

## ГЛАВА 8

### ЗАПОБІЖНИКИ

*Розглянуті процеси нагріву плавкої вставки запобіжника при тривалому навантаженні і при короткому замиканні, конструкції сучасних запобіжників низької і високої напруги. Приведені умови їх вибору.*

*Навчальна ціль глави – формування умінь, які потрібні при виборі і експлуатації запобіжників для захисту електричних кіл від струмових перевантажень і струмів КЗ.*

#### 8.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Запобіжники - це електричні апарати, призначені для захисту електричних кіл від токових перевантажень і струмів КЗ. Основними елементами запобіжника є плавка вставка, що вмикається послідовно з колом, що захищається, і дугогасильний пристрій.

До запобіжників пред'являються такі наступні вимоги.

1. Часострумова характеристика запобіжника повинна проходити нижче, але можливо ближче до часострумової характеристики об'єкта, що захищається.

2. Час спрацьовування запобіжника при КЗ повинний бути мінімально можливим, особливо при захисті напівпровідникових приладів. Запобіжники повинні працювати зі струмообмеженням [13].

3. При КЗ у колі, що захищається, запобіжники повинні забезпечувати селективність захисту.

4. Характеристики запобіжника повинні бути стабільними, а технологічний розкид їхніх параметрів не повинний порушувати надійність захисту.

5. У зв'язку зі зростаючою потужністю установок запобіжники повинні мати високу здатність вимикання.

6. Конструкція запобіжника повинна забезпечувати можливість швидкої і зручної заміни плавкої вставки при її перегорянні.

#### 8.2. НАГРІВ ПЛАВКОЇ ВСТАВКИ ПРИ ТРИВАЛОМУ НАВАНТАЖЕННІ І ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

Основною характеристикою запобіжника є часострумова характеристика, що представляє собою залежність часу плавлення вставки від струму, що протікає. Для досконалого захисту бажано, щоб часострумова характеристика запобіжника (крива 1 на рис. 8.1) у всіх точках йшла нижче, але по можливості ближче характеристики кола або об'єкта, що захищаються (крива 2 на рис. 8.1). Однак реальна характеристика запобіжника (крива 3) перетинає криву 2. Якщо характеристика запобіжника відповідає кривій 1, то він буде перегоряти через старіння або при пуску двигуна. Коло буде вимикатися при відсутності неприпустимих перевантажень. Тому струм плавлення вставки вибирається більше номінального струму навантаження. При цьому криві 2 і 3 перетинаються. В

області великих перевантажень (область *Б*) запобіжник захищає об'єкт. В області *А* запобіжник об'єкт не захищає.

При невеликих перевантаженнях (1,5...2)  $I_{ном}$  нагрів запобіжника протікає повільно. Велика частина тепла віддається навколишньому середовищу. Складні умови тепловіддачі утрудняють розрахунок плавкої вставки.

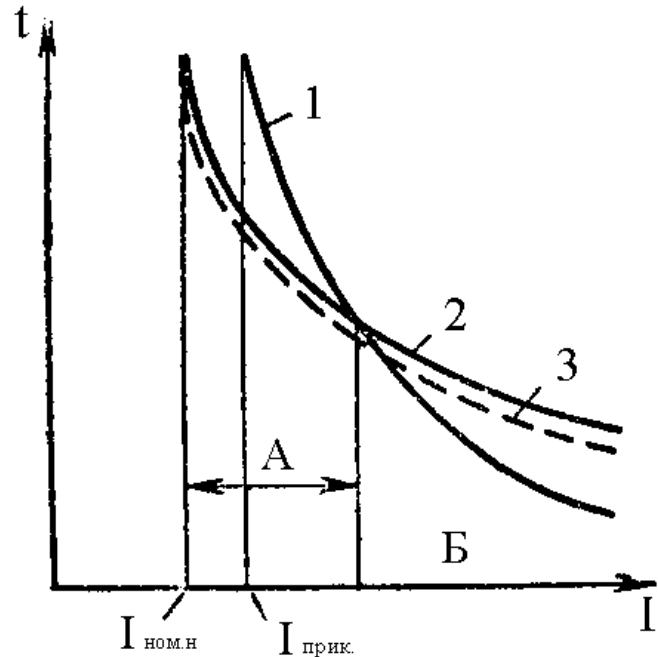
Струм, при якому плавка вставка згоряє при досягненні нею сталої температури, називається *прикордонним струмом*  $I_{прик}$ .

Для того щоб запобіжник не спрацював при номінальному струмі  $I_{ном}$ , необхідно  $I_{прик} > I_{ном,н}$ . З іншого боку, для кращого захисту значення  $I_{прик}$

повинне бути можливо ближче до номінального. При струмах, близьких до прикордонного, температура плавкої вставки повинна наближатися до температури плавлення.

У зв'язку з тим, що час плавлення вставки при прикордонному струмі великий (більш 1 год.) і температура плавлення її матеріалу складає багато сотень градусів Цельсія, усі деталі запобіжника нагріваються до високих температур. Відбувається теплове старіння плавкої вставки.

Для зниження температури плавлення вставки при її виготовленні застосовуються легкоплавкі метали і сплави. Матеріали плавких вставок і їхні властивості дані в табл. 8.1 [13].



**Рис. 8.1** Узгодження характеристик запобіжника і об'єкту, що захищається

Таблиця 8.1

**Властивості матеріалів плавких вставок запобіжників**

Метал вставки	Питомий опір $\rho_0$ , мкОм·м	Температура, °С		$A'$ , $A^2 \cdot c / мм^4$	$A''$ , $A^2 \cdot c / мм^4$	$A'+A''$ , $A^2 \cdot c / мм^4$
		$t_{доп}$	$t_{пл}$			
Мідь	0,0153	250	1083	80 000	11 600	91 600
Срібло	0,0147	-	961	62 000	8000	70 000
Цинк	0,06	200	419	9000	3000	12 000
Свинець	0,21	150	327	1200	400	1600

Примітка.  $t_{доп}$  - допустима температура плавкої вставки при тривалому протіканні струму,  $t_{пл}$  - температура плавлення вставки.  $A'$  і  $A''$  - коефіцієнти, що визначають час плавлення при КЗ.

Найменшу температуру плавлення має свинець. Але питомий опір свинцю в 12 разів вище, ніж у міді. Для того щоб при проходженні даного струму вставка нагрілася до припустимої температури (150°C), її переріз повинний бути значно більше, ніж переріз вставки з міді.

При плавленні вставки пари металу іонізуються у виникаючій дузі завдяки високій температурі. Через великий обсяг вставки кількість парів металу в дузі велике, що утрудняє її гасіння і зменшує граничний струм, що вимикається запобіжником. Через ці особливості вставок з легкоплавких металів широке поширення одержали мідні і срібні плавкі вставки з металургійним ефектом [6]. На тонкий мідний дріт (діаметром менш 0,001 м) наноситься кулька з олова. При нагріванні вставки спочатку плавиться олово, що має низьку температуру плавлення (232°C). У місці контакту олова з дротом починається розчинення міді і зменшення її перерізу. Це викликає збільшення опору і підвищення втрат енергії у цій точці. Процес триває доти, поки мідний дріт не розплавиться в точці розташування олов'яної кульки. Виникаюча при цьому дуга розплавляє дріт на всій довжині. Застосування олов'яної кульки знижує середню температуру плавлення вставки до 280 °С.

Відношення  $I_{\text{прик}} / I_{\text{ном}}$  зменшується до 1,2, що дає покращення часошумової характеристики.

Стабільність часошумової характеристики в значній мірі залежить від окислювання плавкої вставки. Свинець і цинк утворюють на повітрі плівку оксиду, що охороняє вставку від зміни перерізу. Мідна вставка при тривалій роботі і високій температурі інтенсивно окислюється. Плівка оксиду при зміні температурного режиму відшаровується, і переріз вставки поступово зменшується. У результаті плавка вставка перегоряє при номінальному струмі, якщо її температура при струмі, близькому до прикордонного, обрана високій. Температура мідної вставки при струмі, близькому до номінального, повинна бути значно нижче температури плавлення. Тому приходиться завищувати переріз вставки і тим самим збільшувати відношення  $I_{\text{прик}} / I_{\text{ном}}$  приблизно до 1,8, що погіршує захисні властивості запобіжника.

Срібні плавкі вставки не піддані тепловому старінню, і для них відношення  $I_{\text{прик}} / I_{\text{ном}}$  визначається тільки нагріванням.

У вставок з легкоплавких матеріалів експлуатаційна температура ближче до температури плавлення, що дозволяє знизити відношення  $I_{\text{прик}} / I_{\text{ном}}$  до 1,2...1,4.

В даний час як матеріал плавкої вставки почали застосовувати алюміній [13]. Плівка оксиду на поверхні вставки захищає алюміній від корозії і робить характеристику запобіжника стабільною. Більший питомий опір матеріалу компенсується збільшенням перерізу вставки. Алюміній має температуру плавлення нижче, ніж у міді (658 проти 1083 °С).

Часошумові характеристики запобіжників із вставками постійного перерізу з легкоплавкого металу добре погоджуються з характеристиками силових трансформаторів і інших подібних об'єктів. Це пояснюється низькою температурою плавлення, стійкістю проти корозії і малою теплопровідністю матеріалу таких вставок.

Мідна вставка через високу теплопровідність, високу температуру плавлення і велике відношення  $I_{\text{прик}} / I_{\text{ном}}$  в області малих перевантажень не забезпечує захист об'єкта (область  $A$ , рис. 8.1).

Якщо струм, що проходить через вставку, у 3—4 рази більше номінального, то практично процес нагрівання йде адіабатично, тобто все тепло, виділюване плавкою вставкою, йде на її нагрів.

Час нагрівання вставки до температури плавлення [13]:

$$t_{\text{пл}} = A' \frac{S^2}{I_K^2} = A' / J_K^2 \quad (8.1)$$

де  $A'$ — постійна, обумовлена тільки властивостями матеріалу і від розміру вставки не залежна;  $S$ -поперечний переріз вставки;  $I_K$ — струм, що протікає по вставці при КЗ кола, що захищається;  $J_K$  - щільність струму у вставці.

Для переходу вставки з твердого стану в рідке, після того як температура плавкої вставки досягла температури плавлення, їй необхідно передати тепло, рівне схованій теплоті плавлення.

У міру того як частина плавкої вставки з твердого стану перейде в рідке, її питомий опір різко збільшиться (у десятки разів). Час переходу з твердого стану в рідке

$$t_{\text{перех}} = \frac{\gamma L}{\rho_2 - \rho_1} \left( \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \frac{S^2}{I_K^2} = A'' \frac{q^2}{I_K^2} \quad (8.2)$$

де  $\rho_1$ -питомий опір матеріалу вставки при температурі плавлення;  $\rho_2$ -питомий опір матеріалу вставки в рідкому стані;  $\gamma$ -щільність матеріалу вставки;  $L$ -схована теплота плавлення на одиницю маси матеріалу вставки.

Значення постійних  $A'$  і  $A''$  для найбільше часто застосовуваних металів дані в табл. 8.1.

У дійсності процес плавлення йде більш складно [13], і, як правило, дуга загоряється раніш, ніж вставка цілком перейде в рідкий стан.

Основним параметром запобіжника при КЗ є граничний струм вимикання-струм, що він може відключити при напрузі, що повертається, рівному найбільшій робочій напрузі.

Час існування дуги залежить від конструкції запобіжника. Повний час вимикання кола запобіжником

$$t_{\text{зап}} = t_{\text{пл}} + t_{\text{перех}} + t_{\text{дуги}}. \quad (8.3)$$

Для запобіжника з вставкою, що знаходиться в повітрі,

$$t_{\text{зап}} = \left( A' + \frac{A''}{n} \right) \frac{S^2}{I_K^2} k_0, \quad (8.4)$$

де коефіцієнти  $n=3$  враховує передчасне руйнування вставки, а  $k_0=1,2\dots 1,3$  враховує тривалість горіння дуги.

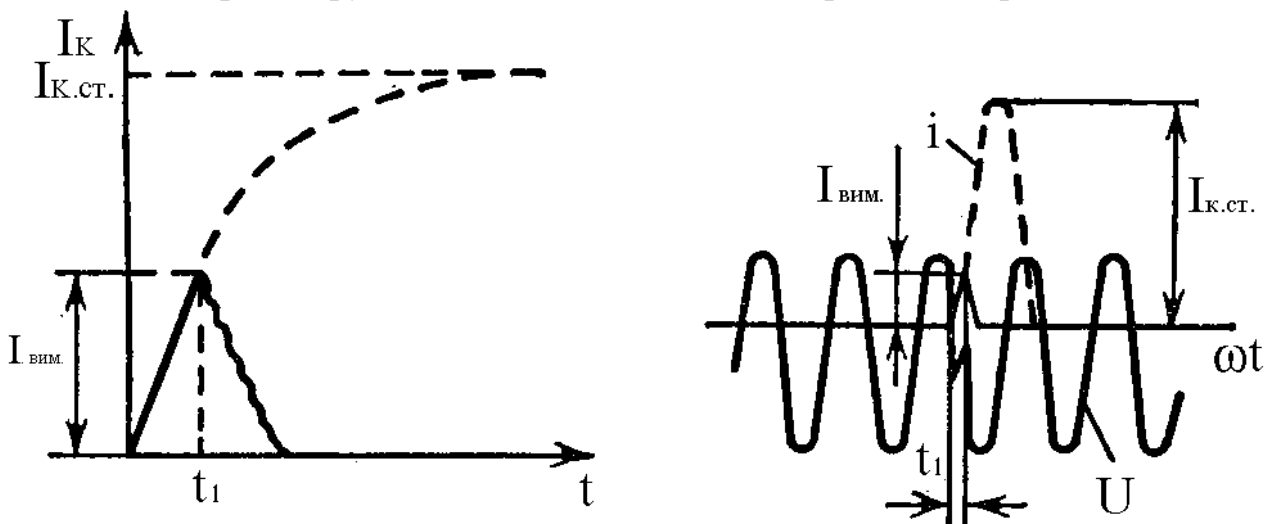
У запобіжниках з наповнювачем (закритого типу) руйнування вставки до повного її плавлення менш ймовірно. Час вимикання кола запобіжником

$$t_{\text{зап}} = (A'+A'') \frac{S^2}{I_K^2} + t_d \approx (A'+A'') \frac{S^2}{I_K^2} k_d. \quad (8.5)$$

Коефіцієнт  $k_d=1,7 \div 2$  враховує тривалість горіння дуги.

Плавлення вставки перемінного перерізу відбувається в перешийках з найменшим перерізом. Процес нагрівання перешийка протікає так швидко, що тепло майже не встигає відводитись на ділянки підвищеного перерізу. Наявність перешийків зменшеного перерізу дозволяє різко знизити час з моменту початку КЗ до появи дуги. Процес гасіння дуги починається до моменту досягнення струмом КЗ сталого чи навіть амплітудного значення. Дуга утвориться через час  $t_1$  після початку КЗ, коли струм у колі значно менше сталого значення  $I_{\text{к.ст.}}$ .

Засоби дугогасіння дозволяють погасити дугу за мілісекунди. При цьому виявляється ефект струмообмеження, показаний на рис. 8.2. При вимиканні



**Рис. 8.2. Вимикання постійного та змінного струму запобіжником з струмообмеженням**

ушкодженого кола з струмообмеженням полегшується гасіння дуги, тому що вимикається не сталий струм КЗ  $I_{\text{к.ст.}}$ , а струм, обумовлений часом плавлення вставки.

З ростом номінального струму зростає і мінімальний переріз вставки. Збільшення цього перерізу приводить до зростання тривалості плавлення вставки і зменшенню ефекту струмообмеження. Інтенсивний відвід тепла від вставки при номінальному режимі дозволяє вибрати зменшений переріз вставки і підвищити ефект струмообмеження.

## 8.3. КОНСТРУКЦІЯ ЗАПОБІЖНИКІВ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

### 8.3.1. Запобіжники з гасінням дуги в закритому обсязі

Запобіжники на струми від 15 до 60 А мають спрощену конструкцію. Плавка вставка 1 притискається до латунної обойми 4 ковпачком 5, що є вихідним контактом (рис. 8.3, а). Плавка вставка 1 штампується з цинку, що є легкоплавким і стійким до корозії матеріалом. Зазначена форма вставки дозволяє одержати сприятливу часострумову (захисну) характеристику. У запобіжниках на струми більш 60 А плавка вставка 1 приєднується до контактних ножів 2 за допомогою болтів (рис. 8.3, б).

Вставка розташовується в герметичному трубчастому патроні, що складається з фібрового циліндра 3, латунної обойми 4 і латунного ковпачка 5.

При вимиканні згоряють звужені перешийки плавкої вставки, після чого виникає дуга. Під дією температури дуги фіброві стінки патрона виділяють газ, у результаті чого тиск у патроні за частки напівперіоду піднімається до 4...8 МПа.

За рахунок збільшення тиску піднімається вольтамперна характеристика дуги, що сприяє її швидкому гасінню (3.3).

Плавка вставка може мати від одного до чотирьох звужень (рис. 8.3, в) у залежності від номінальної напруги. Звужені ділянки вставки сприяють швидкому її плавленню при КЗ і створюють ефект струмообмеження.

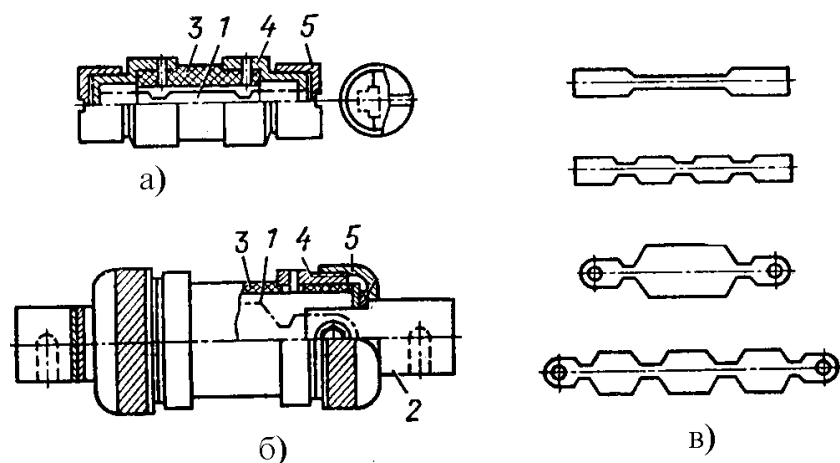


Рис. 8.3 Запобіжник типу ПР-2

Запобіжники працюють безшумно, практично без викиду полум'я і газів, що дозволяє встановлювати їх на близькій відстані друг від друга.

Запобіжники випускаються двох осьових розмірів — короткі і довгі. Короткі призначені для роботи на змінній напрузі не вище 380 В. Вони мають меншу здатність вимикання чим довгі, розраховані на роботу в мережі з напругою до 500 В.

У залежності від номінального струму випускається шість габаритів патронів різних діаметрів У патроні кожного габариту можуть установлюватися вставки на різні номінальні струми. Так, у патроні на номінальний струм 15 А можуть бути установлені вставки на струм 6, 10 і 15 А.

**8.3.2. Запобіжники з дрібнозернистим наповнювачем.** Ці запобіжники більш досконалі, ніж запобіжники ПР-2 [13]. Корпус квадратного перерізу 1 запобіжника типу ПН-2 (рис. 8.4) виготовляється з міцної порцеляни або стеатиту. У середині корпусу розташовані стрічкові плавкі вставки 2 і наповнювач — кварцо-

вий пісок 3. Плавкі вставки приварюються до диска 4, що кріпиться до пластин 5, зв'язаних з ножовими контактами 9. Пластини 5 кріпляться до корпусу гвинтами.

У якості наповнювача використовується кварцовий пісок зі змістом  $\text{SiO}_2$  не менш 98 %, із зернами розміром  $(0,2...0,4) \cdot 10^{-3}$  м і вологістю не вище 3 %. Перед засипанням пісок ретельно просушується при температурі 120...180 °С. Зерна кварцового піску мають високу теплопровідність і добре розвинутою охолоджуючу поверхню.

Плавка вставка виконується з мідної стрічки товщиною 0,1...0,2 мм. Для одержання струмообмеження вставка має звуження перерізу 8.

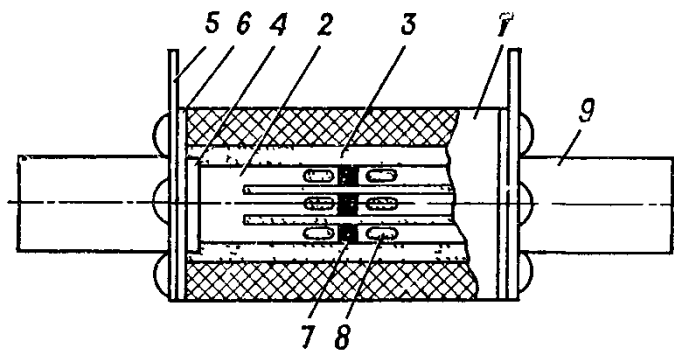


Рис. 8.4 Запобіжник типу ПН-2

Плавка вставка розділена на три рівнобіжні гілки для більш повного використання наповнювача. Застосування тонкої стрічки та ефективний тепловідвод від звужених ділянок дозволяють вибрати невеликий мінімальний переріз вставки для даного номінального струму, що забезпечує високу струмообмежуючу здатність. З'єднання декількох звужених ділянок послідовно

сприяє уповільненню росту струму після плавлення вставки, тому що зростає напруга на дузі запобіжника. Для зниження температури плавлення на вставки наносяться олов'яні смужки 7 (металургійний ефект).

При КЗ плавка вставка згоряє і дуга горить у каналі, утвореному зернами наповнювача. Через горіння у вузькій щілині при струмах вище 100 А дуга має зростаючу вольт-амперну характеристику. Градієнт напруги на дузі дуже високий і досягає  $(2...6) \cdot 10^4$  В/м. Цим забезпечується гасіння дуги за декілька мілісекунд.

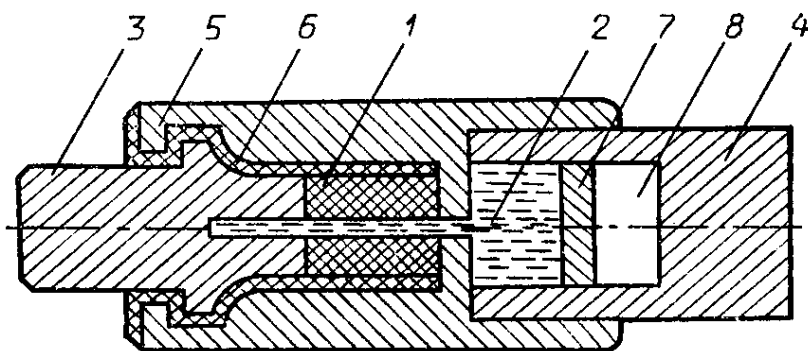


Рис. 8.5 Запобіжник з рідиннометалевим контактом

Після спрацювання запобіжника плавкі вставки разом з диском 4 замінюються, після чого патрон засипається піском. Для герметизації патрона під пластини 5 кладеться азбестова прокладка 6 що охороняє пісок від зволоження. При номінальному струмі

40 А и нижче запобіжник має більш просту конструкцію.

Запобіжники ПН-2 випускаються на номінальний струм до 630 А. Граничний струм КЗ, що може вимикатися запобіжником, досягає 50 кА (діюче значення струму металевого КЗ мережі, у якій установлюється запобіжник).

Малі габарити, незначна витрата дефіцитних матеріалів, висока струмообмежуюча здатність є головними перевагами цього запобіжника.

У малогабаритних розподільних пристроях застосовуються різьбові запобіжники типу ПРС [13].

