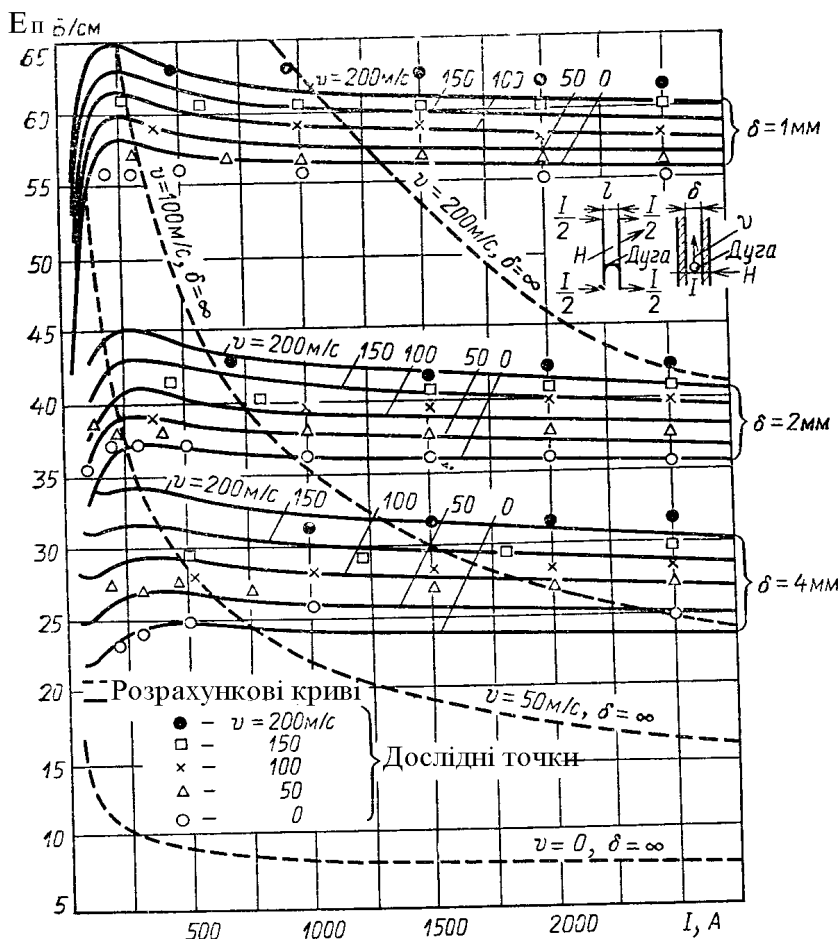


Рис. 3.10 Залежність градієнта  $E_n$  дуги від струму та ширини щілини; штрихові криві—для відкритої дуги; сплошні криві —  $E_n=f(I)$  для щілини шириною 1—4 мм та при швидкостях руху дуги  $v=0$  — 200 м/с.

Підняття ВАХ за рахунок збільшення довжини малоєфективно, тому що значення  $E_n$  для вільно палаючої в повітрі дуги мало (10 В/см), і її гасіння вимагає значного розтягання, що збільшує габарити апарату. В електричних апаратах низької напруги і деяких апаратів високої напруги найбільше широко застосовуються ДУ з вузькою щілиною [13]. Для збільшення ефективності охолодження ширина щілини  $\delta$  робиться менше діаметра дуги  $d_d$ . Крім того, у міру втягування дуги в щілину вона здобуває форму зигзага. При цьому збільшується не тільки довжина дуги, але і відвід тепла від неї.

Переміщення дуги в такій камері здійснюєть-

ся як правило, за допомогою магнітного поля, або під впливом надлишкового тиску.

Найважливішою характеристикою дугогасильної камери є залежність градієнта  $E_n$  від ширини щілини  $\delta$  і струму  $I$  (рис. 3.10) [6]. Для кожного значення  $\delta$  міняються струм  $I$  і напруженість магнітного поля  $H$ .

Значення  $\delta = \infty$  відноситься до відкритої вільно палаючої у повітрі дузі.

Для відкритої дузі (штрихова лінія) градієнт  $E_n$  різко змінюється в залежності від струму і для нерухокої дузі складає всього 10 В/см. Для вузької щілини  $\delta = 1 \div 4$  мм градієнт  $E_n$  мало залежить від струму і збільшується зі зменшенням  $\delta$ . Швидкість руху дузі  $v$  може досягати 200 м/с і при незмінному струмі дузі  $I$

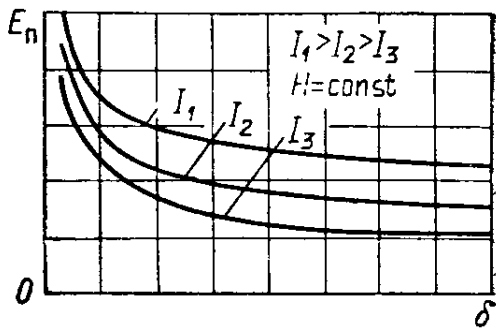


Рис. 3.11 Залежність подовжнього градієнту від ширини щілини  $\delta$

міняється за рахунок зміни напруженості поля  $H$ . Залежність подовжнього градієнта  $E_n$  від ширини щілини показана на рис. 3.11. Слід зазначити, що при зменшенні ширини щілини  $\delta$  зростає опір руху дузі. Магнітна система ДП повинна виключати можливість зупинки дузі, тому що це приводить до руйнування кераміки і відмовленню ДП.

Найбільш характерні форми щілини в керамічних пластинах ДП зображені на рис. 3.12, де 1 і 2-зона найбільшого охолодження дузі; 3-подовжня щілина, у яку направляється дуга; 4— розширення, що полегшує входження дузі в камеру; 5-місцеві розширення в щілині.

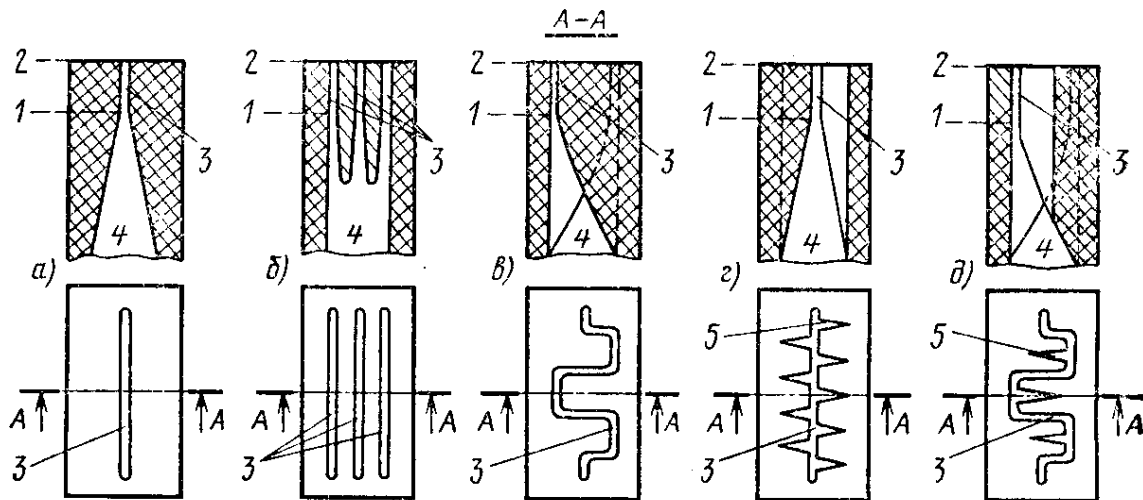


Рис. 3.12 Характерні форми подовжніх щілин дугогасильних камер

Коли дуга під впливом магнітного поля затягується в зигзагоподібну вузьку щілину, збільшується її довжина. При цьому зростає градієнт  $E_n$  за рахунок охолодження завдяки тісному контакту дузі з керамічними стінками щілини.

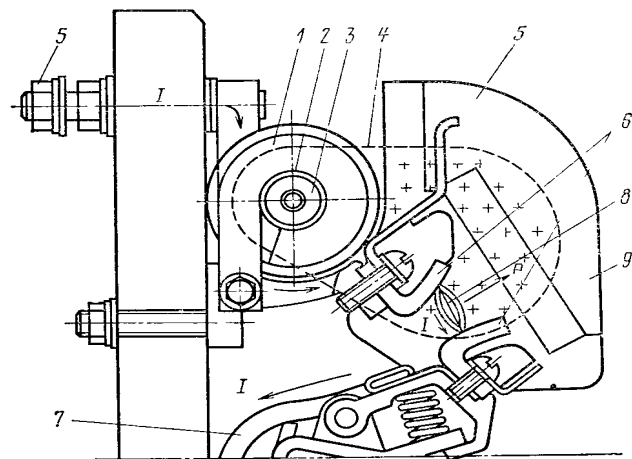
Найбільш ефективна форма рис 3.12,д, при якій градієнт  $E_{\text{п}}$  додатково зростає за рахунок місцевих розширень 5.

Розпечені гази, що викидаються з ДП після гасіння дуги, потрапляючи на струмоведучі деталі устаткування, можуть приводити до виникнення в ньому КЗ. Тому на шляху цих газів установлюють решітку з металевих пластин. Гази, проходячи через цю решітку, деіонізуються, охолоджуються, і небезпечна зона їхнього викиду різко скорочується.

### 3.3.2. Переміщення дуги під впливом магнітного поля

Електрична дуга є своєрідним провідником зі струмом, що може взаємодіяти з магнітним полем. Сила взаємодії між струмом дуги і магнітним полем переміщає дугу, створюється так назване магнітне дуття. ДП з магнітним дуттям показано на рис. 3.13. Магнітне поле створюється котушкою 1, включеної послідовно з колом, що комутується. У середині котушки 1 розміщений сердечник 3, з'єднаний з феромагнітними полюсами у вигляді пластин 4. Між котушкою і сердечником розміщується ізоляційний циліндр 2.

При протіканні струму по котушці створюється магнітне поле, напрямком якого зазначене хрестиками. Струм протікає від вхідного контакту 5 по котушці 1, замкнутим контактам 6 і гнучкому зв'язку 7 до другого вихідного контакту апарату. При розмиканні контактів 6 між ними виникає спочатку рідкий металевий місток, а потім дуга 8. Під дією магнітного поля котушки виникає сила  $P$ , яка переміщає дугу в керамічну камеру 9. Сила, що діє на одиницю довжини дуги,



**Рис. 3.13 ДП с послідовною дугогасильною котушкою**

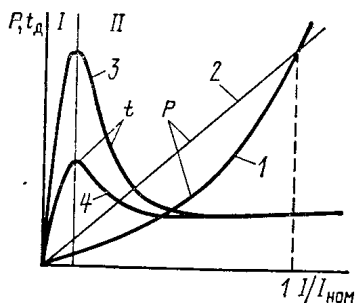
$$P = IB, \quad (3.8)$$

де  $B$ -індукція магнітного поля котушки в місці розташування дуги. Можна вважати, що індукція  $B \equiv I$ , отже,  $P \equiv I^2$ . Ця сила переміщає дугу спочатку в повітрі, а потім у вузькій щілині дугогасильної камери і витрачається на подолання аеродинамічного опору повітря і сили тертя дуги об стінки щілини.

Магнітне поле може бути створено і паралельною котушкою, включеною на напругу джерела. У цьому випадку індукція не залежить від струму в дузі і сила пропорційна цьому струму

$$P = BI, \quad P \equiv I \quad (3.9)$$

На рис. 3.14 показані залежності сили  $P$ , що діє на дугу, і тривалості горіння дуги  $t_d$  від струму, що відключається, у відносних одиницях  $I / I_{\text{ном}}$ . Сила, що діє на дугу при послідовній котушці, пропорційна квадрату струму і зображується кривою 1. Залежність при паралельній котушці описується прямою 2. Покладемо, що при  $I / I_{\text{ном}} = 1$  ці сили рівні.



