

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

## **ЛЕКЦІЯ №1.**

**Тема: «Загальні відомості про електричні релейно-контактні апарати»**

### **План**

1. Роль електричних релейно-контактних апаратів у електрифікації народного господарства;
2. Призначення електричних апаратів;
3. Міжнародний електротехнічний словник та інші термінологічні джерела;
4. Аббревіатури та літерні позначення електричних апаратів;

### **1. Роль електричних релейно-контактних апаратів у електрифікації народного господарства**

Сучасні електричні апарати - це надзвичайно потужна індустрія та динамічний ринок, у якому вітчизняні виробники все гучніше заявляють про себе. На сучасних електротехнічних виставках 30 - 40 % експонованої продукції - це електричні апарати (для цього достатньо побувати на міжнародній виставці ELCOM, яка проводиться щорічно в квітні у Києві, або на регіональних виставках у Львові, Харкові, Одесі, Донецьку та інших містах).

За останні 10-20 років відбулися великі зміни в електроапаратобудуванні - галузі, яка у світі розвивається надзвичайно швидкими темпами. Апарати, які зараз складають основу ринку електричної апаратури низької, середньої та високої напруги: це модульні автоматичні вимикачі (без цих апаратів просто неможливо уявити сучасну будівлю, і це вже у нас - в Україні), це вимикачі, керовані різницею струмами (без яких в Україні ще з 1998 року заборонено здавати в експлуатацію нові або реконструйовані споруди), це обмежувачі імпульсних перенапруг побутового та аналогічного призначення (які в Україні ще недостатньо популярні, ними оснащені, у першу чергу, банки та інші фінансові установи, а в Європі - це багатомільйонна індустрія й сучасні помешкання й офіси буквально нашпиговані цими апаратами), це сучасні системи запобіжників, це комбінації із

запобіжниками (які в Європі дуже популярні, а в Україні швидко набувають популярності), це вакуумні вимикачі середньої напруги (які в Україні складають понад 90% актуального ринку) та елегазові вимикачі високої напруги (які практично витіснили масляні вимикачі та повітряні вимикачі високого тиску) тощо. Також розповсюджені апарати, як контактори, магнітні пускачі, апарати кіл керування, з'єднувальні аксесуари, реле.

Наведений перелік є далеко не повним, його можна суттєво продовжити, але зазначений мінімум, неможливо ігнорувати, не акцентуючи увагу на призначенні, побудові та принципах дії цих апаратів, їх важливої, а подекуди й вирішальної ролі в системах розподілу електричної енергії, системах керування обладнанням та системах захисту людей, тварин, майна й довкілля.

Дисципліна присвячена вивченню призначення, будови, принципів дії та особливостей застосування електромеханічних апаратів та комплектних пристроїв низької, середньої та високої напруги, а також суміжного обладнання.

У ході вивчення дисципліни розглядатиметься комплекс питань, пов'язаних з:

- понятійним апаратом, побудованим на базі міжнародної термінології щодо електричної апаратури;
- функціями електричних апаратів та їх частин;
- тенденціями ринку та класифікацією електричних апаратів;
- захисними властивостями та захищеністю електричної апаратури;
- вимогами до електричних апаратів, нормальними та ненормальними умовами їх роботи, у тому числі при коротких замиканнях;
- позначенням та маркуванням, які застосовуються в сучасній практиці електроапаратобудування з урахуванням вимог міжнародних стандартів.

Сучасна електрична апаратура виробляється з урахуванням вимог стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (International Electrotechnical Commission - ІЕС) стосовно окремих груп електричних апаратів. Ці стандарти, а також термінологічні стандарти (вітчизняні та міжнародні) та Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) є суттєвим джерелом інформації при вивченні дисципліни.

Слово «апарат» наприкінці ХІХ століття, зазвичай, застосовувалося до технічних пристроїв або груп технічних пристроїв, поєднаних за деякими ознаками, наприклад телеграфний апарат, телефонний апарат, літальний апарат тощо.

Відомий електротехнік П.М. Яблочков застосував поняття «електричний апарат» як узагальнюючу назву для групи електротехнічних пристроїв, відомих на той час, які здійснювали комутації електричних кіл, розподілу, контролю та регулювання параметрів електричної енергії - рубильників, перемикачів, комутаторів (розподільних пристроїв), реле та регуляторів.

І хоча у країнах, які впродовж багатьох років активно співпрацювали з ІЕС, вираз «electrical apparatus» вживається у більш широкому розумінні, у вітчизняній технічній літературі протягом десятиліть зберігалася традиція відносити до електричних апаратів саме електротехнічні пристрої комутації, керування й захисту.

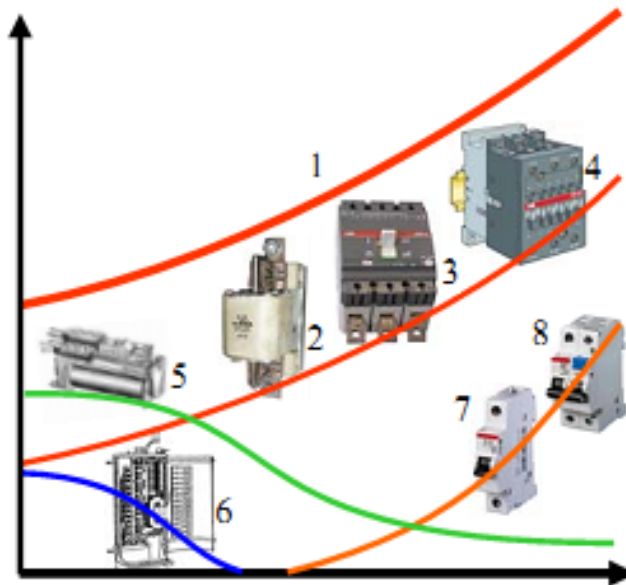
Характерною особливістю електричних апаратів є дуже широка номенклатура пристроїв, що відносяться до цієї галузі електротехніки, величезна кількість понять, визначень, характеристик, а також надзвичайно динамічний ринок як з точки зору неухильного зростання його обсягу, так і з точки зору швидкого оновлення номенклатури та розширення функціональних можливостей електричних апаратів.

Динаміку ринку апаратів низької напруги якісно характеризують графіки, наведені на мал. В1. Загальну тенденцію зростання цього ринку (крива 1 на мал. В.1) практично повторюють деякі апарати, які присутні на ринку багато років - запобіжники 2, автоматичні вимикачі 3, контактори 4 та низка інших апаратів. Натомість, деякі апарати суттєво послабили свої позиції на ринку, наприклад - електромеханічні реле 5, а інші зовсім полишили актуальний ринок - електромеханічні контролери 6.

Приблизно 20 - 25 років тому ринок почав наповнюватися апаратами побутового призначення, серед яких найбільш активно просуваються модульні автоматичні вимикачі 7 та апарати захисту від прямих та непрямих дотиків - відомі на Заході як апарати різницевого струму (residual current device - RCD), а у нас - як ПЗВ (УЗО) (8), ці апарати були практично невідомі в Україні ще 15 років тому.

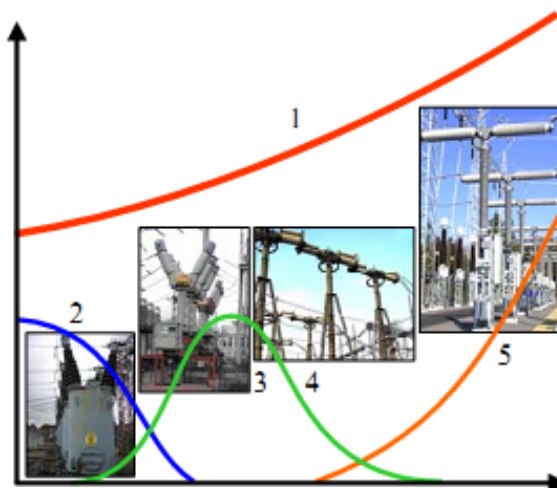
Дещо інша картина спостерігається в сфері апаратів середньої та високої напруги. Як приклад, розглянемо динаміку ринку вимикачів високих напруг (110 кВ

та більше). У цій сфері при загальній тенденції зростання (крива 1 на мал. В.2) спостерігається перерозподіл ринку між апаратами, побудованими па різних принципах дугогасіння - масляними баковими 2, маломасляними й повітряними 3, 4 на користь автокомпресійних елегазових 5 вимикачів.



2 – запобіжники; 3 - автоматичні вимикачі; 4 – контактори; 5 – електро-механічні реле; 6 - електро-механічні контролери; 7 - автоматичні вимикачі; 8 - апарати захисту від прямих та непрямих дотиків (апарати різнице-вих струмів (residual current device - RCD), чи УЗО

Мал. В. 1. Динаміка ринку електричних апаратів низької напруги



2 – вимикач масляними баковими; 3 – вимикач мало масляний; 4 – вимикач повітряний; 5 – вимикач автокомпресійний елегазовий

Мал. В.2. Динаміка перерозподілу ринку вимикачів високої напруги

Обмежимо розглядом лише тих апаратів, що домінують на актуальному ринку за такою схемою: призначення, будова, принципи дії, сфери застосування, найважливіші характеристики.

## 2. Призначення електричних апаратів

Призначення електричних апаратів коротко можна визначити так:

- *розподіл електричної енергії між споживачами* - комутаційні апарати, призначені для вмикання, вимикання та перемикавання в розподільних мережах та інших електричних колах;
- *керування, переважно, електродвигунами, вбудованими у різні технологічні процеси* - електричні апарати керування;
- *захист людей, тварин, майна й довкілля від згубної дії електричної енергії* - електричні апарати захисту;
- *виконання функцій керування, сигналізації, блокування тощо в допоміжних колах комутаційної апаратури, апаратури керування, а також в колах керування електротехнічного обладнання* - апарати кіл керування

Поділ електричних апаратів па групи згідно з їх призначенням є досить умовним, оскільки деякі апарати можуть мати ознаки, які дозволяють відносити їх до різних груп. Наприклад, такі апарати як вимикачі-роз'єднувачі, комбіновані із запобіжниками (вимикачі-роз'єднувачі-запобіжники - мал. В.3 та запобіжники-вимикачі-роз'єднувачі), широко застосовуються у комплектних пристроях для комутації електричних кіл, отже вони можуть бути віднесені до групи комутаційних апаратів призначених для розподілення електричної енергії.



Мал. В.3. Вимикач-роз'єднувач-запобіжник (*swiich-disconnecior-fuse*)

Ці ж апарати відповідно до стандарту ІЕС 60947-3 можуть застосовуватися й для вмикання та вимикання кіл з електродвигунами, відтак їх можна віднести до групи апаратів керування. Нарешті, наявність запобіжників у складі цих апаратів дає підстави віднести їх до групи апаратів захисту.

Ще один приклад. Поворотні перемикачі (мал. В.4) відносять до апаратів кіл керування, оскільки їх основним призначенням є здійснення комутацій у допоміжних колах й колах керування, але вони відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60947-5-1 можуть застосовуватися також для комутацій у головних колах електродвигунів невеликої потужності, тому їх можна віднести також й до групи апаратів керування.



Мал. В.4. Поворотний перемикач керування (*rotary control switch*)

Однак, які б функції не виконував електричний апарат, його кінцевою дією має бути *вмикання або вимикання струму в електричному колі за допомогою комутаційного елемента у вигляді контактів, що замикаються або розмикаються, або напівпровідникового пристрою, що змінює свій опір під дією зовнішнього впливу.*

Іноді до електричних апаратів відносять також електротехнічні пристрої, які не виконують комутаційних функцій (електромагнітні гальма, муфти, сепаратори, електромагніти керування як окремі пристрої тощо).

При визначенні функцій та класифікації електричних апаратів, використовується базова інформація щодо загальновизнаного в світі понятійного апарату - електротехнічної термінології Міжнародного електротехнічного словника (*International Electrotechnical Vocabulary - IEV*) та стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (*International Electrotechnical Commission - IEC*).

Застосування міжнародної термінології має велике значення з огляду на поступове входження України до загальносвітового економічного простору та широке застосування сучасних (у тому числі імпортованих) електричних апаратів і аксесуарів у промисловості, будівництві, сільському господарстві й побуті.

Призначення електричних апаратів та їх частин розглядаються з урахуванням міжнародної електротехнічної термінології. З урахуванням цієї ж термінології та тенденцій ринку електричних апаратів розглядається їх класифікація.

### 3. Міжнародний електротехнічний словник та інші термінологічні джерела

Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission - IEC) - авторитетна міжнародна організація зі стандартизації у галузі електротехніки та суміжних галузей була створена понад століття тому - у 1906 році, постійно опікується питаннями термінології. Зазначимо, що усіма іншими галузями, крім електротехніки та суміжних з нею галузей, опікується створена у 1946 році Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization for Standardization - ISO).

Ще у далекому 1910 році IEC створила спеціальний Комітет для складання міжнародного переліку термінів та їх визначень. Перше видання Міжнародного електротехнічного словника (International Electrotechnical Vocabulary - IEV) з'явилося у 1938 році. У другому виданні словника, яке було опубліковане у 1957 році, терміни та їх визначення наводилися французькою та англійською мовами (так само, як і у першому виданні), а ще шістьма мовами: німецькою, іспанською, італійською, голландською, польською та шведською - терміни без визначень. Технічний комітет №1 IEC доручив національним комітетам ряду країн підготувати та опублікувати словник з тлумаченнями термінів титульними мовами країн.

Визначення термінів є невід'ємною частиною державних стандартів (ДСТУ), отже терміни розпорошилися на велику кількість стандартів, далеко не завжди збігаючись з визначеннями IEV. Зазначені розбіжності у термінології не варто ігнорувати, адже Міжнародний електротехнічний словник є термінологічним підґрунтям усіх стандартів Міжнародної електротехнічної комісії, а саме цим стандартам мають відповідати сучасні електричні апарати.

Актуальна версія IEV зафіксована у стандарті IEC 60050, складається з окремих частин. Починаючи з 2008 року до IEV почали застосовувати назву «Electropedia», причому з того року IEC надала усім користувачам INTERNET вільний доступ до цього ресурсу.

Сучасна Electropedia (IEV) складається з 84 частин (parts), у яких визначається понад 20 000 понять з різних галузей електротехніки та галузей, що тісно пов'язані з електротехнікою (наприклад, електро-біологія), а також з галузей, які є підґрунтям електротехніки (наприклад, математика, фізика, хімія).

Частини IEC згруповані у класи (class):

- Загальні поняття (General concepts)
- Матеріали (Materials)
- Вимірювання, автоматичне керування (Measurement, automatic control)
- Електричне обладнання (Electric equipment)
- Електронне обладнання (Electronic equipment)
- Генерування, передача та розподілення енергії (Generation, transmission and distribution of energy)
- Телекомунікації (Telecommunications)
- Специфічні застосування (Particular applications)

Кожне поняття IEC має свій номер, який складається з розділених дефісами номеру частини (part), для позначення якого застосовується три цифри, перша з яких відповідає номеру класу, номеру розділу (section) у межах відповідної частини (дві цифри) та номеру поняття (concept) у межах відповідного розділу (дві або три цифри), наприклад, 441-17-07.

Міжнародний електротехнічний словник містить лише базові поняття для конкретних галузей. Значний термінологічний масив міститься також в профільних стандартах Міжнародної електротехнічної комісії, які розповсюджуються по певні групи електротехнічної продукції, зокрема, на певні різновиди електричних апаратів.

В умовах поступового входження України до загальносвітового економічного простору виняткову важливість для розвитку міжкультурних комунікацій набуває застосування міжнародно визнаної термінологічної бази, зокрема, термінів та їх тлумачень з Міжнародного електротехнічного словника та стандартів Міжнародної електротехнічної комісії.

В Україні розроблені термінологічні словники (у тому числі у вигляді Державних стандартів України - ДСТУ, зокрема ДСТУ 2843-94. ДСТУ 2267-93. ДСТУ 2815-94) з різних технічних галузей, у тому числі, і з електротехніки. Значну кількість термінів та визначень містять Правила улаштування електроустановок - ПУЕ. Терміни та визначення, наведені у зазначених документах, не завжди збігаються з термінами та визначеннями IEC.



#### 4. Аббревіатури та літерні позначення електричних апаратів

В ІЕВ та у профільних стандартах ІЕС застосовується велика кількість аббревіатур. Ці аббревіатури, переважно, формуються з перших літер слів, що утворюють той чи інший термін. Застосовуються переважно англійські аббревіатури, наприклад DC - постійний струм, AC - змінний струм, rms - середньоквадратичне значення, тощо.

Літерні позначення основних фізичних величин, які застосовуються в сучасній технічній літературі, здійснюються відповідно до вимог стандарту ІЕС 60027, які у певній мірі збігаються з вимогами стандарту ДСТУ 3120-95 «Електротехніка. Літерні позначення основних величин». Крім того у стандарті ІЕС 60027 надаються альтернативні позначення, що дають можливість розрізняти величини за допомогою індексів. Зазначимо, що стандарт ІЕС 60027 рекомендує позначати змінні курсивом, а індекси - прямим шрифтом за винятком тих, що позначають порядкові номери величин або коли індексом є літерний символ фізичної величини.