Запобіжники цього типу випускаються на струми до 100 А напругою до 440 В постійного струму і до 500 В змінного струму частотою 50 Гц. Граничний струм вимикання складає 60 кА. Ці запобіжники більш складні у виробництві і більш дорогі, чим запобіжники ПН-2. Тому їхнє застосування доцільне при малих габаритах розподільного пристрою й обмеженому часі обслуговування (після згоряння плавкої вставки).

### **8.3.3. Запобіжники з рідиннометалевим контактом**

У такому запобіжнику (рис. 8.5) електроізоляційна трубка 1 має капіляр, заповнений рідким металом 2. Капіляр з рідким металом герметично закритий електродами 3, 4 і корпусом 5 з ущільненням 6 і має спеціальний пристрій, що демпфірує, 7, 8. При протіканні великого струму рідкий метал у ньому випаровується, утворюється парова пробка й електричне коло розмикається. Після відповідного часу пари металу конденсуються і контакт відновлюється. Граничний струм вимикання таких запобіжників досягає 250 кА при напрузі 450 В змінного струму. Запобіжники працюють багаторазово з великим струмообмеженням.

### **8.3.4. Швидкодіючі запобіжники для захисту напівпровідникових приладів**

Мала теплова інерція, швидкий прогрів напівпровідникового переходу вкрай утрудняють захист потужних діодів, тиристорів і транзисторів при токових перевантаженнях. Звичайні типи запобіжників і автоматичних вимикачів через відносно великий час спрацьовування не забезпечують захист напівпровідникових приладів при КЗ. Для виконання цієї задачі розроблені спеціальні швидкодіючі запобіжники [13].

Конструктивно швидкодіючий запобіжник являє собою корпус з міцної порцеляни, усередині якого розташовані плавкі вставки і кварцовий пісок. Контакти кріпляться до корпусу гвинтами і можуть мати різне виконання.

У сучасних перетворюючих установках кожен напівпровідниковий прилад має запобіжник. Струми, що протікають через запобіжник, можуть досягати 100—200 кА. При руйнуванні запобіжника може відбутися аварія перетворюючої установки. У зв'язку з цим швидкодіючі запобіжники повинні мати велику механічну міцність і мати високу надійність.

Розроблено серії швидкодіючих запобіжників ПП-57 на номінальні струми 40—800 А і ПП-59 на номінальні струми 250—2000 А. Номінальні напруги складають до 1250 В змінного і до 1050 В постійного струму. Докладні дані про швидкодіючі запобіжники приведені в [12,15].

Швидкодіючі запобіжники призначені тільки для захисту від КЗ. Захист від перевантажень повинний виконуватися іншими апаратами.



### 8.3.5. Блоки «запобіжник — вимикач»

Для зменшення габаритних розмірів розподільних пристроїв випускаються блоки «запобіжник-вимикач» (БЗВ), що забезпечують вимикання номінальних струмів і захист кіл від токових перевантажень і КЗ. У БЗВ (рис. 8.6) при обертанні рукоятки 1 траверса 2 із установленими на ній запобіжниками 3 переміщується і контакти 4 апарата розмикаються. Наявність двох розривів на полюс забезпечує вимикання номінальних струмів до 350 А при змінній напрузі до 550 В. Для вимикання номінального постійного струму 350 А при напрузі до 440 В розриви забезпечуються дугогасильними деіонними решітками.

Знімання патрона з перегорілою вставкою можливо тільки у відключеному положенні БЗВ після звільнення спеціальної засувки. Електрична зносостійкість апарата 2500 циклів «вмикання-вимикання», механічна — 5000 циклів.

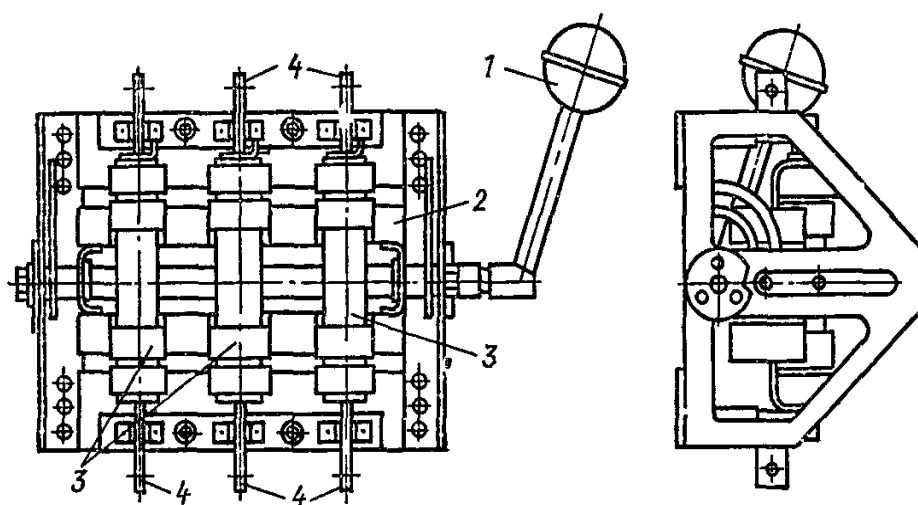


Рис. 8.6 Блок «запобіжник—вимикач»

## 8.4. ВИСОКОВОЛЬТНІ ЗАПОБІЖНИКИ

При напрузі вище 3 кВ і частоті 50 Гц застосовуються високовольтні запобіжники. Процес нагрівання плавкої вставки у високовольтних запобіжниках протікає так само, як і в запобіжниках низької напруги.

У відношенні часу плавлення до високовольтних запобіжників пред'являється загальна вимога: тривалість плавлення вставки повинна бути менш 2 години при струмі перевантаження, рівному  $2I_{\text{ном}}$ , і більш 1 години при струмі перевантаження, рівному  $1,3I_{\text{ном}}$ .

Високовольтні запобіжники часто застосовуються для захисту трансформаторів напруги від КЗ. Струм, що тече через запобіжник у номінальному режимі, не перевищує частки ампера. У таких запобіжниках час плавлення вставки дорівнює 1 хв. при струмі  $1,25 \dots 2,5$  А.

У зв'язку з високим значенням напруги, що відновлюється, процес гасіння дуги ускладнюється. У зв'язку з цим змінюються габаритні розміри і конструкція високовольтних запобіжників. Найбільше поширення одержали запобіжники з дрібнозернистим наповнювачем і запобіжники стріляючого типу.

#### 8.4.1. Запобіжники з дрібнозернистим наповнювачем

Розмір зерен і матеріал такі ж, як і в низьковольтних запобіжниках. Для ефективного гасіння дуги плавка вставка береться малого діаметра.

Запобіжники типу ПК на напругу 6—10 кВ (рис. 8.7) містять порцеляновий циліндр 1, армований по торцях латунними ковпаками 2. Наповнювач б у виді піску засипається через отвір у ковпаку, що після засипання запаюється кришкою 3. У запобіжниках на струм до 7,5 А мідна плавка вставка намотується на керамічний рифлений каркас. Це дозволяє збільшити довжину плавкої вставки

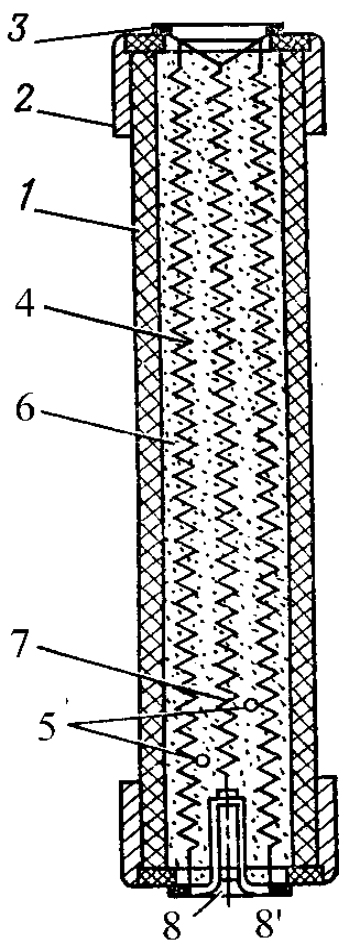


Рис. 8.7 Запобіжник типу ПК

й ефект струмообмеження, а отже, підвищити струм, що вимикається. Однак при перевантаженнях, менших  $3 I_{\text{ном}}$ , можливе утворення струмопровідного каналу з матеріалу каркаса і вставки, що розплавилася. У результаті настає теплове руйнування запобіжника. Тому запобіжники з каркасом варто застосовувати тільки для захисту від КЗ.

При номінальних струмах, що перевищують 7,5 А, плавка вставка виконується у виді паралельних спіралей (рис. 8.7). Застосування паралельних уставок дозволяє збільшити номінальний струм до 100 А при  $U_{\text{ном}} = 3$  кВ. При напрузі 10 кВ номінальний струм запобіжника дорівнює 50 А. При струмі 200 А приходиться встановлювати чотири паралельних запобіжники. Застосування паралельних уставок дозволяє виготовляти їх з мідного чи срібного дроту малого діаметра і зберігати ефект вузької щілини в процесі дугогасіння. Для зниження температури запобіжника при невеликих тривалих перевантаженнях плавкі вставки мають олов'яні кульки 5. Запобіжник має показчик спрацьовування 8. На показчик 8 діє пружина, що утримується в утягненому стані спеціальною плавкою вставкою 7. Ця вставка перегоріє після перегорання основних вставок 4. При цьому показчик звільняється і викидається в положення 8'.

Показчик 8 може бути використаний також у запобіжниках з автоматичним повторним вмиканням. У цьому випадку спрацьовування показчика в першому запобіжнику веде до паралельного підключення до нього іншого запобіжника зі справною плавкою вставкою [13].

При КЗ плавка вставка випаровується по всій довжині й у коло уводиться довга дуга, що горить у вузькій щілині і має високий опір, особливо в початко-

вій стадії, коли пари металу недостатньо іонізовані. Усе це приводить до виникнення великих перенапруг (до  $4,5U_{ном}$ ) на контактах запобіжника. Для обмеження перенапруг застосовуються вставки перемінного перерізу. Спочатку згоряє ділянка меншого перерізу, а потім більшого. У результаті довжина дуги росте повільніше.

Запобіжники з дрібнозернистим наповнювачем мають струмообмеження, особливо при великих струмах КЗ. У тривалому режимі інтенсивне охолодження тонких плавких уставок дозволяє виконувати їх з мінімальним перерізом і знизити струм плавлення. З ростом номінального струму ефект струмообмеження зпадає.

Номінальний струм вимикання запобіжників досягає 20 кА при напрузі до 10 кВ.

Запобіжники серії ПКТН (для забезпечення захисту високовольтних шин від ушкодження трансформатора напруги при будь-якій потужності джерела живлення) на напругу до 35 кВ мають усередині керамічний каркас з тонкою плавкою вставкою. Тому що номінальний струм уставок менш 1 А, той їхній переріз малий і токообмежуючий ефект особливо великий. Плавка вставка виконується з константанового дроту з чотириступеневим перерізом для обмеження перенапруг. Плавлення вставки відбувається послідовно по ступінях.

Запобіжники серій ПК і ПКТН працюють безшумно, без викиду полум'я і розпечених газів.

Для нормальної роботи запобіжників особливо важливе значення має герметизація. При проникненні вологи в запобіжник він утрачає властивість дугогасіння. Тому місця пайки і цементуюча замазка, що кріпить ковпачки, офарблюються спеціальною вологозахисною емаллю. Перезарядження запобіжника в експлуатації не допускаються.

Як правило, установки напругою 35 кВ і вище працюють на відкритому повітрі і піддані впливу атмосфери. У цих умовах важко забезпечити надійну роботу запобіжника ПК через зволоження наповнювача.

Перспективи подальшого розвитку запобіжників на напругу вище 35 кВ ускладнюються технологічними труднощами виготовлення і ростом їхніх габаритів.

#### **8.4.2. Стріляючі запобіжники**

Для роботи на відкритому повітрі при напрузі 10 і 35 кВ і струмі, що відключається, до 15 кА застосовуються так названі стріляючі запобіжники типів ПСН-10 і ПСН-35. На рис. 8.8 показаний патрон запобіжника ПСН-35. У корпусі 1 установлені дві вініпластові трубки 2 і 3, з'єднані сталевим патрубком 4. Плавка вставка 5 приєднується до струмоведучого стрижня 6 і гнучкого провідника 7, з'єданого з наконечником 8.

При перегорянні плавкої вставки утвориться дуга, що, стикаючись зі стінками трубки, розкладає їх, і газ, що утвориться, піднімає тиск у трубці. При витягуванні наконечника з трубки довжина дуги збільшується, тиск зростає. При великих струмах мембрана 9 у патрубку 4 розривається і дуга гаситься поперечним дуттям. Якщо струм невеликий, то дуга гаситься подовжнім потоком газу,

що виривається з трубки після викиду гнучкого контакту 7 із трубки. Тривалість горіння падає при збільшенні струму. При великих струмах дуга гасне за 0,04 с. При малих струмах (800...1000 А) час горіння зростає до 0,3 с [13].

Процес вимикання супроводжується сильним викидом полум'я, газів і стріляючим звуковим ефектом. Тому стріляючі запобіжники сусідніх фаз повинні бути на значному видаленні друг від друга.

У процесі гасіння дуга спочатку має невелику довжину, а потім довжина її збільшується в міру викиду гнучкого провідника. Це обмежує швидкість росту опору дугового проміжку й усуває перенапруги.

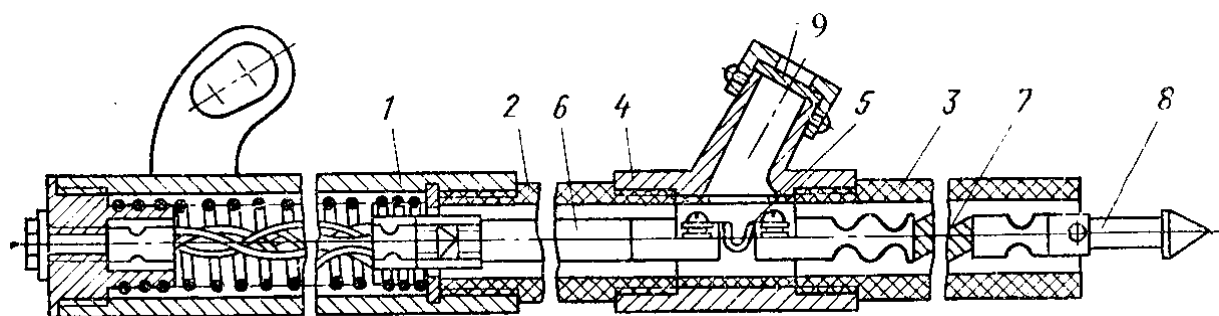


Рис. 8.8 Патрон стріляючого запобіжника ПСН-35

## 8.5. Вибір запобіжників

### а) Вибір запобіжників за умовами тривалої експлуатації і пуску

У процесі тривалої експлуатації температура нагрівання запобіжника не повинна перевершувати припустимих значень. У цьому випадку забезпечується стабільність часострумівих характеристик запобіжника. Для виконання цієї вимоги необхідно, щоб патрон і плавка вставка вибиралися на номінальний струм, рівний чи трохи більший номінального струму установки, що захищається.

Запобіжник не повинний вимикати установку при перевантаженнях, що є експлуатаційними. Так, пусковий струм асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором може досягати  $7I_{ном}$ . В міру розгону пусковий струм падає до значення, рівного номінальному струму двигуна. Тривалість пуску залежить від характеру навантаження. Запобіжник повинний не перегоряти при впливі пускових струмів, а в плавких вставках не повинне відбуватися старіння під дією цих струмів. Експериментально встановлене, що старіння плавкої вставки не відбувається при струмах, рівних половині струму плавлення. Згідно рис. 8.9 вставка запобіжника ПН-2 при часі 1с із плавиться при струмі, рівному  $5I_{ном}$ . Унаслідок виробничих допусків часострумова характеристика має розкид (штрихові криві). Якщо пуск триває 1с, то середнє значення пускового струму за цей період повинне бути не більш 0,5 струму плавлення вставки за

цей же час. Таким чином, пусковий струм  $I_{\Pi}$  зв'язаний зі струмом вставки співвідношенням  $I_{\Pi} = 0,5 I_{\text{пл}} = 0,5 \cdot 5 I_{\text{в,ном}}$  і, отже,

$$I_{\text{в,ном}} = 0,4 I_{\Pi} \quad (8.6)$$

тобто номінальний струм вставки вибирається по пусковому струму навантаження.

Для тяжких умов пуску, коли двигун повільно розвертається, чи в повторно-короткочасному режимі, коли пуски відбуваються з великою частотою, вставки вибирають із ще більшим запасом:

$$I_{\text{в,ном}} = (0,5 \dots 0,6) I_{\Pi} \quad (8.7)$$

Якщо запобіжник стоїть в лінії, що живить кілька двигунів, плавку вставку рекомендується вибирати по формулі

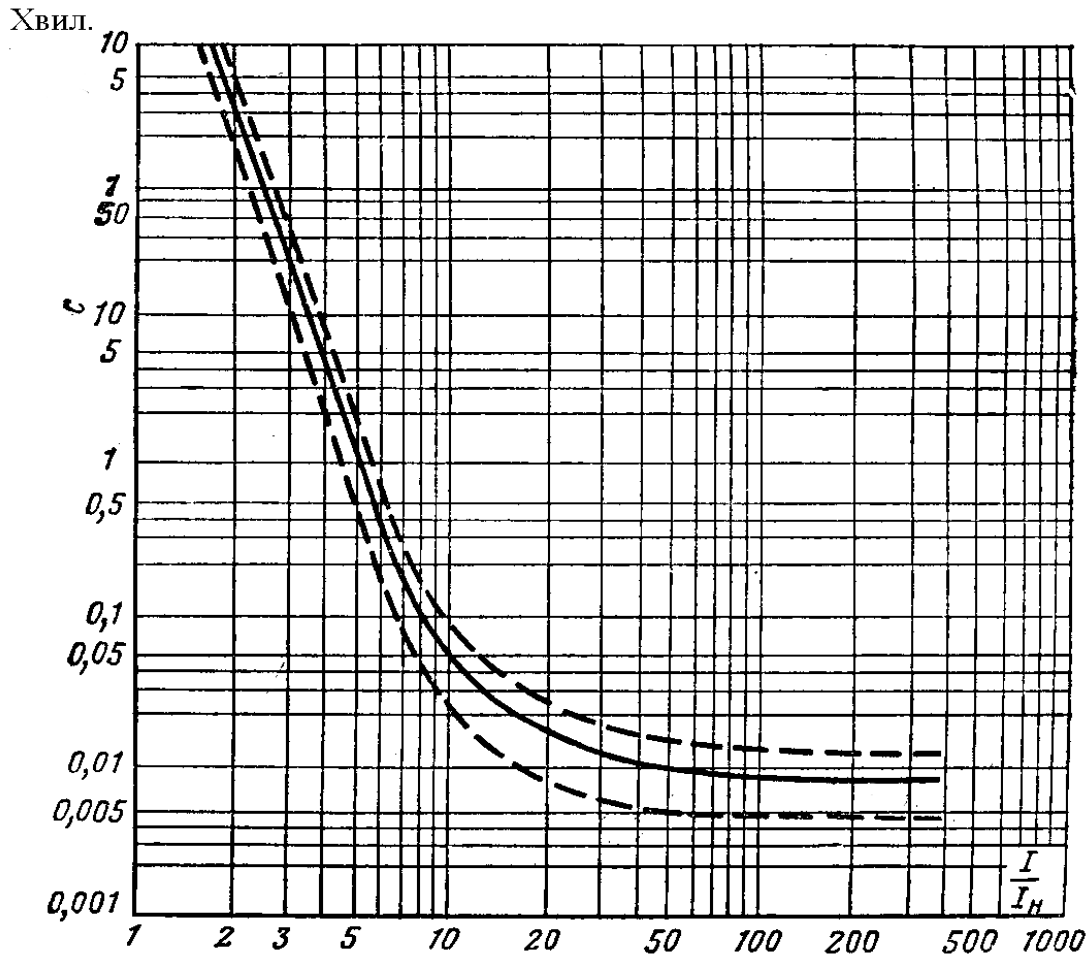


Рис. 8.9 Часострумова характеристика запобіжника ПН-2

$$I_{\text{в,ном}} = 0,4 [I_p + (I_{\Pi} - I_{\text{ном.дв.}})], \quad (8.8)$$

де  $I_p$  — розрахунковий номінальний струм лінії, рівний  $\Sigma I_{\text{ном.дв}}$ . Різниця  $I_p - I_{\text{ном.дв}}$  береться для двигуна, у якого вона найбільша.

Для двигуна з фазним ротором, якщо  $I_p \leq 2I_{\text{ном.дв}}$ , плавку вставку можна вибирати за умовою

$$I_{\text{в,ном}} \geq (1 \dots 1,25) I_{\text{ном.дв}} \quad (8.9)$$

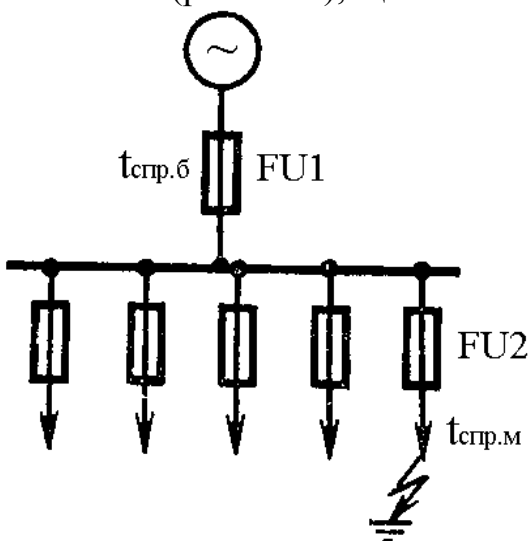
Для двигунів, що працюють у повторно-короткочасному режимі, за номінальний приймається струм у режимі ПВ= 25% [1].

Поряд з перевіркою вставки за умовами пуску чи короткочасного перевантаження необхідно проводити перевірку за умовам КЗ. При  $I_k / I_{\text{в,ном}} \geq 10 \dots 15$  час перегорання вставки не перевищує 0,15...0,2 с, і на цьому часі мало позначається розкид характеристик уставок. При такому часі зварювання контактів контактора чи магнітного пускача мало ймовірно. Однак цієї вимоги часто не вдається дотриматися, тому що кратність  $I_k / I_{\text{в,ном}}$  визначається потужністю живильного трансформатора й опором струмопровідних проводів і кабелів. Допускається застосування запобіжників при кратностях  $I_k / I_{\text{в,ном}} \geq 3 \dots 4$ . При такій кратності час відключення може досягати 15 с, що створює небезпеку для обслуговуючого персоналу, тому що при цій кратності напруга дотику може виявитися небезпечно великою. При такій низькій кратності  $I_k / I_{\text{в,ном}}$  нагрів проводу при невеликих перевантаженнях (1,6...2) може бути дуже великим і може приводити до вигорання ізоляції [16.3]. Тому установка плавких уставок з великим запасом може допускатися тільки в крайніх випадках, коли вигорання ізоляції провідників не грозить пожежею (проводи покладені в сталевих трубах і мають вогнестійку ізоляцію).

На закінчення необхідно вказати, що номінальна напруга запобіжника  $U_{\text{ном.з}}$  повинна дорівнювати номінальній напрузі мережі  $U_{\text{ном.м}}$ .

### б) Вибір запобіжників за умовою селективності

Між джерелом енергії і споживачем звичайно встановлюється кілька запобіжників (рис. 8.10), що повинні відключати ушкоджені ділянки по можливості селективно.



Запобіжник  $FU1$ , що пропускає більший номінальний струм, має вставку більшого перетину, чим запобіжник  $FU2$ , встановлений в одного з споживачів. При КЗ необхідно, щоб ушкодження вимикалося запобіжником, розташованим у місцях ушкодження. Всі інші запобіжники, розташовані ближче до джерела, повинні залишитися працездатними. Така погодженість роботи запобіжників називається чи вибірковістю селективністю.