**Рис. 3.14. Характеристики послідовного та паралельного магнітного дуття**

У кривій  $t_d(I / I_{\text{ном}})$  маються дві характерні області. В області  $I$  час  $t_d$  росте зі збільшенням струму, в області  $II$  -падає. В області  $I$  сила  $P$  мала і гасіння дуги відбувається за рахунок її подовження розбіжним рухомим контактом.

Чим більше струм, тим більше потрібно довжина дуги для її гасіння і тем більше час гасіння. В області  $II$ , як тільки контакти розімкнуться, за допомогою електродинамічних зусиль дуга заводиться в камеру і швидко гасне.

З рис. 3.14 видно, що при малих струмах сила, що діє на дугу при послідовній котушці, менше, ніж при паралельній. Тому тривалість горіння дуги при послідовній котушці (крива 3) більше, ніж при паралельній (крива 4). За рахунок збільшення МДС котушки максимум кривої 4 може бути знижений.

Достоїнства ДУ з послідовною котушкою:

1. При струмах понад 100 А магнітне поле швидко зсуває дугу з робочих поверхонь контактів, чим забезпечується їхній малий знос. Система добре працює в області великих струмів.

2. При зміні напрямку струму змінює знак і магнітне поле. Сила, що діє на дугу, не змінює свого напрямку. Система працює при будь-якому напрямку струму.

3. Оскільки через котушку проходить номінальний струм апарату, що відключає, вона виконується з проводу з великим перерізом. Падіння напруги на котушці складає частки вольта.

Поряд з достоїнствами такі ДУ мають і недоліки. Це недостатньо надійне гасіння дуги при малих струмах (5...7 А), велика витрата міді на котушку, нагрів контактів за рахунок тепла в дугогасильній котушці.

Незважаючи на ці недоліки, завдяки високій надійності при гасінні номінальних і великих струмів ДП з послідовною котушкою одержали переважне поширення.

ДП з паралельною котушкою мають такі наступні недоліки:

1. Напрямок електродинамічної сили, що діє на дугу, залежить від полярності струму. При зміні напрямку струму міняється напрямок руху дуги й апарат стає непрацездатним.

2 При КЗ можливо зниження напруги на джерелі, що живить котушку. У результаті процес гасіння дуги йде неефективно.

У зв'язку з зазначеними недоліками ДП з паралельною котушкою напруги застосовуються тільки при вимиканні невеликих струмів (5...10 А).

Впливати на дугу можна і магнітним полем постійного магніту. При цьому відсутні витрати енергії на створення магнітного поля; різко скорочується витрата міді на контактор; відсутній підігрів контактів від котушки, як це має місце в ДП системи з послідовною котушкою. У порівнянні з ДП з паралельною котушкою ДП з постійним магнітом має високу надійність і може використовуватися при будь-яких значеннях струму. За рахунок конструктивних заходів ДУ з постійним магнітом можна зробити працездатним при будь-якому напрямку струму. Характеристики такого ДП аналогічні характеристикам ДП з паралельною котушкою.

Дугогасильні пристрої з магнітним дуттям і керамічною дугогасильною камерою застосовуються також і в апаратах змінного струму.

У ДП з послідовною котушкою сила, що діє на дугу, пропорційна квадрату струму. Тому і при змінному струмі на дугу діє сила, незмінна по напрямку. Середнє значення сили виходить таким же, як і при постійному струмі, за умови, що постійний струм дорівнює діючому значенню змінного струму. Зазначені співвідношення справедливі, коли втрати в магнітній системі котушки дуття відсутні і потік по фазі збігається зі струмом. Незважаючи на ефективність пристрою, воно застосовується тільки в контакторах з важким режимом роботи при числі вмикань у годину більш 600.

Недоліком цих пристроїв є наявність втрат у сталі магнітної системи дугогасіння, що веде до підвищення температури контактів, і можливість виникнення великих перенапруг при примусовому обриві струму (до природного нуля).

Паралельні котушки в ДП змінного струму не застосовуються через те, що сила, що діє на дугу, змінює свій знак, тому що потік, створений магнітною системою дугогасіння, зрушає по фазі відносно струму, що відключається.

ДУ змінного струму з послідовною котушкою і керамічною дугогасильною камерою застосовуються у високовольтних вимикачах напругою 6...10 кВ.

### 3.3.3. Гасіння дуги за допомогою дугогасильної решітки

У дугогасильних решітках для гасіння дуги використовується біляелектродне падіння напруги  $u_e$  (в апаратах постійного струму) і білякатодна електрична міцність (в апаратах змінного струму).

Після розбіжності контактів 1 і 2 (рис. 3.15,б) виникаюча між ними дуга 3 під впливом магнітного поля рухається нагору на пластини 5 і розбивається на ряд коротких дуг 4. На кожній пластині утворюються катод і анод. Падіння напруги на кожній парі пластин складає 20...25 В. При великому числі пластин удається підняти статичну ВАХ дуги і забезпечити умови її гасіння. Спосіб запропонований ще на початку ХХ століття російським вченим М. О. Доливо-Добровольським і дотепер широко застосовується.

Для апаратів постійного струму напруга дугогасильної решітки

$$U_{\text{д.р.}} = U_e(m-1) + E_{\text{п}} I_{\text{д}} \quad (3.10)$$

де  $U_e = u_{\text{к}} + u_{\text{а}}$ , — сума біляелектродних падінь напруги,  $m$ —число пластин;



$E_{II}$  — градієнт напруги на вільно палаючій дузі, В/см;  $l_D$ —довжина дуги, см;  $l_D=(m-1) l_0$  ( $l_0$ -зазор між пластинами).

Позначимо напругу на стовпі дуги  $U_{D.c.} = E_{II} l_D$ . Форма статичної ВАХ дуги (рис. 3.15, в) близька до форми характеристики дуги в повітрі  $U_{D.c.} = f(I)$ , але зміщена нагору на величину  $u_e(m-1)$ . На рис. 3.15, в крива 1— напруга на дугових проміжках, крива 2-результуюча напруга  $U_{D.p.}$ . Для гасіння дуги необхідно дотриматися умова [1]:

$$U_{D.p.} = U_e (m-1) + E_{II} l_0 (m-1) > U_M - iR \quad (3.11)$$

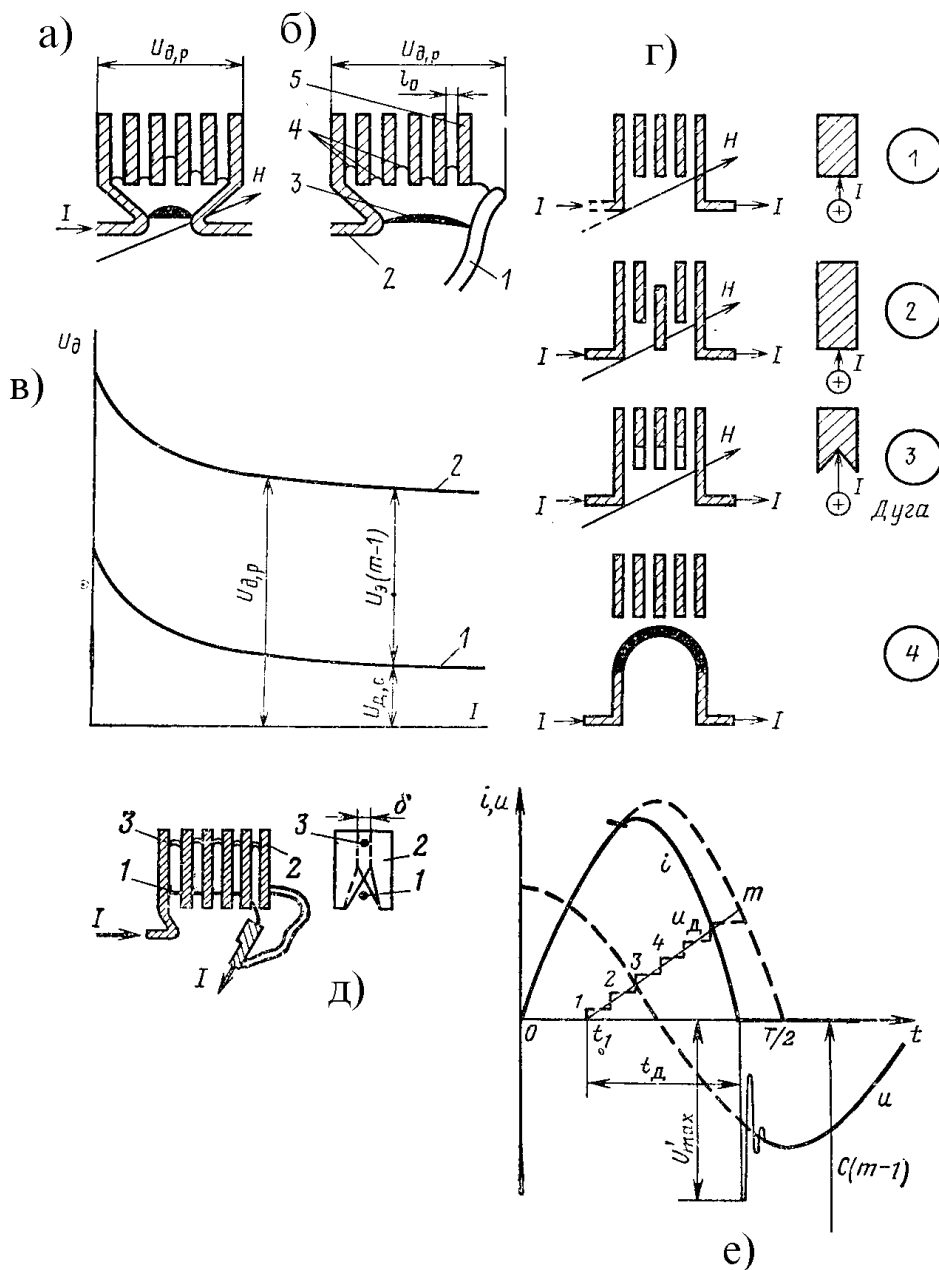
де  $R$ -опір навантаження;  $U_M$  - напруга джерела (мережі) живлення.

На рис. 3.15 показані різні схеми ДП з дугогасильними решітками. У решітках на рис. 3.15, а дуга виводиться на пластини і поділяється між ними за допомогою магнітного поля напруженістю  $H$ , створюваного спеціальною системою. На рис. 3.15, б дуга втягується в решітку за рахунок електродинамічних зусиль, що виникають у контурі 1, 3, 2, і за рахунок зусиль, що діють на дугу, завдяки наявності феромагнітних пластин 5 [11]. У конструкції рис. 3.15, в (позиція 3), для полегшення входження дуги в решітку пластини мають клиноподібний паз. Для того щоб дуга не утворила містків з рідкого металу між пластинами, відстань між ними береться не менш ніж 2 мм.

На постійному і змінному струмі частотою 50 Гц застосовуються феромагнітні пластини. Сила, що діє на дугу, переміщає її в решітку і перешкоджає виходу дуги з неї. Ця сила пропорційна струму і похідній потоку по переміщенню [13]. Вихід дуги з решітки збільшує магнітний опір, зменшує потік, що викликає появу сили, що прагне втягти дугу в решітку. Це є великим достоїнством феромагнітних пластин. Недоліком дугогасильної решітки є прогорання пластин у повторно-короткочасному режимі при струмі 600 А и більш. Для зменшення корозії пластини покриваються міддю або цинком.

Процес гасіння дуги в дугогасильній решітці при змінному струмі має свої особливості. Після розходження контактів (рис. 3.15, д) дуга 1 за рахунок електромагнітних сил зтягується на пластини 2 і поділяється на ряд коротких дуг. Введення в коло  $(m-1)$  коротких дуг зменшує струм у колі через падіння напруги на них, рівного  $U_e (m-1)$ . У результаті струм проходить через нуль раніш свого природного нуля ( $t=T/2$ ) (рис. 3.15, е). При цьому полегшуються умови процесу відновлення напруги (зменшується  $\sin \varphi_k$  кола). Тривалість горіння дуги  $t_D$  зменшується. Після проходження струму через нуль біля кожного катода відновлюється електрична міцність, досягаючи 300 В при малих струмах і 70 В при великих [13]. Гасіння відбувається при виконанні умови  $c(m-1) > U_{max}$ , де  $c$  - білякатодна міцність.