Приклади:

$F$  - сила (механічна, Н);

$F$  - магніторушійна сила (МРС. А), якщо у відповідній формулі не фігурує сила механічна  $F$ :

$F_m$  - магніторушійна сила (МРС. А), якщо у відповідній формулі фігурує сила механічна  $F$ :

$f_m$  - питома механічна сила (Н/м), що діє у точці з номером  $m$ ;

$M$  - момент (механічний, Н м);

$M_{ij}$  - взаємна індуктивність (Гн) контурів з номерами  $i$  та  $j$ , якщо у відповідній формулі не фігурує механічний момент  $M$ ;

$L_{ij}$  - взаємна індуктивність (Гн) контурів з номерами  $i$  та  $j$ , якщо у відповідній формулі фігурує механічний момент  $M$ ;

$\delta_c$  - кут втрат конденсатора ємністю  $C$ .

Література:

1. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. ДСТУ3020-95. Апарати комутаційні низьковольтні(ГОСТ12434-93. – 36 с.
3. ДСТУ3120-95. Електротехніка. Літерні позначення основних величин. – 25 с.
4. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.

**Семестр 5 навчальна дисципліна «Апарати керування і захисту»**  
галузь знань 14 – Електрична інженерія  
спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

## **ЛЕКЦІЯ №2.**

### **Тема: «Функції та основні частини електричних апаратів»**

#### **План**

1. Функції електричних апаратів;
2. Головне коло, коло керування, допоміжне коло, полюс та порт;
3. Контакти електричних апаратів;
4. Дугогасні системи комутаційних апаратів;

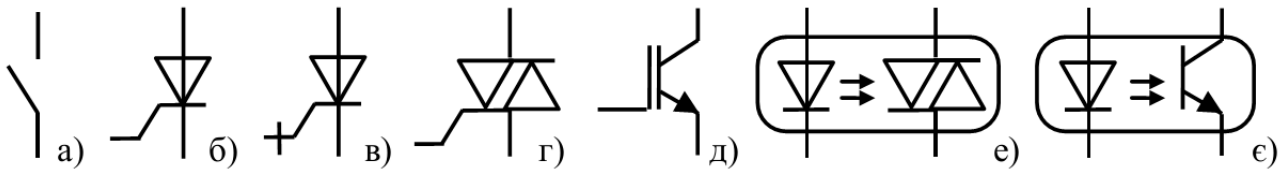
#### **1. Функції електричних апаратів**

Поняття «електричний апарат» охоплює широке коло пристроїв, які здійснюють різноманітні дії, пов'язані з комутацією електричних кіл, керуванням обладнанням, контролем параметрів технологічних процесів, обмеженням надструмів і перенапруг у мережах живлення, та захистом людей, майна й довкілля в процесі виробництва, транспортування, перетворення, розподілу та споживання електричної енергії.

Отже, комутація, керування, контроль, обмеження та захист зазначених об'єктів і є основними функціями електричних апаратів.

Кінцевою дією будь-якого електричного апарата є вмикання або вимикання струму в електричному колі за допомогою комутаційного елемента, яким може бути контакт, що замикається або розмикається, або напівпровідниковий пристрій, що змінює свій опір під дією зовнішнього впливу.

Комутація електричних кіл контактами (мал. 1.4-а) в електромеханічних апаратах здійснюється їх замиканням (зближенням і визначеним натиском) та розмиканням (віддаленням на визначену відстань). Пристрої, позначення яких зображено на мал. 1.4-б ... 1.4-є, застосовуються у напівпровідникових апаратах. У даному посібнику розглядаються, переважно, електромеханічні апарати з контактними комутаційними елементами.



*а - контакт; б - одноопераційний тиристор; в - двоопераційний тиристор; г - симістор; д - інтегрований біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT транзистор); е - оптосимістор; е – оптотранзистор*

Мал. 1.4. Комутаційні елементи електричних апаратів

Типові схеми комутації електричних кіл однополюсними, двополюсними, триполюсними та чотиріполюсними апаратами з контактними комутаційними елементами зображені на мал. 1.5.

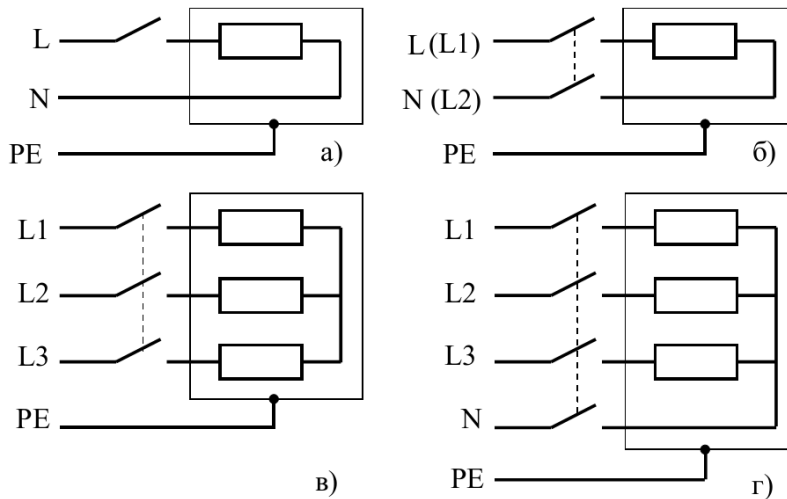
В однополюсних апаратах (мал. 1.5-а) приєднання навантаження до живлення здійснюється через контактний елемент до лінійного провідника (line conductor) та так звану безперервну нейтраль (uninterrupted neutral) - струмопровідну гілку, приєднану безпосередньо до нейтрального провідника (N conductor) розподільного пристрою, від якого живиться навантаження. До речі, майже усі електропобутові пристрої (appliance) приєднуються до живлення саме так.

Металеві корпуси усіх електроустановок з міркувань безпеки мають бути надійно приєднані до захисного заземлювального провідника (PE провідника). На виробничих, торгівельних та інших підприємствах таке приєднання згідно до вимог ПУЕ здійснюється повсюдно, а для житлових та аналогічних помешкань вимоги щодо застосування трипровідних однофазних ліній живлення з'явилися нещодавно, тому вони є обов'язковими лише для новобудов.

Практично заземлення побутових приладів здійснюється завдяки застосуванню триполюсних розеток, до яких від розподільного щитка мають бути підведені три провідники, один з яких - захисний PE провідник. Крім того, побутові прилади мають бути оснащені спеціальними трипровідними вилками, провідники до яких підключені так, що при введенні вилки у розетку металевий корпус приладу автоматично приєднується до захисного провідника.

Комутація однофазного навантаження двополюсними апаратами (мал. 1.5-б) здійснюється в мережах постійного струму для полегшення умов гасіння

електричної дуги, що виникає па контактах при їх розмиканні, а також з міркувань безпеки в мережах постійного та змінного струму - при розмиканні контактів навантаження від'єднується від живлення як з боку лінійного, так і з боку нейтрального провідника.



Мал. 1.5. Комутація електричних кіл електричними апаратами: а - однополюсним; б - двополюсним; в - триполюсним; г - чотириполюсним

Комутація трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором ((squirrel) cage induction motor) здійснюється триполюсними апаратами (мал. 1.5-в), оскільки спільна точка з'єднання обмоток зазвичай не виводиться на клемну коробку двигуна.

Комутацію трифазних навантажень зі спільною нейтраллю з міркувань безпеки бажано здійснювати чотириполюсним апаратом (мал. 1.5-г) - при розмиканні контактів навантаження повністю від'єднується від живлення.

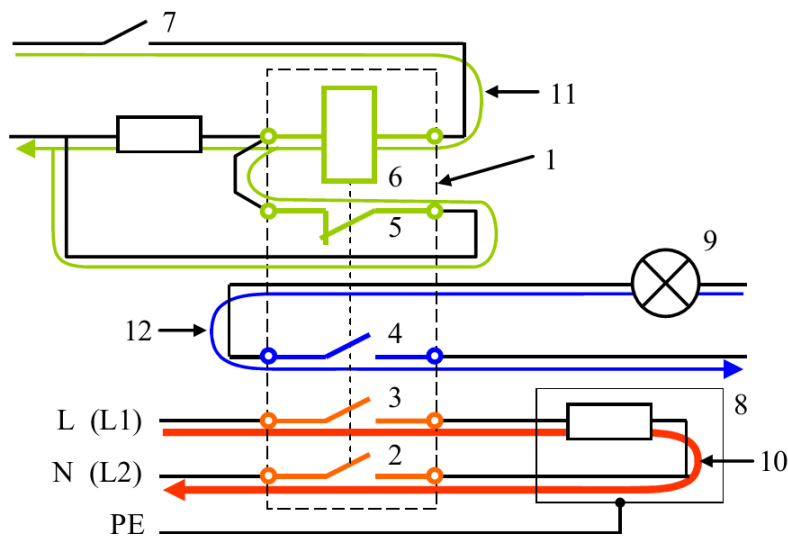
## 2. Головне коло, коло керування, допоміжне коло, полюс та порт

До складу комутаційного апарата крім головного кола (main circuit of a switching device), тобто сукупності струмопровідних частин, що входять до кола, яке апарат має замикати та розмикати за своїм основним призначенням, можуть входити також коло керування та допоміжні кола.

Колом керування комутаційного апарата (control circuit of a switching device) називають сукупність його струмопровідних частин (крім головного кола), що входять до кола, яке має застосовуватися для забезпечення апаратом виконання операцій замикання та або розмикання у головному колі апарата.

Допоміжним колом комутаційного апарата (auxiliary circuit of a switching device) називають сукупність його струмопровідних частин, призначених для застосування у будь-яких колах, крім головного кола та кола керування.

Схема на мал. 1.6 ілюструє поняття головного кола, кола керування та допоміжного кола електричного апарата. На схемі позначено: 1 - електричний апарат з контактами 2, 3, 4 та 5, комутація яких здійснюється за допомогою електромагнітного актуатора, заживлення або знеживлення котушки 6 якого забезпечується за допомогою контакту 7. Призначенням апарата є вмикання та вимикання контактами 2 та 3 навантаження 8, контакт 4 призначений для виконання допоміжних функцій (вмикає сигнальну лампу 9), а контакт 5 здійснює комутації в колі керування.



Мал. 1.6. Головне коло (10), коло керування (11) та допоміжне коло (12) електричного апарата

Отже, частини апарата, які є частинами електричного кола навантаження, а саме контакти 2 та 3 з відповідними терміналами (на схемі показані у вигляді кружків) та провідники, що з'єднують контакти з терміналами, складають головне коло апарата (виділені червоним кольором).

Частини апарата, які входять до електричного кола керування 11 цього апарата, а саме котушка 6, а також контакт 5 з відповідними терміналами та провідниками складають коло керування апарата (виділені зеленим кольором).

Частини апарата, які входять до допоміжного електричного кола 12, а саме контакт 4 з відповідними терміналами та провідниками складають допоміжне коло апарата (виділені синім кольором).

Полюс комутаційного апарата (pole of a switching device) - це його частина, яка пов'язана тільки з однією електрично незалежною гілкою головного кола та не містить частин, призначених для спільного монтажу та оперування всіма полюсами разом.

До складу полюсу входять його термінали (вхідний та вихідний), головні контакти, струмопровідні деталі (жорсткі та гнучкі), які з'єднують контакти з терміналами, а також усі елементи (струмопровідні та ізоляційні), що відносяться до відповідної гілки головного кола.

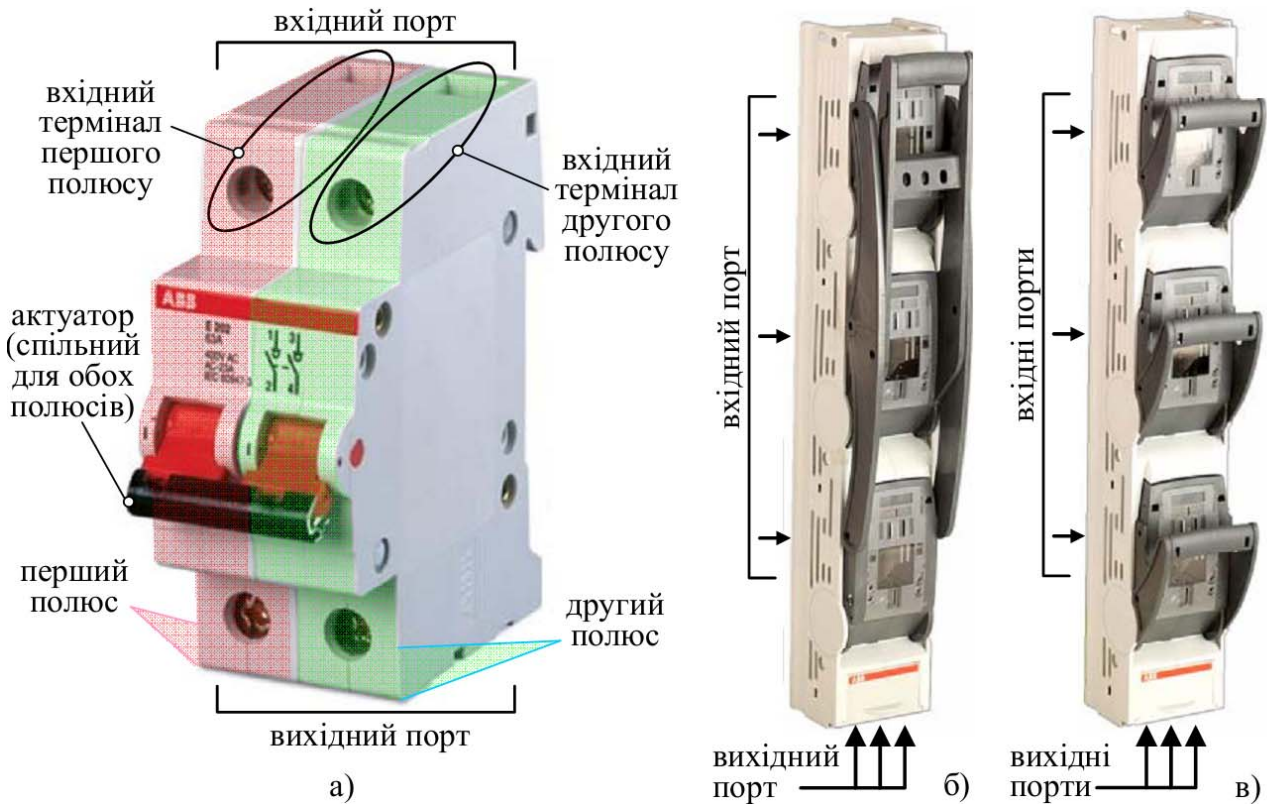
На мал. 1.7 зображено апарати з різною кількістю полюсів - двополюсний вимикач-роз'єднувач (мал. 1.7-а), триполюсний запобіжник - вимикач-роз'єднувач (мал. 1.7-б) та блок з трьох однополюсних запобіжників-вимикачів-роз'єднувачів (мал. 1.7-в).

Вхідні термінали (до них приєднуються провідники, з'єднані з джерелом живлення) усіх полюсів апарата утворюють вхідний порт (port), а вихідні термінали (до них приєднуються провідники, з'єднані з відповідними терміналами навантаження) усіх полюсів апарата утворюють вихідний порт.

У деяких апаратах вхідний та вихідний порти можна міняти місцями, а для деяких апаратів це неможливо робити. Про можливість або неможливість зміни місць портів має свідчити маркування терміналів. На мал. 1.7-а верхні термінали мають цифрове позначення «1» та «3», а нижні термінали - «2» та «4». Це означає, що джерело живлення має бути підключено до верхніх, а навантаження - до нижніх терміналів. Отже верхні термінали даного апарата утворюють вхідний порт, а нижні термінали - вихідний порт. [Правила маркування терміналів стандартизовані \(IEC 60947-1, Annex L\). Ці правила викладені в п. 3.3.2.](#)

Апарати, зображені на мал. 1.7-б та 1.7-в, монтуються безпосередньо на збірних шинах розподільного пристрою, відтак їх вхідні термінали розташовані на задній поверхні корпусу. Вихідні термінали цих апаратів розташовані під ізоляційними кришками, розташованими в нижніх частинах корпусів.

Хоча апарат, зображений на мал. 1.7-в, складається з трьох окремих полюсів, його не варто вважати триполюсним, адже полюси не поєднані так, щоб оперувати разом.



Мал. 1.7. Комутаційні апарати з різною кількістю полюсів: а - двополюсний апарат; б - триполюсний апарат; в - блок з трьох однополюсних апаратів

### 3. Контакти електричних апаратів

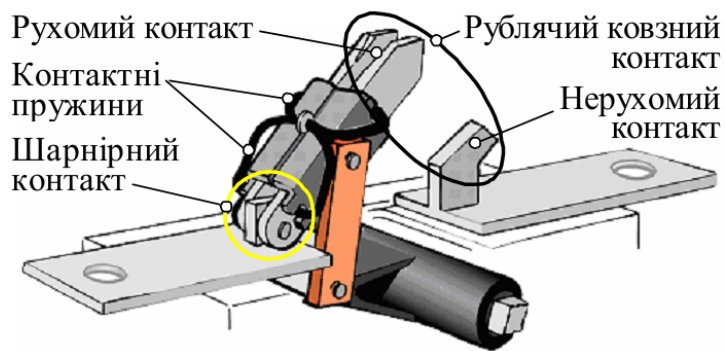
Поняття контакту комутаційного апарата (contact of a mechanical switching device) в ІЕВ визначається як сукупність струмопровідних частин, призначених для встановлення безперервності електричного кола, коли вони (ці частини) стикаються, та які впродовж свого відносного переміщення під час спрацьовування розмикають або замикають коло, або, у випадку шарнірних та ковзних контактів, підтримують безперервність кола. Ілюстрація до цього визначення наведена на мал. 1.8.