Для забезпечення селективності повний час  $t_{p2}$  роботи запобіжника  $FU2$  повинно бути

Рис. 8.10 До розрахунку селективності запобіжників

менше часу нагрівання запобіжника  $FUI$  до температури плавлення його вставки, тобто

$$t_{пл1} \geq t_{р2} \quad (8.10)$$

З (8.1), (8.5) можна одержати для запобіжників закритого типу (ПН-2)

$$A' \frac{q_1^2}{I_k^2} > (A_2' + A_2'') \frac{q_2^2}{I_k^2} k_D \quad (8.11)$$

Після найпростіших перетворень одержимо умову селективності для запобіжників з гасінням дуги в закритому обсязі

$$\frac{q_1}{q_2} > \sqrt{(A_2' + A_2'') / A_1' \cdot k_D} \quad (8.12)$$

Для закритих запобіжників із дрібнозернистим наповнювачем і мідною вставкою селективність дотримується при  $q_1/q_2 > 1,55$ . Зазначені співвідношення справедливі і для випадку струмообмежуючих запобіжників, коли струм КЗ триває тільки частку напівперіоду.

Розглянутий розрахунок носить наближений характер, тому що не враховує конкретні характеристики даної конструкції запобіжника і відхилення реальних характеристик від номінальних через виробничі допуски.

Для забезпечення селективності найменший фактичний час спрацьовування запобіжника  $FUI$  (на більший струм) повинне бути більше найбільшого часу спрацьовування запобіжника  $FU2$  (на менший номінальний струм):

$$t_{спр.б} > t_{спр.м}, \quad (8.13)$$

де  $t_{спр.б}$ ,  $t_{спр.м}$  - часи спрацьовування запобіжника на більший і менший номінальні струми, що відповідають номінальній характеристиці.

Час спрацьовування запобіжника через виробничі допуски може відхилятися від номінального на  $\pm 50\%$ . Тоді приведена нерівність можна записати у виді

$$0,5 t_{спр.б} > 1,5 t_{спр.м} \quad (8.14)$$

Множники 0,5 і 1,5 враховують, що запобіжник  $FUI$  узятий з негативним допуском за часом спрацьовування, а запобіжник  $FU2$  - з позитивним. У результаті одержимо необхідну умову селективності

$$t_{спр.б} > 3t_{спр.м}$$

тобто для селективної роботи час спрацьовування запобіжника на більший струм повинне бути в 3 рази більше, ніж у запобіжника на менший струм.

Нерівність (8.15) враховує крайній випадок, коли час роботи запобіжника на більший номінальний струм має найменше значення, а в запобіжника на менший номінальний струм-найбільше значення.

При визначенні номінального струму вставки високовольтного запобіжника необхідно виходити з умови максимального тривалого перевантаження. Дуже часто обмотка вищої напруги трансформатора приєднується через запобіжник. При подачі напруги на трансформатор виникають піки струму, що намагнічує, середнє значення амплітуди яких досягає  $10 I_{\text{ном}}$ , а тривалість проходження приблизно дорівнює 0,1 с. Обраний по номінальному струму запобіжник повинний бути перевірений на проходження протягом 0,1 с початкового струму, що намагнічує.

На закінчення необхідно перевірити селективність роботи запобіжника з вимикачами, установленими на стороні високої і низької напруги.

При КЗ у самому трансформаторі час відключення запобіжника повинний бути менше, ніж витримка часу вимикача, установленого на стороні високої напруги і найближчого до запобіжника. При КЗ на стороні низької напруги запобіжник повинний мати час плавлення більше, ніж уставка захисту вимикачів на стороні низької напруги. При виборі запобіжника необхідно дотриматися також співвідношення  $U_{\text{ном.з}} = U_{\text{ном.уст}}$ ;  $I_{\text{вим.з}} \geq I_{\text{к.уст}}$ .

### *Запитання для самоперевірки*

- 1. Вимоги до запобіжників.*
- 2. Що являє собою часострумова характеристика запобіжника?*
- 3. Які особливості нагріву плавкої вставки запобіжника при тривалому навантаженні?*
- 4. Які особливості нагріву плавкої вставки струмами короткого замикання?*
- 5. Основні типи конструкцій запобіжників низької напруги.*
- 6. Основні типи конструкцій запобіжників високої напруги.*



## ГЛАВА 9

### АВТОМАТИЧНІ ПОВІТРЯНІ ВИМИКАЧІ (АВТОМАТИ)

#### 9.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Автоматичні повітряні вимикачі (автомати) служать для автоматичного вмикання електричної мережі при перевантаженнях, КЗ, надмірному зниженні напруги живлення, зміні напрямку потужності і т.п., а також для рідких вмикань і вимикань номінальних струмів навантаження оперативним персоналом.

До автоматів пред'являються такі наступні вимоги.

1. Струмове дуче коло автомата повинне пропускати номінальний струм протягом як завгодно тривалого часу. Режим тривалого вмикання для автомата є нормальним. Струмове дуча система автомата може піддаватися впливу великих струмів КЗ як при замкнутих контактах, так і при вмиканні на існуюче КЗ.

2. Автомат повинний забезпечувати багаторазове вмикання граничних струмів КЗ, що можуть досягати десятків і сотень кілоампер. Після вмикання цих струмів автомат повинний бути придатний для подальшої роботи в тривалому режимі.

3. Для забезпечення електродинамічної і термічної стійкості енергоустановок, зменшення руйнувань і інших наслідків, викликуваних струмами КЗ, автомати повинні мати малий час вмикання. З метою зменшення габаритних розмірів розподільного пристрою і підвищення безпеки обслуговування необхідна мінімальна зона вихлопу нагрітих і іонізованих газів у процесі гасіння дуги.

4. Елементи захисту автомата повинні забезпечувати необхідні струми і час спрацьовування та селективність.

У залежності від виду величини, що впливає, автомати поділяються на максимальні автомати по струму, мінімальні автомати по струму, мінімальні автомати по напрузі, автомати зворотного струму, максимальні автомати, що працюють по похідній струму, поляризовані максимальні автомати (вимикають коло при наростанні струму в одному — прямому напрямку) і неполяризовані, реагуючі на зростання струму в будь-якому напрямку.

Для побудови селективно діючого захисту автомати повинні мати регулювання струму і часу спрацьовування.

У деяких випадках потрібно мати комбінований захист — максимальний по струму і мінімальний по напрузі. Автомати, що задовольняють цим вимогам, називаються універсальними.

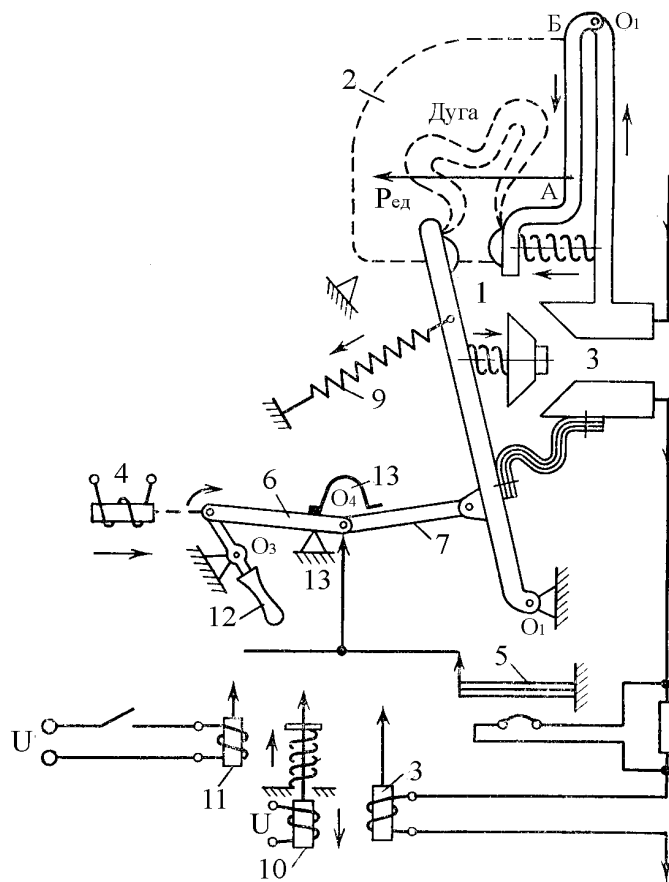
Автомати загальнопромислового і побутового застосування як правило мають лише максимальний токовий захист, відрегульований на заводі. В експлуатації характеристики автомата не можуть бути змінені. Для зменшення можливості зіткнення персоналу з деталями, що знаходяться під напругою, ці автомати закриті пластмасовим кожухом і практично не викидають дугу. Такі автомати називаються установними.

У будь-якому автоматі є такі наступні основні вузли: струмоведуче коло, дугогасильна система, привод автомата, механізм передачі зусилля від привода до контактів і елементи захисту — розчепителі.

В автоматі на струм більш 200 А (рис. 9.1) струмоведуче коло має головні 3 і дугогасильні 1 контакти. Вмикання автомата може робитися вручну рукояткою 12 чи електромагнітом 4. Ланки 6, 7 і упор 13 утворюють механізм вільного розчеплення (рис. 9.3). Вимикання автомата може здійснюватися рукояткою 12 чи за допомогою теплових і електромагнітних розчепителів 5, 8, 10, 11. Необхідна швидкість розбіжності контактів забезпечується пружиною 9. Гасіння дуги відбувається в камері 2.

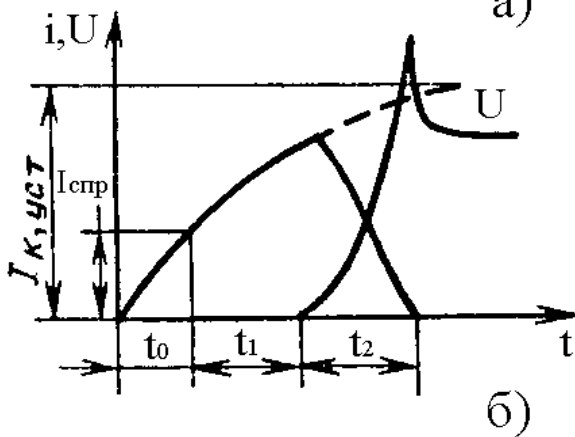
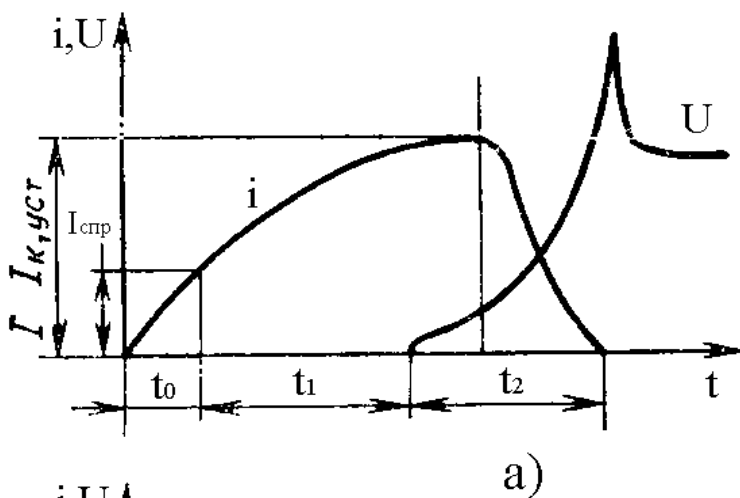
Основними параметрами автоматів є: номінальна напруга  $U_{\text{ном}}$ , номінальний тривалий струм  $I_{\text{ном}}$ , граничний струм вимикання  $I_{\text{вим.}}$ , власний час вимикання  $t_1$  і повний час вимикання  $t_{\text{вим.}}$ .

Під власним часом вимикання автомата  $t_1$  розуміють час від моменту, коли струм досягає значення струму спрацьовування  $I_{\text{спр}}$ , до початку розбіжності його контактів. Після розбіжності контактів виникаюча електрична дуга повинна бути погашена за найменший час з перенапругою, що не представляє небезпеки для іншого устаткування.



На рис. 9.2, а показані криві зміни струму і напруги на контактах у процесі вимикання для нешвидкодіючого автомата, а на рис. 9.2, б — для швидкодіючого. Заради простоти приймемо, що до КЗ струм навантаження  $I_H=0$ . Усталений струм КЗ —  $I_{к.уст.}$ . Від моменту початку КЗ струм росте за законом експоненти до значення струму спрацьовування автомата  $I_{спр}$  (час  $t_0$ ). Час  $t_0$  залежить від уставки по струму спрацьовування і швидкості наростання струму, що визначається параметрами кола КЗ. Після цього до моменту розмикання контактів проходить час  $t_1$ . Цей час витрачається на роботу механізму розчеплення, вибір провалу контактів і є власним часом вимикання автомата. Після розбіжності контактів дуга гасне за час  $t_2$ . Час, рівний  $t_{вим.} = t_0 + t_1 + t_2$ , є повним часом вимикання автомата.

Власний час вимикання автомата залежить від способу розчіплювання і конструкції контактів, маси рухомих частин і інших факторів [13].



Якщо  $t_1 \geq 0,01$  с, то автомат називається звичайним (нешвидкодіючим). У цьому випадку до моменту розмикання контактів струм досягає усталеного значення  $I_{к.уст.}$ . Такий автомат не забезпечує струмообмеження і його контактами вимикається усталений струм КЗ  $I_{к.уст.}$ .

У швидкодіючих автоматах час  $t_1$  скорочується до 0,002...0,008 с, і до моменту розбіжності контактів струм КЗ не досягає усталеного значення. Такий автомат, як правило, вимикає струм, значно менший усталеного струму КЗ. Завдяки цьому полегшується робота самого автомата, зменшується термічне і динамічне навантаження апаратури й устаткування.

## 9.2. ОСНОВНІ КОНСТРУКТИВНІ ВУЗЛИ АВТОМАТІВ

### 9.2.1. Струмоведуче коло

Найбільш важливою частиною струмоведучого кола автоматів є контакти. При номінальних струмах до 200 А застосовується одна пара контактів, які для збільшення дугостійкості можуть бути облицьовані металокерамікою. При струмах більш 200 А застосовуються двоступінчасті контакти типу контакту, що перекочується [13], чи пари головних і дугогасильних контактів. Основні контакти облицьовуються сріблом або металокерамікою (срібло, нікель, графіт). Дугогасильний нерухомий контакт покривається металокерамікою СВ-50 (срібло, вольфрам), рухомий — СН-29ГЗ. Застосовується металокераміка й інших марок. В автоматах на великі номінальні струми застосовується кілька паралельних пар головних контактів.

У швидкодіючих автоматах з метою зменшення власного часу вимикання застосовуються винятково торцеві контакти, що мають малий провал. Контакти виготовляються з міді, а поверхні торкання піддаються срібленню. В даний час проводяться роботи щодо створення штучного рідинного охолодження контактів [13]. Таке рішення дозволяє зберегти малу масу і швидкодію автомата і збільшити тривалий струм з 2,5 кА до 10 кА.

Щоб уникнути приварювання контактів застосовується електродинамічна компенсація [13]. Один варіант такого компенсатора показаний на рис. 9.1. При протіканні струму в дугогасильному контурі на провідник  $AB$ , що несе нерухомий дугогасильний контакт, діє електродинамічне зусилля  $P_{ед}$ , що збільшує натискання контактів.

В установних і швидкодіючих автоматах, у яких при короткому замиканні вимикання відбувається без витримки часу, електродинамічна компенсація не застосовується, тому що вона веде до збільшення власного часу вимикання.

### 9.2.2. Дугогасильна система

В автоматах застосовуються напівзакрите і відкрите виконання дугогасильних пристроїв. У напівзакритому виконанні автомат закритий ізоляційним кожухом, що має отвори для виходу гарячих газів. Об'єм кожуха досить великий для виключення появи великих надлишкових тисків. Зона викиду гарячих і іонізованих газів складає кілька сантиметрів від вихлопних щілин. Таке виконання застосовується в установних і універсальних автоматах, монтуємих поруч з іншими апаратами у розподільних пристроях, автоматах з ручним управлінням. Граничний струм вимикання не перевищує 50 кА.

У швидкодіючих автоматах і автоматах на великі струми вимикання (100 кА і вище) чи великі напруги (вище 1000 В) застосовуються дугогасильні пристрою відкритого виконання з великою зоною викиду [13].

В установних і універсальних автоматах масового застосування широко використовуються деіонна дугогасильна решітка зі сталевих пластин (3.3). Оскільки ці автомати призначені як для змінного, так і для постійного струму, число пластин вибирається з умови вимикання кола постійного струму. На кожну па-

ру пластин повинна приходитися напруга не більш 25 В. У колах змінного струму з напругою 660 В такі дугогасильні пристрої забезпечують гасіння дуги зі струмом до 50 кА. На постійному струмі ці пристрої працюють при напрузі до 440 В і струмах вимикання до 55 кА. При цьому дуга горить з мінімальним викидом іонізованих і нагрітих газів з дугогасильного пристрою.

При великих струмах застосовуються лабиринтно-щільові камери і камери з прямою поздовжньою щілиною. Утягування дуги в щілину здійснюється магнітним дуттям з котушкою струму. Поздовжньо-щілинна камера може мати кілька паралельних щілин незмінного перерізу, що зменшує аеродинамічний опір камери і полегшує входження в неї дуги з великим струмом. Стінки камери і перегородки виготовляються з асбоцементу чи кераміки.

У лабиринтно-щілинній камері (див. рис. 3.12) поступове входження дуги в зигзагоподібну щілину не створює високого аеродинамічного опору при великих струмах. Вузька щілина підвищує градієнт напруги в дузі, що скорочує необхідну її довжину при гасінні. Зигзагоподібна форма щілини зменшує габаритні розміри автомата. У такій камері дуга інтенсивно охолоджується стінками. Тому матеріал камери повинний мати високу теплопровідність і температурою плавлення. Як матеріал для камери застосовується кераміка — кордієрит.

В даний час з метою спрощення конструкції (відмовлення від потужних і складних систем магнітного дуття) знову повертаються до використання деіонних сталевих решіток. Сталеві, ізольованою керамікою пластини, що мають паз для дугогасильних контактів, створюють зусилля, що переміщують дугу. Гасіння дуги відбувається так само, як у камері з поперечними ізоляційними перегородками, але при відсутності спеціальної системи магнітного дуття.

### 9.2.3. Приводи

Привод повинний забезпечити зусилля на контактах, необхідне для вмикання автомата в найважчому випадку — на існуюче КЗ.

Приводи можуть бути ручні й електромеханічні. Ручні приводи застосовуються при номінальних струмах до 200 А. При струмах до 1 кА застосовуються електромагнітні приводи, що забезпечують необхідну швидкість наростання тиску в контактах. Недоліками електромагнітного привода є великі швидкості руху й удари в механізмі, що можуть приводити до вібрації контактів.

Як правило електромагнітний привод автомата отримує живлення від тієї ж мережі, що і навантаження. Напруга на приводі в момент вмикання на існуюче КЗ падає до нуля, і автомат може не ввімкнутися. У приводі незалежної дії енергія, необхідна для вмикання, накопичується в заведеній пружині. Після подачі команди на вмикання звільняється утримуюча засувка пружини й автомат вмикається при будь-яких напругах мережі.

В автоматах на струми 1500 А и вище бажане застосування електродвигунного приводу. Електродвигун з'єднаний з автоматом через понижуючу зубчасту передачу. Навіть при втраті напруги кінетичної енергії, накопиченої в швидкообертаючомуся роторі двигуна, буває досить, щоб закінчити процес вмикання. Достоїнствами цього привода є плавний хід механізму і відсутність ударів.

#### 9.2.4. Механізм передачі зусилля від привода до контактів

виконує такі наступні функції: передає рух від привода до контактів і утримує їх у замкненому положенні; звільняє контакти при вимиканні автомата; передає контактам швидкість, необхідну для гасіння дуги; фіксує контакти у вимикненому положенні і підготовляє автомат для нового вмикання.

На рис. 9.3 показаний найпростіший механізм для автоматів зі струмом до 1000 А. При відсутності аварійної ситуації ланки 2 і 3 складають один твердий важіль, тому що центр шарніра  $O$ , що з'єднує ці ланки, лежить нижче прямої, що з'єднує точки  $O_1$  і  $O_2$ , а упор 5 не дає можливості скластися цим ланкам (рис. 9.3, а).

При вмиканні на КЗ по обмотці електромагніта 7 починає протікати великий струм. Якір 6 втягується в обмотку і ламає важіль (рис. 9.3, б). Рукоятка 4 і контактний важіль 1 виявляються розчепленими. Під дією вимикаючої пружини не показаної на малюнку, плоскої контактної пружини і маси рухомих частин контакти розмикаються і відбувається вимикання автомата. Рукоятка привода може обернутися проти годинникової стрілки, не роблячи впливу на стан контактів. Для підготовки до нового вмикання необхідно повернути рукоятку 4 до відмовлення по годинниковій стрілці. Ланки 2 і 3 складуться і при знеструмленому електромагніті знову складуться один твердий важіль (рис. 9.3, в). Недоліком механізму є відносно велике зусилля розчіплювання, тому що при цьому необхідно деформувати контактну пружину. З ростом номінального струму росте натискання

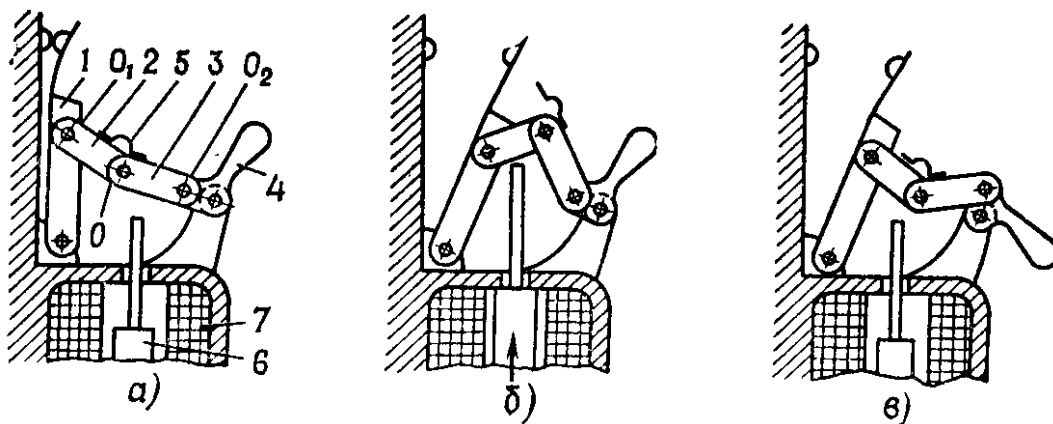


Рис. 9.3 Механізм найпростішого автомата

контактних пружин, а отже, і зусилля, необхідне для розчіплювання автомата.

При струмах більш 1000 А прибігають до інших типів механізмів вільного розчеплення [13].

#### 9.2.5. Розчепителі автоматів

Вимикання автоматів відбувається під дією на механізм вільного розчеплення елементів захисту — розчепителів. Найбільш поширені максимальні роз-

чепителі. Для захисту устаткування від перевантажень необхідно, щоб часострумова характеристика розчепителя йшла можливо ближче до характеристики об'єкта, що захищається.

У максимальних розчепителях широко використовуються електромагнітні системи і теплові системи з біметалічною пластиною. Електромагнітний розчепитель (поз. 8, рис. 9.1) простий по конструкції, має високу термічну й електродинамічну стійкість і стійкість до механічних впливів. До моменту впливу на механізм вільного розчеплення якір розчепителя переборює значний вільний хід (5...10 мм). Розчеплення відбувається за рахунок удару, у якому основну роль грає кінетична енергія якоря, накопичена при його русі. Обмотка електромагніта розчепителя ввімкнута послідовно з навантаженням. Регулювання струму спрацьовування може вироблятися за рахунок натягу протидіючої пружини розчепителя чи зміни числа витків обмотки.