Завдяки високій міцності, що відновлюється, число пластин в апаратах перемінного струму в 7—8 разів менше, ніж в апаратів постійного струму.



**Рис. 3.15 Статичні ВАХ електричної дуги в решітці та види дугогасильних решіток**

Незважаючи на швидке гасіння дуги, при частих комутаціях номінального струму пластини нагріваються до дуже високої температури і можливо навіть їхнє прогорання. У зв'язку з цим число вмикань і вимикань у годину в контакторів з дугогасильними решітками не перевищує 600. При більшій частоті комутацій приходится використовувати електромагнітне дуття і керамічну дугогасильну камеру. При використанні дугогасильних решіток на постійному струмі чи при частоті 50 Гц електромагнітні сили, що діють на дугу, втягують її між феромагнітних пластин. У високочастотних апаратах на струми частотою 5—10 кГц у феромагнітних пластинах наводяться вихрові струми, що відштовхують дугу від решітки. Така сила відштовхування виникає і при використанні

латунних пластин. Тому для переміщення дуги в решітку необхідні спеціальні електромагнітні системи.

### 3.3.4. Гасіння дуги високим тиском

Кількість зарядів, що з'являються в стовпі дуги в результаті термічної іонізації, можна визначити за допомогою рівняння Саха [13]:

$$\frac{\chi^2}{1-\chi^2} 10^{-5} p = 315,8 \cdot T^{2,5} \exp(-11600 U_i / T) \cdot 10^{-8} \quad (3.12)$$

де  $\chi$  - ступінь іонізації, рівний відношенню числа іонізованих часток до повного числа атомів у даному об'ємі;  $p$  – абсолютний тиск газу, Па;  $T$ - абсолютна температура газу, К;  $U_i$  – потенціал іонізації, В.

Якщо  $T = \text{const}$ , то, з урахуванням того, що  $\chi^2 \ll 1$ , можна вважати, що

$$\chi \equiv 1 / \sqrt{p} \quad (3.12)$$

Таким чином, ступінь іонізації дуги зменшується з ростом тиску  $p$ .

З ростом тиску зростає щільність газу, при цьому збільшуються теплопровідність і відвід тепла від дуги. Якщо при даному струмі в дузі збільшити тиск навколишнього середовища, то збільшиться відвід тепла. Для того щоб зберегти той же струм, необхідно до дуги підвести велику потужність, що при незмінному струмі вимагає підвищення напруги на дузі (градієнта  $E_{\text{н}}$ ).

На цьому принципі засноване гасіння дуги в запобіжниках і інших апаратах низької напруги. Внутрішній об'єм запобіжника герметизован. При перегорянні топкого вставу дуга загоряється і виділяє енергію, що витрачається на підвищення тиску у внутрішньому об'ємі запобіжника. З кінетичної теорії газів зв'язок між тиском  $p$ , об'ємом  $V$  і енергією  $W_{\text{г}}$  газу може бути описана як [13]:

$$p = \frac{2}{3} W_{\text{г}} = \frac{2}{3} W_{\text{д}} = \frac{2}{3} \frac{1}{2} LI_{\text{г}}^2 = \frac{1}{3} LI_{\text{г}}^2 \quad (3.14)$$

Енергія, отримана газом,  $W_{\text{г}}$  дорівнює енергії, виділеною дугою,  $W_{\text{д}}$  яка може бути прирівняна до електромагнітної енергії контуру, що вимикається

$LI_{\text{г}}^2 / 2$ . Таким чином, тиск  $p$  у внутрішньому обсязі запобіжника залежить від струму, що вимикається,  $I_{\text{г}}$  та індуктивності кола, що комутується,  $L$ .

По дослідним даним, градієнт  $E_{\text{н}}$  у процесі гасіння дуги швидко росте з ростом тиску:

$$E_{\text{н}} = E_0 p^k \cdot 10^k; \quad k = 0,5 \div 1 \quad (3.15)$$

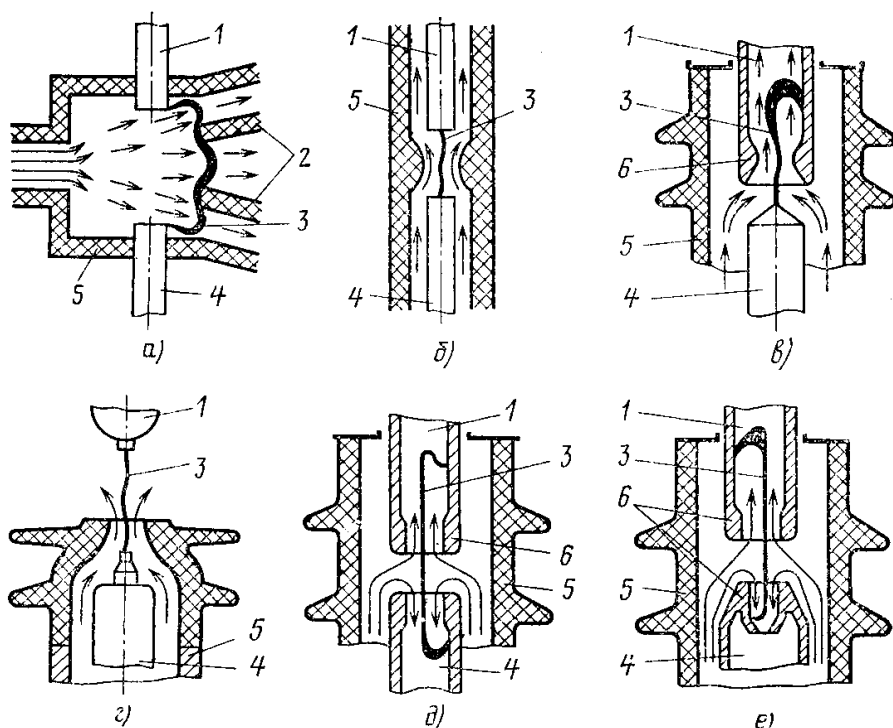
де  $E_0$ —градієнт напруги в дузі при атмосферному тиску (тиск  $p$  у мегапаскалях).

У деяких апаратах (запобіжниках, пакетних вимикачах і ін.) стінки дугогасильної камери робляться з газогенеруючого матеріалу - фібри. Завдяки високій температурі дуги такі стінки виділяють газ, і тиск в об'ємі піднімається до

10—15 МПа за частки напівперіоду. Через різкий підйом напруги на дузі струм обривається до свого природного нуля, не досягши максимального значення, обумовленого параметрами кола, тобто в таких апаратах виявляється ефект обмеження струму.

### 3.3.5. Гасіння електричної дуги в потоці стиснутого газу

В електричних апаратах високої напруги комутуються струми в десятки кілоампер при напрузі до  $10^6$  В. Для рішення такої складної задачі використовується вплив на електричну дугу потоку стиснутого повітря чи інших газів. Стиснене повітря має високу щільність і теплопровідність.



**Рис. 3.16** Камери ДП з повітряним дуттям

Омивючи дугу з великою швидкістю, воно охолоджує її і при проходженні струму через нуль забезпечує деіонізацію дугового стовпа. Повітря при високому тиску має також високу електричну міцність, що створює високу швидкість наростання електричної міцності міжконтактного проміжку.

Камери з повітряним дуттям показані на рис. 3.16. Стиснене повітря з компресорів очищається від механічних домішок за допомогою фільтрів і проходить спеціальне сушіння від вологи. Тиск, застосовуваний у повітряних вимикачах, коливається від 1 до 4 МПа. Можливі варіанти ДП з поперечним і подовжнім дуттям. У першому (рис. 3.16, *a*) повітряний потік спрямований перпендикулярно дузі, у другому — уздовж її осі. Дуга 3, що виникає між контактами 1 і 4, піддається впливу стиснутого повітря і притискається до перегородок 2. При цьому забезпечується ефективне охолодження дуги. Через великі габарити і наявність органічної ізоляції в області дуги в даний час ці камери не випускаються (але в експлуатації ще маютьяся). В даний час для апаратів на всі класи на-

пруги найбільш поширені ДП подовжнього дуття (рис. 3.16, б-е). Найбільш вдосконалими є камери по рис. 3.16, д и е. Корпус камери 5 виконаний з порцеляни. Дуга 3, що утворюється між торцями контактів 1 і 4, потоком повітря швидко вдувається в їхню внутрішню порожнину. При цьому забезпечується малий знос контактів. Пари металу електродів не попадають у міжконтактний проміжок і потоком повітря виносяться в атмосферу. Завдяки цьому пари металу електродів не зменшують швидкості відновлення електричної міцності проміжку. Елемент 6, у якому електрична дуга піддається подовжньому охолодженню повітрям, називається соплом. Після розбіжності контактів у дузі виділяється потужність

$$P_d = u_d I \quad (3.16)$$

Під дією цієї потужності відбувається швидкий підігрів повітря і місцеве підняття тиску, у результаті кількість повітря, що охолоджує дугу, і його швидкість різко зменшуються. За певних умов можлива взагалі зупинка повітряного потоку. Відбувається закупорка сопла ДП. Це явище необхідно враховувати при проектуванні ДП, забезпечуючи при амплітудному значенні струму, що відключається, мінімальну швидкість витікання повітря не нижче 8...10 м/с.

Після проходження струму через нуль міжконтактний проміжок заповнений плазмою, нагрітої до 12000—15000 К. При охолодженні плазми дуги повітрям електрична міцність проміжку відновлюється з кінцевою швидкістю. Чим більше струм, що відключається, тим сутужніше остудити плазму і тем повільніше йде процес відновлення електричної міцності. Тому для ДП з подовжнім дуттям характерне зменшення струму, що відключається, з ростом швидкості відновлення напруги. При великих значеннях струму, що відключається, необхідно знижувати швидкість відновлення напруги мережі за допомогою шунтуючих резисторів (§ 3.2).

Одним з засобів подальшого збільшення номінальних напруг установок і припустимих струмів КЗ є застосування нових дугогасильних газів. Найкращі результати отримані з електротехнічним газом—елегазом ( $\text{SF}_6$ ), застосованим вперше в колишньому Радянському Союзі. У порівнянні з повітрям елегаз має такі наступні переваги:

1. Електрична міцність елегазу в 2,5 рази вище, ніж у повітря, і при тиску 0,2 Мпа близька до електричної міцності трансформаторного масла.
2. У ДП подовжнього дуття дугогасильна здатність елегазу приблизно в 5 разів вище, ніж у повітря.
3. Висока питома щільність поліпшує тепловіддачу струмоведучих систем, що дозволяє збільшити припустиму щільність струму і зменшити масу міді у вимикачі.
4. Мале значення градієнта  $E_n$  в електричній дузі зменшує ефект закупорки сопла. Це дозволяє збільшити міжконтактний зазор і підвищити напругу на кожному розриві. При цьому скорочується число розривів на вимикач.

5. Елегаз є інертним газом, що не вступає в реакцію з киснем і воднем, слабо розкладається дугою. Елегаз нетоксичний, хоча деякі продукти, що утворюються при впливі дуги, небезпечні.

Недоліком елегазу є висока температура зріджування. Так, наприклад, при тиску 1,31 МПа перехід з газоподібного стану в рідке відбувається при 0°C. Це змушує при високому тиску прибігати до пристроїв, що підігрівають. У елегазовому ДП високого тиску гасіння дуги відбувається так само, як і в повітряному ДП. Через складність і знижену надійність такі ДП не використовуються.

Широке застосування у вимикачах знайшли автопневматичні елегазові ДП. У вимикачі підтримується тиск 0,35 МПа, при якому температура зріджування елегазу складає  $-40^{\circ}\text{C}$ . При вимиканні вимикача його механізм впливає на поршневий пристрій, що створює в зоні горіння дуги тиск 0,7...0,8 МПа. При цьому забезпечується надійне гасіння дуги. В даний час повітряні ДП витісняються елегазовими.