Дане поняття поширюють і на ті апарати, які не мають комутаційних елементів (запобіжники, обмежувачі імпульсних виплесків, вимірювальні трансформатори тощо), якщо врахувати, що безперервність електричних кіл підтримують також струмопровідні частини апаратів, які призначені для їх приєднання до зовнішніх кіл, тобто струмопровідні частини терміналів.

В англійській науково-технічній літературі не застосовуються звичні для нас терміни «контактний апарат» (contact switching device) або «безконтактний апарат» (contactless switching device), а вживаються терміни, які показують, у який спосіб забезпечується комутація електричних кіл - «механічний комутаційний апарат»



(mechanical switching devise) та «напівпровідниковий комутаційний апарат» (semiconductor switching devise).



Мал. 1.8. Контакти електричного апарата: рубаючий ковзний контакт забезпечує замикання та розмикання кола та підтримує його безперервність у замкненому стані завдяки верхній контактній пружині, а шарнірний контакт завдяки нижній контактній пружині забезпечує підтримку безперервності кола

Контакт апарата, який здійснює комутації головного кола та призначений у замкненому положенні проводити його струм, називають головним контактом (main contact). Отже, апарат, електрична схема якого зображена на мал. 1.6, має два головних контакти, а саме контакти 2 та 3.

Контакт 5, що входить до кола керування комутаційного апарата та механічно приводиться удію цим апаратом, називають контактом керування (control contact). Контакт 7 - це також контакт керування, але він є частиною не апарата 1, а іншого комутаційного апарата, отже він є стороннім контактом керування.

Контакт 4, що входить до допоміжного кола та механічно приводиться у дію комутаційним апаратом, називають допоміжним контактом (auxiliary contact).

Контакт керування або допоміжний контакт, який є замкненим, коли головні контакти комутаційного апарата є замкненими, та розімкненим, коли вони розімкнені, називають а-контактом або замикальним контактом (a-contact; make contact). Контакт керування або допоміжний контакт, який є розімкненим, коли головні контакти комутаційного апарата є замкненими, та замкненим, коли головні контакти розімкнені, називають b- контактом або розмикальним контактом (b-contact; break contact). Контакт 4 па мал. 1.6 є а-контактом, контакт 5 - b-контактом.

У міжнародних стандартах застосовуються також альтернативні терміни «normally open contact» (нормально розімкнений контакт) замість «make contact» та «normally closed contact» (нормально замкнений контакт) замість «break contact».

В апаратах низької напруги з робочими струмами понад 1000 А (так звані багатоамперні апарати) та у деяких різновидах апаратів середньої та високої напруги (у тому числі із меншими робочими струмами) крім головних контактів, призначених проводити робочі струми у замкненому стані, у головних колах застосовують додаткові - дугогасні контакти (arcing contact), на яких встановлюється електрична дуга при розмиканні електричного кола.

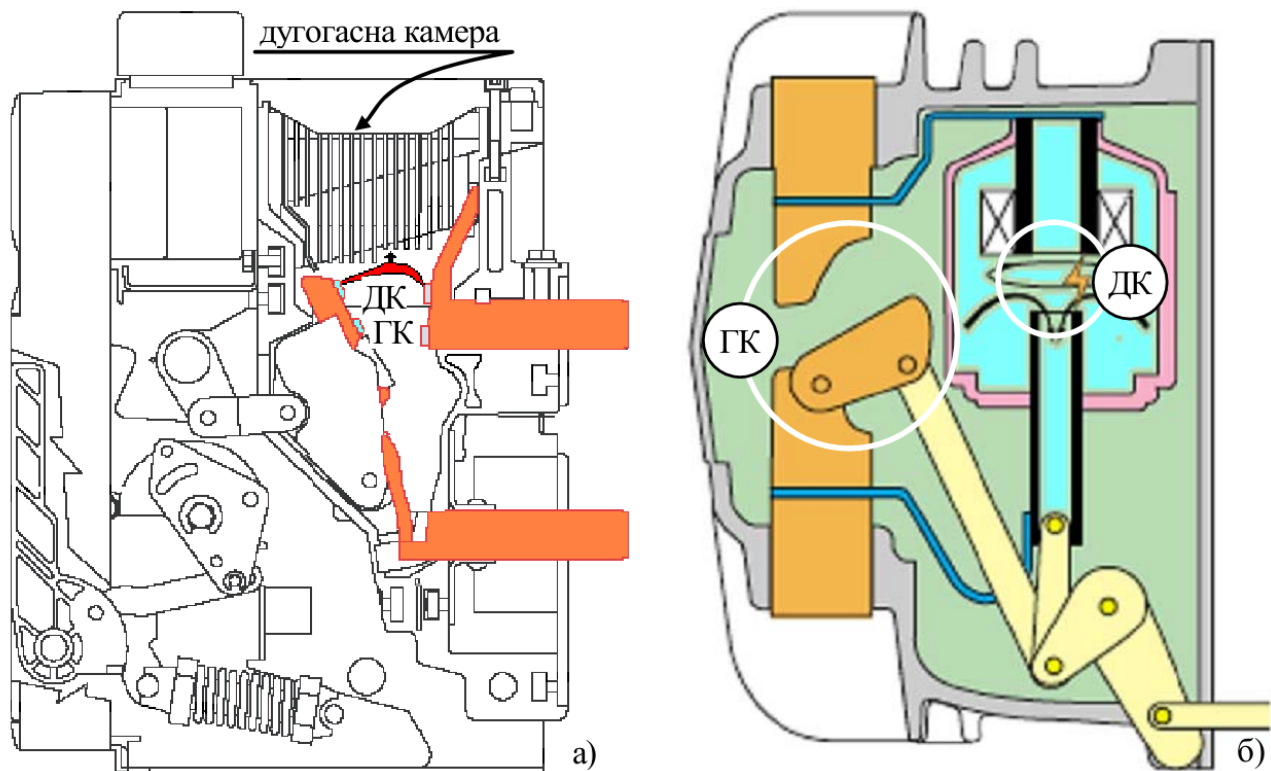
Дугогасний контакт завжди є електрично паралельним головному контакту, причому конструкція контактної системи побудована таким чином, що дугогасний контакт замикається раніше та розмикається пізніше головного контакту. В переважній більшості комутаційних апаратів їх головні контакти виконують функції й дугогасних контактів.

Застосування окремих головних та дугогасних контактів в багатоамперних апаратах низької напруги пояснюється тим, що контактні накладки їх головних контактів, з метою зменшення опору та нагрівання, виготовляють зі срібла або з металокерамічних композицій на основі срібла. Срібло - матеріал дорогоцінний, до того ж недостатньо лугостійкий (температура плавлення – 960 °С), а відтак схильний до швидкого зношування під дією дуги.

**Дугогасні контакти** виготовляють з більш лугостійких матеріалів - міді або спеціальних металокерамічних композицій. У замкненому стані головні та дугогасні контакти з'єднані паралельно, тому, завдяки низькому опору срібла, практично весь струм тече через головні контакти. При здійсненні операції вимикання першим розмикається головний контакт (ГК), але електрична дуга на ньому не виникає (отже, головний контакт захищається від дугового зношування), тому що струм перетікає у коло дугогасного контакту (ДК), а вже після розмикання ДК саме на ньому встановлюється дуга, яка, завдяки електродинамічним силам, пересувається у дугогасну камеру апарата, де і згасає (мал. 1.9-а).

Застосування окремих головних та дугогасних контактів в апаратах середньої (мал. 1.9-б) та високої напруги з гасінням дуги в середовищі елегазу

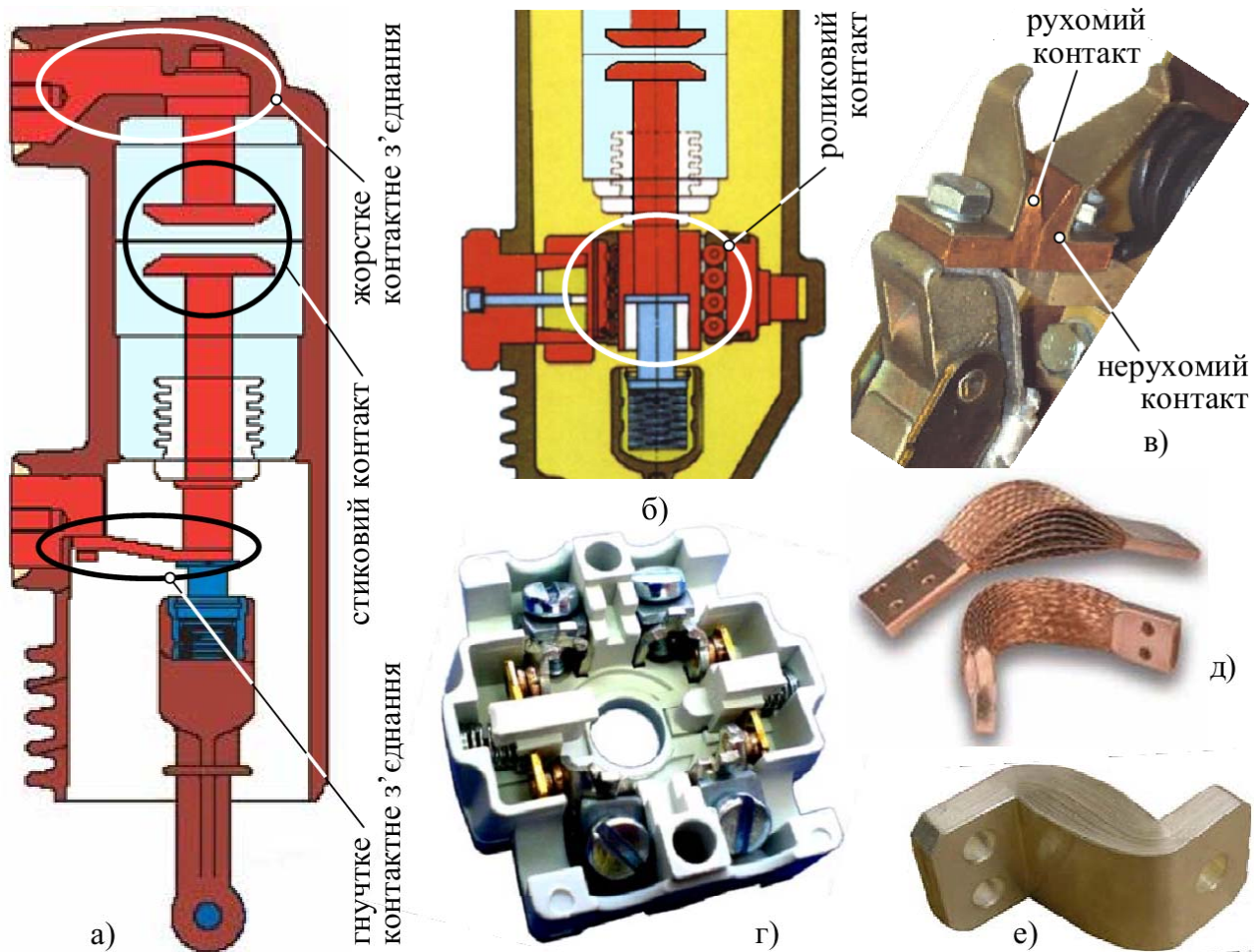
(шестифтористої сірки –  $SF_6$ ) пояснюється особливостями процесів гасіння електричної дуги в цих апаратах.



Мал. 1.9. Перерізи полюсів багатоамперного селективного відмикача низької напруги (а) та елегазового відмикача середньої напруги (б) з головними (ГК) та дугогасними (ДК) контактами

Будь-який контакт комутаційного апарата - головний, керування, допоміжний - складається з декількох частин, які теж називають контактами або контакт-деталлями (contact (piece)). Одна з таких частин утворює рухомий контакт (moving contact), інша - нерухомий контакт (fixed contact) - див. мал. 1.8.

В електричних апаратах застосовується багато різновидів контактів, пов'язаних з особливостями відносного пересування контакт-деталей - стикові контакти (butt contact), ковзні контакти (sliding contact), роликові контакти (rolling contact) тощо та контактних з'єднань, до яких відносять контакти та провідники, які підтримують безперервність електричних кіл та не розмикаються під час роботи апарата - жорсткі з'єднання (rigid connection), гнучкі з'єднання (flexible connection) тощо. На мал. 1.10 зображені фрагменти деяких комутаційних апаратів з контактами різних типів, а також деякі контактні з'єднання.



Мал. 1.10. Фрагменти електричних апаратів з контактами різних типів: а - полюс вакуумного відмикача середньої напруги з жорстким та гнучким контактними з'єднаннями; б - фрагмент полюсу потужного вакуумного відмикача середньої напруги з роликівими контактами замість гнучкого контактного з'єднання; в - стиковий контакт кулачкового контролера (аналогічні контакти застосовують у контакторах); г - місткові контакти поворотного кулачкового перемикача (аналогічні контакти застосовують також у інших електричних апаратах); д - гнучкі з'єднання, які застосовуються в апаратах низької напруги (зокрема, у контакторах) для з'єднання рухомих контактів з виводами (termination) апарата; е - гнучкі з'єднання, які застосовуються в вакуумних відмикачах середньої напруги

Термін «контакт» застосовують не тільки до сукупності струмопровідних частин, які, стикаючись, утворюють струмопровідний шлях, а й до стану цієї сукупності струмопровідних частин, додаючи до позначення «контакт» специфікатор «електричний» (electric contact). Цей стан може бути охарактеризований тим,

наскільки добре контакт проводить електричний струм, тобто опором, який створює контакт. В IECV зазначений опір визначається як контактний опір (contact resistance).

**Контактний опір** утворюється внаслідок двох причин:

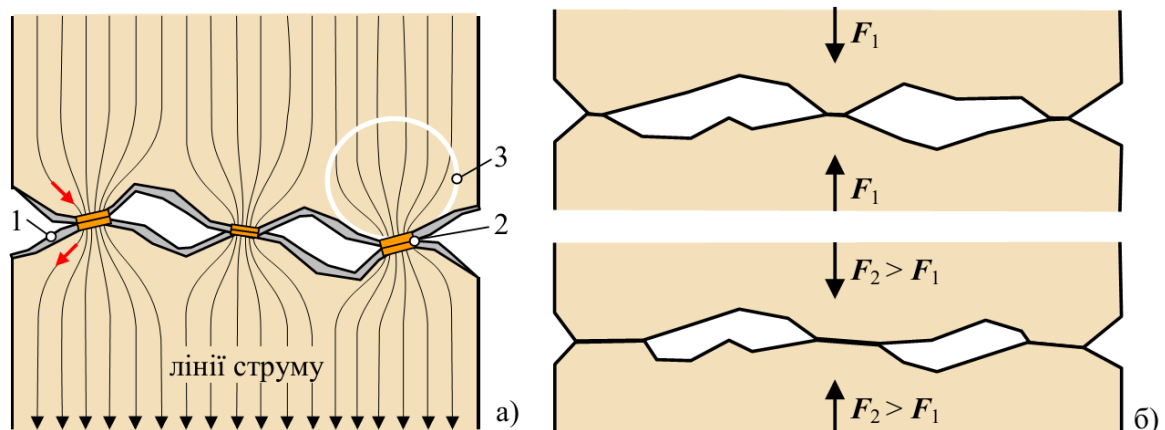
1) звуження або стягування ліній струму в зоні стикання деталей, що контактують;

2) наявності оксидних, сульфідних та інших плівок в зоні контактування.

Вплив стягування ліній струму (мал. 1.11-а) на контактний опір пояснюється тим, що за рахунок шорсткості поверхонь контактування (навіть таких, які на перший погляд здаються ідеально гладкими) реальна площа контактування на один-два порядки менша уявної площі контактування.

Вплив на контактний опір плівок мікронної товщини пояснюється тим, що ці плівки мають дуже великий питомий опір (resistivity;  $\rho$ ), який на багато порядків (до  $10^{15}$ ) перевищує питомий опір чистих металів.

Контактний опір дуже сильно залежить від контактного натиску (contact force). Наприклад, контактний опір між терміналами полюсу вакуумного відмикача (див. мал. 1.10-а) при контактному натиску 4000 Н не повинен перевищувати 11 мкОм, а контактний опір між виводами мініатюрного електромагнітного реле може сягати одиниць Ом (при контактному натиску порядку 10 мН). Такий сильний вплив контактного натиску на контактний опір пояснюється тим, що реально контактування відбувається через мікроскопічні горбки на поверхнях контактів (мал. 1.11-б), тому при збільшенні контактного натиску  $F$  ці горбки сплющуються, фактична площа контактування збільшується, а плівки руйнуються.



1 - плівка на поверхні контактів; 2 - площинка металевої провідності з тонкими плівками; 3 - зона стягування ліній струму поблизу однієї площинки контактування

Мал. 1.11. Перетікання струму з однієї контактуючої деталі у іншу (а) та зміна розмірів площинок контактування внаслідок зміни контактного натиснення (б)

На перший погляд, опір порядку 10 мкОм здається мізерно малим, але номінальний струм цього полюсу, який має працювати у безперервному режимі, дорівнює 3150 А. Отже розсіювана потужність (power loss) у полюсі становить  $3150^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \approx 100$  Вт. Розміри полюсу дозволяють розсіювати таку потужність, не викликаючи неприпустимих температур (на терміналах полюсу згідно з IEC60694 температура не повинна перевищувати 90 °С). Але треба враховувати, що зазначений полюс вакуумного відмикача має витримувати струм короткого замикання 40 кА впродовж 3 секунд. Енергія, яка за цей час виділиться у полюсі, становить  $10 \cdot 10^{-6} \cdot (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 3 = 16$  кВт · 3 с = 48 кДж(!). Оскільки розміри зони стягування складають частки міліметра, матеріал контактів у цій зоні нагрівається дуже швидко, температура сягає точки плавлення й після припинення проходження струму короткого замикання розплавлений матеріал твердіє, отже контакти приварюються. Привод апарата має бути побудований так, щоб він був здатний виконати операцію вимикання й розірвати контакти, що приварилися.