Для створення витримок часу між електромагнітом і механізмом вільного розчеплення ставляться пристрої затримки. Селективно працюючі автомати повинні бути строго погоджені за часом спрацьовування, що досягається застосуванням годинних механізмів. Витримка часу таких пристроїв не залежить від струму.

Витримки часу, залежні від струму навантаження, створюються різноманітними сповільнюючими пристроями [13]. Найбільше просто залежна від струму витримка часу виходить за допомогою теплових розчепителей (поз. 5, рис. 9.1), аналогічних по конструкції тепловим реле. Їх часострумова характеристика досить добре погодиться з об'єктом, що захищається. Однак ці розчепителі мають такі наступні недоліки:

1. Слабка термічна стійкість вимагає високої швидкодії при вимиканні великих струмів. У цих випадках звичайно застосовується комбінація з електромагнітного і теплового розчепителей. Електромагнітний розчепитель працює при КЗ, тепловий — при перевантаженнях.

2. З ростом струму, що вимикаються, росте зусилля, необхідне для розчеплення автомата. Тому тепловий розчепитель застосовується при струмах до 200 А.

3. Витримка часу теплових розчепителей залежить від температури навколишнього середовища, що обмежує їхнє застосування.

4. Розкид у струмі спрацьовування в теплових розчепителей приблизно в 2 рази більше, ніж в електромагнітних.

5. Мала термічна стійкість теплових розчепителей визначає малу припустиму тривалість КЗ, що утрудняє одержання необхідної селективності.

Більш вдосконалим є захист за допомогою напівпровідникового розчепителя [1].

Для дистанційного вимикання автомата встановлюється незалежний електромагнітний розчепитель (поз. 11, рис. 9.1), електромагніт якого може бути як постійного, так і змінного струму. Обмотка електромагніта розраховується на короткочасний режим роботи.

Номінальна напруга розчепителя береться не вище 220 В. Якщо джерело живлення має більш високу напругу, то ставиться додатковий резистор.

Мінімальний розчепитель виконується також електромагнітного типу (поз. 10, рис. 9.1). Для розриву кола котушки у вимкненому положенні вона отримує живлення через замикаючий допоміжний контакт. Цей контакт при вмиканні замикається раніш головних контактів. Завдяки цьому механізм підготовляється до роботи в процесі самого вмикання. Напруга відпускання електромагніта регулюється в межах 35...70 % номінальної. При напрузі, меншій напруги уставки, пружина відриває якір і впливає на механізм вільного розчеплення.

Мінімальний розчепитель може використовуватися для дистанційного вимикання, якщо послідовно з ним ввімкнути кнопку з контактом, що розмикає.

### 9.3. ОСНОВНІ ТИПИ СУЧАСНИХ АВТОМАТІВ

#### 9.3.1. Автомати серії А-3700 (рис. 9.4)

Нерухомий контакт 7 має можливість невеликого переміщення і знаходиться під дією контактної пружини (аналогічно рис. 9.1). Рухомий контакт 6 укріплений на ізоляційному важелі, зв'язаному з механізмом апарата через тягу 16. Контакти мають металокерамічні накладки 8. Струм мережі, що комутується, проходить також через котушку електромагніта максимального розчепителя 10 і трансформатор струму 3. Автомати цієї серії можуть бути струмообмежуючими і селективними. У перших при великих струмах КЗ нерухомий контакт 7 відкидається вліво електродинамічною силою в крапці торкання контактів і дуга виникає до початку руху рухомого контакту.

Якщо спочатку струм кола складав 100 кА, то через 1 мс за рахунок опору дуги він зменшується до 20...50 кА. Повторне торкання контактів не відбувається, тому що розчепитель 10 за допомогою якоря 15 звільняє механізм і починається рух контакту 6. Гасіння дуги здійснюється дугогасильною решіткою 9 (3.3). Повний час спрацьовування струмообмежуючого автомату 10...15 мс.

У селективних автоматах використовується електродинамічний компенсатор, аналогічний показаному на рис. 9.1. Контакти не розмикаються доти, поки не почнеться рух важеля 16.

В автоматі А-3700 при перевантаженнях напівпровідниковий блок захисту 5 подає сигнал на незалежний електромагнітний розчепитель 4 (рис. 9.4). Якір цього розчепителя 1 діє на механізм вільного розчеплення. Напівпровідниковий блок захисту дозволяє регулювати номінальний струм пристрою і витримку часу спрацьовування в широких межах.

При перевантаженнях повернення напівпровідникового блоку в початковий стан забезпечується, якщо після витікання 75 % витримки часу струм упаде до  $I_{ном}$ . При КЗ повернення напівпровідникового блоку забезпечується, якщо після 50, 170, 320 мс із початку КЗ струм упаде до 70% уставки струму КЗ [13].

В автоматах змінного струму напівпровідниковий блок захисту отримує живлення від трансформатора струму 3. В автоматах постійного струму замість трансформатора як датчик струму використовується дросельний магнітний підсилювач [13]. Живлення блоку датчика струму здійснюється від спеціального



стабілізованого джерела. У процесі експлуатації робота напівпровідникового блоку захисту може бути перевірена без виводу автомата в ревізію.

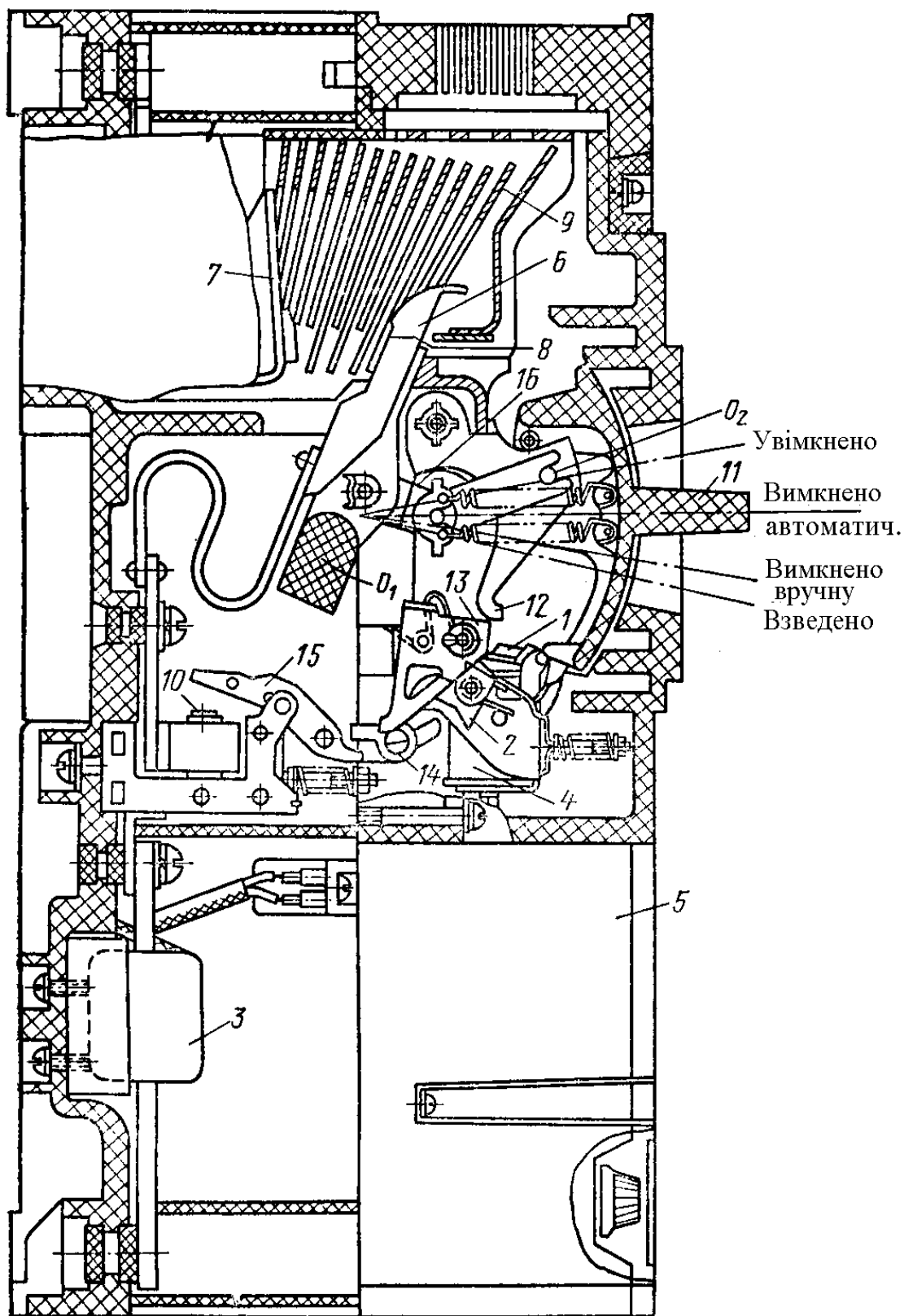


Рис. 9.4 Автомат серії А-3700

Напівпровідниковий блок захисту працездатний при коливанні напруги мережі в межах 85...110 % номінального значення.

Автомат може забезпечуватися електромагнітним приводом для дистанційного керування. Вихідний елемент привода впливає на рукоятку 11 і забезпечує вмикання і вимикання апарата.

Номінальні струми автоматів серії А-3700 складають 160...630 А при перемінній напрузі до 660 і постійному до 440 В. Максимально припустимий струм КЗ мережі, у якій може бути встановлений автомат, досягає по амплітуді 200 кА. Зносостійкість досягає  $(5...10) \cdot 10^3$  у залежності від номінального струму апарата [15].

### 9.3.2. Автомати серії «Електрон»

розроблені для мереж з номінальним струмом 250...4000 А. Такі автомати (рис. 9.5) мають головну (1, 2, 3) і дугогасильну (4, 5) контактні системи. Контактуючі поверхні облицьовані металокерамікою. Для підвищення динамічної стійкості використовується компенсатор 8. При вимиканні повертається важіль 9. Спочатку переміщається місток 1, і між головними контактами утворюється зазор 6 мм, після чого розмикаються контакти 4, 5. Дуга, що утворюється, затягується в дугогасильну камеру з металевими пластинами 6. Для обмеження викиду полум'я й іонізованих газів дугогасильна камера закрита полум'ягасителем 7.

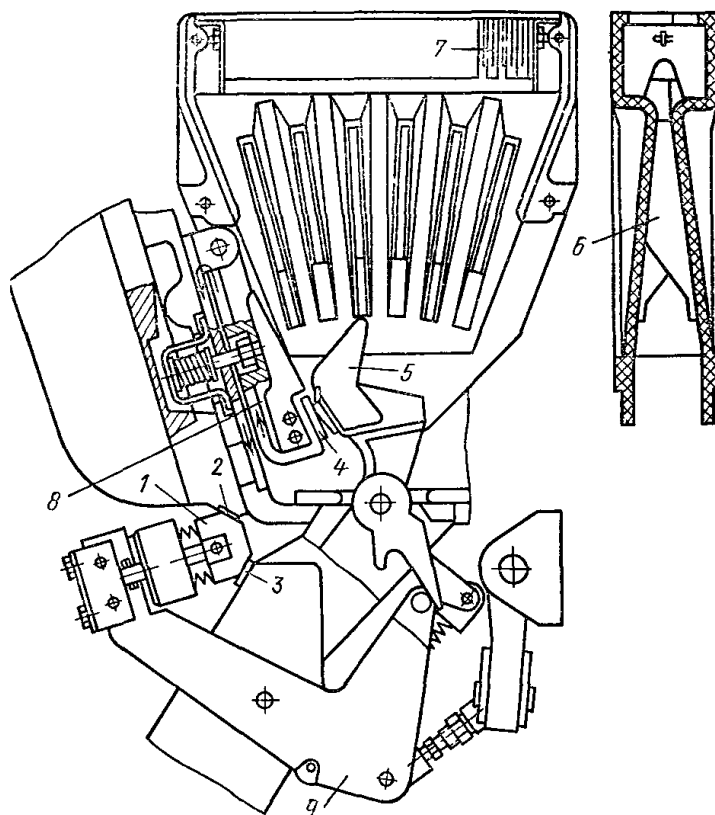


Рис. 9.5 Контактна та дугогасильна системи автомату серії «Електрон»

Він являє собою набір мідних пластин, установлених із зазором, Нагріті вихлопні гази і полум'я, стикаючись із пластинами, охолоджуються і зона викиду гарячих газів значно зменшується.

Струм автомата, що вимикається, досягає 65 кА при номінальній перемінній напрузі 660 В і постійній 440 В. Конструкція вихідних і вхідних контактів дозволяє легко вкочувати і викочувати автомат з установки по спеціальних рейках для ремонту і ревізії. Дистанційне вмикання автомата виконується електромагнітним (при  $I_{\text{ном}}=600$  А) або пружинним приводом (при  $I_{\text{ном}}=1000\text{...}4000$  А).

### 9.3.3. Швидкодіючі автомати

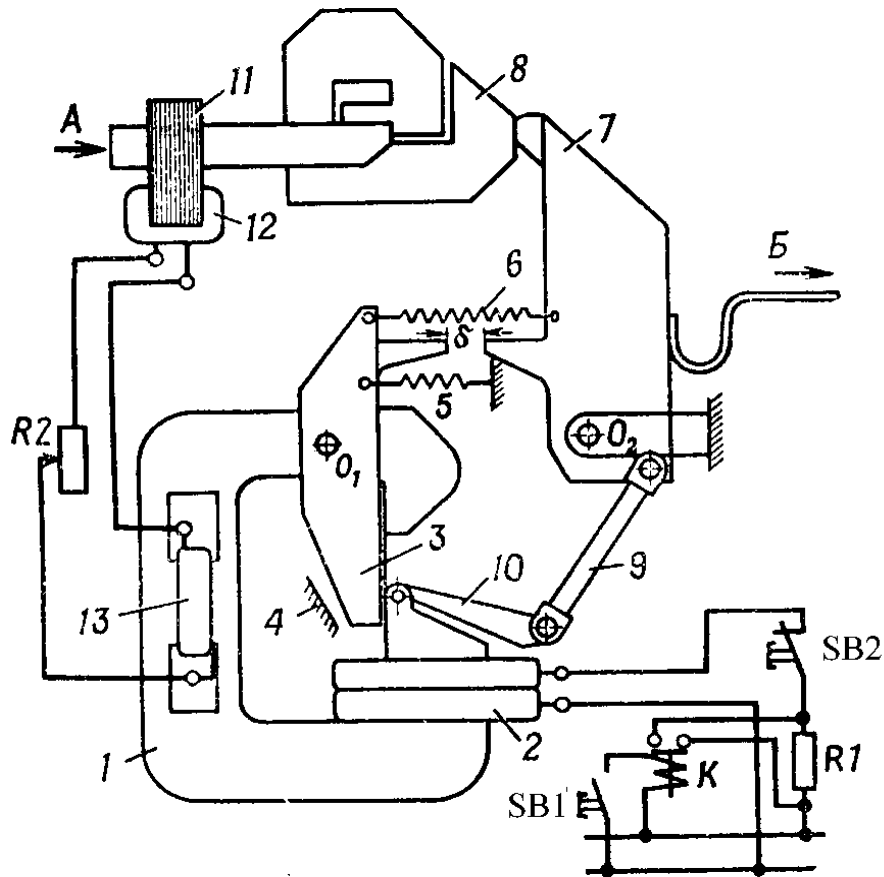
Швидкодія автомата може бути підвищена за рахунок скорочення власного часу вимикання і часу гасіння дуги. Останнє обмежується рівнем перенапруг. Чим швидше зменшується струм, тим вище перенапряга [13]. Тривалість гасіння дуги в даний час доведена до  $(1,5\text{...}2)\cdot 10^{-2}$  с (на постійному струмі). Подальше зменшення тривалості гасіння дуги на даному етапі розвитку техніки не представляється перспективним [13]. Тому в даний час основна увага приділяється зменшенню власного часу вимикання автомата.

Для одержання малого власного часу вимикання контакти швидкодіючих автоматів виконуються торцевими і з малим провалом (порядку 8...10 мм). Максимальна відстань між контактами береться невеликою і складає 18...22 мм при номінальній напрузі до 3000 В. Утворення дуги й обмеження струму за рахунок її опору починаються при відстані між контактами 1...1,5 мм. Для зменшення оплавлення контактів і прискорення розриву металевого містка в місці розташування контактів створюється потужне магнітне поле.

Для зменшення власного часу вимикання необхідно максимально скоротити час від моменту досягнення струмом значення  $I_{\text{спр}}$  до моменту розбіжності контактів. У зв'язку з цим у швидкодіючих автоматах не застосовуються механізми з ламким важелем і електромагнітні розчепителі з великим вільним ходом якоря. Прагнуть або безпосередньо зв'язати якір електромагніта з контактом, або максимально спростити ці зв'язки.

По характеру мереж, що вимикаються, швидкодіючі автомати поділяються на лінійні, катодні й анодні. З існуючих конструкцій найбільш універсальні швидкодіючі автомати серії ВАБ-28 на номінальні струми від 1,5 до 6 кА і номінальні напруги від 825 до 3300 В. Вимикач ВАБ-28 (рис. 9.6) містить електромагніт постійного струму 1 з утримуючою котушкою 2 і якір 3, що може повертатися навколо осі  $O_1$ , до упора 4.

При увімкненому електромагніті якір 3 утримується в положенні, показаному на малюнку, електромагнітною силою так, що пружина, що вимикає 5, і контактна пружина 6 розтягнуті. Струм кола, що захищається, проходить по шині А, котушці магнітного дугтя 8, рухомому контакту 7 і шині Б. Вимикання катодного автомата відбувається при зворотному запалювання ртутного вентиля, коли струм у колі змінює свій знак.



Різке спадання струму в колі (струм переходить через нульове значення) викликає ЕДС в обмотці 12, що сидить на сердечнику 11, який охоплює шинопровід. Ця ЕДС прикладається до обмотки 13, розташованої на магнітопроводі.

Магнітний потік обмотки 13 насичує ділянки магнітопроводу електромагніта, що приводить до різкого збільшення магнітного опору на шляху основного потоку.

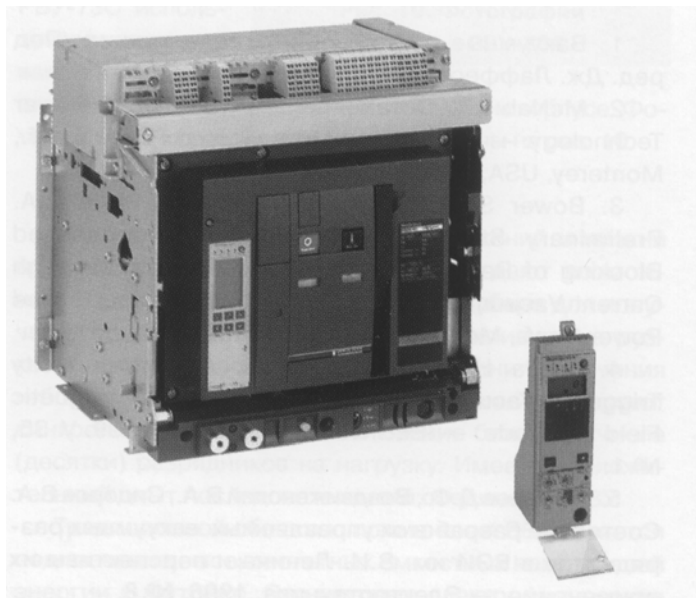
Сила притягання якоря 3 зменшується, і він починає рухатися під дією пружин 5 і 6. Велика швидкість розмикання рухомого контакту 7 досягається за рахунок кінетичної енергії якоря 3, отриманої їм при розгоні. Після вибору зазору  $\delta$  ця енергія ударом передається контакту 7. Регулювання струму спрацьовування виробляється резистором R2.

У процесі вмикання якір механізму вільного розчіплювання 10 притягається до скошеного полюса електромагніта 1. Вмикання вимикача можливо, якщо в утримуючій обмотці 2 різко збільшити струм, що здійснюється контактором K, шунтуючим додатковий резистор R1. При цьому якір 3 притягнеться, розтягнувши пружину 6. Рухомий контакт 7 залишиться нерухомим, тому що його утримує тяга 9, з'єднана з притягнутим якорем вільного розчіплювання 10. Замикання контакту 7 відбудеться тільки після вмикання в коло обмотки 2 резистори R1, унаслідок чого зменшиться сила притягання якоря механізму вільного розчіплювання 10 (відпускається кнопка SB1).

Вимикання лінійних вимикачів реалізується за рахунок розриву кола утримуючої котушки контактами, що розмикають, спеціального реле (індуктивний диференціальний шунт) типу РДШ [13].

Гасіння дуги здійснюється в повздовжно-щілинній камері з азбестоцементу, що має три рівнобіжні щілини.

Серед закордонних нових розробок у цій галузі слід відмітити автоматичні вимикачі низької напруги на великі струми класу Masterpact, які випускаються



**Рис. 9.7 Зовнішній вигляд автомата**

компанією Schneider Electric. Компанія Schneider Electric входить у число найбільш крупних світових виробників електротехнічного обладнання і засобів автоматизації і на сьогодні працює в 130 країнах, де має 170 заводів.

У 2002 р. розпочалося серійне виробництво автоматичних вимикачів Compact NS на номінальні струми 630...1600 А та 1600...3200 А, які є стандартизованим і уніфікованим силовим комутаційним обладнанням, яке застосовується в складі розподільних пристроїв.

Зовнішній вигляд автоматів серії Masterpact представлено на рис. 9.7.

Нова серія апаратів містить у собі два сімейства:

- Masterpact NS – самий малогабаритний у світі силовий автоматичний вимикач на струми 630...1600 А;
- Masterpact NW у двох типорозмірах на струми 800...4000 А і 4000...6300 А.

У цих автоматах впроваджені всі новітні розробки, що дозволило значно покращити їх технічні можливості і підвищити надійність експлуатації [Э2].

#### **9.4. ВИБІР АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ**

Номінальні значення напруги  $U_{\text{ном.а.}}$  і струму  $I_{\text{ном.а.}}$  автомата, струму навантаження  $I_{\text{ном.н.}}$  і напруги мережі  $U_{\text{ном.м.}}$  повинні задовольняти співвідношенням:  $U_{\text{ном.а.}} \geq U_{\text{ном.м.}}$ ;  $I_{\text{ном.а.}} \geq I_{\text{ном.н.}}$ .

Для автомата захисту двигуна, що працює в повторно-короткочасному режимі, номінальний струм електромагнітного розчепителя приймається рівним струму двигуна в режимі ПВ=25%. Для автоматів захисту двигунів з короткозамкненим ротором струм уставки електромагнітного розчепителя

$$I_{\text{уст.ем.}} \geq (1,5 \dots 1,8) I_{\text{п}} \quad (9.1)$$

Для двигуна з фазним ротором

$$I_{\text{уст.ем}} \geq (2,5 \dots 3) I_{\text{ном.дв.}} \quad (9.2)$$

Для групи короткозамкнених двигунів

$$I_{\text{уст.ем}} \geq (1,5 \dots 1,8) [\Sigma I_{\text{ном.дв.}} + (I_{\text{п}} - I_{\text{ном.дв.}})'], \quad (9.3)$$

де різниця  $(I_{\text{п}} - I_{\text{ном.дв.}})'$  береться для двигунів, у яких вона найбільша.  
Для групи двигунів з фазним ротором

$$I_{\text{уст.ем}} \geq (1,5 \dots 2) I'_{\text{ном.дв.}} + \Sigma I_{\text{ном.дв.}}, \quad (9.4)$$

де  $I'_{\text{ном.дв.}}$  струм двигуна з найбільшим пусковим струмом.