### 3.3.6. Гасіння дуги в трансформаторному маслі

Найпростіший ДП такого типу представлено на рис. 3.17, а. Дугогасильна камера 6 виконана з міцного ізоляційного матеріалу (гетинаксу чи стеклотекстоліту) і розташована в трансформаторному маслі 1. При вимиканні рухомий контакт 7 переміщується вниз з великою швидкістю. Між ним і нерухомим контактом 2 загоряється дуга 4. Під дією енергії дуги відбувається вибухоподібне розкладання масла на водень і гази у виді парів масла. Водень має винятково

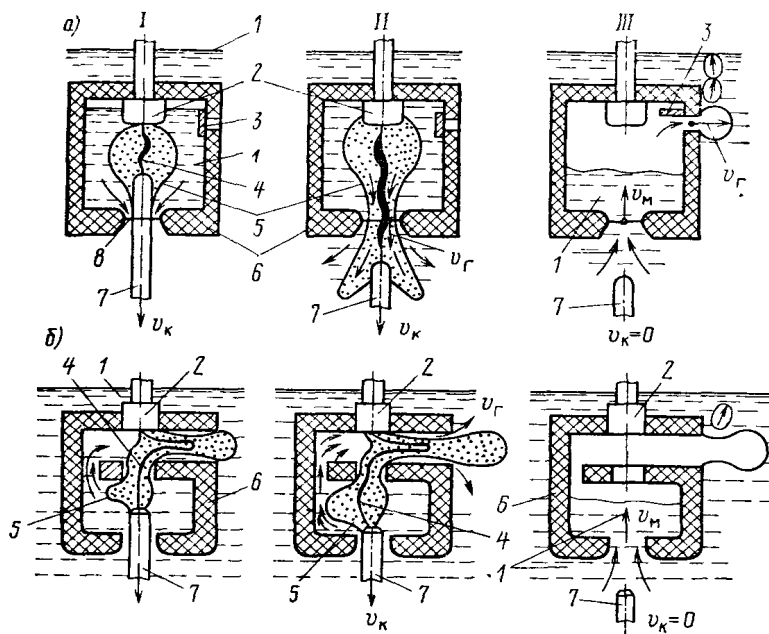


Рис. 3.17 ДП масляних вимикачів

високу теплопровідність і є одним з кращих дугогасильних середовищ.

Температура газу при гасінні досягає 2000...3000 К. За соті частки секунди тиск піднімається до 2...4 МПа. Газовий міхур 5, що утворюється, прагне вирватися з камери через щілину 8. При цьому відбувається ефективне охолодження дуги потоками газу, що випливають з камери зі швидкістю звуку.

Оскільки тиск і ефективність гасіння дуги залежать від її енергії, то чим більше струм, що вимикається, тим швидше відбувається гасіння. Залежність тривалості вимикання від струму аналогічна приведеній на рис. 3.14. При малому струмі через недолік енергії дуги процес гасіння затягується, і для його прискорення необхідні спеціальні міри. На рис. 3.17, б показано, що дуга 4 у нижній частині

об'єму камери створює додатковий обсяг газу, що гонить масло зі швидкістю  $v_t$  на дугу, зтягнуту в щілину. У результаті цей процес дугогасіння прискорюється. У вимикачах на напругу 220...500 кВ приходится вмикати велике число камер послідовно, тому що кожна камера працює при напрузі не більш 100 кВ. Найпростіша камера (рис. 3.17, а) працює при напрузі не вище 10 кВ. Звільнення газів з камери після гасіння дуги виробляється через отвір 3.

### 3.3.7. Гасіння дуги у вакуумному середовищі

У вакуумному ДП контакти розходяться в середовищі з тиском  $10^{-4}$  Па ( $10^{-6}$  мм рт.ст.), при якому щільність повітря дуже мала. Довжина вільного пробігу молекули досягає 50 м, а довжина вільного прольоту електрону - 300 м. За таких умов електричний пробій між електродами утруднений через відсутність носіїв зарядів. Пробивна напруга проміжку довжиною 1 мм у вакуумі досягає 100 кВ, при нормальному атмосферному тиску - 3...3,5кВ (рис. 3.18).

Процес горіння і гасіння дуги у вакуумі при змінному струмі відбувається таким чином. При розмиканні контактів контактне натискання зменшується, а перехідний опір контактів збільшується і при натисканні, рівному нулю, прагне до нескінченності. Навіть при невеликих струмах у момент розмикання контактів через виділення великої кількості тепла матеріал контактів плавиться й утворюється рідкий металевий місток, що під дією високої температури нагрівається і випаровується. При розриві містка загоряється дуга, що горить у середовищі парів металів електродів. Вакуумна дуга при струмах менш 10 кА характеризується малим падінням напруги, що складає 20...30 В. Після проходження струму через нуль вакуумна дуга гасне. Швидкість дифузії зарядів дуже висока через велику різницю щільностей часток у дузі і вакуумі навколо неї. Практично через 10 мкс після нуля струму між контактами відновлюється електрична міцність вакууму. Швидка дифузія часток, високі електрична міцність вакууму і швидкість її

відновлення забезпечують гасіння дуги при першому проходженні струму через нуль. Великим достоїнством цього ДП є висока швидкість відновлення електричної міцності проміжку. Вакуумні ДП є в даний час найбільш ефективними і довговічними. Їхній термін служби без ревізії досягає 25 років. Створені ДП на

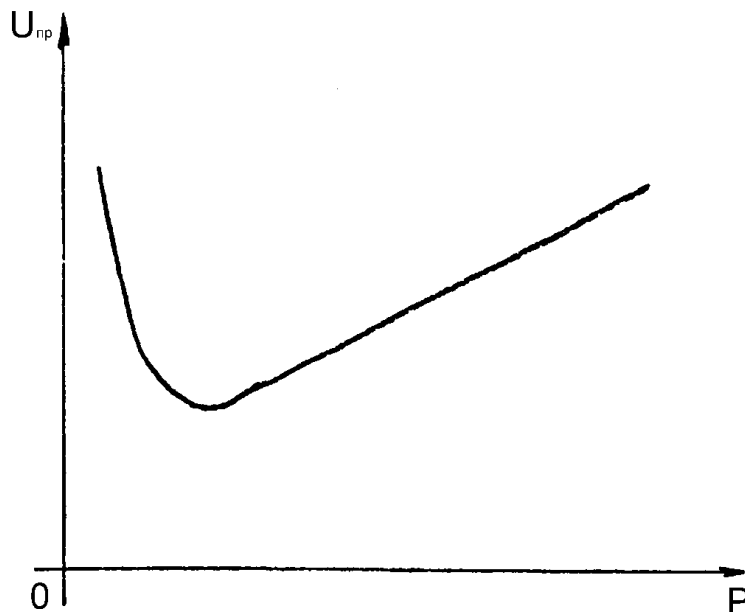


Рис. 3.18. Залежність пробивної напруги від тиску середовища (крива Пашена)

струм вимикання до 100 кА при напрузі 10 кВ і на струм, що вимикається, 40 кА при напрузі 160 кВ.

### 3.3.8. Безконтактна комутація

При великому числі комутацій у годину зростає знос контактів при звичайній дуговій комутації. З цього погляду застосовуються схеми бездугової (безконтактної) комутації за допомогою силових напівпровідникових приладів: діодів (VD), тиристорів, двоопераційних тиристорів (VS), силових транзисторів (VT) (рис.3.19, а).

В даний час основним керованим вентиляним елементом у силових колах є тиристор. При відсутності сигналу на керуючому електроді (КЕ) тиристор закритий, при подачі на КЕ позитивного сигналу щодо катода тиристор відкривається і здатний пропускати струм у визначеному напрямку як діод. При проходженні змінного струму через нуль тиристор знову закривається, тобто обривається шлях кола, що комутується. Два зустрічно паралельно включених тиристори являють собою двохлапівперіодний ключ однофазного змінного струму Q (рис. 3.19, б), як при фазовому (рис. 3.19, в) так і при широтно-імпульсному (рис. 3.19, г) керуванні.

На основі такого перетворювача можливе здійснення таких наступних операцій:

- 1). вмикання і вимикання електричного кола з активним і змішаним (індуктивним і ємнісним) навантаженням;
- 2). змінення струму навантаження за рахунок регулювання моменту подачі сигналу керування тиристорами.

При фазовому керуванні середнє і діюче значення струму мінються за рахунок зміни моменту подачі на тиристор відкриваючого сигналу – за рахунок кута  $\alpha$ . Кут  $\alpha$  називається кутом керування або кутом вмикання. Діюча напруга на навантаженні при активному характері останньої

$$U_H = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \sin 2\alpha / 2} = \frac{U_M}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \sin 2\alpha / 2} = U_M \sqrt{\gamma} \quad (3.16)$$

$$\gamma = \frac{\pi - \alpha + \sin 2\alpha / 2}{\pi};$$

$$U_H = U_{M0} (1 + \cos \alpha) / 2,$$

де  $U_m$ -амплітуда напруги живлення;  $U_c$ ,  $U_{M0}$  - діюче і середнє значення напруги живлення;  $\gamma$ -кут регулювання.

Крива струму в мережі й у навантаженні несинусоїдальна, що викликає викривлення форми напруги мережі і порушення в роботі споживачів, чуттєвих до високочастотних перешкод. Для зменшення цих викривлень необхідні спеціальні міри.



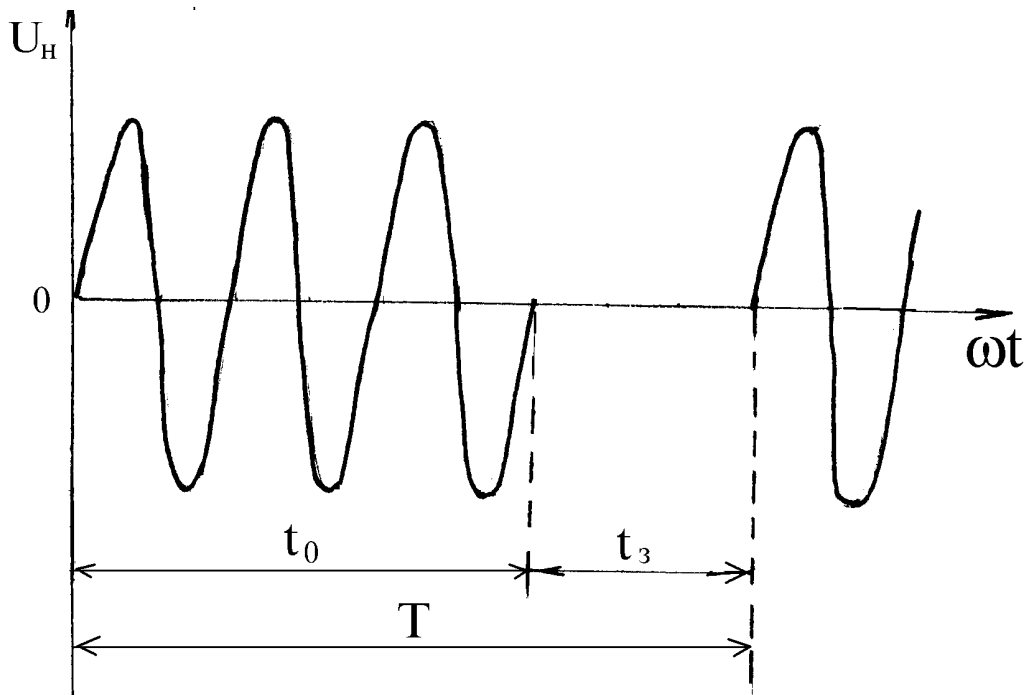
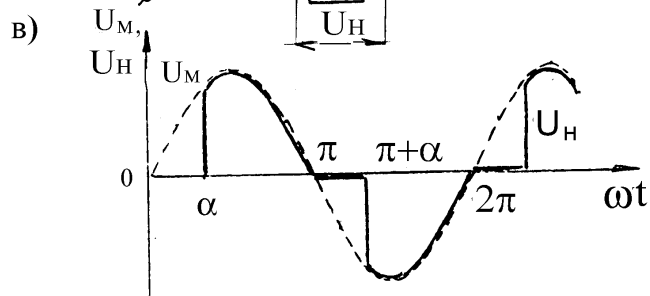
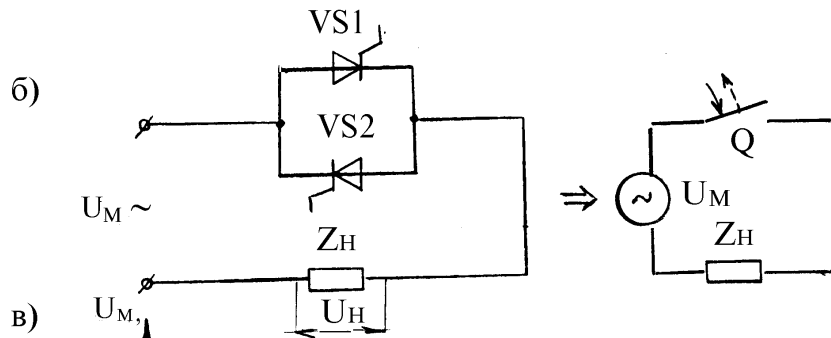
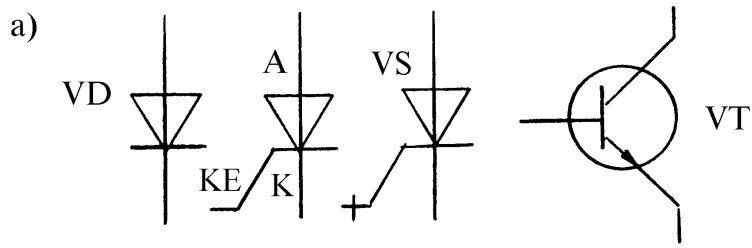