Зварюванню контактів сприяє також ефект відкидання контактів при коротких замиканнях, внаслідок дії електродинамічних сил в зоні стягування ліній струму. Електродинамічними називають сили, які виникають між провідниками зі струмами. Якщо струми течуть в одному напрямі, провідники притягуються, якщо струми течуть у протилежних напрямках, то провідники відштовхуються один від одного. В зоні контактування струми в контактуючих деталях частково течуть у протилежних напрямках (див. мал. 1.11-а), відтак ці контакти відштовхуються. Значення електродинамічних сил стають відчутними при струмах порядку тисяч Ампер та більше, коли ці сили сягають десятків, сотень й навіть тисяч Ньютон.

**Електродинамічне відкидання контактів** має суттєве значення лише при коротких замиканнях. Відкидання контактів супроводжується виникненням електричної дуги, яка розплавляє контактний матеріал в зоні стягування, а після остаточного замикання контактів розплавлений матеріал твердіє, й контакти приварюються. Для зменшення сил приварювання контактів у деяких випадках збільшують контактні натиски до значень, які перевищують можливі сили

відкидання, або застосовують електродинамічні компенсатори, зокрема паралельні контактні ножі у роз'єднувачах, які притягаються один до одного, оскільки струми в них течуть в одному напрямі, компенсуючи відкидання контактів.

Зварювання контактів може відбутися й за відсутності короткого замикання, зокрема в контакторах та пускачах, які здійснюють прямий пуск електродвигунів. Якщо при виконанні операції замикання спостерігаються відскоки або деренчання (bounce) контактів, то кожний відскок супроводжується виникненням потужної електричної дуги, адже пусковий струм двигуна у 6...7 разів перевищує робоче значення (коли двигун набере обороти). Відтак контакти можуть приваритися, як і при електродинамічному відкиданні контактів.

Відскоки контактів, а відтак і сила їх приварювання зменшуються при зменшенні маси контактів та швидкості їх руху в момент замикання, а також при збільшенні сили контактного натиску. Ці фактори враховуються в реальних конструкціях апаратів.

**До матеріалів стикових контактів комутаційних апаратів та апаратів керування висувуються такі вимоги:**

- висока механічна зносостійкість;
- висока електрична зносостійкість;
- висока стійкість до зварювання;
- висока електропровідність;
- висока теплопровідність;
- низький та стабільний контактний опір;
- низька схильність до взаємодії з хімічно-активними складовими атмосфери – двоокисом вуглецю, сірководнем, двоокисом сірки, аміаком, киснем тощо;
- забезпечення надійного кріплення до контактотримача зварюванням, пайкою чи заклепуванням;
- низька вартість при заданому рівні надійності.

**Матеріали з яких виготовляються електричні контакти.** Таким вимогам не задовольняє жодний з чистих металів. Зокрема, мідь, яку можна було б вважати ідеальним контактним матеріалом, якби не схильність до окислення, внаслідок чого на поверхні утворюються плівки з надзвичайно високим опором, що збільшує

контактний опір, а відтак сприяє неприпустимому перегріванню або навіть порушенню контакту. Тому в сучасній апаратурі мідні контакти замінюються композиційними на основі міді. Однак, мідь має широке застосування в комутаційних апаратах з ручним керуванням, які працюють зі значними механічними зусиллями та з ковзанням робочих поверхонь.

Суттєво меншу хімічну активність порівняно з міддю має срібло, тому опір контактів, виготовлених зі срібла, є відносно стабільним. Незважаючи на високу вартість, срібло застосовується в контактах як домінуючий компонент у композиціях з іншими металами та їх сполуками.

Застосування методів порошкової металургії дозволяє створити так звані металокерамічні контакти, тобто контакти, виготовлені методом твердофазного спікання суміші порошків різних металів та окисів, підібраних у певних пропорціях. Відповідний підбір інгредієнтів дозволяє отримати металокерамічні контакти, які у певній мірі задовольняють більшості суперечливих вимог до стикових контактів комутаційних апаратів та апаратів керування й усувають недоліки сплавів: невелику міцність, схильність до зварювання, сульфідну корозію.

Технологія виготовлення металокерамічних контактів передбачає такі етапи:

- 1) змішування (віброзмішування) порошків у заданих пропорціях;
- 2) пресування;
- 3) спікання при температурі, яка є меншою за температуру плавлення компонентів;
- 4) опресовування та повторне спікання з метою ущільнення й надання контактам остаточної форми.

Основними перевагами металокерамічних контактів перед контактами, виготовленими з чистих металів та сплавів є майже повна безвідходність та можливість отримувати властивості контактних матеріалів, які непритаманні чистим металам та сплавам.

Серед найбільш розповсюджених металокерамічних композицій слід зазначити такі:

- А10 – 85,0±0,5% срібла, решта – окис кадмію (у ГОСТ19725 наводиться лише позначення для дрібнодисперсної композиції – А10м);



- А30 –  $70,0 \pm 0,5\%$  срібла, решта – нікель, а також модифікації: дрібно-дисперсна композиція А30м та композиція А30мд, яка передбачає подвійне спікання.

Контакт марки КМК-А30 має високу електроерозійну стійкість (порівняно зі сріблом) і низький стабільний перехідний опір. Дрібнодисперсний контактний матеріал з розміром частинок 1 мкм (КМК-А30м) має електроерозійну стійкість в 1,5...2 рази вищу ніж матеріал з частинками 10...100 мкм (КМК-А30). Основний недолік контактів марки КМК-А30 – низька стійкість до зварювання. Для збільшення стійкості до зварювання при перевантаженнях та струмах короткого замикання контакти марок КМК-А30м використовують в автоматичних відмикачах у парі з контактами КМК-А41 ( $97 \pm 0,5\%$  срібла, решта – графіт).

В контакторах як на рухомих, так і на нерухомих контактах донедавна широко застосовувалася металокерамічна композиція марки КМК-А10 (85% срібла та 15% оксиду кадмію), яка має унікальну дугогасну здатність, стабільність контактного опору, а також відносно високу стійкість до ерозії та зварювання.

Високі дугогасні властивості цієї композиції зумовлені низькою температурою сублимації CdO, яка становить  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  і є нижчою за температуру плавлення срібла –  $960,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , внаслідок чого при високих температурах, зумовлених електричною дугою, з контактів виділяються великі об'єми кисню і парів кадмію, які й забезпечують гасіння дуги.

Стабільність контактного опору забезпечується низькою термічною стійкістю CdO, в результаті контактні поверхні виявляються вільними від накопичень оксидів. Нажаль, цей чудовий контактний матеріал є дуже токсичним і входить до переліку матеріалів, не рекомендованих до застосування європейською Директивою 2002/95/EU (RoHS directive – Restriction of Hazardous Substances) та низькою вітчизняних нормативних документів. Зокрема, Державні санітарні правила та норми ДСанПіН 2.2.7. 029-99 відносять кадмій до речовин I-го класу небезпеки (надзвичайно небезпечних речовин).

Численні дослідження, проведені науковцями у різних країнах, показали можливість застосування в електричних контактах замість оксиду кадмію оксидів інших металів, серед яких особливу увагу привертає екологічно безпечний оксид

олова. Композиції срібла з кількістю оксиду олова ( $\text{SnO}_2$ ) 8%, 10% та 12% маси в останні роки знаходять все більш широке застосування як контактні матеріали для низьковольтних комутаційних апаратів.

#### 4. Дугогасні системи комутаційних апаратів

**Умови виникнення електричної дуги при спрацюванні контактів та її вплив на контакти.** При замиканні та при розмиканні контактів електричного апарата, за певних умов, між ними виникає електрична дуга ((electric) arc). Такими умовами є певні рівні напруги джерела живлення (не менші за 20...30 В) та струму у колі (не менше 1 А), у якому здійснюється комутація. Дуга має дуже високу температуру й здатна розплавити частини апарата, яких вона торкається.

При замиканні контактів електрична дуга виникає за рахунок автоелектронної емісії (при зближенні контактів у між контактному проміжку збільшується напруженість електричного поля і, коли ця напруженість перевищує електричну міцність проміжку, виникає його електричний пробій, за яким й настає дугова стадія). В електричній дузі замикання, враховуючи її малу довжину, виникає дуже великий тиск (порядку одиниць й навіть десятків атмосфер), що може привести до сповільнення руху контактів до їх замикання.

Деяка частка контактного матеріалу електродів під дією дуги розплавлюється, а після замикання контактів і припинення дії дуги, розплавлений матеріал частково розбризкується, а частково твердіє і контакти зварюються.

Сила зварювання, тобто сила, яка необхідна для розриву контактів, що зварилися, залежить від багатьох факторів, найсуттєвішими з яких є значення струму дуги замикання, та властивості контактного матеріалу.

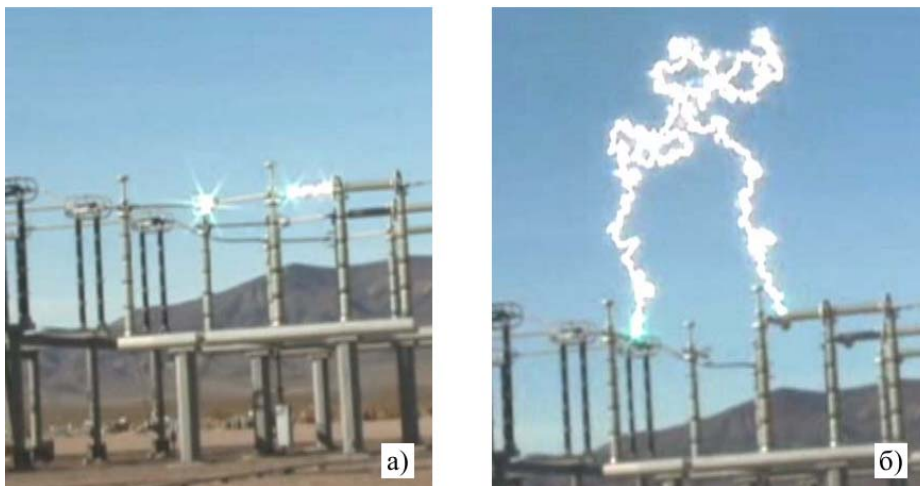
Дуга, що виникає при розмиканні контактів, є стійкою й сама не згасає, отже для забезпечення її гасіння треба створювати певні умови, застосовуючи спеціальні дугогасні пристрої (arc control devices).

Дугогасні пристрої, окрім основного призначення, а саме забезпечення розмикання електричного кола, повинні зменшувати згубну дію електричної дуги (у першу чергу, термічну, бо температура електричної дуги у деяких випадках сягає значень порядку 10 000 °С), як стосовно самого апарату, так і стосовно пристроїв,

розташованих поблизу цього апарату. Фото, що наведені на мал. 1.12, на якому зафіксована електрична дуга на роз'єднувачі під час аварійної ситуації в розподільному пристрої високовольтної підстанції, дозволяють скласти уявлення про масштаби згубної дії електричної дуги.

Але й надмірна потужність дугогасних пристроїв може призвести до не менш згубних наслідків, адже при великій швидкості зменшення струму  $di/dt$  падіння напруги в індуктивності кола  $L \cdot di/dt$  може перевищити припустиме значення і призвести до пробую ізоляції обладнання.

Треба зазначити, що саме наявність електричної дуги не дозволяє струму зменшуватися надмірно швидко і в цьому смислі дуга відіграє певну позитивну роль. Ще одна позитивна риса електричної дуги полягає в тому, що, в деяких умовах, особливо в мережах низької напруги, де захист мереж здійснюється швидкодіючими апаратами, час спрацювання яких вимірюється мілісекундами, дуга, завдяки її електричному опору, може ефективно обмежувати струм короткого замикання, а відтак й обмежувати згубну дію (термічну, електродинамічну) цього струму на обладнання.



Мал. 1.12. Електрична дуга, яка виникла на полюсі роз'єднувача під час аварійної ситуації в розподільному пристрої високовольтної підстанції (а), згодом набуває загрозливих розмірів (б)

**Складові частини електричних дуг між контактами.** Результати експериментальних досліджень дозволяють стверджувати про те, що струм у дузі підтримується завдяки руху електронів від катоду до аноду, а також про існування

трьох ділянок електричної дуги – двох при електродних зон (прикатодної та прианодної), а також стовпа дуги.

Приелектродні зони мають незначну протяжність – порядку  $10^{-6}$  м, але на цій незначній відстані потенціал залежно від матеріалу контактних електродів зростає приблизно на 10...15 В (на електродах з міді значення прикатодного падіння  $U_k$  становить приблизно 13 В, а на срібних електродах – приблизно 12,5 В й практично не залежить від струму та інших факторів). Наявність прикатодного падіння пояснюють виникненням поблизу катоду об'ємного позитивного заряду внаслідок швидкої евакуації легких електронів з прикатодної області у бік аноду та малої рухливості відносно важких позитивно заряджених іонів. Прикатодна зона є визначальною для існування електричної дуги, тому що вона забезпечує емісію електронів з катоду завдяки великій концентрації енергії. Наприклад, при струмі 100 А, у прикатодній зоні виділяється енергія з потужністю  $(10...15) \text{ В} \cdot 100 \text{ А} = (1,0...1,5) \text{ кВт}$ . Така потужність призводить до розігрівання катоду до температури, яка є достатньою для забезпечення термоелектронної емісії.

Наявність прианодної зони та відповідного падіння напруги  $U_a$  пояснюють виникненням об'ємного від'ємного заряду поблизу аноду внаслідок вторинної електронної емісії.

Стовп дуги становить найбільшу за розмірами частину дуги – довжина стовпа майже дорівнює довжині всієї дуги. Процеси у стовпі характеризуються динамічною рівновагою між процесами іонізації (переважно термічної) і де іонізації (рекомбінації – захоплення електрона позитивним іоном та утворення нейтрального атому). Збільшення струму призводить до збільшення діаметру стовпа дуги, тобто діаметру, у межах якого тече струм. Цей діаметр відповідає температурі приблизно 4000 °С. Слід зазначити, що видимий діаметр дуги, який відповідає температурі приблизно 2000 °С, є дещо більшим. Падіння напруги на стовпі  $U_c$  залежить від багатьох факторів і, в тому числі, від довжини дуги  $l_a$ . Розподіл потенціалів вздовж стовпа дуги характеризується майже постійним градієнтом  $E_c$ , значення якого залежить від багатьох факторів зокрема, від умов охолодження стовпа. Градієнт стовпа дуги, яка вільно горить в атмосферному повітрі, за даними різних дослідників становить 10...20 В/см.

При підвищенні тиску та при інтенсивному охолодженні дуги градієнт стовпа суттєво збільшується – до 100...200 В/см й більше.

Електричні дуги умовно поділяють на довгі та короткі. Довгі дуги мають всі належні компоненти: прикатодну та прианодну зони, стовп дуги. Довгі дуги використовують, наприклад, у контакторах, що працюють у важких режимах комутацій. В цих апаратах дуга забезпечує відносно повільне перетворення енергії, що накопичується перед відмиканням у навантаженні індуктивного характеру (електричні двигуни), на теплову енергію, завдяки чому перенапруги, що виникають при відмиканні подібних індуктивних навантажень, не перевищують безпечних для обладнання значень.

Короткі дуги (довжиною у декілька міліметрів) складаються лише з приелектродних зон та нерозвиненого стовпа довжиною декілька міліметрів. Коротка дуга не має струмообмежувальних властивостей, бо падіння напруги на такій дузі є набагато меншим за напругу мережі, але якщо використати послідовне з'єднання багатьох коротких дуг, то таке з'єднання може бути дуже ефективним засобом обмеження струму короткого замикання.

У будь-якому випадку, для усталеного горіння дуги потрібне певне значення напруги. Наприклад, якщо розтягнути дугу на 15 см, то напруга, яка буде необхідна для її підтримки, складатиметься з суми приелектродних падінь (приблизно 25 В) та падіння у стовпі ( $20 \text{ В/см} \times 15 \text{ см} \approx 300 \text{ В}$ ), що у підсумку дасть приблизно 320 В. Якщо напруга мережі буде меншою за це значення, то дуга не зможе горіти усталено й згасне. Ще один приклад. Для того, щоб дуга згасла при послідовному з'єднанні коротких дуг, при напрузі мережі  $U$  кількість послідовних дуг має перевищувати  $U/25$  (якщо прийняти, що сума приелектродних падінь становить приблизно 25 В).

Зокрема, при  $U = 220 \text{ В}$  для забезпечення надійного розмикання електричного кола кількість послідовних дуг має бути більше десяти).