Для двигунів, що працюють у важкому чи повторно-короткочасному режимі, номінальний струм теплового чи комбінованого розчепителя

$$I_{\text{ном.розч.}} \geq 1,5 I_{\text{ном.дв.}} \quad (9.5)$$

Вибір по умовам струмів КЗ:

- для автоматів з електромагнітним розчепителем

$$I_{\text{к}} / I_{\text{уст.ем}} \geq 1,25 \dots 4 \quad (9.6)$$

- для автоматів з комбінованим розчепителем

$$I_{\text{к}} / I_{\text{н.розч.}} \geq 3 \quad (9.7)$$

Граничний струм вимикання автомата  $I_{\text{вим.а}}$  повинний бути не менш струму КЗ  $I_{\text{к}}$

$$I_{\text{вим.а}} \geq I_{\text{к}} \quad (9.8)$$

### *Запитання для самоперевірки*

1. *Призначення і вимоги до автоматів.*
2. *Як поділяються автомати у залежності від виду величини, що впливає?*
3. *Чим відрізняються швидкодіючі автомати від звичайних?*
4. *Основні конструктивні вузли автоматів.*
5. *Які засоби гасіння дуги використовують в автоматах?*

## ГЛАВА 10

### ВИМИКАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

*Розглянуті класифікація, основні параметри, конструкції та особливості роботи вимикачів змінного струму високої напруги. Приведені умови їх вибору.*

*Навчальна ціль глави – формування умінь, які потрібні при виборі і експлуатації різних типів вимикачів у розподільних та живильних мережах високої напруги промислових підприємств.*

#### 10.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Вимикачі високої напруги призначені для комутації мереж змінного струму з напругою 3 кВ і вище у всіх режимах, можливих в експлуатації: вмикання і вимикання номінальних струмів, струмів КЗ, струмів холостого ходу силових трансформаторів і ємнісних струмів конденсаторних батарей і довгих ліній. Найбільш важким режимом роботи вимикача є вимикання і вмикання струмів КЗ.

Основні параметри вимикачів: номінальна напруга  $U_{\text{НОМ}}$ , номінальний тривалий струм  $I_{\text{НОМ}}$ , номінальний струм термічної стійкості  $I_t$ , номінальний струм електродинамічної стійкості  $i_y$ , номінальний струм вимикання  $I_{\text{ВИМ.Н.}}$ , номінальна потужність вимикання  $S_{\text{ВИМ.Н.}}$ , номінальний струм вмикання  $I_{\text{В.НОМ}}$ , власний час вмикання  $t'_{\text{ВЛ}}$  і вимикання вимикача  $t_{\text{ВЛ}}$ , повний час вмикання  $t_{\text{ВМ}}$  і вимикання  $t_{\text{ВИМ}}$ .

Струми КЗ у сучасних мережах високої напруги досягають сотень кілоампер. При таких струмах процес гасіння дуги у високовольтних вимикачах дуже складний через високу номінальну напругу і високу швидкість відновлення напруги (3.2).

Номінальний струм вимикання  $I_{\text{ВИМ.Н.}}$ , являє собою найбільший струм, що вимикач здатний надійно вимикнути при напрузі, що повертається, між фазами, рівному найбільшій робочій напрузі мережі (при заданих умовах відновлення напруги на контактах вимикача). Значення  $I_{\text{ВИМ.Н.}}$  характеризує вимикаючу здатність вимикача. Вимикаюча здатність вимикача часто визначається номінальною потужністю вимикання. Номінальна потужність вимикання, МВ·А, трифазного вимикача

$$S_{\text{ВИМ.Н.}} = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{ВИМ.Н.}} \cdot 10^{-6} \quad (10.1)$$

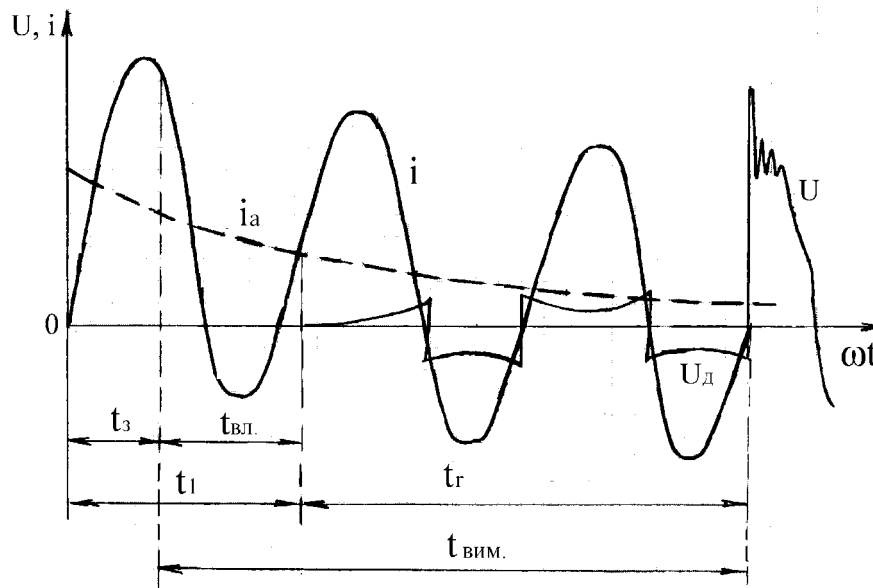
Поняття цієї потужності умовно. Коли по вимикачу протікає струм  $I_{\text{ВИМ.Н.}}$ , то напруга на затисках апарата практично дорівнює напрузі на дузі і складає кілька відсотків напруги мережі. Відновлення цієї напруги відбувається після припинення струму. Таким чином,  $U_{\text{НОМ}}$  і  $I_{\text{ВИМ.Н.}}$  діють на вимикач у різний час. Однак  $S_{\text{ВИМ.Н.}}$  враховує навантаження вимикача цими двома факторами і, власне кажучи, являє собою потужність, близьку до потужності короткого замикання мережі, у якій установлений вимикач.

У більшості випадків причина, що викликає КЗ, носить тимчасовий характер. Наприклад, у результаті перенапруг відбулося перекриття порцелянового ізолятора і виникло КЗ на землю. Якщо причина швидко зникла, а порцелянова ізоляція залишилася неушкодженою, то при новому вмиканні вдається відновити подачу енергії споживачу. Цей процес називається автоматичним повторним вмиканням (АПВ) вимикача. Застосування АПВ дозволяє підвищити надійність енергопостачання.

Час з моменту вимикання до нового вмикання повинний бути досить малим для того, щоб забезпечити безперервну роботу споживача. Це час повинний бути достатнім для деіонізації пробитого проміжку після вимикання мережі. Час деіонізації складає приблизно 0,1...0,5 с і залежить від напруги системи.

Якщо до моменту повторного вмикання КЗ у мережі не зникає, тоді вимикач вмикається на існуюче КЗ, після чого знову відбувається вимикання КЗ. У ряді вимикачів, наприклад у масляних, вимикання другого КЗ відбувається в більш тяжких умовах, тому що після першого вимикання дугогасильний пристрій може бути тільки частково заповнений маслом. Тому номінальне значення струму вимикання залежить від циклу роботи вимикача (без АПВ, з одно- чи дворазовим АПВ і т.д.).

Діюче значення струму КЗ не залишається постійним через зміну періодичної й аперіодичний складових. Типова крива струму при КЗ приведена на рис. 10.1.



**Рис. 10.1** Часові діаграми струму і напруги при КЗ

Початкове значення аперіодичної складової залежить від моменту початку КЗ і може змінюватися від нуля до амплітуди періодичної складової. Швидкість її спаду визначається постійного часу кола вимикання. Чим більше потужність установки, тим менше активний опір кола і більше постійна часу.

Контакти вимикача розходяться через деякий час  $t_1$  після початку КЗ. Це час можна представити як



$$t_1 = t_3 + t_{\text{вл}} \quad (10.2)$$

де  $t_3$ -час дії релейного захисту;  $t_{\text{вл}}$  - власний час вимикання вимикача, що представляє собою час з моменту подачі команди на вимикання (подачі напруги на електромагніт вимикання) до початку розбіжності контактів.

До моменту часу  $t_1$  зменшуються як періодична, так і аперіодична складові струму.

Під номінальним струмом вимикання  $I_{\text{вим.н}}$  розуміється діюче значення періодичної складової струму в момент розбіжності контактів. Цей струм вказується в технічній характеристиці вимикача.

Вимикач повинний вимикати коло і при наявності аперіодичної складової, котра може існувати до моменту розбіжності контактів. При цьому її початкове значення дорівнює амплітуді періодичної складовий, а постійна часу спаду  $Ta = 0,05$  с [13].

Аперіодичну складову необхідно враховувати у швидкодіючих вимикачах, коли  $t_1 < 0,1$  с і постійна часу спаду аперіодичної складаючої  $Ta \geq 0,05$  с.

Збереження енергетичного устаткування, безперебійність енергопостачання, динамічна стійкість паралельно працюючих систем вимагають, щоб тривалість КЗ була можливо меншою й обмежувалася часом  $0,05 \dots 0,1$  с. Тому усі вимикачі забезпечуються дугогасильними пристроями, що забезпечують гасіння дуги в обмеженому обсязі за час у соті частки секунди.

Повний час вимикання вимикача  $t_{\text{вим.}}$ —це час від подачі команди на вимикання до моменту загасання дуги у всіх полюсах. Воно складається з власного часу вимикання  $t_{\text{вл}}$  і часу гасіння дуги  $t_{\text{г}}$  (рис. 10.1), тобто

$$t_{\text{вим.}} = t_{\text{вл}} + t_{\text{г}}$$

При вмиканні на існуюче КЗ вимикач піддається великим механічним, тепловим і електродинамічним навантаженням. Здатність вимикача вмикатися на існуюче КЗ характеризується номінальним струмом вмикання.

Номінальний струм вмикання - це найбільший ударний струм КЗ, на який вимикач вмикається без зварювання контактів і інших ушкоджень, що перешкоджають його подальшій нормальній роботі. Цей струм визначається або амплітудою  $i_{\text{уд}} = 1,8 \sqrt{2} I_{\text{вим.н.}}$ , або діючим значенням ударного струму за період після початку КЗ.

Час вмикання вимикача - цей час від подачі команди на вмикання до завершення операції вмикання (посадка привода на засувку, закінчення ходу віддільника повітряного вимикача, тощо).

Вимикач є найбільш відповідальним апаратом високовольтної частини системи електропостачання. При відмовленні вимикача аварія розвивається, що веде до важких руйнувань і великих матеріальних утрат, зв'язаним з невідпущкою електроенергії, припиненням роботи великих підприємств.

У зв'язку з цим основною вимогою до вимикачів є особливо висока надійність їхньої роботи у всіх експлуатаційних режимах. Вимикання вимикачем будь-яких навантажень не повинне супроводжуватися перенапругами, небезпе-

чними для ізоляції елементів установки. Вимикання мережі при КЗ повинно відбуватися за мінімально можливий час.

У зв'язку з ростом потужності в одиниці устаткування (генераторах, трансформаторах) росте частота власних коливань кола вимикання, а отже, і швидкість відновлення напруги (§ 3.2). Вимикач повинний забезпечувати надійне вимикання мережі при умовах відновлення напруги, обумовлених нормативними документами [13].

Вивід вимикача з робочого стану для ревізії і ремонту пов'язаний з великими труднощами, тому що приходиться або переходити на іншу схему розподільного пристрою, або просто відключати споживача. У зв'язку з цим вимикач повинний допускати можливо більше число вимикань КЗ без ревізії і ремонту. Сучасні вимикачі можуть вимикати без ревізії до десяти КЗ при струмі вимикання, рівному номінальному  $I_{\text{вим.н}}$ .

Вимикання вимикачем КЗ не повинне супроводжуватися викидом з нього полум'я і розпечених газів, що може привести до перекриття ізоляції в розподільному пристрої.

Вимикачі можуть бути класифіковані по методу гасіння дуги, виду ізоляції струмоведучих частин між собою і на землю, принципам, закладеним у конструкцію дугогасильного пристрою.

У **масляних вимикачах** дуга, що утворюється між контактами, горить у трансформаторному маслі. Під дією енергії дуги масло розкладається і гази та пари, що утворюються, використовуються для її гасіння. У залежності від способу ізоляції струмоведучих частин розрізняють бакові вимикачі і маломасляні. У перших струмоведучі частини ізолюються між собою і від землі за допомогою масла, що знаходиться в сталевому баці, з'єднаному з землею. У маломасляних вимикачах ізоляція струмоведучих частин від землі і між собою використовується за допомогою твердих діелектриків і масла.

У **повітряному вимикачі** як гасильне середовище використовується стиснене повітря, що знаходиться в баці під тиском 1...5 МПа. При вимиканні стиснене повітря з бака подається в дугогасильний пристрій. Дуга, що утвориться в камері дугогасильного пристрою (ДП), обдувається інтенсивним потоком повітря, що виходить в атмосферу. Ізоляція струмоведучих частин між собою здійснюється за допомогою твердих діелектриків і повітря.

У **елегазових вимикачах** гасіння дуги здійснюється за рахунок охолодження її рухаючимися з великою швидкістю елегазом (шестифтористою сіркою SF<sub>6</sub>), що використовується і як ізолююче середовище.

**Електромагнітні вимикачі** по своєму принципу аналогічні контакторам постійного струму з лабіринтно-щілинною камерою. Гасіння дуги відбувається за рахунок збільшення опору дуги внаслідок її інтенсивного подовження й охолодження.

У **вакуумних вимикачах** контакти розходяться у вакуумному середовищі з тиском менше 10<sup>-4</sup> Па. Виникаюча при розбіжності контактів дуга швидко гасне завдяки інтенсивній дифузії її зарядів у вакуумі.

## 10.2. БАКОВІ (БАГАТООБ'ЄМНІ) МАСЛЯНІ ВИМИКАЧІ

Баковий масляний вимикач на напругу 110 кВ показаний на рис. 10.2. У сталевому баці 1 на маслонаповнених вводах 2 розташовані дугогасильні пристрої (камери) 3. Маслонаповнений ввід (прохідний ізолятор) служить для проведення струмоведучого кола, що знаходиться під високою напругою, через металеву стінку чи інші перешкоди. Траверс 4 перемикає вихідні контакти камер.

Гарячі іонізовані вихлопні гази, що виходять з камер, можуть викликати перекриття з камер на бак. Для запобігання цього явища мається бакова ізоляція 5.

На вимикачі встановлені магнітопроводи 8 із вторинними обмотками трансформаторів струму (у даному випадку їх чотири). Первинною обмоткою трансформаторів є струмоведучі стрижні вводів 2. Для збереження в'язкості трансформаторного масла при низьких температурах передбачений електричний підігрів масла пристроєм 9.

При вимиканні контакти рухаються під дією пружини камери й у кожному розриві утвориться дуга. Під дією енергії дуги масло розкладається на водень, метан і інші гази. Протягом сотої частки секунди тиск зростає до 5...8 Мпа. Необхідно відзначити, що в момент проходження струму через нуль дуга гасне і підведення потужності до неї припиняється. Однак енергія, виділена дугою протягом попереднього напівперіоду, створює в камері обсяг газу, у якому запасена визначена енергія. Цей газ знаходиться під високим тиском. До моменту нуля струму цей тиск зменшується, однак залишається ще досить великим, щоб створити газовий потік, що охолоджує дугу і відновлює електричну міцність дугового проміжку. Після того як тіло рухомого контакту відкриває спеціальну дуттєву щілину в дугогасильному пристрої, створюється потік газів і парів масла, що охолоджують і деіонізують дугу. Слід зазначити, що енергія, необхідна для гасіння виділяється самою дугою. Тому чим більше струм, тим більше тиск у камері й інтенсивніше гасіння дуги. При струмах, близьких до номінального струму вимикання, тривалість горіння дуги не більш 0,02 с.

Найбільша тривалість горіння дуги спостерігається при вимиканні невеликих індуктивних струмів (500...2000 А).

У свій час бакові вимикачі випускалися на напругу 35...220 кВ з найбільшою потужністю вимикання 25000 МВ·А. Як правило, бак вимикача заповнюється маслом приблизно на 2/3 обсягу.

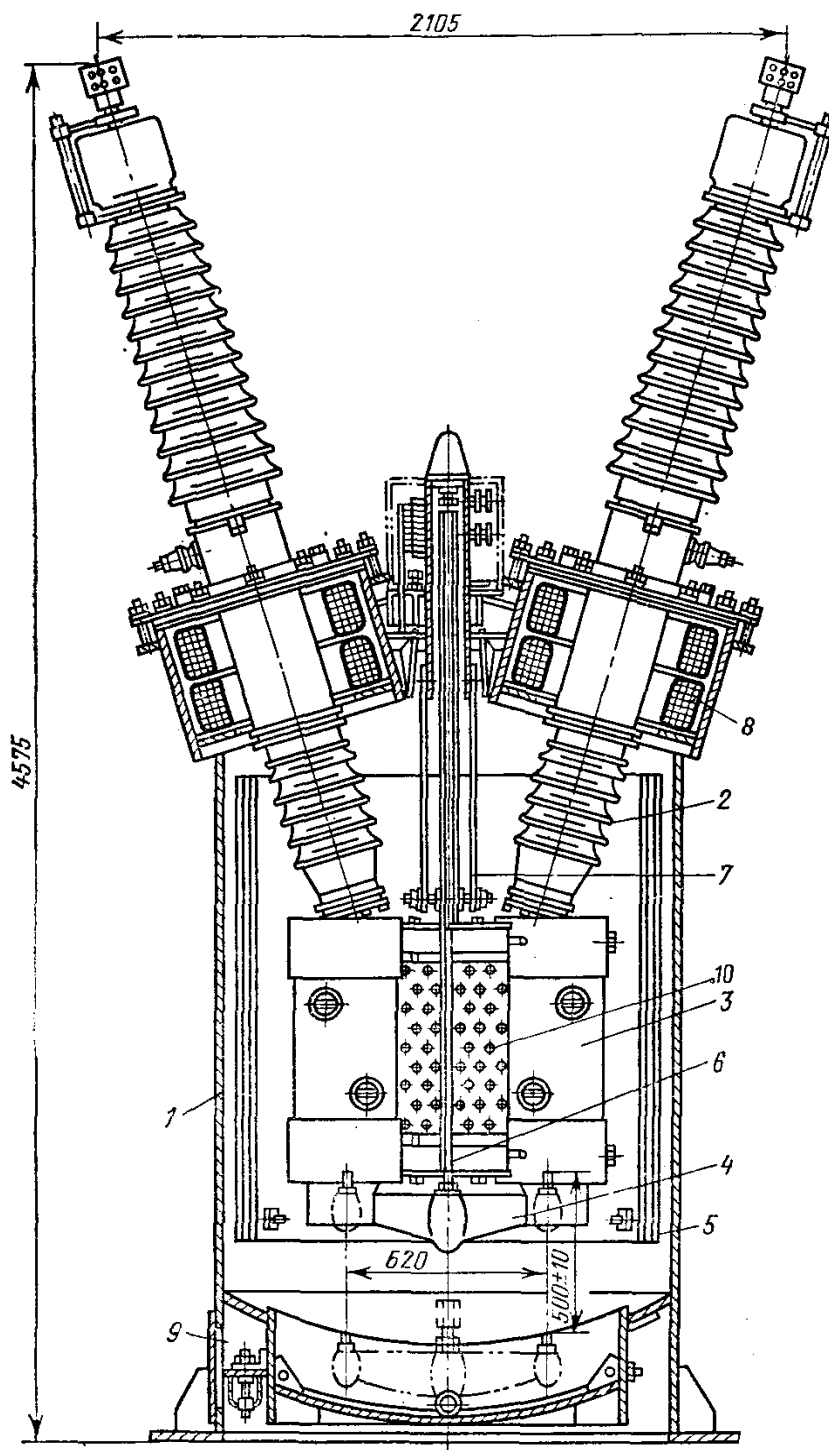


Рис. 10.2 Баковий масляний вимикач:

$U_{\text{НОМ}}=110 \text{ кВ}; I_{\text{НОМ}}=2000 \text{ А};$

$I_{\text{ВИМ.Н.}}=40 \text{ кА}$

При вимиканні газ, що викидається з камери, змушує шари масла, що лежать над камерами, рухатися з великою швидкістю нагору. Повітря, що знаходиться над маслом, може вільно виходити в атмосферу. Таким чином вдається обмежити тиск у баці. Після вимикання масло, рухаючись по інерції, вдаряє в кришку вимикача. Цей удар може бути настільки сильним, що деформуються кріплення бака до фундаменту. Фундамент вимикача повинний бути розрахований на ці навантаження.

У випадках пошкодження механізму або камер вимикача утвориться довгостроково палаюча «стояча» дуга, при цьому тиск у баці може піднятися до небезпечної величини. Вибух бака є важкою аварією, тому що масло, що виливається з його, може запалитися і викликати пожежу в розподільному пристрої. Для запобігання вибуху бака в його кришці розташовані аварійні вихлопні труби з каліброваними мембранами. При визначеному тиску мембрани руйнуються і з вимикача виливається масло, завдяки чому тиск у баці знижується до безпечних меж.

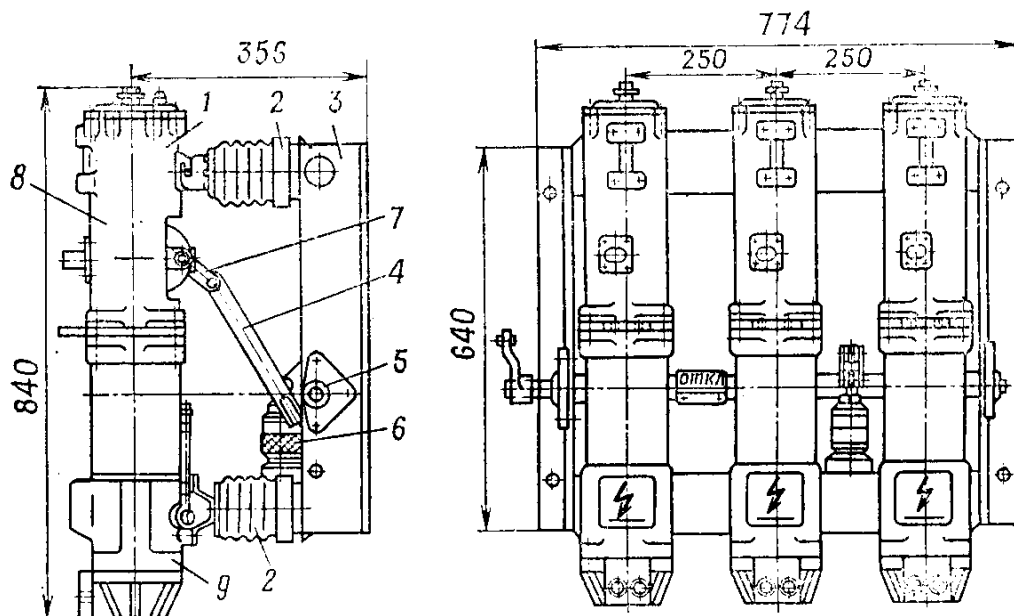
Протягом багатьох десятиріч конструкція бакових вимикачів поліпшувалася в напрямку зменшення маси, обсягу, збільшення вимикаючої здатності. Головними достоїнствами цих вимикачів є висока надійність, простота конструкції камер і механізму, висока механічна міцність елементів (камер, бака, механізму, ввідів), що дозволяє використовувати ці апарати в найважчих умовах експлуатації (при низьких температурах необхідний підігрів масла для зменшення його в'язкості). Згідно вітчизняній статистиці надійність бакових вимикачів вище надійності повітряних і маломасляних вимикачів. Великим достоїнством їх є можливість використання убудованих трансформаторів струму і ємнісних дільників напруги. Простота конструкції не вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу і складного устаткування. При напругах до 220 кВ бакові вимикачі по номінальному струму вимикання не уступають повітряним.

До недоліків вимикачів варто віднести: великі габарити і маса; необхідність періодичного очищення масла, що вимагає наявності спеціалізованого масляного господарства; складність і трудомісткість ремонту і ревізії вимикачів з напругою 110 кВ і вище. Головним недоліком є вибухо- і пожежонебезпека бакових вимикачів. Тому, по можливості їх намагаються замінити маломасляними і елегазовими.