Рис. 3.19. Базова схема бесконтактної комутації

При широтно-імпульсному керуванні протягом часу  $t_0$  на тиристори поданий відкриваючий сигнал, вони відкриті і до навантаження прикладена напруга мережі. Протягом часу  $t_3$  керуючий сигнал знятий і тиристори закриті. Діюче значення струму в навантаженні

$$I = I_{н.м} \frac{t_0}{t_0 + t_3}$$

де  $I_{н.м}$  - струм навантаження при  $t_{закр} = 0$ .

Регулювання струму навантаження можливо за рахунок зміни як кута вмикання  $\alpha$ , так і кута вимикання при примусовій комутації (здійснюється за допомогою спеціальних вузлів примусової комутації [13] чи двухопераційних тиристорів, що можуть закриватися подачею сигналу керування). При великих струмах через складність такі схеми не застосовуються. Створення транзисторів на великі струми (сотні амперів) і великі напруги (сотні вольт) дозволяє спростити примусову комутацію кіл постійного і змінного струму, що особливо важливо в апаратах підвищеної швидкодії.

Базова схема (рис. 3.19,б) досить широко використовується при реалізації безконтактних апаратів пуску, керування, захисту (див. главу 6).

### 3.3.9. Сучасні тенденції розвитку способів гасіння дуги

В даний час ведуться пошуки нових ефективних способів гасіння дуги в комутаційних апаратах, наприклад:

- гасіння дуги в середовищі зрідженого елегазу ( $SF_6$ );
- гасіння дуги під впливом вибуху;
- підвищення ефективності шляхом зовнішнього схемного впливу на дугу, наприклад, шляхом шунтування дуги зустрічно паралельно включеними тиристорами.

#### *Запитання для самоперевірки*

1. *Головні особливості дугового розряду.*
2. *За рахунок яких явищ починається і підтримується дуговий розряд?*
3. *Якими факторами визначається швидкість наростання напруги, що відновлюється?*
4. *Як штучно знизити швидкість наростання напруги, що відновлюється?*
5. *В чому полягає вплив на стовп дуги для її гасіння?*
6. *Способи гасіння дуги в сучасних вимикачах високої і низької напруги.*

## ГЛАВА 4

### КОНТРОЛЕРИ, КОМАНДОАПАРАТИ І РЕОСТАТИ

*Приведені конструкції і аналіз сучасних контролерів, кнопок управління, командоконтролерів, позиційних вимикачів, універсальних перемикачів, ключів управління, резисторів і реостатів.*

*Навчальна ціль глави – ознайомлення студента з призначенням і конструкцією зазначених пускорегулюючих апаратів та формування умінь, які потрібні при читанні електричних схем, виборі і експлуатації контролерів, командоапаратів і реостатів.*

*Контролером називається електричний апарат з ручним керуванням, призначений для зміни схеми підключення електродвигуна до джерела живлення і зміни схеми його силових кіл. По конструктивному виконанню контролери поділяються на барабанні, кулачкові і плоскі.*

*Командоапаратом називається пристрій, призначений для переключень у колах керування силових електричних апаратів (контакторів). Іноді вони застосовуються для безпосереднього пуску електродвигунів малої потужності, вмикання електромагнітів і іншого електроустаткування. Командоапарати можуть мати ручний привод (кнопки, ключі управління, командоконтролери) чи приводитися в дію контрольованим механізмом (шляхові вимикачі).*

*Реостат є сукупністю резисторів і контролера, що дозволяє змінювати величину електричного опору, що вводиться у коло.*

#### 4.1. КОНТРОЛЕРИ

Барабанні контролери в силу серйозних конструктивних недоліків (мала зносостійкість контактів; припустиме число включень контролера в годину не перевищує 240; потужність двигуна, що запускається, приходить знизувати до 60 % номінальної) одержали дуже обмежене застосування.

У **кулачковому контролері** змінного струму (рис. 4.1) рухомий контакт, що перекочується, *1* має можливість обертатися щодо центра  $O_2$ , розташованого на контактному важелі *2*. Контактний важіль *2* повертається щодо центра  $O_1$ . Контакт *1* замикається з нерухомим контактом *3* і з'єднується з вихідним контактом за допомогою гнучкого зв'язку *4*. Замикання контактів *1*, *3* і необхідне контактне натискання створюються пружиною *5*, що впливає на контактний важіль через шток *6*. При розмиканні контактів кулачок *7* діє через ролик *8* на контактний важіль. При цьому стискається пружина *5* і контакти *1*, *3* розмикаються. Момент вмикання і вимикання контактів залежить від профілю кулачкової шайби *9*, що приводить у дію контактні елементи. Малий знос контактів дозволяє збільшити число включень у годину до 600 при ПВ=60%. У контролер входять два комплекти контактних елементів *I* і *II*, розташованих по обидві

сторони кулачкової шайби 9, що дозволяє різко скоротити осьову довжину пристрою.

Як у барабанному, так і в кулачковому контролері мається механізм для фіксації положення вала. Контролери змінного струму через полегшені умови гасіння дуги можуть не мати дугогасильних пристроїв. У них установлюються тільки дугостійкі азбестоцементні перегородки 10. Контролери постійного струму мають дугогасильний пристрій, аналогічний пристрою, застосовуваному у контакторах (§ 3.3.3).

Вмикання розглянутого контролера відбувається при впливі на рукоятку і передачі цього впливу через кулачкову шайбу. Вмикання відбувається за допомогою сили пружини 5 при відповідному положенні рукоятки. Тому контакти вдається розвести навіть у випадку їхнього зварювання. Недолік конструкції полягає у великому моменті на валу за рахунок пружин, що вмикають, при значному числі контактних елементів. Треба відзначити, що можливі й інші конструктивні рішення привода контактів контролера.

На рис. 4.2 показана частина схеми для пуску асинхронного двигуна з фазним ротором за допомогою кулачкового контролера типу КТТ61А.

Частина схеми стосовної до контролера, обведена штрих-пунктирною лінією. Регулювання частоти обертання двигуна М здійснюється шляхом зміни опору в колі ротора. Діаграма замикання і розмикання контактів контролера К1...К9 симетрична для обох напрямків обертання двигуна.

Вмикання двигуна і зміна напрямку його обертання здійснюється контактами К1, К2, К3 і К4, що комутують і змінюють порядок чергування двох фаз обмоток статора С1 і С2. Комутування ступіней резисторів ротора здійснюється контактами К5...К9. При цьому ступіні резисторів вмикаються за несиметричною схемою.

Основні типи силових кулачкових контролерів: ККТ61А, ККТ62А, ККТ65А, ККТ68А (для асинхронних двигунів з фазним ротором); КВ1-02 (для двигунів постійного струму); КВС-201 (для рудникових електровозів).

При великому числі контактів габарити і маса кулачкових і барабанних контролерів різко зростають. У цьому випадку, якщо число операцій у годину при

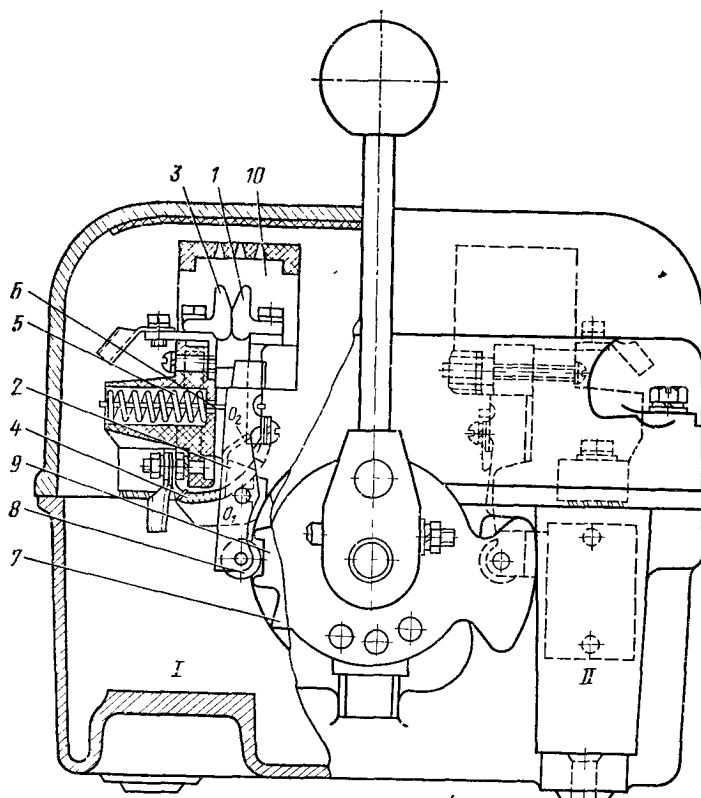


Рис. 4.1. Кулачковий контролер

регулюванні і пуску невелике (10...12), застосовуються плоскі контролери. У плоскому контролері на плиті з ізоляційного матеріалу розташовуються нерухомі контакти, по яких сковзає рухомий контакт місткового типу, що одночасно стикається з струмоз'ємною шиною.

Такий контролер показаний на рис. 4.3, де по нерухомих циліндричних контактах 0 ... 13 і шинам 14, 15 сковзає рухомий контакт 16 місткового типу.