### **Правила побудови контактних систем та дугогасних пристроїв.**

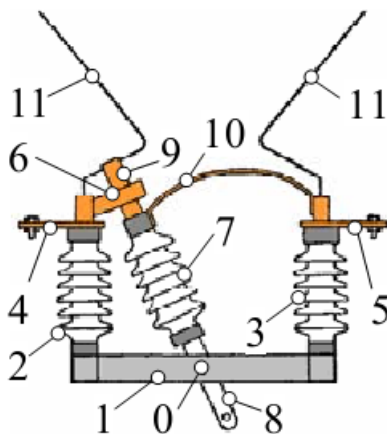
Підсумовуючи наведені вище дані, можна сформулювати основні правила побудови контактних систем та дугогасних пристроїв, слідування яким забезпечує ефективне гасіння електричної дуги:

1) швидке розмикання контактів та подвійне розривання кола у полюсі, що забезпечує розтягування дуги та вихід її з міжконтактного проміжку;

2) створення умов для швидкого переміщення опорних точок дуги по поверхнях контактів, що зменшує термоелектронну емісію, завдяки якій підтримується струм у дузі;

3) інтенсивне охолодження стовпа дуги, що підсилює процеси деіонізації й зменшує кількість електронів у стовпі, підвищує опір дуги та сприяє її згасанню.

Вказані правила в електричних апаратах реалізують дугогасні пристрої різних конструкцій. Мабуть, першими дугогасними пристроями були так звані дугогасні роги (мал. 1.13).



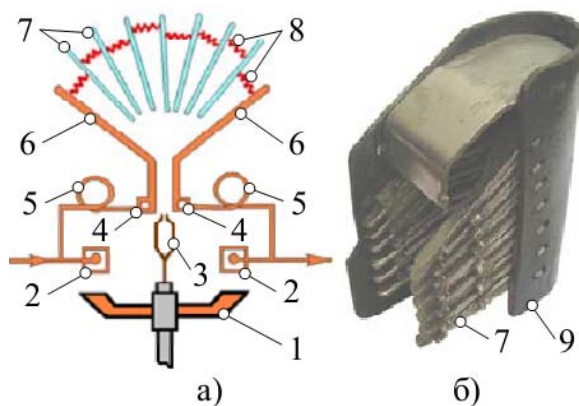
*1 – металева рама; 2, 3 – нерухомі ізолятори; 4, 5 – термінали; 6 – нерухомий контакт, з'єднаний з виводом 4; 7 – рухомий ізолятор; 8 – важіль, що обертається навкруги вісі 0; 9 – контактний ніж; 10 – гнучке контактне з'єднання; 11 – дугогасні роги.*

Мал. 1.13. Один з перших відмикачів з дугогасними рогами (Фойт і Гефнер, 1902 р.)

При обертанні важеля за годинниковою стрілкою контакти 9 іб розмикаються, між ними виникає електрична дуга, яка під дією електродинамічних сил перекидається на дугогасні роги 11, де розтягується, охолоджується й згасає.

Дугогасні роги як самостійні дугогасні пристрої застосовувалися впродовж майже трьох десятиліть на початку ХХ століття, і хоча вони дуже широко зустрічаються в сучасних апаратах, але лише у поєднанні з іншими більш ефективними засобами – решітчастими та щілинними дугогасними камерами (arc shute) – як засіб, що організує рух дуги до дугогасної камери.

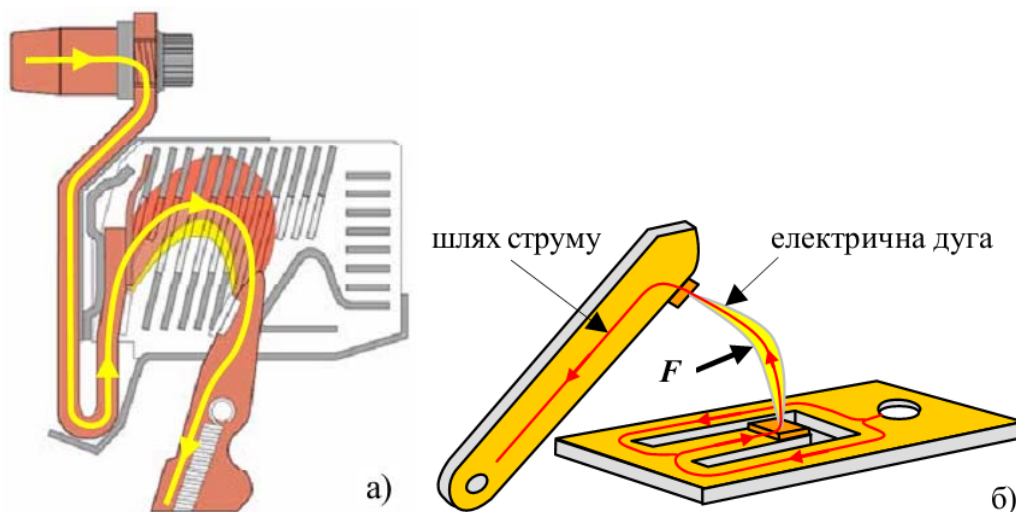
Принцип побудови контактно-дугогасної системи, у якій реалізується спосіб гасіння дуги за допомогою решітчастої камери, ілюструє ескіз (за патентом М.О. Доліво-Добровольського, 1912 р.), показаний на мал. 1.14. Цей спосіб й дотепер широко застосовується в комутаційних апаратах.



*а – відмикач М.О. Доліво-Добровольського 1 – рухомий головний контакт; 2 – нерухомі головні контакти; 3 – рухомий дугогасний контакт; 4 – нерухомі дугогасні контакти; 5 – дугогасні котушки; 6 – роги; 7 – пластини дугогасної решітки; 8 – короткі дуги); б – решітчаста камера сучасного автоматичного відмикача (9 – газотенерувальна обойма)*

Мал. 1.14. Дугогасні решітки в електричних апаратах

У сучасних відмикачах для спрямування дуги у камеру, крім дугогасних рогів, застосовують також електродинамічні петлі різних конструкцій (мал. 1.15), які, завдяки створюваним ними електродинамічним силам, суттєво прискорюють рух дуги, завдяки чому дуга розтягується, охолоджується й швидше потрапляє у камеру.



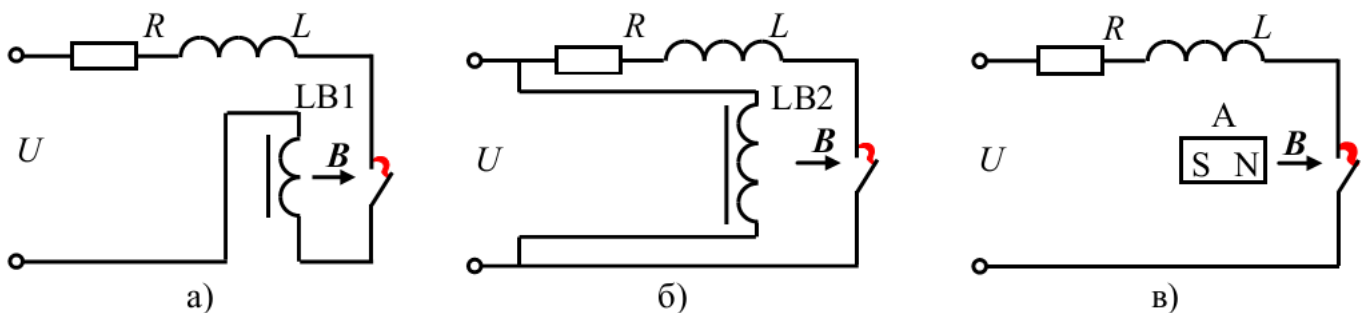
*а – просторова петля; б – пласка петля*

Мал. 1.15. Електродинамічні петлі як засіб прискорення руху дуги у камеру

Електродинамічна сила  $F$ , що діє на провідник зі струмом, пропорційна добутку довжини  $l$  провідника, силі струму  $I$ , що тече у ньому, та індукції  $B$  магнітного поля, в якому знаходиться провідник зі струмом (закон Ампера).

Системи магнітного дуття. Прискорення руху дуги у камеру може бути здійснене за рахунок електродинамічних сил, якщо у міжконтактному проміжку створити магнітне поле, спрямоване впоперек електричної дуги. Сукупність пристроїв, які створюють магнітне поле, завдяки якому дуга нібито видувається у камеру, називають системами магнітного дуття.

Системи магнітного дуття, які застосовують в електричних апаратах (переважно у контакторах), поділяють на системи послідовного, паралельного та незалежного дуття. Магнітне поле з індукцією  $B$  в системах послідовного (мал. 1.16 - а) та паралельного (мал. 1.16 - б) дуття створюється дугогасними котушками відповідно LB1 та LB2, а у системі незалежного дуття (мал. 1.16 - в) – постійним магнітом А.



*а – послідовне дуття; б – паралельне дуття; в – незалежне дуття*

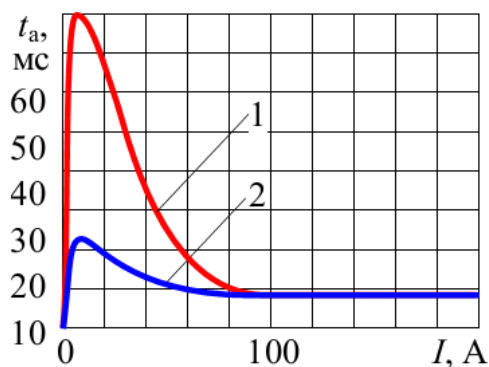
Мал. 1.16. Електричні схеми систем магнітного дуття

У системі послідовного дуття магнітне поле створюється котушкою LB1, яка включена послідовно з контактами та навантаженням, резистивна та індуктивна складові якої мають відповідно опір  $R$  та індуктивність  $L$  (мал. 1.16 - а). Магнітопровід системи магнітного дуття зазвичай є ненасиченим при струмах до робочого значення, при цьому магнітна індукція поля, створюваного дугогасною котушкою, пропорційна струму, тому сила, що діє на дугу, пропорційна квадрату значення струму. При більших значеннях струму магнітопровід системи дуття насичується, магнітна індукція перестає збільшуватися і електродинамічна сила стає пропорційною значенню струму. Таким чином, система послідовного дуття дуже ефективна в зоні робочого струму та при більших струмах  $i$ , навпаки, є вкрай



неефективною при малих струмах, тому що при зменшенні струму, наприклад, у 10 разів, сила, що видуває дугу в камеру, зменшується у 100 разів. Системи паралельного та незалежного дуття порівняно з системами послідовного дуття ефективніші при малих струмах, тому що електродинамічна сила у таких системах лишається пропорційною до струму на всьому діапазоні струмів.

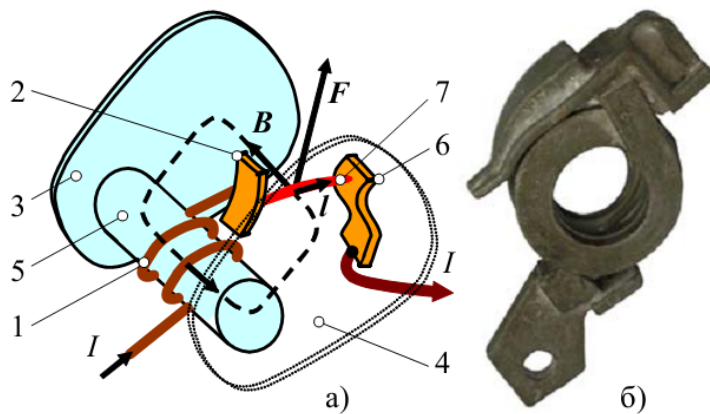
На мал. 1.17 показані графіки залежності часу  $t_a$  горіння електричної дуги у полюсі контактора постійного струму (номінальний струм – 100 А) з послідовною та паралельною системою магнітного дуття. Як бачимо, при відносно великих значеннях струму час горіння дуги майже не залежить від значення струму (при збільшенні струму дуга швидше входить у камеру, але довше згасає), а при струмах, менших за номінативне значення, час горіння дуги зростає, причому критичне значення струму (при якому час горіння дуги є найбільшим) є набагато меншим за номінативне значення і становить 10...15 А.



Мал. 1.17. Залежність часу горіння електричної дуги  $t_a$  від струму  $I$  у контакторі постійного струму з послідовною (1) та паралельною (2) системами магнітного дуття

Найпоширенішою є система послідовного дуття, конструкція якої зображена на мал. 1.18-а. Дугогасна котушка 1 або як її називають інакше – котушка магнітного дуття (blow-out coil) призначена для створення магнітного поля, яке організує рух дуги до дугогасної камери. Ця котушка (мал. 1.18-б) має невелику кількість витків (наприклад, у контактора з номінативним струмом 250 А дугогасна котушка має чотири витки), вона підключена до нерухомого контакту 2, з'єднаного з дугогасним рогом (на мал. не показаний), який потрібний не тільки для розтягування дуги, але й для захисту від неї котушки та інших частин апарата.

До системи магнітного дуття входить також магнітопровід, який складається з двох феромагнітних пластин 3 та 4, а також феромагнітного осердя 5, на якому встановлюється дугогасна котушка. Між нерухомим та рухомим 6 контактами при їх розмиканні виникає електрична дуга 7, яка може розглядатися як провідник зі струмом  $I$ . Струм, що тече через котушку 1, створює в осерді 5 магнітний потік, напрям якого показано стрілкою, причому цей потік замикається через зазор між пластинами 3 та 4, створюючи в зазорі між пластинами (у зоні дуги) магнітне поле з індукцією  $B$ . В результаті виникає електродинамічна сила  $F$ , яка розтягує дугу та виштовхує її у дугогасну камеру.



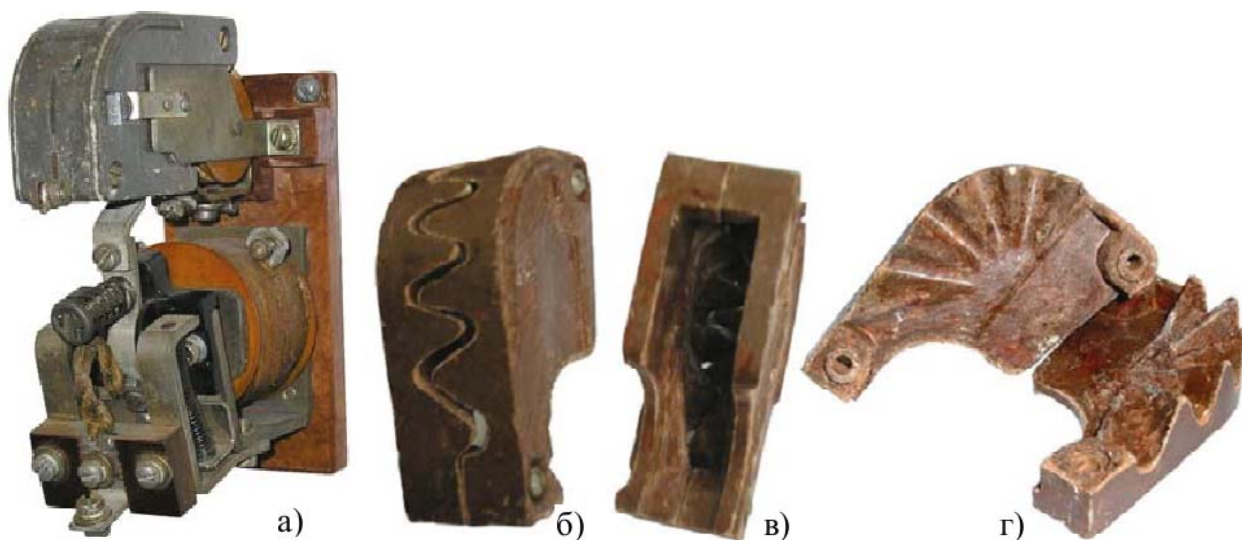
Мал. 1.18. Конструкція системи послідовного магнітного дуття (а) та дугогасна котушка контактора з номінальним струмом 250 А(б)

В системі послідовного дуття напрям сили не залежить від напрямку струму, оскільки при зміні напрямку струму змінюється й напрям вектора магнітної індукції, тому системи послідовного дуття можна застосовувати в апаратах як постійного так і змінного струму. Недоліками системи послідовного дуття, окрім низької ефективності при малих струмах, є також досить велика матеріаломісткість, а також втрати енергії у ввімкненому положенні контактора – дугогасна котушка споживає енергію весь час, коли струм тече через струмопровід контактора, хоча магнітне поле потрібно створювати лише при розмиканні його контактів.

Система паралельного дуття, незважаючи на більшу ефективність гасіння малих струмів, зараз майже не застосовується через незручність монтажу таких апаратів (окрім підключення головних контактів треба підключати й дугогасні котушки). Системи незалежного дуття застосовують, коли апарат працює лише при одному напрямі струму (неревверсивно), тому що при зміні напрямку струму буде

змінюватися й напрям дії електродинамічної сили, отже дуга, замість того, щоб видуватися у камеру, буде потрапляти в апарат, руйнуючи його.

Щілинна дугогасна камера. Дугогасні камери, що зазвичай застосовуються в контакторах (мал. 1.19-а) називають щілинними. Щілинна камера складається з двох стулок, які виробляють з спеціальних негорючих дугостійких пластмас. Стулки охоплюють міжконтактний проміжок, у якому виникає електрична дуга. Простір між стулками навколо контактів називають порожниною, яка звужується на периферії камери й переходить у найбільш вузьку частину – щілину. Вид дугогасної камери з боку щілини та з боку порожнини показано на мал. 1.19-б та мал. 1.19-в відповідно. Оскільки щілина камери контактора орієнтована паралельно осі електричної дуги, таку камеру називають камерою з повздовжньою щілиною. Щілина камери може бути прямолінійною або зигзагоподібною як у даному випадку.