### **10.3. МАЛОМАСЛЯНІ (МАЛООБ'ЄМНІ) ВИМИКАЧІ**

У маломасляних вимикачах з метою зменшення габаритних розмірів і маси ізоляція в основному здійснюється твердими матеріалами. Широко поширені маломасляні вимикачі серії ВМП-10 (вимикач масляний підвісного типу), призначені для роботи при номінальній напрузі 10 кВ. Номінальний струм у залежності від контактної системи змінюється від 600 до 3200 А. Номінальний струм вимикання досягає 31,5 кА при напрузі 10 кВ, номінальна потужність вимикання 550 МВ·А. Повний час вимикання приблизно 0,12...0,13 с при номінальному струмі вимикання.

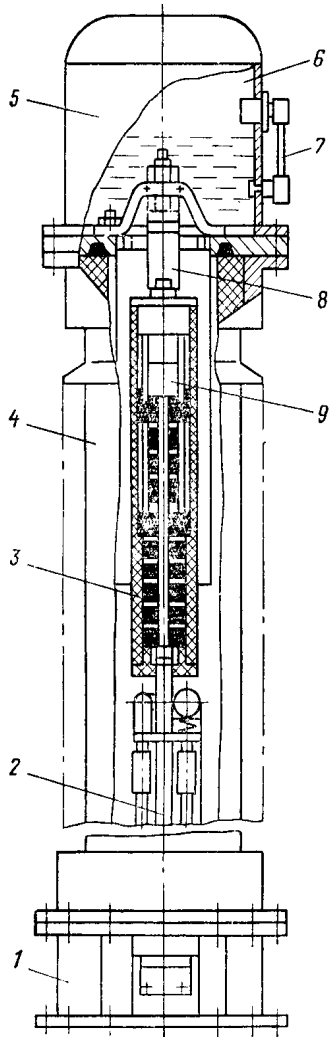
Контактна система, ДП і пристрій, що перетворює обертальний рух важелів у поступальний рух контактів, змонтовані у виді єдиного блоку полюса 1 (рис. 10.3). Цей блок за допомогою опорних ізоляторів 2 кріпиться до сталевій рами 3.



У верхній голівці полюсу 8 розташовані рухомий контакт і механізм, у нижній 9-нерухомий контакт. У рамі установлені вал вимикача 5, пружина що вимикає, пружинний буфер вмикання і масляний буфер вмикання 6. Вал 5 зв'язаний з вихідним важелем механізму полюса 7 за допомогою міцної ізоляційної тяги 4.

При вмиканні ізоляційна тяга 4 повертає вихідний важіль полюса 7 проти часової стрілки і робить замикання контактів. Пружина, що вимикає, при цьому розтягується, а пружинний буфер вмикання стискується. Цей буфер розвиває велику силу на невеликому ході, що відповідає ходу рухомого контакту в розетці, і створює необхідну для гасіння дуги швидкість переміщення рухомого контакту.

Розріз нижньої частини блоку полюса представлений на рис. 10.4. Для зменшення обгорання кінці ламелей розеточного контакту 1, що піддаються впливу дуги, облицьовані металокерамікою. Нижня голівка 2 має знімну кришку 3, на якій і укріплений розеточний контакт 1. При ревізіях і ремонтах знімна кришка 3 виймається разом з розеточним контактом 1. ДУ газового дуття знаходиться в склопоксидному циліндрі 4. ДП збирається з пластин фібри, гетинаксу і електрокартону, у яких вирізані отвори, що утворюють канали і порожнини для гасіння дуги. Кожний із трьох каналів (один з них видний на рис. 10.4) спочатку йде горизонтально, а потім вертикально. Усі пластини ДП стягаються фі-



бровими чи текстолітовими шпильками. Камера заповнена трансформаторним маслом 7. Для обмеження тиску при великих струмах і створення необхідного тиску поблизу нульового значення струму ДП має повітряний буфер А (рис. 10.4). Тиск у ДП досягає найбільшого значення поблизу максимального значення струму. Під дією цього тиску масло стискає повітря в буфері, і у ньому акумулюється енергія. При наближенні струму до нуля потужність у дузі і тиск різкий зменшуються. Енергія, накопичена в буфері, дозволяє створити поблизу нуля струму такий тиск, який необхідно для гасіння дуги.

Під дією дуги, що виникає при розходженні контактів, масло розкладається і гази, що утворюються, створюють у камері тиск. У той момент, коли тіло рухомого контакту 6 відкриє першу щілину, виникає газове дуття, і при проходженні струму через нуль можливе гасіння дуги. Овіювання дуги газами ще більш підсилюється після відкриття свіч другого і третього каналів.

Як правило, гасіння дуги з великим струмом відбувається після відкриття перших двох щілин.

При вимиканні малих струмів у камері ДП тиск невеликий і дуга не гасне після відкриття всіх трьох щілин, а затягується в масляні кишені 5 у верхній частині ДП. Коли рухомий контакт, піднімаючись нагору, входить у першу знизу кишеню 5', під дією дуги масло в кишені розкладаються, і гази прагнуть вийти вниз, охо-

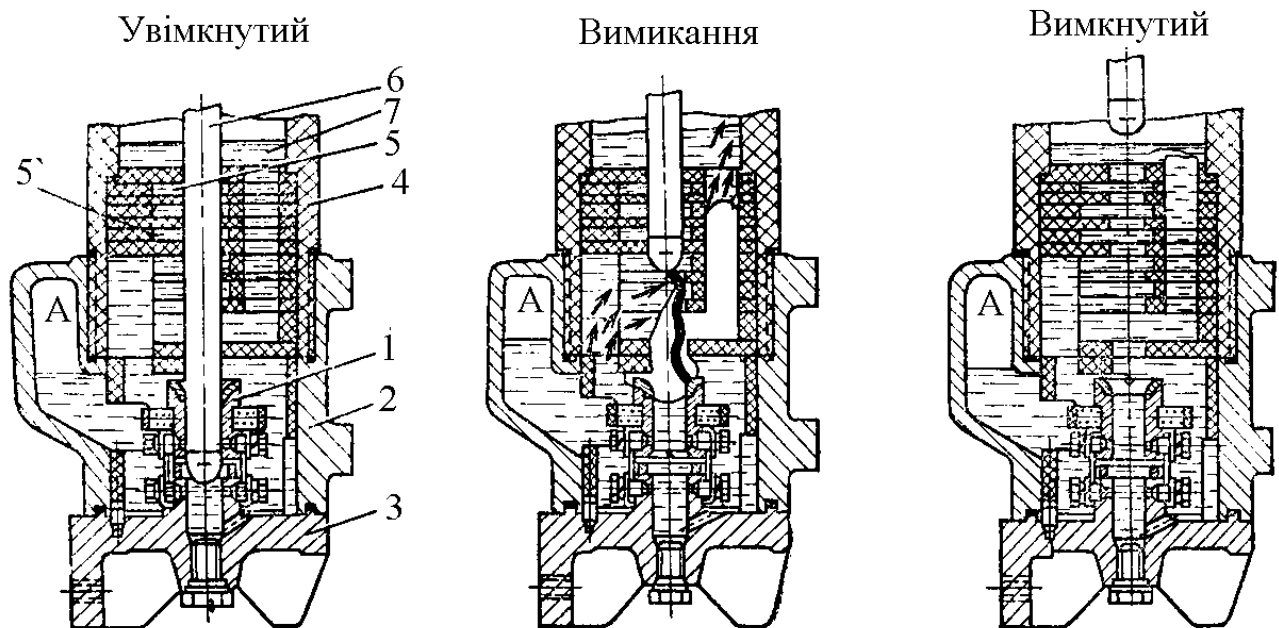


Рис. 10.4. Нижня частина полюсу вимикача ВМП - 10

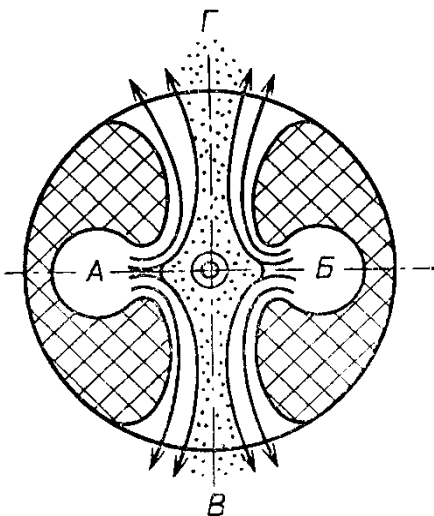
лоджуючи дуговий проміжок. Процес підсилюється в міру вмикання нових кишень. У результаті вдається надійно відключати критичні струми (1...2 кА).

Гази, що утворюються в процесі гасіння дуги, виходять через зигзагоподібний канал у верхній голівці полюса.

Щоб уникнути викиду масла з полюса в його верхній частині встановлений спеціальний масловіддільник.

При напрузі 110 і 220 кВ поки ще на окремих підприємствах використовуються бакові вимикачі з номінальним струмом вмикання 20...40 кА. У 75 % випадків струм КЗ не перевищує 20 кА і заміна їх маломасляними вимикачами дає великий техніко-економічний ефект.

Створені маломасляні вимикачі серії ВМТ на напругу 110 і 220 кВ із номінальним струмом 1000 А і номінальним струмом вмикання 20 кА. Час вмикання 0,08 с, час вмикання 0,15 с. Ці вимикачі працюють у циклі АПВ з часом безструмової паузи 0,3 с. У трифазному вимикачі ВМТ на напругу 110 кВ вмикання всіх трьох полюсів виконується одним пружинним приводом. Верхня частина одного полюса показана на рис. 10.5. Тут 1 - нижній струмопідвід, 2 - рухомий контакт круглого перерізу, 3 - дугогасильна камера, 4 - ізолятор, 5 - ковпак, 6 - розширювальний об'єм, 7 - маслопоказчик, 8 - верхній струмопідвід, 9 - нерухомий контакт. Внутрішня порожнина ДП герметизована, і нагорі знаходиться розширювальний об'єм 6, у якому мається повітря або азот при тиску 0,5...1 МПа.



**Рис. 10.6** Дугогасильна камера зустрічно-поперечного дуття

ДП вимикача залито трансформаторним маслом. При вмиканні контакт 2 рухається вниз і між контактами 2 і 9 загоряється електрична дуга. У камері швидко піднімається тиск. У вимикачі використовується камера зустрічно-поперечного дуття (рис. 10.6). Під тиском газів, що утворилися, масляний потік підводиться з каналів А і Б перпендикулярно дузі. При зіткненні з дугою масло утворить газопарову суміш, що впливає через дуттєві щілини В і Г. При цьому стовп дуги інтенсивно охолоджується і дуга гасне за 0,02—0,03 с.

Для забезпечення роботи при низьких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) вимикач постачений електропідігрівачим пристроєм. Вимикач на напругу 220 кВ має два розриви на полюс. Кожен полюс змонтований на окремій рамі. Номінальний струм

вмикання вимикача 20 кА.

При напрузі вище 220 кВ доцільне застосування декількох розривів, з'єднаних послідовно. В даний час маломасляні вимикачі з таким компонуванням будуються на напругу до 500 кВ.

У порівнянні з баковими і повітряними маломасляні вимикачі мають такі наступні переваги:

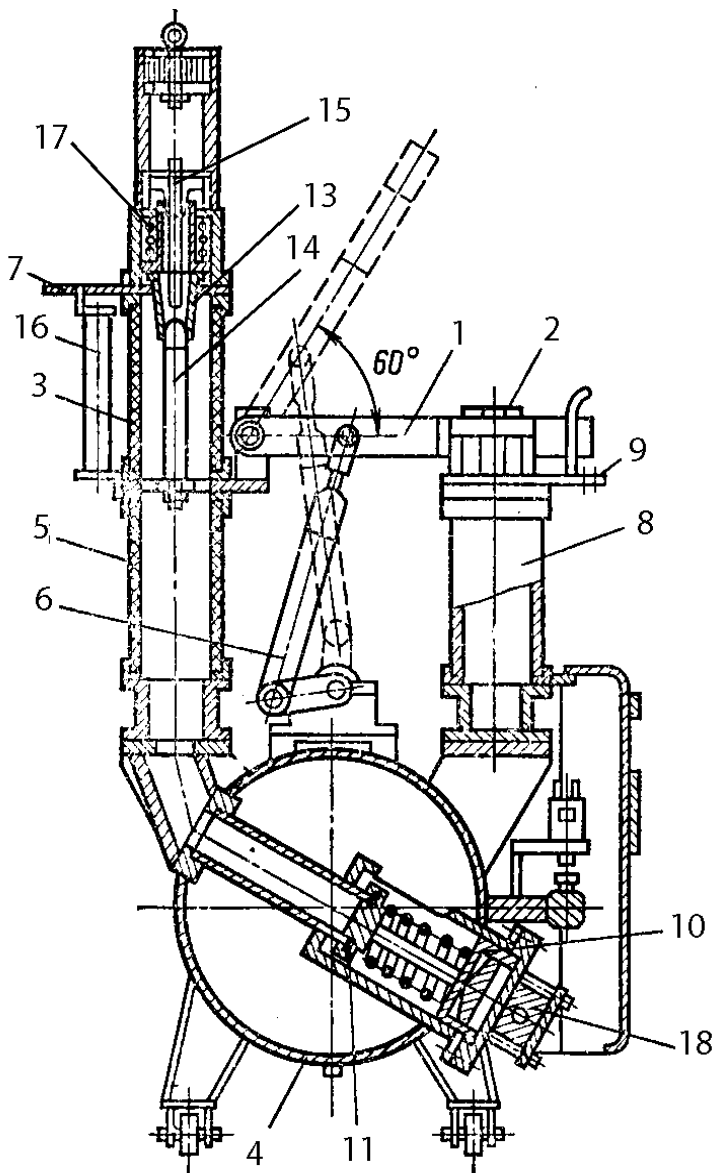
1. Вони мають менші масу і габаритні розміри при малому обсязі масла.



2. ДП завжди готово до роботи незалежно від наявності стиснутого повітря.
3. Огляд і ремонт дугогасильних камер і контактів можливий без зливу масла, що забезпечує зручність експлуатації.
4. Шляхом застосування уніфікованих вузлів вимикач досить легко можна виконати на напругу до 500 кВ.

Однак ці вимикачі мають і недоліки:

1. Вони менш надійні в роботі, чим бакові. Ізоляційні деталі, опорна ізоляція піддаються підвищеним механічним навантаженням. Номінальний струм вимикання маломасляних вимикачів поки нижче, ніж у бакових.
2. Маломасляні вимикачі, як правило, не допускають установки убудованих трансформаторів струму.



Однак, завдяки своїм незаперечним перевагам, маломасляні вимикачі знайшли дуже широке поширення в установках з напругою 6...10 кВ.

При напругах 6...10 кВ масляні вимикачі поступово витісняються електромагнітними і вакуумними, а при напругах 35 – 220 кВ – вакуумними та элегазовими.

#### 10.4. ПОВІТРЯНІ ВИМИКАЧІ

На рис. 10.7 спрощено показаний повітряний вимикач типу ВВП-35 для електротермічних установок. Параметри вимикача: номінальна напруга 35 кВ, номінальний струм 1250 А, номінальний струм вимикання 20 кА, час вимикання 0,08 с, номінальний тиск 2 МПа. Особливістю вимикача є можливість багаторазової комутації номінального струму. Принциповою особливістю ВВП-35 є наявність віддільника 1, включеного послідовно з ДП 3. Його головне призначення

- створення надійного ізоляційного проміжку після гасіння дуги і змикання контактів ДП. При вимиканні спочатку розходяться контакти в ДП і дуга гасне,

потім розходяться контакти віддільника. Після цього подача стиснутого повітря в ДП припиняється і контакти ДП змикаються. Вмикання вимикача виконується замиканням контактів віддільника 1 і 2. Робота вузлів вимикача описується нижче.

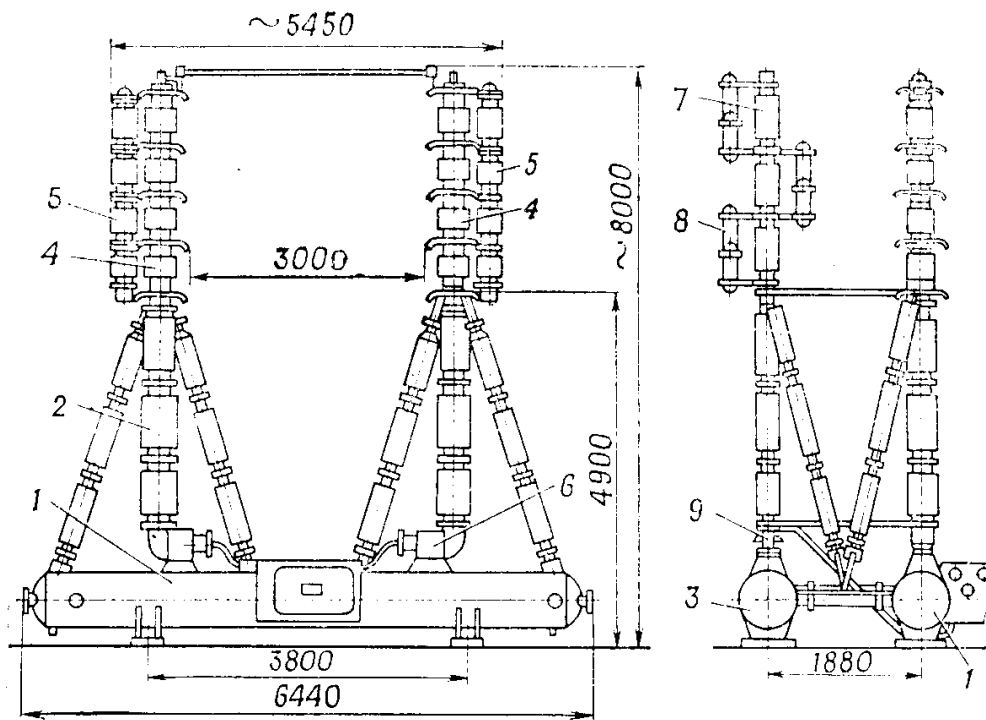
Стиснуте повітря знаходиться в сталевому баці 4. На склоепоксидній трубці 5 розташовані ДП 3. Коло високої напруги приєднується до виводів 9 і 7. Послідовно з ДП увімкнені контакти 1, 2. Нерухомий контакт віддільника 2 укріплений на склопластиковім циліндрі 8. Привод ножа віддільника здійснюється через ізоляційну штангу 6. Для обмеження перенапруг, що виникають при вимиканні навантажених трансформаторів, дуговий проміжок шунтований нелінійним резистором 16.

При вимиканні електромагніт впливає на пусковий клапан 18 і сполучає з атмосферою порожниною праворуч від поршня 10. Під дією стиснутого повітря поршень 10 переміщається вправо і вниз і відкриває головний клапан 11. Стиснуте повітря з бака 4 надходить по трубці 5 у ДП, у якому дуга між контактами 13 і 14 інтенсивно охолоджується стиснутим повітрям. Гранична довжина дуги обмежується електродом 15. Тривалість горіння дуги складає 0,5...1,5 напівперіоду.

Під час роботи ДП стиснене повітря подається в привід віддільника. Після загасання дуги привід переносить ніж віддільника 1 у положення, позначене пунктиром. Після вимикання клапан 11 закривається і під дією пружини 17 контакти ДП замикаються. Для вмикання вимикача змінюється напрямок потоку стиснутого повітря, що надходить у привід віддільника, завдяки чому ніж 1 і контакт 2 замикаються. Через невисоку надійність віддільників такі вимикачі не застосовуються у відкритих розподільних пристроях (ВРП). У ВРП застосовуються вимикачі з газонаповненим віддільником (серії ВВН), у яких контакти віддільника захищені від впливу навколишнього середовища.

На рис. 10.8 показаний полюс вимикача серії ВВН із номінальною напругою 330 кВ, номінальним тривалим струмом 2 кА і номінальним струмом вимикання 25 кА. У підставі полюса розташовані два баки зі стиснутим повітрям 1 і 3. Дугогасильні камери 4, постачені шунтуючими резисторами 5, які укріплені на порожніх порцелянових ізоляторах 2, які є повітропроводом. Стиснуте повітря в камери 4 подається клапаном 6. Кожен полюс має вісім дугогасильних камер подовжнього дуття, з'єднаних послідовно.

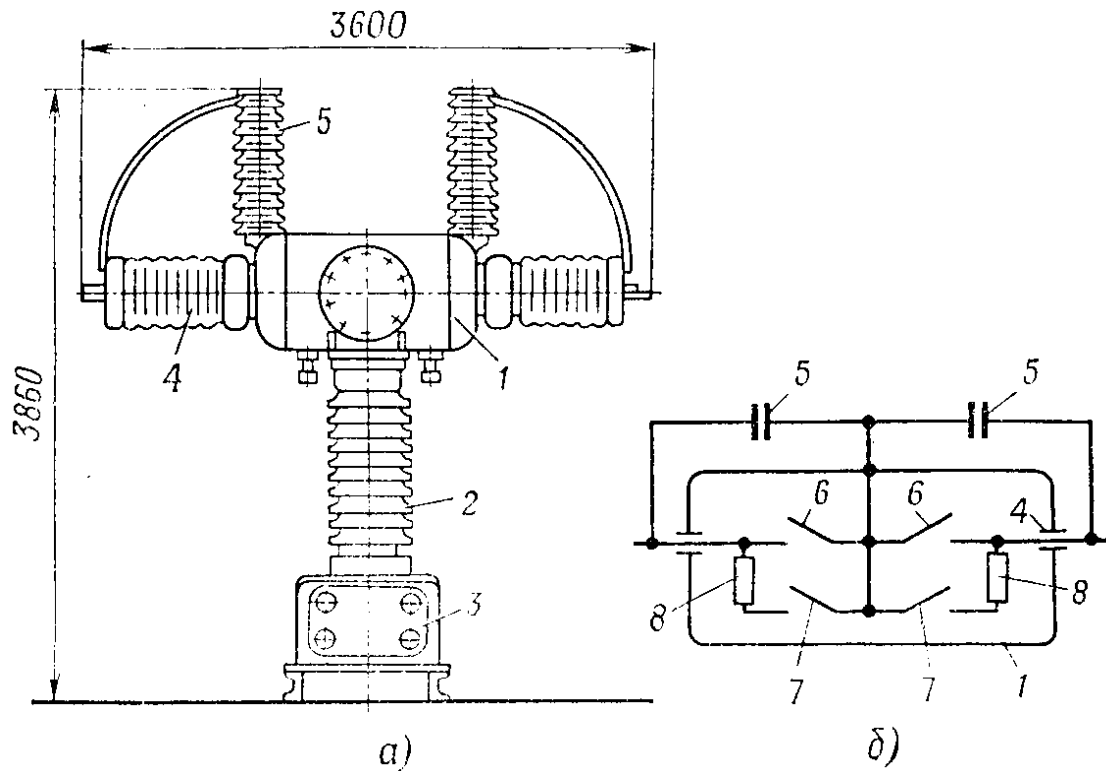
Повітрянаповнений віддільник складається із шести дугогасильних елементів 7, шунтованих конденсаторами 8. Процес вимикання протікає в такий спосіб: спочатку відкривається клапан 6, камери 4 розводять контакти і відключають струм КЗ.