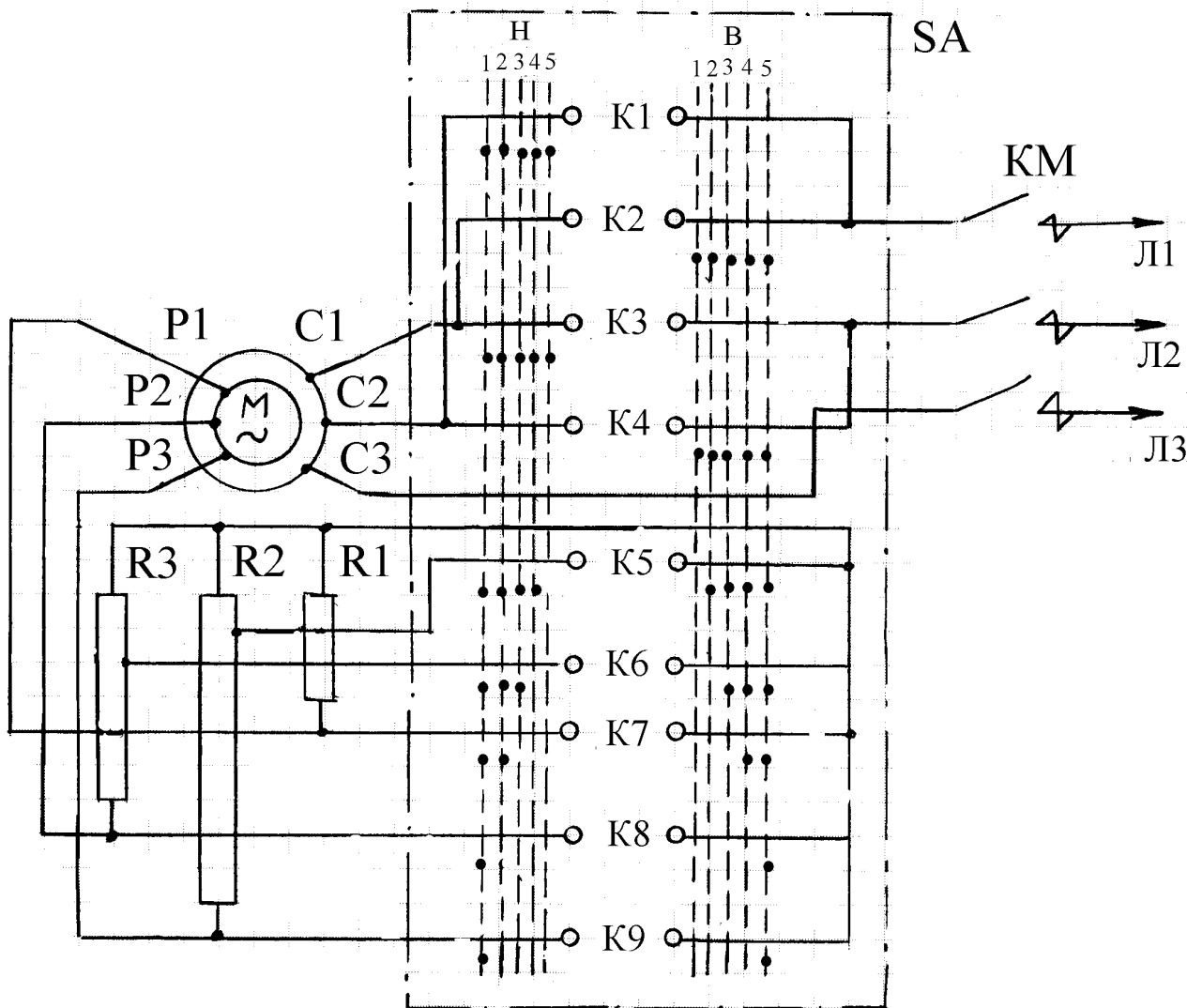


Рис. 4.2 Схема з'єднань кулачкового контролера для пуску асинхронного двигуна з фазним ротором

## 4.2. КОМАНДОПАРАТИ

### 4.2.1. Кнопки управління

Найпростішим командоапаратом є кнопка управління. Кнопка використовується для схем пуску, зупинки і реверса електродвигунів шляхом замикання і розмикання обмоток контакторів, що комутують головне коло, а також для керування всілякими схемами автоматики. Один з варіантів конструктивного ви-

конання кнопки управління показаний на рис 4.4 Для підвищення надійності контакти часто виконуються зі срібла. При змінному струмі електрична дуга надійно гасне при напрузі до 500 В и струмі 3 А завдяки двом розмикаючим контактам для одного кола, що комутується. При постійному струмі і напрузі 440 В струм, що відключається, не перевищує 0,15 А При використанні кнопки для вмикання електромагнітів змінного струму (наприклад, контакторів) її контакти в замкнутому положенні повинні надійно пропускати пускові струми обмоток, що можуть досягати 60 А.

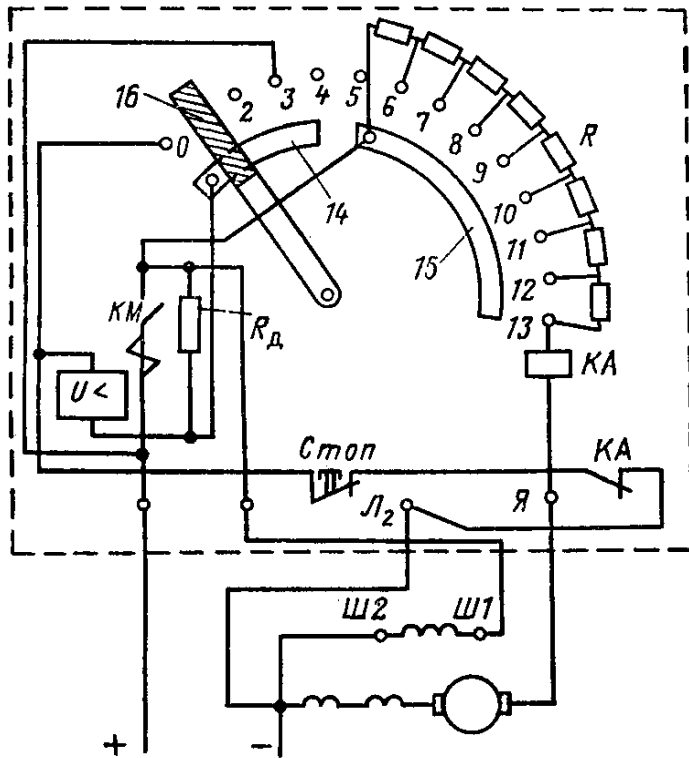


Рис. 4.3 Схема вмикання пускового реостата

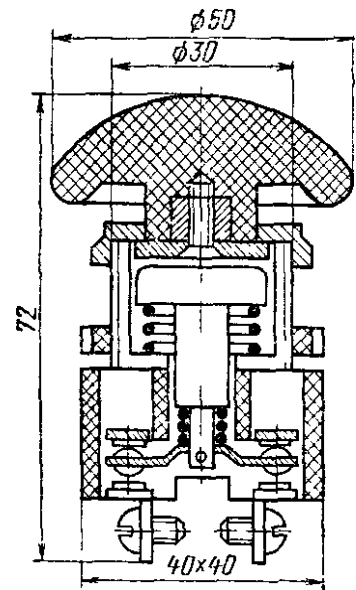


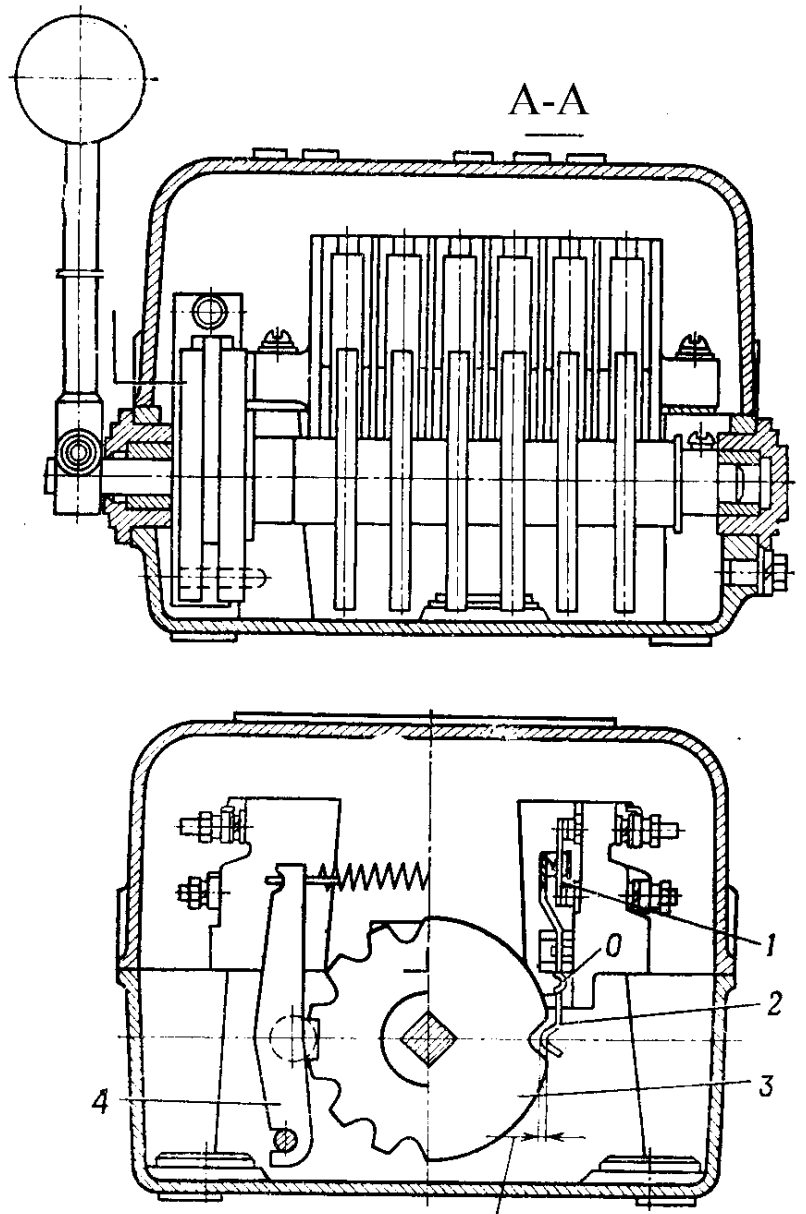
Рис. 4.4 Кнопка управління

Слід зазначити, що схеми керування доцільно проектувати так, щоб безпосереднє вимикання кола здійснювалося не кнопкою, а іншим, більш потужним апаратом, що має допоміжні контакти. У тому випадку, коли необхідно робити перемикання декількох кіл по визначеній програмі з великою частотою вмикань, застосовуються командоконтролери.

#### 4.2.2. Командоконтролери

Широке розповсюдження одержали нерегулюємі кулачкові командоконтролери. На рис. 4.5 показаний нерегулюємі командоконтролер постійного струму, за принципом пристрою аналогічний кулачковому контролеру. За допомогою місткового контакту 1 у колі, що вимикається, створюються два розриви, що полегшує гасіння дуги. Кулачковий привод, велика відстань контактів від центра обертання важеля 2, великий міжконтактний проміжок дозволяють оде-

ржати високу швидкість розбіжності контактів і збільшити струм вимикання майже в 4 рази в порівнянні зі струмом вимикання кнопкового елемента. Моменти замикання і розмикання контактів залежать від профілю кулачка 3. Положення вала фіксується за допомогою важількового фіксатора 4. За допомогою командоконтролера реалізується керування силовими контакторами, якими у свою чергу комутуються силові кола. При необхідності точного регулювання моменту спрацьовування застосовуються регулюємі кулачкові командоконтролери, у яких момент замикання і розмикання контактів може регулюватися в широких межах з великою точністю.



Западання важіля 5 мм.

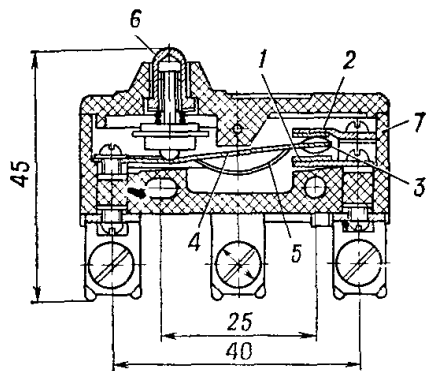
Рис 4.5 Нерегулюємі кулачковий командоконтролер

У регулюємому командоконтролері можна установити на кожному диску до трьох кулачків, що вмикають, і трьох кулачків, що вимикають. Число кіл, що комутуються, може мінятися від 4 до 12, що дозволяє використовувати командоконтролер для керування досить складними схемами автоматики.