Мал. 1.19. Електромагнітний контактор (а) та його дугогасна камера: у зібраному стані – вид з боку щілини (б), вид з боку порожнини (в), в розібраному стані (г)

Процес дугогасіння у камері пов'язаний з охолодженням дуги у щілині. З точки зору гасіння дуги, найбільш ефективними і компактними є камери з зигзагоподібними щілинами. З іншого боку, камери з зигзагоподібними щілинами є найменш зносостійкими, тому їх застосовують в апаратах з малою частотою комутацій, до яких не висуваються вимоги щодо великого ресурсу роботи (зносостійкості), і навпаки, до яких висуваються жорсткі вимоги щодо габаритів і маси. Тому в контакторах, які застосовують в електротранспорті, використовують камери, щілини яких мають зигзагоподібну форму.

Менш ефективними й компактними, але більш зносостійкими є камери з прямолінійними щілинами, які, у свою чергу, умовно поділяють на камери з вузькими та широкими подовжніми щілинами. Якщо ширина щілини є меншою за діаметр дуги при робочому струмі, таку щілину вважають вузькою, а якщо ширина щілини є більшою за діаметр, її вважають широкою. Камери з широкими щілинами є найбільш зносостійкими, але й найбільш габаритними, тому їх застосовують у тих галузях, де зносостійкість має першочергове значення, а габарити апарата відступають на другий план. Такою галуззю є металургія (прокатне виробництво), де частота комутацій контакторів сягає 1200 на годину, а розміри прокатних цехів дозволяють розміщувати апарати з відносно великими габаритами.

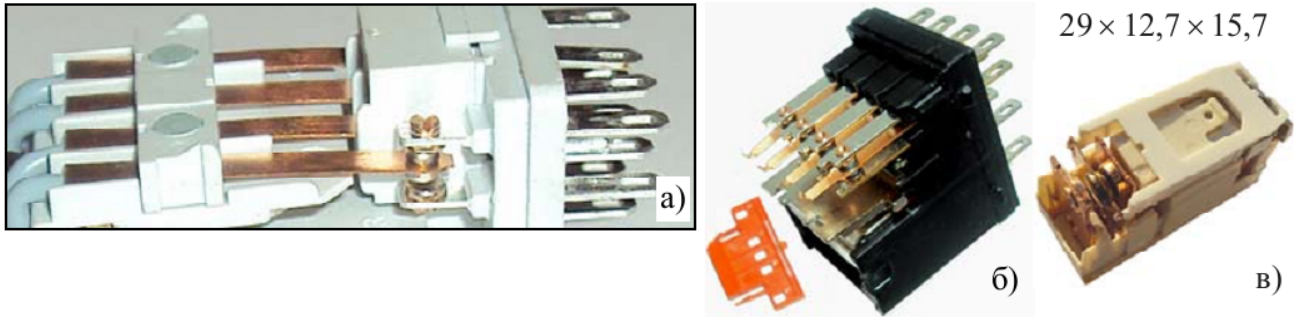
Гасіння електричної дуги постійного та змінного струму здійснюється у принципово різних умовах. У колі постійного струму електрична дуга горить стійко і дугогасні пристрої мають порушити стійкий характер дуги.

У колі змінного струму електрична дуга гаситься, власне, кожен півперіоду при переході струму через нуль, а після цього дуга або гасне остаточно, або виникає знов і горить, принаймні, впродовж ще одного півперіоду.

В електричних апаратах постійного та змінного струму застосовують подібні дугогасні системи але, враховуючи особливості гасіння дуги змінного струму, відповідні дугогасні системи мають певні особливості.

Призначення дугогасних пристроїв змінного струму полягає в тому, щоб сприяти прискоренню поновлення електричної міцності між контактного проміжку після переходу струму через нуль, зокрема за рахунок інтенсивного переміщення опорних точок дуги по контактних електродах.

При малих струмах (приблизно до 20 А) та резистивному навантаженні достатньо одного розриву кола на відстань до 1 мм, щоб дуга не відновлювалася після переходу струму через нуль. Саме такий спосіб застосовується в електричних реле (мал. 1.20-а, б), причому дуже малі за розмірами реле (мал. 1.20-в) здатні здійснити понад  $10^5$  комутацій резистивних кіл при струмі 16 А та напрузі 250 В.

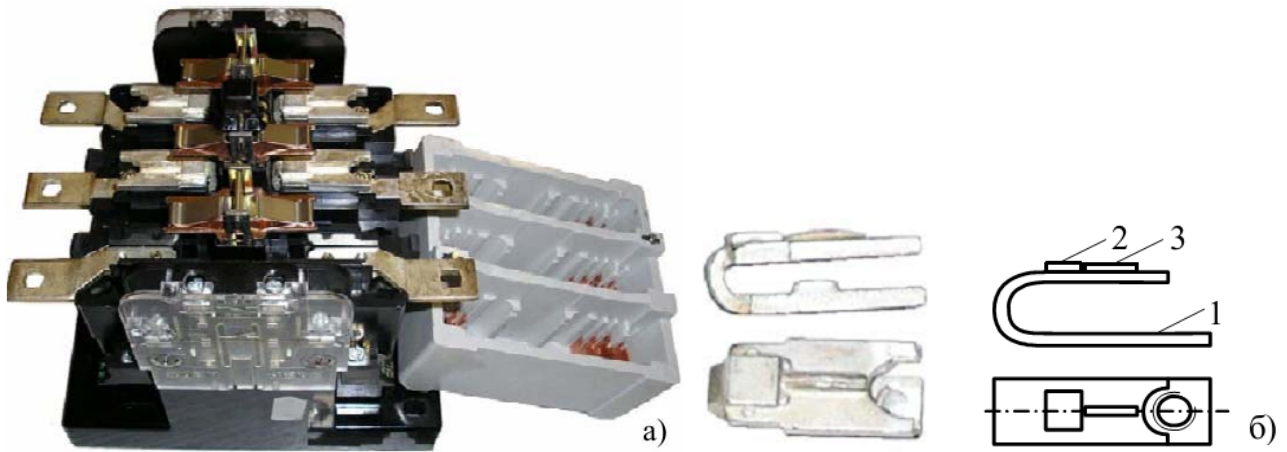


*а – традиційна конструкція контактного елемента; б – реле у якому застосовано контактні елементи без гнучких з'єднань (8 А, 250 В, АС); в – мініатюрне реле (16 А, 250 В, АС)*

Мал. 1.20. Застосування контактних елементів з одним розривом кола у полюсі в реле

Подвійний розрив кола містковим контактним елементом (див. мал. 1.10-г) при відносно невеликих струмах (приблизно до 40 А) виявляється достатнім для гасіння електричної дуги без будь-яких додаткових дугогасних пристроїв навіть при комутації кіл зі значною індуктивною складовою навантаження, зокрема кіл з асинхронними двигунами.

При комутації струмів понад 40 А лише подвійний розрив не забезпечує надійного дугогасіння, тому в дугогасних системах застосовують й інші пристрої, наприклад, дугогасні камери та решітки. При цьому розміри дугогасних пристроїв змінного струму є набагато меншими за розміри таких самих пристроїв, що застосовуються в апаратах постійного струму. На мал. 1.21-а зображено контактор змінного струму на 400 А, 380 В, категорія застосування АС-3 (прямий пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та його відмикання, коли він обертається) зі знятою камерою, яка у перегорнутому стані розташована поруч з контактором. Конструкція нерухомого контакту даного контактора показана на мал. 1.21-б. Його струмовідвід 1 має С-подібну форму, завдяки чому опорні точки дуги, під дією електродинамічної сили, що виникає в струмопроводі, швидко переміщуються з контактних накладок 2 на виступи 3, які виконують роль дугогасних рогів і спрямовують дугу у решітку, змонтовану безпосередньо в камері (на мал. 1.21-а добре видно, що кожна решітка складається лише з чотирьох пластин – цього виявляється цілком достатньо, щоб згасити дугу зі струмом 400 А.



*а – загальний вигляд зі знятою камерою; б – конструкція контактної вузла нерухомого контакту (фото та ескіз)*

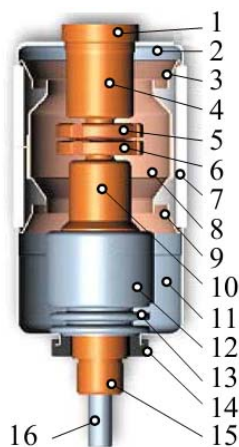
Мал. 1.21. Контактор змінного струму з номінальним струмом 400 А

Контактор змінного струму на 400 А для більш важкої категорії застосування – АС-4 (прямий пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та відмикання його у загальмованому стані), фото якого зображено на мал. 4.34, має набагато більші розміри, причому для гасіння такої дуги необхідно застосовувати ще й магнітне дугтя.

Принцип гасіння дуги у вакуумі виявляється дуже ефективним для комутаційних апаратів змінного струму завдяки тому, що при переході струму через нуль пари металу, які власне й утворюють вакуумну дугу, внаслідок наявності тиску у дузі, швидко розсіюються з між контактної проміжку, електрична міцність якого після цього стрімко зростає, випереджаючи зростання напруги, яка поновлюється на контактах. Відтак, дуга у вакуумі зазвичай згасає при першому ж переході струму через нуль.

Вакуумний переривник (vacuum interrupter), зображений на мал. 1.22, монтується у керамічному кільцеподібному корпусі 7, на торцях якого закріплюються два фланці – упорний 2 та прохідний 11. На упорному фланці закріплено стрижень 4 з нерухомим контактом 5 у нижній частині та виводом 1 для приєднання зовнішнього кола у верхній частині. Рухомий контакт 6 розташований у верхній частині рухомого стрижня 10, який проходить через отвір прохідного фланця 11 й закінчується виводом 15 з гвинтом 16 для приєднання зовнішнього кола. Для забезпечення переміщення рухомого контакту у напрямній втулці 14 без

порушення вакууму у порожнині переривника, де тиск становить  $10^{-5} \dots 10^{-7}$  мм.рт.ст., застосовують металеву гофровану трубку – сільфон 13.



Мал. 1.22. Вакуумний переривник

При розмиканні контактів 5 та 6 між ними з'являється електрична дуга, яка утворюється завдяки виділенню парів з контактних електродів. При переході струму через нуль температура електродів і, відповідно, приплив парів у між контактний проміжок зменшується, пари металів, які були до того у між контактному проміжку, розсіюються у радіальному напрямі і, оскільки швидкість зростання електричної міцності проміжку є дуже великою (порядку  $1 \dots 10$  кВ/мкс), після переходу струму через нуль дуга знов не виникає. Таким чином, при частоті мережі 50 Гц, час горіння вакуумної дуги не перевищує 10 мс.

Для перешкодження осадженню парів металів на поверхні корпусу при розсіюванні парів у радіальному напрямі при згасанні дуги застосовують спеціальний металевий екран 8 й додаткові екрани 3 та 9, розташовані відповідно на упорному та прохідному фланцях. Екран 12 захищає сільфон, перешкоджаючи потраплянню на нього парів металу.

Особливістю вакуумних переривників є те, що у вільному стані контакти в них є замкненими, завдяки різниці тиску всередині та ззовні корпусу. Розімкнений стан контактів у вакуумних апаратах забезпечується дією або поворотальних пружин, або бістабільних поляризованих актуаторів.

Суттєвою перевагою вакуумних апаратів є їх дуже висока комутаційна зносостійкість (порядку  $10^6$  циклів), яка забезпечується завдяки тому, що енергія у вакуумній дузі набагато менша за енергію дуги у традиційних апаратах, оскільки час горіння вакуумної дуги не перевищує 10 мс, а напруга на дузі сумірна з приелектродними падіннями і становить 10...20 В (в апаратах середньої напруги –

до 100 В, що набагато менше падіння на дузі у відповідних апаратах з елегазовими та масляними камерами). Інші переваги вакуумних апаратів пов'язані з відносно малими габаритами цих апаратів, а також з ізолюванням дуги від навколишнього середовища.

Недоліками вакуумних апаратів є їх відносно велика вартість, а також неспроможність здійснювати комутацію постійного струму. Суттєвим недоліком вакуумних апаратів є наявність ефекту зрізу струму (круте спадання струму при його підході до нуля), що призводить до виникнення комутаційних перенапруг. Для зменшення значення струму зрізу  $i$ , відповідно, комутаційних перенапруг, застосовують спеціальні контактні матеріали (стопи міді з хромом, металокерамічні композиції тощо), пари яких підтримують горіння дуги майже до природного переходу струму через нуль. У деяких випадках для зменшення перенапруг застосовують варисторні обмежувачі імпульсних виплесків, які підключають у розподільних пристроях безпосередньо між терміналом вакуумного комутаційного апарата, до якого приєднується фідерний кабель, та терміналом заземлення.

Гасіння дуги в середовищі елегазу, яке застосовується в апаратах середніх та високих напруг, а також відповідні дугогасні пристрої будуть розглянуті у підрозділах, присвячених цим апаратам (п. 4.2.1 та п. 4.3.1).

#### Література:

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.



### **ЛЕКЦІЯ №3.**

#### **Тема: «Тенденції ринку та класифікація електричних апаратів»**

##### **План**

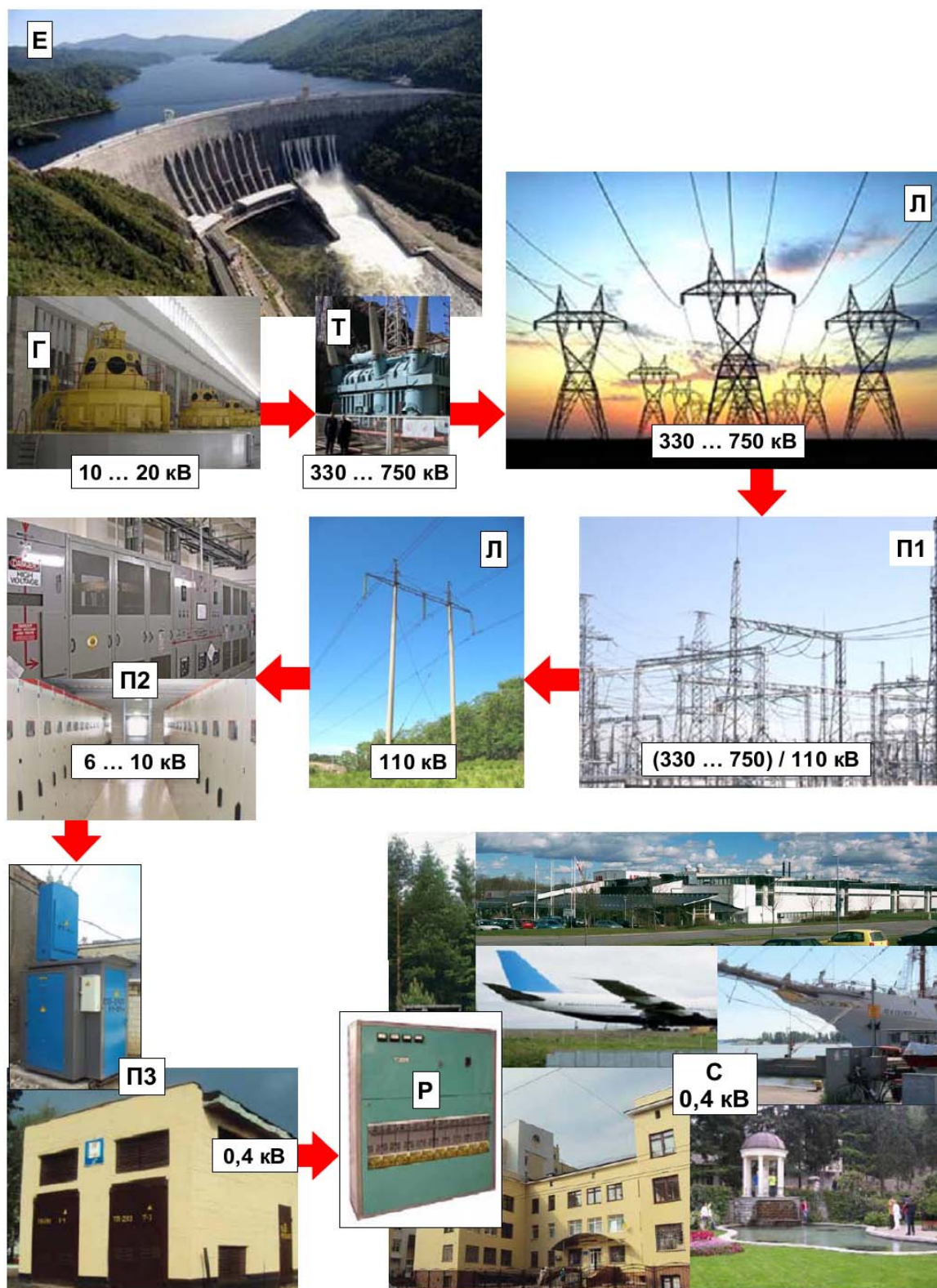
1. Розвиток виробництва електричної енергії та тенденції ринку електричних апаратів;
2. Класифікація електричних апаратів;
3. Напівпровідникові комутаційні апарати.