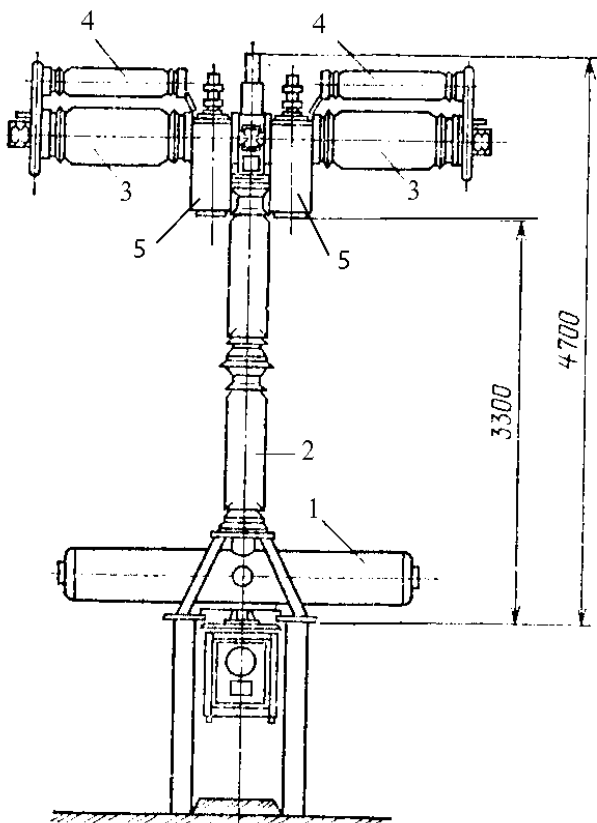
Потім відкривається клапан 9, розходяться контакти камер віддільника 7 і розривається струм шунтів. У весь час вимкненого стану вимикача віддільник знаходиться під тиском 2 МПа. Ця конструкція більш надійна, чим конструкція з відкритим віддільником, тому що тут віддільник захищений від дії навколишнього середовища. Великим недоліком вимикача є тривале перебування порцелянових ізоляторів ДУ віддільника під тиском у вимкненому положенні вимикача.

Досвід експлуатації показав недостатньо високу надійність описаної конструкції, тому такі вимикачі в даний час не випускаються. У сучасних вимикачах на напругу 110 кВ і вище відмовилися від віддільників і перейшли на дугогасильні камери, які у вимкненому положенні наповнені стиснутим повітрям.

Найбільш досконалими є повітряні вимикачі, у яких дугогасильна камера розміщується безпосередньо в баці зі стиснутим повітрям. На рис. 10.9, а показаний полюс такого вимикача серії ВВБ на напругу 110 кВ. Бак зі стиснутим повітрям 1 розташовується на опорному ізоляторі 2. У цьому ж ізоляторі проходять керуючі повітропроводи, повітря в яких знаходиться під тиском 2,6 МПа. Шафа керування 3 розташована у підставі вимикача. ДП з'єднується з зовнішнім колом струмоведучими частинами прохідних ізоляторів 4.



**Рис. 10.9** Баковий повітряний вимикач серії ВВБ-110;  
 $I_{\text{відк.н.}} = 31,5 \text{ кА}; I_{\text{ном.}} = 2000 \text{ А}$



**Рис. 10.10** Повітряний вимикач серії ВВН

Рівномірний розподіл напруги між двома розривами пристрою забезпечується за допомогою конденсаторів 5. Схема пристрою представлена на рис. 10.9, б, де 5 — шунтуючі конденсатори, що забезпечують рівність напруг на двох розривах пристрою; 6 — основні контакти; 7 — допоміжні контакти; 8 — шунтуючі резистори, що служать для зниження швидкості відновлення напруги. Струм через шунтуючі резистори вимикається контактами 7 після гасіння дуги в основних розривах 6. З рис. 10.9, б видно, що корпус бака 1 знаходиться під напругою.

У даній конструкції під високим тиском знаходиться тільки сталевий бак. Це дозволяє підвищувати тиск повітря в баці до 3,5...4 МПа і збільшувати струм, що вимикається. У вимикачах серії ВВН на кожен клас напруги створюється, власне кажучи, нова конструкція. Це

вимагає великих витрат на виробництво й експлуатацію. У сучасних вимикачах використовується модульний принцип [13]. ДП розрахований на напругу 110 кВ, може використовуватися при напрузі 220 кВ при тій же струмі вимикання, але два ДП з'єднуються послідовно, а опорна ізоляція відповідно підсилюється. На напругу 500 кВ з'єднуються п'ять ДП. Вимикачі, використовувані для розширення номінальної напруги шляхом послідовного їхнього з'єднання, називаються модулями. Перспективно також поліпшення параметрів кожного модуля. Так, удосконалення модуля ВВБ (підвищення тиску, доробка ДП) дозволило підвищити номінальну напругу з 110 до 220 кВ. При цьому скорочується число розривів вимикача в 2 рази, що дає великий техніко-економічний ефект.

На базі модуля (одного полюса), зображеного на рис. 10.9, створена серія вимикачів з номінальною напругою до 750 кВ і номінальним струмом вимикання до 40 кА. Їхній повний час вимикання складає 0,06...0,08 с у залежності від номінальної напруги. Полюс вимикача на напругу 220 кВ має чотири розриви. У порівнянні із серією ВВП габарити і маса вимикачів серії ВВБ зменшені на 20...30 %, а витрата повітря скорочена в 3 рази. Експлуатація показала їхню високу надійність. Розвитком цієї серії вимикачів є вимикач ВВБК, у якому тиск повітря піднятий до 4 МПа. У результаті конструктивних удосконалень при вимиканні створюється двостороннє несиметричне дугтя, що підвищує ефективність гасіння дуги [1]. Номінальний струм вимикання збільшений з 31,5 до 50 кА, а допустима напруга на розриві з 55 до 110 кВ. Час вимикання при цьому знижено з 0,06...0,08 до 0,04 с. Номінальна напруга вимикача ВВБК досягає 1 150 кВ.

Існує також серія повітряних вимикачів ВНВ, яка призначена для напруги 220...1150 кВ і струму вимикання до 63 кА. Модуль на напругу 250 кВ представлений на рис. 10.10. Основною особливістю модуля є розташування ДП в атмосфері стиснутого повітря при тиску 4 МПа. При вимиканні контакти ДП розходяться і відкривається вихлопний клапан, що з'єднує внутрішню порожнину ДУ з атмосферою. Після гасіння дуги контакти залишаються в розведеному стані, а вихлопний клапан закривається, ДП герметизується. Привід контактів здійснюється за допомогою легкої склопластикової тяги. На рис. 10.10: 1-бак зі стисненим повітрям; 2-опорний ізолятор; 3 — основний розрив; 4-конденсатор для вирівнювання напруги по розривах; 5—шунтуючий резистор з ДП. Електрична схема модуля аналогічна схемі рис. 10.9,б. Вимикач на 500 кВ має два модулі, з'єднаних послідовно, і три модулі при напрузі 750 кВ. Опорні ізолятори підсилюються відповідно класу напруги.

Вимикач має наступні конструктивні особливості:

1. ДУ розташовані усередині міцних склоепоксидних труб, що є баком стиснутого повітря вимикача. Така конструкція дозволяє зняти з порцеляни вплив високого тиску повітря. Порцелянова сорочка захищає склоепоксидну трубу від впливу атмосфери.

2. Тиск стиснутого повітря в ДП досягає 4 МПа, що поряд з іншими заходами забезпечує струм вимикання до 63 кА при напрузі на розриві 125 кВ.

3. ДП має два розриви. Після гасіння дуги дугогасильний контакт відходить на відстань, що забезпечує необхідну електричну міцність проміжку, і у своєму крайнім положенні впливає на вихлопний клапан ДУ. Камера ДУ герметизується, і розведені контакти знаходяться при тиску 4 МПа.

4. Привід контактів розташований на заземленому баці вимикача. Передача сили від привода до механізму контактів здійснюється механічно через легку ізоляційну склопластикову тягу. Це дозволяє одержувати повний час вимикання не більш 0,04 с.

5. При тяжких умовах відновлення напруги паралельно кожному розриву включається низькоомний шунтуючий резистор (40 Ом). З конструктивних розумінь резистор розбитий на дві частини (два контейнери). Струм резистора відключається двоступінчастою контактною системою, розташованою в одному з контейнерів.

## 10.5. ЕЛЕГАЗОВІ ВИМИКАЧІ

Подальше підвищення номінальної напруги і номінального струму в повітряних вимикачах пов'язано з великими труднощами (тиск повітря в ДП досягає 4 МПа, що вимагає великих витрат на створення механічно міцної і працездатної конструкції вимикача). Рішення такої задачі може бути отримане шляхом використання замість повітря газу, що володів би більш високою електричною міцністю і здатністю, що вимикає. Таким газом є шестифториста сірка  $SF_6$  ÷ елегаз (електротехнічний газ) [13]. У порівнянні з повітрям цей газ має такі наступні переваги:

1. Електрична міцність у 2,5 рази вище, ніж у повітря. При тиску 0,2 Мпа електрична міцність елегазу наближається до міцності трансформаторного масла.

2. Висока питома об'ємна теплоємність (майже в 4 рази вище, ніж у повітря) дозволяє збільшити навантаження струмоведучих частин і зменшити масу міді у вимикачі.

3. Номінальний струм вимикання камери подовжнього дугтя з елегазом у 5 разів вище, ніж з повітрям.

4. Мала напруженість електричного поля у стовпі дуги. Завдяки цьому різко скорочується знос контактів, зменшується ефект термодинамічного закупорювання сопла. Це дозволяє збільшити відстань між контактами, підвищити напругу на кожному контактному проміжку і припустиму швидкість відновлення напруги.

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

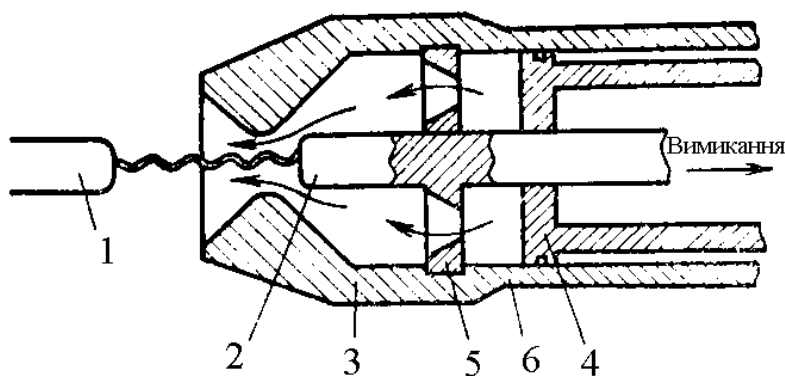
Недоліком елегаза є висока температура зріджування. Так, наприклад, при тиску 1,31 МПа перехід елегаза з газоподібного стану в рідке відбувається при температурі 0°C. Це змушує використовувати його або з пристроєм, що підігріває, або при низькому тиску. При тиску 0,35 МПа температура зріджування дорівнює -40°C. Для електричних апаратів застосовується газ з високим ступенем очищення від домішок, що ускладнює і здорожує його одержання.

Дугогасильна здатність елегазу найбільш ефективна при великій швидкості його струменя відносно палаючої дуги. Можливі наступні виконання ДУ з елегазом:

- 1) з автопневматичним дуттям (необхідний для дуття перепад тиску створюється за рахунок енергії привода);
- 2) з охолодженням дуги елегазом при її руханні, викликаному взаємодією струму з магнітним полем.
- 3) з гасінням дуги за рахунок перетікання газу з резервуара з високим тиском у резервуар з низьким тиском (вимикачі з подвійним тиском).

В даний час широко застосовується перший спосіб. Дугогасильний пристрій з автопневматичним примусовим дуттям показаний на рис. 10.11. ДП розташовується в герметичному баці з тиском елегаза 0,2...0,28 МПа. При цьому вдається одержати необхідну електричну міцність внутрішньої ізоляції. При вимиканні дуга виникає між нерухомим 1 і рухомим 2 контактами. Разом з рухомим контактом 2 при вимиканні переміщуються сопло 3 із фторопласта, перегородка 5 і циліндр 6. Тому що поршень 4 при цьому є рухомим, елегаз стискується і його потік, проходячи через сопло, подовжньо омиває дугу і забезпечує її ефективне гасіння.

Для комплектних розподільних пристроїв розроблений елегазовий вимикач з номінальною напругою 110 і 220 кВ, номінальним струмом вимикання 40 кА. Час вимикання 0,065 с, час вмикання 0,08 с, номінальний тиск елегазу 0,55 МПа, привід пневматичний з тиском повітря 2 МПа [13].



**Рис. 10.11** Схема дугогасильного пристрою елегазового-

Такий елегазовий вимикач має високі технічні показники і допускає 20-кратне вимикання струму КЗ граничного значення 40 кА без ревізій. Витік елегазу з бака не перевищує 1 % у рік. Термін служби вимикача до капітального ремонту складає 10 років. Розроблені ДУ з номінальною напругою 220 кВ на один розрив і струмом вимикання 40 кА при високій швидкості відновлення напруги. Дослідні зразки елегазових вимикачів допускають струм вимикання до 100 кА при напрузі на розриві 245 кВ і струм 40 кА при напрузі на розриві до

362 кВ. Елегазові вимикачі найбільш перспективні для напруг вище 35 кВ і можуть бути створені на напругу 800 кВ і вище [13].

У сфері використання елегазового комутаційного обладнання на напругу 6...10 кВ заслуговують уваги розробки фірми “Merlin Gerin – Groupe Schneider” (автоматичні вимикачі серії LF, високовольтні контактори Rollarc R400) та фірми АВВ (автоматичні вимикачі Н-12).

Такі комутаційні апарати змонтовані на спеціальних викатних елементах вітчизняного виробництва і призначені для заміни викатних елементів з мало масляними вимикачами комплектних розподільних пристроїв КРУ-2-10 з метою модернізації, удосконалення, підвищення надійності, безпеки і ресурсу роботи розподільного пристрою.

Трифазні високовольтні контактори внутрішньої установки Rollarc випускаються на номінальну напругу 6...10 кВ і номінальний струм до 400 А, і призначаються для комутації двигунного навантаження і можуть бути спеціально адаптованими для управління конденсаторними пристроями та індуктивним навантаженням – трансформаторами. Можуть бути використані в системах електропостачання з рівнем струмів КЗ до 50 кА при  $U_{ном} = 6$  кВ та 40 кА при  $U_{ном} = 10$  кВ.

Елегазові автоматичні вимикачі LF та Н-12 випускаються на номінальні струми 630...3150 А при номінальній напрузі 6...10 кВ при номінальному струмі вимикання до 40 кА.

Комутаційний ресурс контактора Rollarc – 300 000 циклів “вмикання - вимикання”, автоматичних вимикачів LF та Н-12 не менш 10 000 циклів при номінальному тривалому струмі і більш 50 вимикань номінальних струмів КЗ.

Принцип гасіння дуги заснован на техніці обертання дуги в елегазовому середовищі, автокомпресії та ефекті теплового розширення, що у комплексі дозволяє найбільш ефективно використати фізико-хімічні властивості SF<sub>6</sub>.

## 10.6. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВИМИКАЧІ

На відміну від масляних і повітряних вимикачів електромагнітні вимикачі для своєї роботи не вимагають масла чи стиснутого повітря, більш прості і зручні в експлуатації, мають високу надійність і більший термін служби.

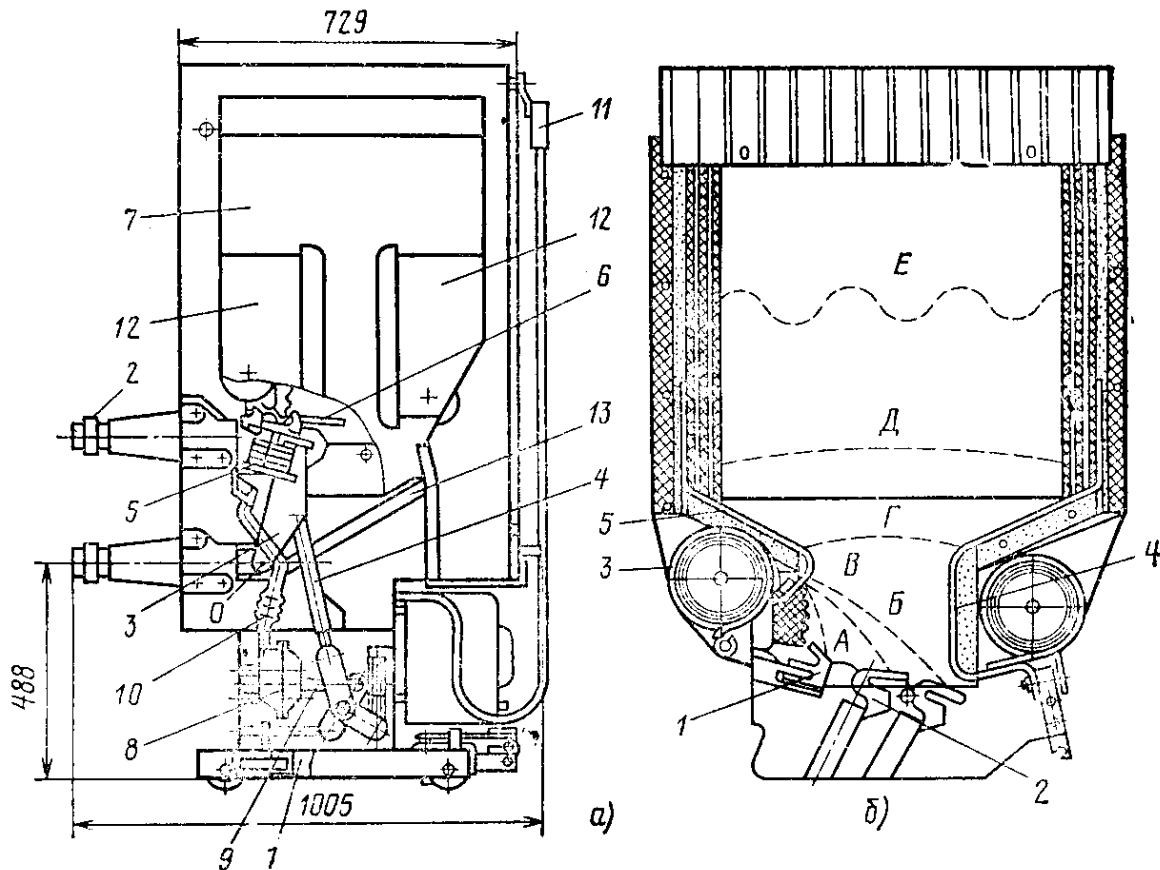
Електромагнітний вимикач серії ВЕ на напругу 6 і 10 кВ, номінальний струм до 3,6 кА і номінальний струм вимикання до 31,5 кА показаний на мал. 10.12, а. Три полюси вимикача змонтовані на викатному візку 1. При переміщенні візка вліво пальцевий контакт 2 з'єднується з мідною шиною комплектного розподільного пристрою (КРП). Рухомий контакт 3 вимикача має обертальний рух відносно точки О і приводиться в дію ізоляційною штангою 4, з'єднаною з механізмом вимикача. Розривний контакт полюса має головні пальцеві контакти 5 і дугогасильні контакти 6, розташовані над головними контактами. ДП вимикача 7 розташовано над контактною системою.



Для поліпшення гасіння малих струмів вимикач має пристрій повітряного дуття 8, що приводиться в дію тягою 9, з'єднаною з механізмом привода вимикача. При вимиканні вимикача в дуттєвому пристрої створюється стиснуте повітря, що протікає по трубці 10 і впливає на дугу, переміщаючи її нагору і включаючи котушки магнітного дуття.

Приєднання кіл привода і сигналізації до схеми керування КРП виробляється за допомогою штепсельного контактної роз'єму 11.

Права котушка магнітного дуття 12 з'єднується з нижнім виводом вимикача шиною 13.



**Рис. 10.12 Електромагнітний вимикач:**  
а – загальний вид вимикача ВЕ-10; б – дугогасильний пристрій

ДП вимикача зображене на рис. 10.12, б. При розмиканні дугогасильних контактів 1 і 2 виникає дуга А, що під дією електродинамічних сил і конвекційних потоків повітря переміщається в положення Б. Цьому також сприяє повітряний дуттєвий пристрій. Один кінець дуттєвої котушки 3 з'єднаний з нерухомим контактом 1, другий - з лівим рогом 5. При переміщенні дуги нагору вона торкається рогу 5, при цьому ділянка дуги між контактом 1 і нижнім кінцем рога 5 шунтується дуттєвою котушкою. Тому що повний опір котушки малий, то ця ділянка дуги гасне і котушка 1 вмикається в коло, що комутується, послідовно. Магнітний потік, створюваний котушкою 3, проходить по полюсних наконечниках (поз. 12, рис. 10.12, а), за допомогою яких магнітне поле направляється перпендикулярно площини (рис. 10.12, б). Сили взаємодії струму дуги і маг-

нітного поля переміщують дугу нагору і зтягують її в ДП, що складається з пакета керамічних пластин з вирізами. При переміщенні дуги в положення  $\Gamma$  правий кінець дуги переходить у дугогасильний риг  $4$  і включається друга система магнітного дуття. У результаті дуга рухається з великою швидкістю (близько 100 м/с). В міру переміщення нагору дуга деформується, приймаючи зигзагоподібну форму  $E$  (у горизонтальній площині), подовжується і тісно стикається з пластинами ДП. Це приводить до росту опору дуги і напруги на ній. Через ефективний відвід тепла від дуги градієнт напруги на ній, В/м, не залежить від струму [13] і дорівнює

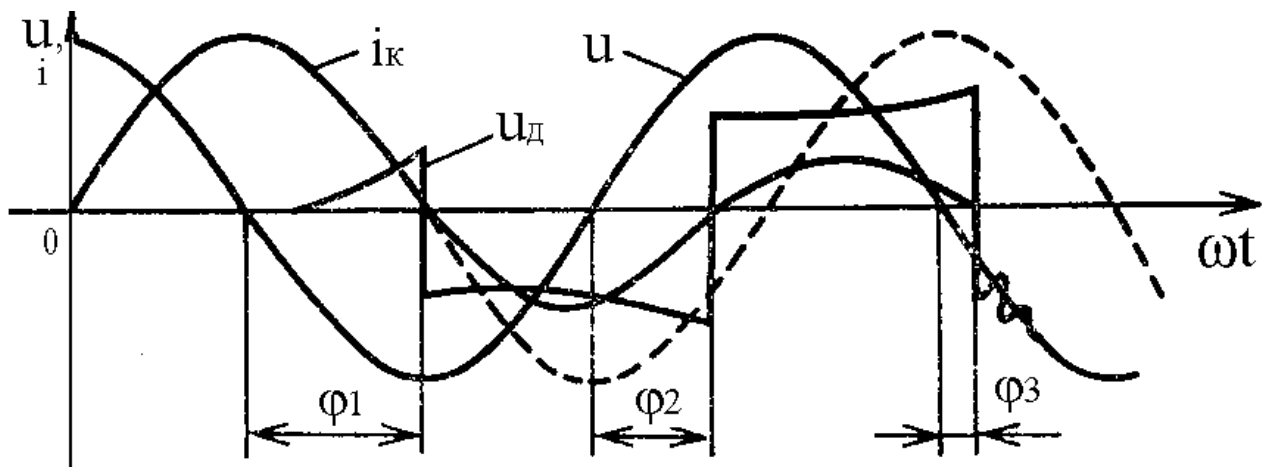
$$E = 190/\sqrt{\delta} , \quad (10.3)$$

де  $\delta$  — відстань між пластинами, м.

Напруга на дузі

$$U_{\text{д}} = El_{\text{д}} = 190 l_{\text{д}}/\sqrt{\delta} \quad (10.4)$$

де  $l_{\text{д}}$  — довжина дуги, м.



У результаті опір дуги стає більше опору  $X_{\text{к}}$  кола, що комутується, струм у колі і зсув фаз між струмом і напругою кола зменшуються, що приводить до полегшення умов відновлення напруги на контактному проміжку.

Умова гасіння дуги [13]:

$$U_d = E l_d \geq E_m \sin \varphi_{гр} \quad (10.5)$$

де  $E_m$  — амплітуда ЕДС джерела, В; ( $\varphi_{гр}$  — граничний кут зсуву фаз, при якому напруга на дузі більше чи дорівнює напрузі, що повертається, промислової частоти,  $\varphi_{гр} = 32,5^\circ$  [13].