Обертання вала командоконтролера може здійснюватися спеціальним виконавчим двигуном, що забезпечує дистанційне керування їм.

#### 4.2.3. Шляхові (позиційні) вимикачі (перемикачі) і мікро вимикачі

Шляховий вимикач призначений для замикання чи розмикання слабкострумових кіл керування в залежності від просторового положення (позиції) робочого органа керованого електропривода. Окремими випадком шляхових є кінцеві вимикачі, що забезпечують комутацію сигнальних кіл тільки в крайніх положеннях ходу робочого органа. Контактні шляхові вимикачі можна підрозділити на кнопкові і важількові. У кнопковому шляховому вимикачі контрольований робочий орган впливає на шток кнопкового елемента (див рис. 4.6). Розмикання і замикання контактів відбувається зі швидкістю переміщення контрольованого органа. При швидкості штока менше 0,4 м/хв необхідно застосовувати вимикачі з підвищеною швидкодією, що забезпечують необхідну швидкість розмикання контактів.



**Рис. 4.6 Шляховий мікроперемикач**

Якщо потрібно зупинити робочий орган привода або при його наближенні виконати відповідні переключення з високою точністю ( $0,3...0,7 \cdot 10^{-3}$  м, застосовуються шляхові (кінцеві) мікроперемикачі. На рис. 4.6 показаний мікроперемикач з одним перемикаючим контактом.

Нерухомі контакти 1 і 2 укріплені в пластмасовому корпусі 7. Рухомий контакт 3 укріплений на кінці спеціальної пружини, що складається з плоскої 4 і фігурної 5 частин. У зображеному на рис. 4.6 положенні пружина створює

тиск на контакт 2.

При натисканні робочого органа на голівку 6 відбуваються деформація пружини і перекидання контакту 3 у нижнє положення за час  $0,01...0,02$  с, що забезпечує надійне вимикання кола. Хід голівки 6 складає десяти частки міліметра. Мікровимикачі ВМК-ВЗГ, наприклад, відключають струм 2,5 А при постійній напрузі 220 В і змінній напрузі 380 В.

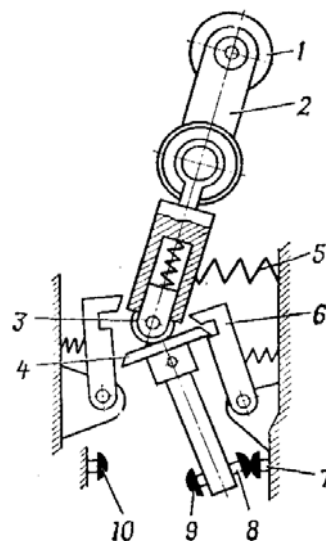
При великих ходах робочого органа і великих струмах застосовуються важількові шляхові перемикачі. Принцип дії одного з виконань таких перемикачів показаний на мал. 4.7. Контрольований робочий орган привода впливає на ролик 1, укріплений на кінці важеля 2. На іншому кінці важеля знаходиться підпружинений ролик 3, що може переміщатися уздовж осі важеля. У зазначеному на малюнку положенні замкнуті контакти 7 і 8. Положення контактів надійно зафіксовано заскочкою 6. При впливі на ролик 1 важіль 2 повертається проти



годинникової стрілки. Ролик 3 повертає тарілку 4 і зв'язані з нею контакти 8 і 9. При цьому контакти 7 і 8 розмикаються, а 9 і 10 замикаються.

Завдяки наявності пружин замикання і розмикання контактів відбувається з великою швидкістю, що не залежить від швидкості руху ролика 1. Це дає можливість вимикати струми до 6 А при напрузі до 220 В постійного струму. Повернення у початкове положення після припинення впливу на ролик 1 здійснюється пружиною 5.

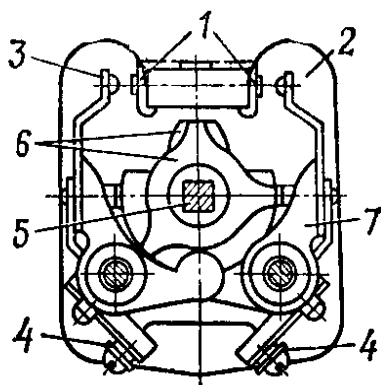
Сучасні вимоги до надійності і збільшеної частоти спрацьовування привели до створення безконтактних шляхових вимикачів. У таких вимикачах контрольований робочий орган впливає не на контакти, а на безконтактні датчики. Датчики можуть бути індуктивними, індукційними, магнітотомодуляційними, оптичними й ін. Вироблюваний датчиками сигнал використовується для керування електроприводом [9].



**Рис. 4.7 Важильковий шляховий перемикач**

#### 4.2.4. Універсальні перемикачі

Для схем керування електроприводом, електричних апаратів і різноманітних пристроїв автоматики широко застосовуються універсальні перемикачі (УП). Одна секція такого перемикача (мал. 4.8) має нерухомий контакт 1 і два рухомих контакти 2 і 3.



**Рис. 4.8. Секція універсального перемикача**

У секції можна використовувати як два, так і один розриви кола, що комутується. В останньому випадку коло приєднується до нерухомого контакту 1 і виводу одного з рухомих контактів 4. При повороті вала 5 повертається кулачок 6, що впливає на контактний важіль 7 рухомого контакту, після чого відбувається замикання контактів. Використання одного чи двох розривів визначається значеннями струму, що вмикається, і напруги кола, що комутується. У найбільш важких режимах контакти двох сусідніх секцій з'єднуються послідовно, що забезпечує чотири послідовних розриви кола. Номінальний струм перемикача 20 А. Число кіл, що комутуються, (секцій) змінюється від 2 до 16.

Завдяки великій вимикаючій спроможності і великій кількості кіл, що комутуються, перемикачі типу УП широко використовуються для пуску і реверса двигунів потужністю до 5 кВт при напрузі до 500 В. Ці перемикачі зручні при реверсуванні і регулюванні частоти обертання асинхронних двигунів шляхом переключення числа полюсів обмоток.

#### 4.2.5. Ключі управління

При великій кількості складних та різноманітних комутаційних операцій використовуються ключі або перемикачі управління. На відміну від перемикача УП вал перемикача управління має як фіксовані положення, так і нефіксовані, з яких він автоматично повертається у початкове положення після припинення впливу оператора. Контактна система ключа аналогічна контактній системі пакетного вимикача [13].

### 4.3 РЕЗИСТОРИ ПУСКОВИХ І ПУСКОРЕГУЛЮЮЧИХ РЕОСТАТІВ

#### 4.3.1. Класифікація резисторів

У залежності від призначення резистори поділяються на такі наступні групи:

- *пускові резистори* для обмеження струму в момент підключення до мережі нерухомого двигуна і для підтримки струму на визначеному рівні в процесі його розгону;
- *гальмові резистори* для обмеження струму двигуна при його гальмуванні;
- *регульовальні резистори* для регулювання струму чи напруги в електричному колі;
- *додаткові резистори*, що включаються послідовно в коло електричного апарату з метою зниження напруги на ньому;
- *розрядні резистори*, що включаються паралельно обмоткам електромагнітів чи інших індуктивностей з метою обмеження перенапруг при їхньому вимиканні або для уповільнення відпускання реле і контакторів; такі резистори використовуються також для розряду ємнісних накопичувачів;
- *баластові резистори*, що включаються в коло послідовно для поглинання частини енергії чи паралельно джерелу з метою запобігання його від перенапруг при вимиканні навантаження;
- *навантажувальні резистори* для створення штучного навантаження генераторів і інших джерел; вони використовуються при іспитах електричних апаратів;
- *нагрівальні резистори* для нагрівання навколишнього середовища чи апаратів при низьких температурах;
- *заземляючі резистори* включені між землею і нульовою точкою генератора чи трансформатора з метою обмеження струмів КЗ на землю і можливих перенапруг при замиканні на землю;
- *установочні резистори* для установки визначеного значення струму чи напруги в приймачах енергії.

Пускові, гальмові, розрядні і заземляючі резистори в основному призначені для роботи в короткочасному режимі і повинні мати можливо велику постійну часу нагрівання. Особливих вимог до стабільності параметрів цих резисторів не пред'являється. Всі інші резистори працюють, в основному, у тривалому режимі і вимагають необхідної поверхні охолодження. Опір цих резисторів повинний бути стабільним у заданих межах.

У залежності від матеріалу провідника розрізняють металеві, рідинні, вугільні і керамічні резистори. У промисловому електроприводі найбільше поширення одержали металеві резистори. Керамічні резистори (з нелінійним опором) широко застосовуються у високовольтних розрядниках.

#### 4.3.2. Матеріали резисторів

З метою зменшення габаритних розмірів резисторів питомий опір використаного для його виготовлення матеріалу повинний бути можливо вище. Припустима робоча температура матеріалу також повинна бути якнайбільша, що дозволяє скоротити масу матеріалу і необхідну поверхню охолодження. Для того щоб опір резистора якнайменше залежав від температури, температурний коефіцієнт опору (ТКО) резистора повинний бути можливо меншим. Матеріал резисторів, призначених для роботи на повітрі, не повинний піддаватися корозії або повинний утворювати протистоячу їй захисну плівку.

У табл. 4.1. приведені основні властивості матеріалів, використовуємих для виготовлення резисторів.

Таблиця 4.1

#### Властивості матеріалів, використовуємих для виготовлення резисторів і реостатів

Найменування і склад	Питомий електричний опір при 20 °С, мк Ом·м	Максимальна робоча температура, °С	Температурний коефіцієнт опору, °С <sup>-1</sup>
Манганін Мнц 3-12 (Cu, Mn, Ni+Co)	0,42-0,48	60	(-2... +25)× ×10 <sup>-6</sup>
Константан Мнц 40·1,5 (Cu, Ni+CoMn)	0,45-0,52	500	2·10 <sup>-5</sup>
Нейзильбер Мнц 15·20 (Cu, Zn, Ni+Co)	0,3-0,32	200	36·10 <sup>-5</sup>
Ніхром, Х15Н60Н (Fe, Ni, Cr)	1,07-1,17	1100	17·10 <sup>-5</sup>
Жаростійкий сплав 0Х23Ю5 (Fe, Cr, Al)	1,29-1,25	1200	8·10 <sup>-5</sup>
Чавун (Fe, C)	0,8	400	0,001
Сталь (дріт)	0,11-0,13	200-300	(24...48) 10 <sup>-4</sup>
Сталь листовая електротехнічна (Fe, Si)	0,3	150-200	0,002

Сталь має малий питомий електричний опір. На повітрі сталь інтенсивно окислюється і тому застосовується тільки в реостатах, заповнених трансформа-

торним маслом. У цьому випадку робоча температура сталі визначається нагріванням трансформаторного масла і не перевищує 115°C.

Через високе значення ТКО сталь незастосовна для резисторів зі стабільним опором. Єдине достоїнство сталі — дешевина.

Електротехнічний чавун має значно більше ніж сталь питомий електроопір і значний ТКО. Робоча температура чавуну досягає 400 °С. Відлиті з чавуну резистори, як правило, мають зигзагоподібну форму. Через крихкість чавуну необхідна механічна міцність елементів резистора досягається збільшенням їхнього перерізу. Тому чавунні резистори придатні для роботи при великих струмах і потужностях.

Через недостатню стійкість до механічних впливів (вібраціям, ударам) чавунні резистори використовуються тільки в стаціонарних установках.

Питомий електричний опір листової електротехнічної сталі за рахунок присадки кремнію майже утворює вище, ніж у звичайної сталі. Сталеві резистори мають зигзагоподібну форму і виходять з листової сталі штампуванням. Через великий ТКО листовая сталь застосовується тільки для пускових резисторів, як правило, встановлюваних у трансформаторному маслі.

Для резисторів з підвищеною стабільністю опору може застосовуватися константан, що не піддається корозії на повітрі і має максимальну робочу температуру 500 °С. Великий питомий опір дозволяє створювати на основі константану малогабаритні резистори. Константан широко застосовується у виді дроту і стрічки.