#### **1. Розвиток виробництва електричної енергії та тенденції ринку електричних апаратів**

Електрична енергія виробляється на електричних станціях – гідравлічних (ГЕС), теплових (ТЕС), атомних (АЕС) та електростанціях іншого типу, де відповідно гідравлічна, теплова та атомна енергія перетворюється спочатку на механічну, а вже потім, за допомогою синхронних генераторів (гідрогенераторів на ГЕС та турбогенераторів на ТЕС та АЕС) механічна енергія перетворюється на електричну зазвичай на рівні середніх напруг (10...20 кВ). Місця споживання електричної енергії у переважній більшості випадків віддалені на десятки й сотні кілометрів від електростанцій, тому транспортування електроенергії до місць споживання, з метою зменшення втрат енергії, здійснюється на високих напругах (110 кВ та більше). Підвищення напруги здійснюється безпосередньо на електростанціях за допомогою силових трансформаторів, причому якщо генератори розташовують у спеціальних приміщеннях – машинних залах, то трансформатори – за межами приміщень – на спеціальній площадці, яку називають підвищувальною підстанцією і на якій крім трансформаторів встановлюють високовольтні комутаційні та інші апарати, які сприяють розподілу електричної енергії між лініями електропередачі (ЛЕП), що відходять від цієї підстанції.

Поблизу місця споживання електроенергії встановлюють так звані районні знижувальні підстанції, які приймають електричну енергію безпосередньо від високовольтних ЛЕП, знижують напругу до рівня 110...35 кВ та розподіляють

енергію між головними підстанціями, які знижують напругу до рівня 10...6 кВ та розподіляють енергію між місцевими підстанціями.



*Г – генератор на електростанції; Т – підвищувальний трансформатор; Л – високовольтні лінії електропередачі; П1, П2, П3 – відповідно районна, головна та місцева знижувальні підстанції; Р – увідно-розподільний пристрій споживача електроенергії; С – кінцеві споживачі*

Мал. 1.63. Схема руху електричної енергії від електростанції (Е) до кінцевих споживачів:

На місцевих підстанціях (наприклад тих, що встановлюються у житлових мікрорайонах) напруга знижується до рівня, на якому відбувається живлення кінцевих споживачів (у житлових мікрорайонах – це 220/380 В) і енергія розподіляється між ними. У споживача, перед тим, як потрапити до кінцевих електроприймачів (освітлювальні прилади, побутова електроапаратура тощо), електроенергія проходить через увідно-розподільний пристрій, де здійснюється облік спожитої енергії та її розподіл між електроприймачами.

Схема руху електричної енергії від електростанції до кінцевого споживача зображена на мал. 1.63.

На усіх етапах виробництва, перетворення, транспортування та споживання електричної енергії електричні апарати займають чільне місце. Разом з тим слід зазначити, що структура ринку електричних апаратів постійно змінюється. Інтерес споживачів до деяких видів апаратів з часом суттєво зменшується, деякі види апаратів взагалі відходять у минуле, натомість інші апарати виходять на нові рівні розвитку, знаходячи для себе нові застосування.

Крім того, успіхи у розвитку електротехніки та суміжних галузей сприяють появі нових видів апаратів та нових принципів їх побудови.

Так винайдення та освоєння виробництва висококоерцитивних постійних магнітів на основі рідкоземельних металокерамічних композицій сприяли розвитку масового виробництва й широкому застосуванню апаратів захисту від різницевого струму. Зараз ці апарати в усьому світі здійснюють надійний захист людей від прямих та непрямих дотиків до небезпечних струмопровідних частин електроустановок, а також протипожежний захист – таких апаратів за останні 20 років виготовлено та встановлено понад 2 млрд. штук.

Успіхи у вакуумній техніці за останні 20 років докорінно змінили структуру ринку відмикачів середніх напруг (до 35 кВ). Ці апарати з'явилися на ринку електротехнічної продукції приблизно 40 років тому, коли у відповідному сегменті ринку домінували маломасляні відмикачі. На початку 80-х років минулого століття частка вакуумних відмикачів середньої напруги складала не більше 10%, а зараз перевищує 80% актуального ринку, причому решта майже повністю припадає на

відмикачці з гасінням дуги у середовищі елегазу. Слід зауважити, що ринок відмикачів середніх напруг невинно зростає – приблизно на 10...12 % щорічно.

Суттєві успіхи у розвитку напівпровідникової техніки сприяли освоєнню масового виробництва й широкому застосуванню відносно дешевих напівпровідникових приладів, на базі яких були створені компактні й надійні перетворювачі – випрямлячі (rectifier) та інвертори (inverter).

Ці пристрої на сьогодні повністю витіснили перетворювачі, побудовані на інших принцип – електромашинні, електромеханічні та ртутні. Цікаво, що розвиток напівпровідникових перетворювачів сприяв появі й нових електричних апаратів – запобіжників для їх захисту або так званих швидкодіючих запобіжників.

Розвиток комп'ютерної техніки, а також побутової й офісної електроніки сприяв становленню і бурхливому розвитку ринку апаратури захисту чутливих електронних пристроїв від атмосферних та комутаційних перенапруг. Подібних прикладів зростання окремих сегментів ринку електричної апаратури можна навести чимало, але непоодинокими є й приклади протилежного характеру.

Ще 30 – 40 років тому майже усі телефонні станції були електромеханічними, побудованими на базі електромагнітних реле. Відповідно, потреба у таких апаратах була величезною. Зараз швидкими темпами відбувається заміна електромеханічних телефонних станцій на цифрові з мікропроцесорним керуванням. Відтак потреба в електромеханічних реле зменшилася у десятки (якщо не у сотні) разів, а виробництво таких апаратів як крокові шукачі взагалі було припинено. Така сама доля спіткала й деякі електромеханічні апарати керування, зокрема пускові реостати та регулятори збудження для електричних машин постійного струму, інтерес споживачів до яких також стійко знижується. У той же час, при керуванні двигунами змінного струму за відсутності вимог щодо регулювання швидкості (це стосується у першу чергу найбільш поширених асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором) позиції електромеханічних апаратів лишаються непохитними.

Електромеханічні апарати майже повністю витіснені напівпровідниковою та мікропроцесорною технікою з такої сфери як автоматичне керування. Але у такій дуже важливій галузі як енергетика, позиції електромеханічних комутаційних

апаратів, внаслідок їх деяких унікальних властивостей, не похитнулися й навіть укріпилися і не існує скільки-небудь обґрунтованих прогнозів зменшення зацікавленості споживачів електромеханічних комутаційних апаратів у цих апаратах в енергетичній сфері. Не спостерігається також тенденцій до зниження темпів зростання ринку електромеханічних апаратів кіл керування, деякі властивості яких не дозволяють аналогічним за призначенням напівпровідниковим пристроям конкурувати з цими апаратами.

## **2. Класифікація електричних апаратів**

Класифікація – це процес та результат групування об’єктів дослідження (у тому числі продуктів людської діяльності) відповідно з їх загальними ознаками. Будь-яка класифікація є досить умовною, суб’єктивною (особливо це стосується продуктів людської діяльності, зокрема електричних апаратів). У той же час, класифікація не тільки сприяє спрощенню спілкування людей, які її застосовують, а й дозволяє сформулювати загальні вимоги до тих чи інших продуктів зі спільними ознаками, а також виявити очікувані потреби людства в існуючих та нових продуктах. Наведена нижче класифікація враховує реалії ринку комутаційних електричних апаратів, тенденції їх розвитку та перспективи застосування у майбутньому.

### ***Класифікація електричних апаратів за призначенням***

У багатьох джерелах електричні апарати поділяють на класи відповідно до їх призначення:

- комутаційні апарати (здійснюють комутацію електричних кіл при розподіленні електричної енергії);
- апарати керування (здійснюють керування обладнанням – електричними машинами, технологічними об’єктами) і застосовуються при автоматизації виробничих процесів)
- апарати захисту (забезпечують захист людей, тварин, майна та довкілля від шкідливої дії електричної енергії);
- обмежувальні апарати (забезпечують обмеження надструмів та перенапруг у мережах);

- апарати контролю (здійснюють моніторинг параметрів технологічних процесів та сигналізують про їх стан).

Цей пункт класифікації ми наводимо як данину традиціям адже, як уже зазначалося у вступі, поділ електричних апаратів на класи за призначенням є досить умовним, оскільки багато апаратів мають ознаки, які дозволяють відносити їх до різних груп. Наприклад, вимикачі-роз'єднувачі, комбіновані із запобіжниками, можуть бути віднесені і до комутаційних апаратів, і до апаратів керування, і до апаратів захисту. А якщо у цьому апараті застосована вставка так званого струмообмежувального запобіжника, то цей апарат можна віднести й до класу обмежувальних апаратів.

### ***Класифікація електричних апаратів за родом струму***

Також небездоганною є класифікація електричних апаратів за родом струму, при якому вони мають працювати – хоча існують апарати, що працюють винятково у колах змінного струму або тільки у колах постійного струму, існує також велика кількість різновидів апаратів, що можуть працювати як у колах змінного струму, так і у колах постійного струму.

### ***Класифікація електричних апаратів за номінативною напругою***

Більш об'єктивною є класифікація електричних апаратів за їх номінативною напругою. Нагадаємо, що значення номінативної напруги апарата встановлює виробник, причому номінативна напруга апарата повинна відповідати значенню номінальної напруги мережі, у якій має працювати апарат з урахуванням визначених виробником умов. За цією ознакою апарати поділяють так:

- апарати низької напруги тобто апарати з номінативною напругою до ~1000 В (змінного струму) або до 1500 В(постійного струму);
- апарати середньої напруги – від ~1000 В до 35 кВ (верхня межа у деяких країнах є вищою – до ~52 кВ) або від 1,5 кВ до 5 кВ;
- апарати високої напруги (вище верхньої межі середніх напруг, причому апарати високої напруги – це переважно апарати змінного струму).

Апарати низької, середньої та високої напруги суттєво відрізняються за номенклатурою, конструкцією й умовами роботи, тому, хоча будь-який апарат може

мати декілька номінативів (рейтингів) напруги, усі ці значення для даного апарата ніколи не виходять за межі одного діапазону.

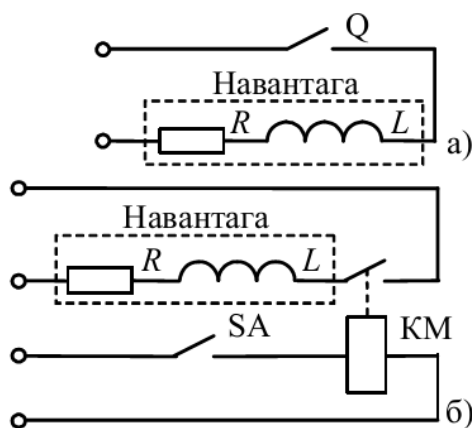
### **Класифікація електричних апаратів за типом комутаційного елементу**

Відповідно до типу комутаційного елементу електричні апарати поділяють на такі класи:

- електромеханічні електричні апарати;
- напівпровідникові електричні апарати;
- гібридні електричні апарати.

Електромеханічні комутаційні апарати (mechanical switching device) замикають та розмикають електричні кола за допомогою контактів, причому будь-який з цих апаратів може бути визначений відповідно до середовища, де його контакти розмикаються та замикаються, наприклад повітряний, елегазовий, вакуумний тощо.

Розрізняють електромеханічні апарати з ручним та не ручним керуванням (мал. 1.64). В апаратах з ручним керуванням замикання та розмикання контактів здійснюється за рахунок м'язової енергії оператора, а апарати з не ручним керуванням можуть бути визначені відповідно до способу, яким забезпечується сила, необхідна для замикання та розмикання контактів, наприклад електромагнітні, електропневматичні тощо.



$R, L$  – відповідно резистивна та індуктивна складові імпедансу навантаження;  $Q$  – силовий комутаційний апарат з ручним керуванням;  $KM$  – контактор (силовий комутаційний апарат з електромагнітним керуванням);  $SA$  – контакт керування стороннього апарата.

Мал. 1. 64. Схеми підключення до навантаження електромеханічних комутаційних апаратів з ручним (а) та не ручним (б) електромагнітним керуванням:

Головними перевагами електромеханічних комутаційних апаратів є можливість забезпечення так званої функції роз'єднання та незначне падіння напруги на замкнених контактах при проходженні через них робочого струму.

Поняття функції роз'єднання (isolation; isolating function) детально розглянуто нижче у п. 3.3 даного посібника. Тому, не торкаючись вимог щодо забезпечення цієї функції, зазначимо, що ця функція є дуже важливою для комутаційного апарата, оскільки її наявність є свідченням можливості безпечного проведення робіт у навантаженні при розімкненому стані апарата. Функція роз'єднання в електромеханічних комутаційних апаратах забезпечується передусім за рахунок створення ізоляційного проміжку певної довжини між розімкненими контактами, що перешкоджає пробією цього проміжку імпульсною напругою та виникненню струмів витoku небезпечного рівня внаслідок забруднення ізоляційних поверхонь апарата.

Падіння напруги на контактному комутаційному елементі знаходиться у межах від 10...20 мВ (при струмах 1000 А та більше) до 60...80 мВ (при менших значеннях струму). При цьому виділення енергії, що перетворюється на тепло в контактних елементах є відносно невеликим.

Наприклад, при струмі 100 А та падінні напруги на контакті 40 мВ потужність втрат енергії у цьому контакті становитиме  $100 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 4$  Вт.

Отже, за одну секунду у контакті при цьому «втрачається» (перетворюється на тепло) лише 4 Дж енергії. Якщо напруга джерела живлення становить 220 В, то за одну секунду через контакт до навантаження проходить  $100 \cdot 220 \cdot 1 = 22\ 000$  Дж енергії. Відтак «коефіцієнт корисної дії» контактного комутаційного елемента становить  $(22\ 000 - 4) / 22\ 000 = 99,98\ %$ .

Головними недоліками електромеханічних комутаційних апаратів є наявність рухомих частин (а відтак – зниження надійності цих апаратів) та виникнення на контактах при їх розмиканні електричної дуги, яка не тільки призводить до небажаних ефектів – теплового, світлового та звукового, а й суттєво зношує контакти, скорочує ресурс роботи апарата.



### 3. Напівпровідникові комутаційні апарати

Напівпровідникові комутаційні апарати (semiconductor switching device) призначені для вмикання струму в електричних колах за допомогою керування провідністю напівпровідника.

У напівпровідникових апаратах постійного струму для комутації електричних кіл зазвичай застосовують транзистори (найчастіше IGBT транзистори) або двоопераційні тиристори, а в апаратах змінного струму – тиристори різних типів та симістори. Схеми підключення до навантаження найпростіших напівпровідникових комутаційних апаратів постійного та змінного струму зображені на мал. 1.65 та 1.66.

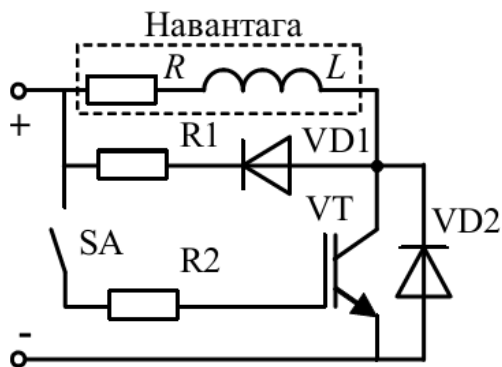
Напівпровідниковий апарат постійного струму (мал. 1.65) забезпечує комутації струму у навантаженні з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  завдяки силовому транзистору  $VT$ , керування яким здійснюється допоміжним контактом стороннього апарата  $SA$  (який працює у колі керування даного апарата).

У вихідному положенні (при розімкненому контакті  $SA$ ) транзистор  $VT$  знаходиться у закритому стані, отже струм через навантаження не тече.

При замиканні контакту апарата  $SA$  на затвор транзистора надходить позитивний потенціал, завдяки чому транзистор  $VT$  відкривається і через навантаження починає текти струм. Розмикання вказаного контакту сприяє запиранню транзистора  $VT$  і перериванню струму у навантаженні. Оскільки тривалість процесу запирання транзистора є дуже короткою (порядку  $1 \mu\text{с}$ ), за відсутності у схемі гілки  $VD1$ ,  $R1$  магнітна енергія, що нагромаджується в індуктивності  $L$  навантаження перед моментом переривання струму, призведе до виникнення перенапруг, які викличуть пробій ізоляції і створять струмопровідні шляхи, де нагромаджена в індуктивності енергія перетвориться на теплову. При цьому вийдуть з ладу і навантаження, і джерело живлення, і силовий транзистор, захист якого додатково здійснює діод  $VD2$ .

За наявності гілки  $VD1$ ,  $R1$  у момент запирання транзистора  $VT$  діод  $VD1$  відкривається і утворюється замкнений контур: навантаження з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  –  $VD1$  –  $R1$ , струм у якому від початкового значення  $i_0 = U/R$ , де  $U$  – напруга живлення, поступово зменшиться до нуля за експоненціальним законом зі сталою часу  $\tau = L / (R + R_1)$ , де  $R_1$  – опір резистора  $R1$ . У момент запирання

транзистора VT миттєве значення напруги  $u$  на навантаженні буде залежати від співвідношення опорів  $R$  та  $R_1$ , а саме  $u = U \cdot R_1 / R$ . Інакше кажучи, якщо  $R_1 > R$ , то у момент комутації на навантаженні може виникнути перенапряга певного рівня. Як бачимо, збільшення опору резистора  $R_1$  призводить до пришвидшення процесу розмикання струму (зменшується стала часу  $\tau$ ), але збільшувати значення опору  $R_1$  можна лише до рівня, при якому перенапряга у момент комутації не перевищить допустимого значення для ізоляції навантаження та допустимих значень для напівпровідникових приладів.