Значення  $l_d$  і  $\delta$  вибираються так, щоб дотримувалася нерівність (10.5). При  $\varphi_{гр} = 32,5^\circ$  амплітуда струму в колі зменшується до  $0,463 I_m$  [13].

Криві струму і напруг процесу вимикання електромагнітного вимикача представлені на рис. 10.13. Тут  $u$  - напруга джерела живлення;  $i_k$  — струм КЗ;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - кути зсуву фаз при КЗ. До моменту розмикання контактів  $\varphi_k = 90^\circ$ . При першому проходженні через нуль напруга на дузі  $u_d$  мала і дуга загоряється знову. В міру подовження й охолодження дуги напруга на ній збільшується. До моменту третього проходження струму через нуль напруга  $u_d$  значно більша напруги що повертається, промислової частоти, і при цьому забезпечується нерівність (10.5). Через значний опір дуги струм  $i_k$  до моменту гасіння дуги значно зменшується.

Описаний вимикач забезпечує  $10^4$  комутаційних циклів при  $I_{ном} = 1600$  А и  $5 \cdot 10^3$  циклів при  $I_{ном} = 3600$  А без ревізії і ремонту. Механічна зносостійкість його складає  $5 \cdot 10^4$  циклів. Тому вимикачі цієї серії застосовуються при великій частоті операцій.

Вимикач має пружинний привод, що заводиться двигуном. Недоліком електромагнітних вимикачів є велика провідність стінок ДУ. Вузькі щілини ДУ нагріваються дугою до дуже високих температур, при яких починають проводити струм, що може приводити до пробою по розпеченій поверхні пластин. Через цього номінальна напруга електромагнітних вимикачів не перевищує 10 кВ [13].

## 10.7. ВАКУУМНІ ВИМИКАЧІ

У вакуумних вимикачах контакти розходяться в середовищі з тиском  $10^{-4}$  Па. При такому вакуумі дугогасильний проміжок має дуже високу електричну міцність приблизно 100 кВ/мм. Мала щільність повітря створює можливість гасіння дуги без додаткових ДП за час 0,01...0,02 с. Усе це дає можливість створити вимикачі з малим зносом контактів, що працюють при мінімальному технічному обслуговуванні протягом декількох десятків років. Це визначає перспективність розвитку і широкого застосування вакуумних вимикачів. Процес гасіння дуги у вакуумі розглянутий у 3.3.

Мала щільність середовища обумовлює дуже високу швидкість дифузії зарядів через велику різницю щільності часток у розряді і вакуумі. Швидка дифу-

зія часток, висока електрична міцність вакууму дозволяють ефективно гасити дугу у вакуумному вимикачі.

Для роботи вакуумного вимикача має велике значення дегазація контактів, тому що адсорбовані ними гази при розігріві виділяються і погіршують вакуум. З метою видалення газових включень з контактів їх нагрівають протягом декількох годин до червоного розжарювання.

При роботі вимикача розпилені матеріали контактів осаджуються на поверхні ізоляційного циліндра, що створює можливість перекриття ізоляції. Для захисту циліндра від парів металу електроди захищаються спеціальними металевими екранами 8, 9 (рис. 10.14). При відсутності екранів електрон, розганяючись в електричному полі по довгому шляху, здобуває високу енергію і при зіткненні з молекулою може викликати її іонізацію. Завдяки екранам 8 і 9 електричне поле розбите на дві невеликих ділянки (між електродами 9 і 8 і між електродами 8 і 9). Можливість перекриття усередині камери різко знижується. При змінному струмі після проходження струму через нуль відбувається швидке розсмоктування зарядів унаслідок дифузії, і через 10 мкс між контактами відновлюється електрична міцність вакууму. Швидке наростання електричної міцності проміжку після проходження струму через нуль є великим достоїнством вакуумних вимикачів.

Для вакуумної дуги характерний різкий обрив (зріз) струму при підході до нульового значення. При зменшенні струму падає тиск парів металу, дуга стає несталою і гасне. Різкі зменшення струму можуть викликати перенапруги, небезпечні для устаткування, що вимикається. Струм зрізу залежить як від параметрів кола, що вимикається, так і від властивостей матеріалу контактів. Вольфрам має стійкість до зварювання, високу температуру плавлення і зносостійкість. Однак при вольфрамових контактах значення струму зрізу і перенапруг

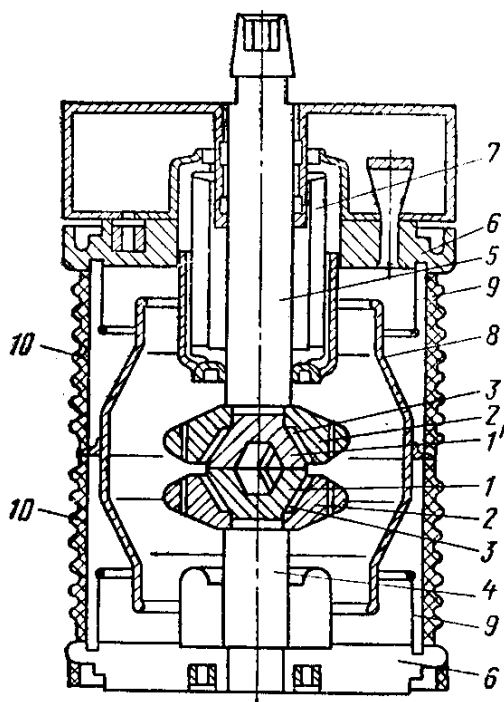


Рис. 10.14 Вакуумна дугогасильна камера

дуже високі, тому що пари вольфраму створюють низький тиск. Перенапруги при мідних контактах у 2,5 рази нижче, але вони більш піддані зварюванню і зносу. Ці протиріччя усуваються, якщо частина контактної поверхні виконана з дугостійкого металу (молібден), а інша з матеріалу з високим тиском пар (сурма). Гарні результати дає спеціальна металокераміка [13]. Наявність вакууму погіршує охолодження контактів. Однак за рахунок збільшення розмірів шин, що підводять струм, удосконалювання конструкції ДП і контактних матеріалів вдається довести тривалі струми до необхідних значень.

У вакуумній дугогасильній камері (рис. 10.14) контактний стрижень 4 з контактним наконечником 1—2 жорстко укріплений у металевому фланці 6 керамічного корпусу

10. Контактний стрижень рухомого контакту 5 зв'язаний із сільфоном 7, виконаним з нержавіючої сталі. Сільфон являє собою циліндричну еластичну гармошку. Тому стрижень 5 має можливість осевого переміщення. Внутрішня порожнина сільфона зв'язана з атмосферою, тому контакт 3 верхнього контакту натискає на контакт 3 нижнього контакту із силою, рівною добутку площі сільфона на атмосферний тиск, що досить для пропуску невеликого номінального струму.

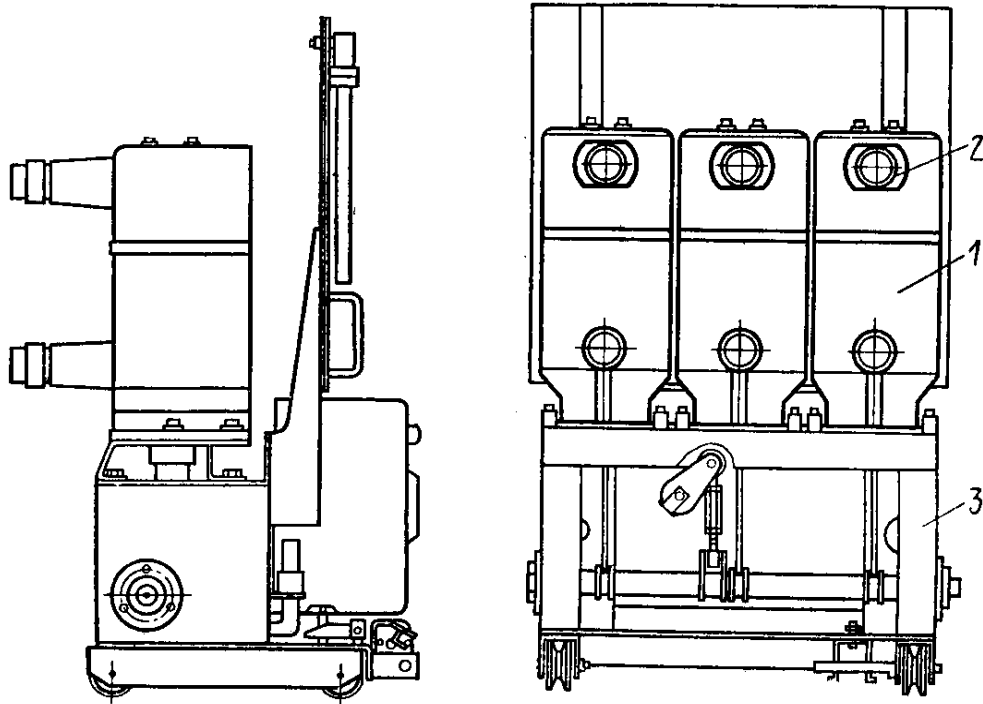
При великих номінальних струмах і для одержання необхідної динамічної стійкості ставиться додаткова пружина, що створює необхідне натискання контактів. Металеві екрани 8 і 9 служать для вирівнювання електричного поля між контактами з метою підвищення електричної міцності. Екран 8 захищає також кераміку 10 від напилювання парів металу, що утворюються при гасінні дуги. Контакти 1 і 2 мають форму, показану на рис. 10.14. Торкання контактів 1 відбувається в шести точках, що дозволяє знизити перехідний опір і зменшити температуру контактів. Слід зазначити, що тепло, виділюване в контактах 1, 1' і контактних стрижнях 4, 5, відводиться в основному теплопровідністю до нижнього фланця 6 і шинам, що з'єднується з контактом 5. Через високий вакуум віддача тепла в радіальному напрямку йде тільки за рахунок випромінювання.

Переміщення дуги по контактах з великою швидкістю за рахунок поперечного магнітного поля дозволяє зменшити ерозію контактів і знизити кількість парів металу у вакуумній дузі. При таких контактах удалося підняти номінальний струм вимикання до 31,5 кА при напрузі 10 кВ. Однак при великих струмах вимикання напруга на дузі починає рости зі збільшенням струму (до 100 В и вище). При цьому енергія дуги збільшується, процес гасіння ускладнюється. Як показали дослідження, якщо потужна вакуумна дуга знаходиться в подовжнім магнітному полі (індукція спрямована по осі камери), те вдається знизити напругу на дузі при великих струмах (до 50 В) і вимикати струми 100 кА при напрузі мережі 10 кВ [13].

Загальний вид вимикача, що використовує вакуумні ДП, даний на рис. 10.15. Дугогасильні камери 1, залиті в епоксидний компаунд, мають вихідні контакти 2 у виді розеток. ДП укріплені на візку 3, на якому розташований механізм і привод вимикача.

Головні переваги вакуумних вимикачів перед іншими типами:

- відсутність спеціального дугогасильного середовища, що вимагає заміни;
- висока комутаційна здатність і зносостійкість, що забезпечує термін служби вимикачів до 25 років при мінімальних експлуатаційних витратах;
- швидке відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку;
- повна вибухо- і пожежонебезпечність;
- висока швидкодія;
- широкий діапазон робітників від 70 до +200 °С;
- відсутність екологічно небезпечних продуктів в процесі роботи, при аваріях та утилізації.



До недоліків можна віднести: виникнення великих перенапруг при вимиканні індуктивного навантаження, що може приводити до ушкодження ізоляції; великі труднощі при створенні вимикачів на номінальну напругу 100 кВ і вище, коли приходиться з'єднувати кілька розривів послідовно; складність розробки і виготовлення, великі витрати для організації виробництва. Проте при масовому виробництві собівартість вакуумного вимикача наближається до собівартості маломасляних і електромагнітних. При напрузі до 35 кВ вакуумний вимикач є найбільш перспективним, особливо при вимиканні великих струмів високої частоти.

При масовому виробництві вакуумні вимикачі усього на 5...15% дорожче маломасляних і дешевше електромагнітних. Економія експлуатаційних витрат обумовлює усе більш широке поширення вакуумних вимикачів (у Японії більше 50 % усіх високовольтних вимикачів вакуумні).

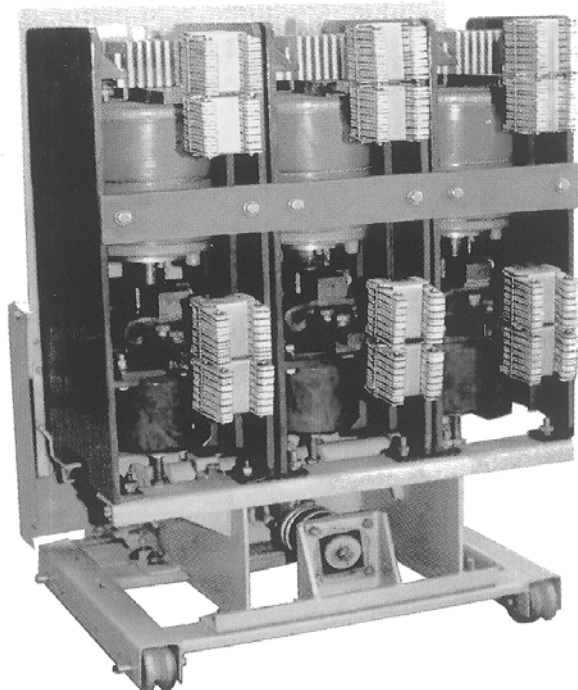
Серед сучасних розробок вакуумних апаратів слід відзначити вакуумні вимикачі високої комутаційної здатності типу ВВЕ – (С)М – 10 – 40 [1] та вакуумні вимикачі нового покоління типу ВВ/TEL – 10 – 20 [2].

Вакуумні вимикачі ВВЕ – (С)М – 10 – 40 на номінальну напругу 10 кВ, номінальні струми 2000 – 3150 А, номінальний струм вимикання 31,5 та 40 кА є найбільш потужними апаратами по комутаційній здатності серед вакуумних вимикачів. Вони призначені для застосування у комплектних розподільних пристроях як ввідні та секційні апарати енергоємних промислових підприємств, розподільних пристроїв власних потреб електростанцій (теплових і атомних), нафто- і газо промислових комплексів. Ці вимикачі розроблені для заміни мало-

масляних вимикачів типу ВМПЕ – 10 – 31,5/3150 і електромагнітних типу ВЕМ – 6 – 40/3150, перед якими вони мають зазначені вище переваги.

Загальний вид вимикача типу ВВЕ – М – 10 – 40/3150, виготовленого у виді вискатного елемента показаний на рис. 10.16.

Повний час вимикання такого вимикача з електромагнітним приводом скла-

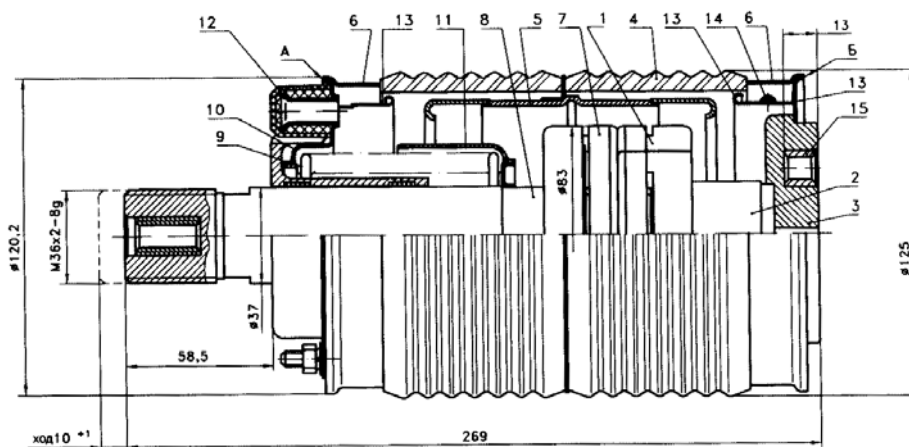


дає не більш 0,05 с, власний час вимикання – 0,03 с. Комутаційна зносостійкість при номінальному струмі складає  $10^4$  циклів “вмикання – вимикання”, а при номінальному струмі вимикання - 50 циклів.

Створення вимикачів з зазначеними параметрами стало можливим після розробки вакуумної дугогасильної камери (ВДК) типу КДВХ 4 – 10 – 40/3150 (рис. 10.17).

ВДК складається з трьох основних вузлів: струмоуводу, корпусу, струмовиводу. Струмоувід містить контактний вузол 1, мідний стрижень 2, і мідний фланець 3. Корпус ВДК містить у собі два керамічних ізолятори 4, які пайкою герметично з'єднані між собою. Між ізоляторами упаяне кільце, до якого кріпиться

екран 5. Екран 5 охороняє внутрішню поверхню ізоляторів 4 від впливу електричної дуги і продуктів ерозії контактів. З торців корпусу припаяні коварові кільця 6, зварені з фланцем 3. Струмовивід складається з контактної вузла 7 і мідного стрижня 8.



**КДВХ 4 – 10 – 40/3150**

Рухомість струмовиводу щодо корпусу ВДК забезпечується приєднанням мідного стрижня 8 до фланця 9 через сильфон 10. Для захисту сильфона від дуги продуктів ерозії мається екран 11. Для з'єднання вузлів ВДК – струмоуводу, корпусу і струмовиводу – використовується аргоно-дугове зварювання по замикаючим швам А і Б. Відкачка газів з порожнини ВДК у процесі виготовлення здійснюється через штенгель 12. Екрани 13 призначені для вирівнювання електричного поля уздовж поверхні ізоляторів 4. Підтримка вакууму в процесі експлуатації на належному рівні здійснюється геттером 14, що виконаний з пористого титана. Приєднання фланця струмоуводу до зовнішньої силової мережі здійснюється за допомогою втулок 15, упаяних у фланець 3. Струмівивід приєднується до зовнішньої силової мережі за допомогою різьблення на стрижні 8 струмовиводу, що обжимається розрізною гайкою.

Форма контактів 1 і 7 виконана такою, щоб при розведенні струмоуводу і струмовиводу виникаюча дуга мала дифузійний характер через вплив подовженого магнітного поля, що утворюється за рахунок струму, що протікає, по контактному вузлу спеціальної форми. Дифузійна форма дуги дозволяє мати невелику ерозію контакту і сприяє швидкому охолодженню дуги при переході струму через нуль. Це дозволило при діаметрі контакт-деталі 82 мм відключати амплітуду струму до 82 кА (діюче значення 40 кА при аперіодичній складовій 40 %). Спеціально скоординована система екранів вакуумної дугогасильної камери дозволяє досягти напруги промислової частоти 42 кВ, що витримується, протягом 1 хв, стандартного грозового імпульсу 1,2/50 мкс амплітудою 95 кВ і зрізаного стандартного грозового імпульсу. Перехідний опір камери лежить у межах 9...12 мкОм [1].

## 10.8. ВИБІР ВИМИКАЧІВ

При виборі вимикача його номінальні параметри порівнюються з параметрами мережі в місці його установки. Вимикач вибирається по найбільш важкому режиму роботи, що можливий в експлуатації.

Номінальна напруга вимикача  $U_{\text{ном.}}$  повинна дорівнювати чи бути більше номінальної напруги мережі, що захищається  $U_{\text{ном.м}}$

Номінальний тривалий струм вимикача  $I_{\text{ном.}}$  повинний бути більше номінального струму установки  $I_{\text{ном.у}}$ .

Номінальний струм вимикання вимикача  $I_{\text{вим.н.}}$  повинний бути більше максимального розрахункового струму короткого замикання  $I_{\text{к}}$  до моменту розбіжності контактів.

При визначенні  $I_{\text{к}}$  необхідно розглянути всі можливі варіанти КЗ і вибрати найбільш важкий ймовірний режим. Як правило, найбільш важкі режими створюються при вимиканні трьох- і однофазного КЗ на землю. Розрахунок аперіодичної складової ведеться з умови, що КЗ відбулося в момент, коли напруга в одній з фаз дорівнює нулю.

При виборі вимикача слід мати на увазі, що в момент розмикання контактів вимикача аперіодична складова струму КЗ не повинна перевищувати аперіоди-



чний струм, гарантований заводом-виготовлювачем. Як правило цей струм виражається у відсотках номінального струму вимикання.

Розрахунковий час розмикання береться рівним мінімально можливому.

Поряд з номінальним струмом вимикання необхідно враховувати цикли (послідовність вмикань і вимикань), при яких вимикач працює. Номінальний струм вимикання вимикачів без АПВ гарантується при циклі “Вимикання” – 180 – “Вмикання-Вимикання” – 180 – “Вмикання-Вимикання”. Для вимикачів, що працюють у циклах багаторазового швидкодіючого АПВ, можливо зменшення номінального струму вимикання, особливо при другому чи третьому АПВ.

Термічна стійкість перевіряється з умови протікання через вимикач струму КЗ протягом максимального часу, обумовленого спрацьовуванням захисту.

Номінальний струм електродинамічної стійкості вимикача повинний перевищувати максимально можливе значення ударного струму КЗ, що може бути в установці. Звичайно порівнюють миттєві значення піка струму.

Вимикачі, що випускаються промисловістю, випробуються при швидкостях відновлення напруги, що є типовими. Однак у деяких випадках необхідно проводити розрахунок швидкості відновлення напруги в проєктованих мережах і порівнювати з умовами, що мали місце при іспитах апарата. Особливо тяжкі умови з цього погляду мають місце при КЗ на затисках потужних генераторів, трансформаторів і близьких КЗ. Іноді потрібно установка спеціальних шунтуючих резисторів для зниження швидкості відновлення напруги. Для потужних системних вимикачів, від роботи яких залежить стійкість паралельно працюючих мереж, важливим параметром є час вимикання і час повторного вмикання. Іноді ці параметри диктують вибір типу вимикача і його привода.

При виборі типу вимикача слід враховувати такі наступні обставини:

1. При номінальній напрузі 6...10 кВ і рідких комутаціях доцільне застосування маломасляних і електромагнітних вимикачів. При частих комутаціях рекомендується застосовувати вакуумні, елегазові і електромагнітні вимикачі, що мають великий термін служби.

2. При номінальній напрузі 35...110 кВ і номінальних струмах вимикання до 20 кА доцільно застосовувати маломасляні вимикачі. При великих номінальних напругах і великих номінальних струмах вимикання застосовуються повітряні і елегазові вимикачі.

При економічній оцінці обраного типу вимикачів варто врахувати, що, незважаючи на те, що вакуумні вимикачі мають декілька більшу вартість, застосування їх більш виправдано через малі витрати на технічне обслуговування і великий термін служби ДП (до 25 років).

Висока зносостійкість вакуумних ДП дозволила створити також вакуумні контактори, прикладом яких може бути трифазний контактор КВТ-6/10-400-4-У2 з наступними параметрами [13]: номінальна напруга 6 і 10 кВ; номінальний струм 400 А; номінальний струм вимикання 4 кА; комутаційна зносостійкість при номінальному струмі -  $10^5$  циклів, при струмі 4 кА—50 циклів; механічна зносостійкість  $10^6$  циклів; частота включень у годину 300. Ведуться роботи що-

до збільшення номінальної напруги одного розриву вимикача до 80 кВ при струмі вимикання 40 кА.

### *Запитання для самоперевірки*

- 1. Основні параметри вимикачів.*
- 2. За якими ознаками і як класифікуються вимикачі високої напруги?*
- 3. Переваги і недоліки багато об'ємних масляних вимикачів.*
- 4. Дати порівняльний аналіз мало масляних та електромагнітних вимикачів.*
- 5. Які переваги мають елегазові вимикачі високої напруги у порівнянні з повітряними?*
- 6. Дати порівняльний аналіз електромагнітних і вакуумних вимикачів.*