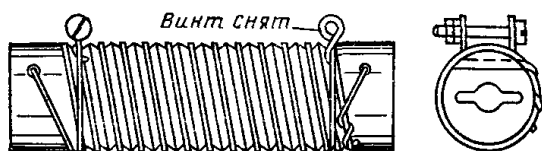
Для виготовлення нагрівальних резисторів застосовуються в основному ніхромі, що мають високі питомий електроопір і робочу температуру.

В даний час для нагрівальних резисторів широко застосовується більш дешевий жаростійкий сплав ОХ23Ю5. Питомий опір його більш ніж у 2 рази вище, ніж у константану, а робоча температура досягає 850 °С.

Для резисторів з високою стабільністю опору застосовується манганін з робочою температурою не більш 60 °С.

### 4.3.3. Конструкція резисторів

Резистори у виді спіралі з дроту чи стрічки виготовляються шляхом її навіски на циліндричне оправлення «виток до витка». Необхідний зазор між витками встановлюється при розтяганні спіралі і кріпленні її до опорних ізоляторів



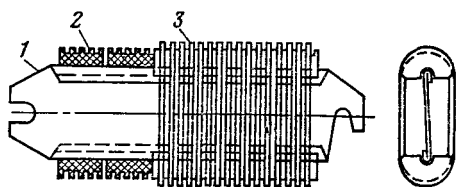
**Рис. 4.9. Резистор на керамічному каркасі**

у виді порцелянових роликів. Недоліком такої конструкції є мала твердість, через яку можливе зіткнення сусідніх витків, що вимагає зниження робочої температури матеріалу (100 °С для константанової спіралі). Оскільки теплоємність такого резистора визначається тільки масою резистивного матеріалу, постійна часу нагрівання таких резисторів мала.

Резистори у виді спіралі доцільно використовувати для тривалого режиму роботи, тому що тепло розсіюється всією поверхнею дроту чи стрічки [13].

Для збільшення твердості спіралі дріт може намотуватися на керамічний каркас у виді трубки (мал. 4.9) зі спіральним пазом на поверхні, що запобігає замиканню витків між собою. Така конструкція дозволяє підвищити робочу температуру резистора з константану до 500 °С. У процесі нагрівання й охолодження бере участь як дріт, так і каркас.

Такі трубчасті резистори широко застосовуються для керування двигунами малої потужності, у якості розрядних, додаткових опорів у колах автоматики та



**Рис. 4.10 Рамковий резистор**

рамковими резисторами. На сталевій пластині 1 укріплені ізолятори 2 з порцеляни чи стеатиту. Константановий дріт 3 намотується в канавки на поверхні ізоляторів. Для резисторів на великі струми використовується стрічка. Умови охолодження такого резистора гірше, ніж при вільній спіралі [13]. Максимальна припустима температура дорівнює 300 °С.

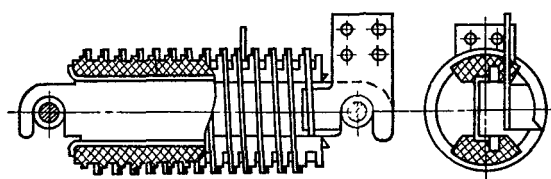
Потужність, що розсіюється, досягає 350 Вт. Звичайно кілька резисторів такого типу компонується в одному блоці.

Для двигунів потужністю від трьох до декількох тисяч кіловатів застосовуються високотемпературні резистори на основі жаростійких сплавів ОХ23Ю5 (рис. 4.11).

З метою зменшення габаритних розмірів і одержання необхідної твердості жаростійка стрічка намотується на ребро й укладається в канавки, що фіксують положення окремих витків. В одному блоці встановлюється п'ять резисторів потужністю 450 Вт кожен, з котрих при великих струмах може бути з'єднаний паралельно.

Жаростійкі резистори мають малий ТКО і велику механічну твердість, завдяки чому широко застосовуються в апаратах, що піддаються інтенсивним механічним впливам. Ці резистори мають високу термічну стійкість. Допускається короткочасне нагрівання до 850 °С при тривалій припустимій температурі 300 °С.

Чавунні резистори (рис. 4.12) широко застосовуються для двигунів потужністю від трьох до декількох тисяч кіловатів. При максимальній робочій температурі чавуну 400 °С номінальна потужність резисторів приймається з розрахунку на температуру 300 °С. Опір чавунних резисторів у значній мірі залежить від

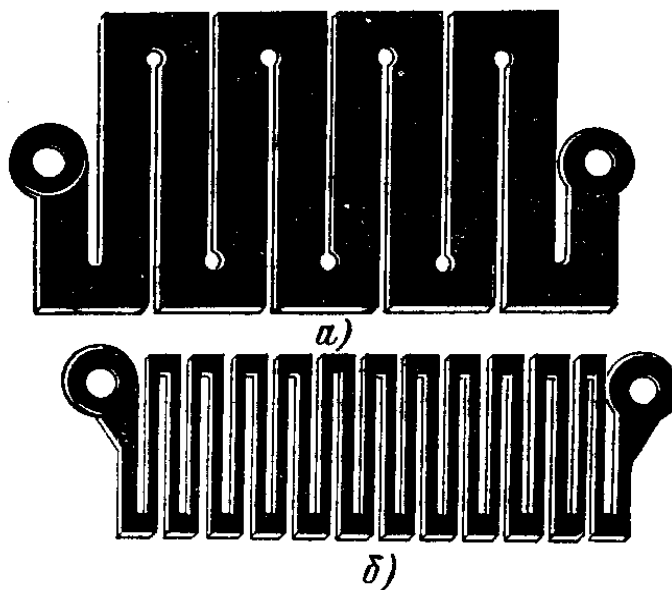


**Рис. 4.11 Високотемпературний резистор**

температури, тому вони застосовуються тільки як пускові. Набір чавунних резисторів збирають у стандартні шухляди за допомогою сталевих стрижнів, ізолюваних від чавуну міканітом.

Загальна потужність резисторів, встановлених в одній шухляді, не повинна перевершувати 4,5 кВт. При монтажі шухляди резисторів монтуються друг на другу. При цьому повітря, нагріте у нижніх шухлядах, омиває верхні, погіршуючи охолодження останніх. З цих розумінь при вертикальному монтажі більш трьох шухляд між ними необхідний зазор не менш ніж  $80 \cdot 10^{-3}$  м.

Для відповідальних електроприводів доцільно реостат збирати зі стандартних шухляд (без відводів усередині шухляди). При ушкодженні резистора в шухляді працездатність схеми швидко відновлюється шляхом заміни несправної шухляди на новий.



**Рис. 4.12 Чавунні резистори:**  
а—для великих струмів;  
б—для малих струмів

#### 4.4. РЕОСТАТИ

Відповідно до призначення резисторів (4.3) реостати поділяються на пускові, пускорегулюючі, регульовального, навантажувальні і кіл збудження.

Пускові реостати і пускова частина пускорегулюючого реостату для зменшення габаритів повинні мати велику постійну часу. Ці реостати призначені для роботи в короткочасному режимі, і вимоги підвищеної стабільності опору до них не пред'являються. Відповідно до існуючих норм пусковий реостат нагрівається до граничної температури після трьох пусків з інтервалами між пусками, рівними подвійному часу пуску.

До всіх інших реостатів пред'являються вимоги стабільності опору і вони розраховані на роботу у тривалому режимі. В електроприводі найбільш поширені реостати з металевими резисторами, що переключаються. Для переключення використовуються плоскі, барабанні і кулачкові контролери (при великих потужностях).

По виду тепловідводу реостати можуть бути з природним повітряним чи масляним охолодженням, із примусовим повітряним, масляним чи водяним охолодженням.

#### **4.4.1. Конструкція реостатів із природним повітряним охолодженням**

У цих реостатах перемикаючий пристрій і резистори розташовуються так, щоб конвективні потоки повітря, переміщаючись знизу нагору, охолоджували резистори. Кожухи, що закривають реостат, не повинні перешкоджати циркуляції охолоджуючого повітря. Максимальна температура кожуха не повинна перевищувати 160 °С. Температура контактів перемикаючого пристрою повинна бути не вище 110°С.

У таких реостатах застосовуються резистори всіх типів. При невеликій потужності резистори і контролер компонуються в один апарат. При великих потужностях контролер є самостійним апаратом.

Для пуску двигунів постійного струму із шунтовим і компаундним збудженням при потужності до 42 кВт застосовуються реостати серій РП і РЗП. Ці реостати крім резисторів і контролера містять контактор, що включає, використовуваний для захисту від зниження напруги, і максимальне реле для захисту від перевантажень по струму. Резистори виконуються на порцелянових каркасах чи у виді рамкових елементів. Перемикаючий пристрій виконаний у виді плоского контролера (рис. 4.3) із самоустановлювальним містковим контактом. Контролер, малогабаритний контактор КМ і максимальне реле миттєвої дії КА встановлені на загальній панелі. Вузли реостата змонтовані на сталевій підставі. Кожух захищає реостат від улучення крапель води, але не перешкоджає вільній протоці повітря.

Для вибору пускового реостата необхідно знати потужність двигуна, умови пуску і характер зміни навантаження при пуску, а також напругу живлення двигуна.

#### **4.4.2. Масляні реостати**

У таких реостатах металеві елементи резисторів і контролер розташовуються в трансформаторному маслі, що має значно більшу теплопровідність і теплоємність, чим повітря. Завдяки цьому масло більш ефективно відводить тепло від нагрітих металевих деталей. За рахунок великої кількості масла, що бере участь у нагріванні, постійна часу нагрівання реостата різко зростає, що дозволяє створити пускові реостати малих габаритів на велику потужність навантаження.

Для запобігання місцевих перегрівів у резисторах і поліпшення їхнього теплового контакту з маслом в реостатах застосовуються резистори у виді вільної спіралі, дотові і стрічкові поля, зигзагоподібні резистори з електротехнічної сталі і чавуну.

При температурах нижче 0°С охолодна здатність масла через підвищення його в'язкості різко погіршується. Тому масляні реостати не застосовуються при від'ємних температурах навколишнього середовища.

Поверхня охолодження масляного реостата визначається в основному циліндричною поверхнею кожуха. Ця поверхня менше поверхні охолодження дроту резисторів, тому застосування масляних реостатів у тривалому режимі недоцільно. Мала припустима температура нагрівання масла також обмежує потужність, що може розсіяти реостат [6].

Масляні реостати широко застосовуються для пуску трифазних асинхронних двигунів з фазним ротором. При потужностях двигунів до 50 кВт використовуються плоскі контролери з круговим рухом рухомого контакту. При великих потужностях застосовується барабанний контролер [13].

Реостати можуть мати блок-контакти для сигналізації про стан апарату і блокування з контактором у колі обмотки статора двигуна. Якщо максимальний опір реостата ще не ввімкнуто, обмотка контактора, що вмикає, розімкнута і напруга на обмотку статора не надходить.

Наприкінці пуску двигуна реостат повинний бути цілком виведений, а ротор закорочений, тому що елементи розраховані на короткочасний режим роботи. Чим більше потужність двигуна, тим довше час його розгону і тим більше число ступіней повинний мати реостат.

Для вибору реостата необхідно знати номінальну потужність двигуна  $P_{\text{ном}}$ , робочу напругу  $U_p$  на загальмованому роторі при номінальній напрузі на статорі, номінальний струм ротора  $I_{\text{ном,р}}$  і рівень навантаження двигуна при пуску. По цих параметрах можна вибрати реостат за допомогою довідників [13].

Недоліками масляного реостата є мала припустима частота пусків через повільне охолодження масла, забруднення приміщення бризами і парами масла, можливість запалення масла.

#### *Запитання для самоперевірки*

- 1. Призначення контролерів і командоапаратів.*
- 2. Класифікація резисторів.*
- 3. Матеріали резисторів.*
- 4. Головні конструкції реостатів.*