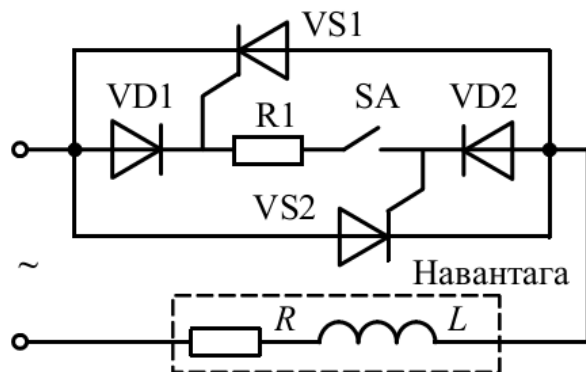
$R, L$  – відповідно опір та індуктивність навантаження;  $VT$  – силовий транзистор у головному колі;  $R_1, R_2$  – резистори у колі керування;  $VD_1, VD_2$  – допоміжні діоди;  
 $SA$  – сторонній апарат керування

Мал. 1.65. Схема підключення напівпровідникового комутаційного апарата постійного струму до навантаження

Напівпровідниковий апарат змінного струму (мал. 1.66) забезпечує комутацію струму у навантаженні з опором  $R$  та індуктивністю  $L$ ) завдяки силовим тиристорам  $VS_1$  та  $VS_2$ , керування провідністю яких здійснюється допоміжним контактом стороннього апарата  $SA$ . У вихідному положенні (при розімкненому контакті  $SA$ ) обидва тиристора  $VS_1$  та  $VS_2$  знаходяться у закритому стані, отже струм через навантагу не тече. При замиканні контакту  $SA$  (залежно від полярності напруги джерела живлення у той момент) виникне струм в колі керування одного з тиристорів.

Наприклад, якщо в момент замикання контакту  $SA$  позитивним був верхній термінал, виникне такий шлях струму: верхній термінал – діод  $VD_1$  – резистор  $R_1$  – електрод керування тиристора  $VS_2$  – навантаження – нижній термінал. Оскільки потенціал аноду тиристора  $VS_2$  у той момент є позитивним відносно потенціалу

його катода, цей тиристор відкриється і струм у навантаження буде потрапляти вже безпосередньо через тиристор VS2, оминаючи резистор R1, опір якого набагато перевищує модуль імпедансу навантаження.



*R, L – відповідно опір та індуктивність навантаження; VS1, VS2 – силові тиристори у головному колі; R1 – резистор у колі керування; VD1, VD2 – діоди у колі керування; SA – сторонній апарат керування*

Мал. 1.66. Схема підключення напівпровідникового комутаційного апарата змінного струму

Отже струм у навантаженні суттєво (у десятки разів) збільшиться. Хоча в момент відкриття тиристора струм в його електроді керування практично перерветься, струм з анода у катод тиристора буде продовжувати текти і тиристор закриється лише після переходу струму через нульове значення. Після зміни полярності напруги і моменту переходу струму через нульове значення тиристор VS2 закриється, а тиристор VS1 відкриється і так далі. Тиристори будуть відкриватися й закриватися по черзі, лишаючись у відкритому стані пів періоду коливань напруги джерела (при частоті  $f = 50$  Гц пів періоду становить 10 мс). У такому режимі цей апарат буде працювати до тих пір, поки контакт SA буде лишатися у замкненому стані. При цьому через навантаження буде текти робочий струм навантаги  $I = U / Z$ , де  $U$  – напруга живлення (середньо-квадратичне значення),  $Z$  – модуль імпедансу навантаження.

Якщо розімкнути контакт SA, струм в електродах керування не буде виникати, а тиристор, через який у той момент тік струм навантаження, буде лишатися у відкритому стані аж до переходу струму через нульове значення. Після цього (за відсутності струму в електроді керування) інший тиристор не відкриється і проходження струму через навантаження припиниться. Отже, час відмикання

(проміжок часу між моментом розмикання контакту керування та моментом припинення проходження струму через навантаження) у напівпровідникових комутаційних апаратах змінного струму не перевищує 10 мс (пів періоду) при частоті мережі 50 Гц.

Висока швидкодія напівпровідникових комутаційних апаратів змінного струму є їх безумовною перевагою. Іншими перевагами цих апаратів є відсутність будь-яких рухомих частин, а відтак і відсутність проблеми механічної зносостійкості, та відсутність електричної дуги при комутації електричних кіл, отже і відсутність створюваних дугою ефектів – теплового, світлового та звукового.

Напівпровідникові комутаційні апарати мають і суттєві недоліки:

- відсутність функції роз'єднання;
- велике падіння напруги на комутаційному елементі;
- великі габарити і вартість;
- низька перевантажувальна здатність;
- чутливість до температури середовища;
- чутливість до перенапруг;
- схильність до процесу старіння;
- створення радіоперешкод.

Функція роз'єднання в напівпровідникових комутаційних апаратах не може бути забезпечена, оскільки напівпровідникові прилади не гарантують відсутності струмів витоку та не витримують імпульсних перенапруг високого рівня.

Пряме падіння напруги у напівпровідниковому комутаційному елементі є набагато більшим аніж у контактному елементі і становить 1...3 В. Отже, при струмі 100 А та падінні напруги 2 В потужність втрат енергії у цьому комутаційному елементі становитиме  $100 \cdot 2 = 200$  Вт, а «коефіцієнт корисної дії» зменшиться до 99,09 %. Таке збільшення втрат (у 50 разів більше, ніж у контактному елементі!) має не тільки економічні наслідки, а й може призвести до неприпустимого нагрівання апарата. Щоб цього не сталося, до конструкції напівпровідникового комутаційного апарата вводять радіатори, вентилятори тощо, а це призводить до збільшення габаритів апарата та його вартості.

Інші з перерахованих вище недоліків напівпровідникових електричних апаратів є спільними для будь-яких напівпровідникових пристроїв. Усі ці недоліки не дозволяють напівпровідниковим апаратам конкурувати з електромеханічними в енергетичній сфері (розподілу електричної енергії). Але у тих галузях, де до апаратів висуваються вимоги щодо плавного регулювання параметрів (наприклад, швидкості електродвигуна), щодо високої частоти комутацій електричних кіл, високої швидкодії, щодо якісної передачі сигналів з малою енергією (телефонія та інші засоби комунікацій), а також щодо роботи у вибухонебезпечному середовищі, напівпровідникові апарати успішно конкурують з електромеханічними, а подекуди майже повністю витіснили їх з актуального ринку.

Наприклад, до появи надійних напівпровідникових апаратів електроприводи з регульованою швидкістю будувалися виключно на складних, дорогих та малонадійних двигунах постійного струму, регулювання швидкості обертання у яких здійснювалося введенням/виведенням резисторів у колах якоря та збудження електромеханічними комутаційними апаратами. Прості, дешеві, високонадійні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором застосовувалися там, де швидкість не треба регулювати (наприклад, вентиляційні установки) або там, де швидкість регулюється іншими засобами (наприклад, металорізальні верстати). З появою на ринку надійних та дешевих напівпровідникових приладів розпочався бурхливий розвиток частотно-регульованих електроприводів на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Незважаючи на наявність радіаторів та вентиляторів ці пристрої у сукупності з асинхронним двигуном набагато компактніші, дешевші й надійніші, аніж приводи, побудовані на базі електричних двигунів постійного струму та електромеханічних систем керування ними.

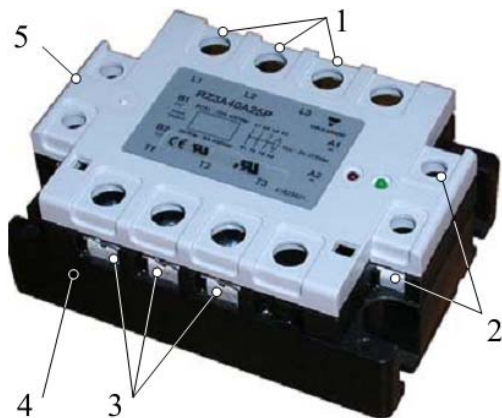
Зовнішній вигляд одного з напівпровідникових пристроїв частотного регулювання швидкості асинхронного двигуна зображено на мал. 1.67.

У напівпровідникових комутаційних апаратах, зокрема у контакторах (мал. 1.68), не виникає електрична дуга, відтак вони мають суттєві переваги над електромеханічними апаратами при роботі у вибухонебезпечному середовищі.



*1 – напівпровідниковий блок; 2 – вентилятор; 3 – радіатор*

Мал. 1.67. Регулятор швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:



*1 – термінали для підключення трифазного джерела живлення навантаження;  
2 – термінали пристрою, який імітує котушку електромагнітного актуатора контактора; 3 – термінали для підключення трифазного навантаження;  
4 – радіатор; 5 – напівпровідниковий блок*

Мал. 1.68. Триполюсний напівпровідниковий контактор:

Наведемо ще один приклад, який свідчить про переваги напівпровідникових апаратів у галузі якісної передачі сигналів з малою енергією. На мал. 1.69-а наведено фото фрагменту автоматичної електромеханічної телефонної станції. Електромеханічна станція на 1500 абонентів складалася з 70 шаф, у кожній з яких містилося декілька сотень реле. Зараз функції цієї станції виконує цифрова АТС, яка розміщується лише в одній шафі (мал. 1.69-б).



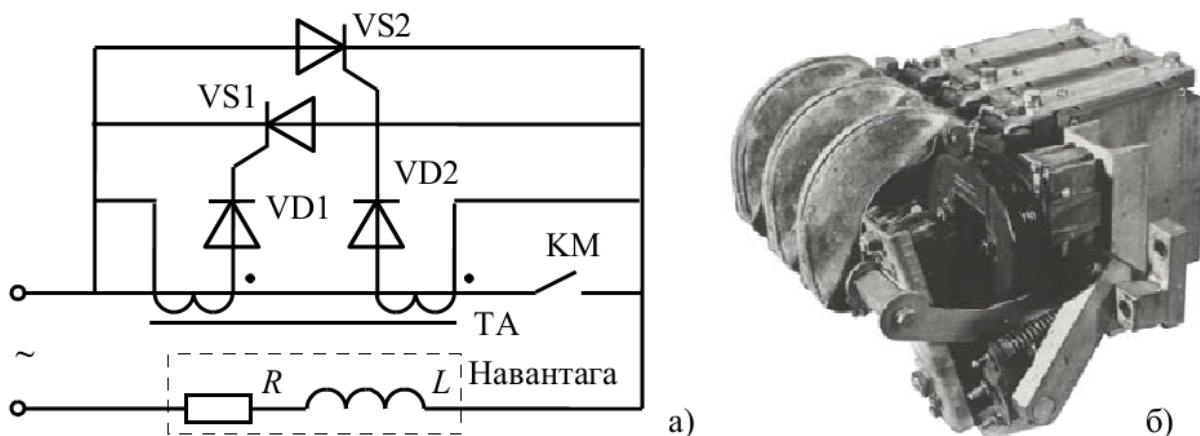
Мал. 1.69. Електромеханічна (а) та цифрова (б) АТС

Гібридні комутаційні апарати (hybrid switching device) – це апарати, у головних колах яких застосовуються як контактні елементи, так і напівпровідникові прилади. У ввімкненому стані струм головного кола тече переважно через контактні елементи, а при вимиканні струм перетікає у паралельні контактам гілки головного кола, де розташовані напівпровідникові комутаційні пристрої, які й здійснюють відмикання струму. Таким чином, гібридні апарати у певній мірі поєднують переваги електромеханічних та напівпровідникових апаратів – малі втрати енергії у робочому стані, а також високу швидкодію та практичну відсутність електричного зношування контактів.

Вперше принцип гібридної комутації був застосований в конструкціях контакторів змінного струму КТ6433, та деяких інших модифікаціях, розроблених у ВНДІЕ електроапарат (Харків) на початку 70-х років минулого століття. Невдовзі були розроблені й гібридні контактори постійного струму. Ці апарати були призначені для роботи в безперервних виробничих циклах металургійних підприємств з частотою до 1200 циклів вмикання-вимикання на годину. У таких умовах їх головні контакти швидко зношуються. Оскільки комутаційна зносостійкість контакторів становить приблизно 360 000 комутацій, а механічна зносостійкість може сягати 10 мільйонів, це означає, що контакти на контакторі треба міняти кожні два тижні, хоча його механічний ресурс вичерпується за рік. Реальна середня частота комутацій контакторів становить 300 - 400 комутацій на годину. При такій частоті електричний ресурс роботи контактів вичерпується за

один - два місяці, а механічний – за 3 - 4 роки. При цьому слід мати на увазі, що економічні втрати пов'язуються не стільки з вартістю замінюваних контактів, скільки з призупиненням виробничого процесу на час, необхідний для заміни контактів.

На мал. 1.70-а наведена принципова електрична схема головного кола полюсу гібридного контактора змінного струму та зовнішній вигляд контактора КТ6433, у якому реалізована ця схема.



Мал. 1.70. Принципова електрична схема головного кола полюсу гібридного контактора змінного струму (а) та зовнішній вигляд контактора КТ6433 (б)

Хоча тиристори VS1 та VS2 підключені паралельно головному контакту контактора КМ, а на електроди керування цих тиристорів приходять по черзі струмові імпульси від вторинних обмоток трансформатора струму ТА через діоди VD1 та VD2, при замкнених контактах струм через ці тиристори не тече, оскільки падіння напруги на контакті (а відтак і на тиристорах) є набагато меншим за пороговий струм відпирання тиристора. Таким чином, при замкнених головних контактах струм у навантаженні з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  тече від джерела живлення з напругою  $U$  лише через замкнені контакти. Отже, у цьому режимі падіння напруги на комутаційному елементі гібридного контактора є таким самим, як і у електромеханічного контактора – 50...100 мВ, тому гібридний контактор, як і електромеханічний контактор, не потребує пристроїв для охолодження комутаційних елементів (радіаторів, вентиляторів).

При розмиканні головного контакту на ньому виникає коротка електрична дуга, напруга якої становить 12...15 В, тому відкривається один з тиристорів – VS1 або VS2. Оскільки опір тиристора у відкритому стані є набагато меншим за опір

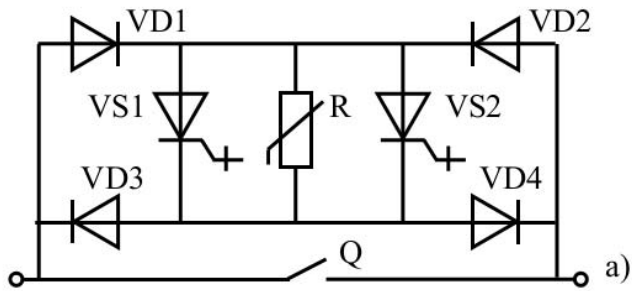


дуги, струм головного кола перетікає у тиристор і дуга на контактах згасає – тривалість часу горіння дуги має порядок мікросекунди. Після згасання дуги переривається струм й у первинній обмотці трансформатора ТА (вона увімкнена послідовно з головними контактами) і як наслідок – в колах керування тиристорів. За умови відсутності імпульсів керування, тиристор, у який перетік струм головного кола, закриється, а другий тиристор не відкриється. Таким чином, час переривання струму у навантаженні не перевищує половини періоду коливань напруги джерела (при частоті 50 Гц – не перевищує 10 мілісекунд). Оскільки дуга на контактах горить впродовж дуже короткого проміжку часу, електричне зношування контактів гібридних контакторів практично відсутнє і електрична зносостійкість наближається до механічної.

Недоліком контакторів, побудованих за даною схемою, є відсутність у них функції роз'єднання, оскільки напівпровідникові прилади – тиристиори шунтують міжконтактний проміжок. Втім, послідовно з головним колом контактора обов'язково має бути встановлений апарат захисту від коротких замикань (short-circuit protective device, SCPD) – автоматичний відмикач, запобіжник або вимикач, комбінований із запобіжником. Саме цей апарат повинен забезпечувати функцію роз'єднання у послідовному колі контактор – SCPD.

З появою на ринку потужних силових високовольтних IGBT транзисторів та двоопераційних IGCT тиристорів з'явилися дослідницькі роботи, присвячені розробці гібридних комутаторів – аналогів швидкодіючих відмикачів постійного струму для захисту мереж живлення електротранспорту.

Схема головного кола одного з таких апаратів, у якій були застосовані високовольтні IGCT тиристиори у паралельних до контактів колах, показана на мал. 1.71-а. Фото зразка апарата, де була застосована згадана схема, наведено на мал. 1.71-б. Апарат розрахований на застосування в мережах постійного струму з номінальною напругою 1600 В й передбачає тривале проведення струму до 4000 А та відмикання кіл коротких замикань з очікуваним струмом 5...6 кА. Роботи по створенню таких апаратів наразі знаходяться на стадії дослідних зразків.



Мал. 1.71. Принципова електрична схема головного кола швидкодіючого гібридного відмикача постійного струму (а) та зовнішній вигляд макетного зразка (б) такого відмикача (Jean-Marc Meyer, Alfred Rufer – Laboratory of Industrial Electronics, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne): Q – контакт головного кола; VD1...VD4 – силові діоди; VS1, VS2 – IGCT тиристри; R – варистор, у якому поглинається енергія, яка була нагромаджена у навантаженні перед розмиканням контактів у головному колі

#### Література:

1. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

## **ЛЕКЦІЯ №4.**

### **Тема: «Електробезпека: система захисту від згубної дії електричної енергії»**

#### **План**

1. Види небезпек, пов'язаних з електрикою;
2. Негативні фактори впливу електричного струму на організм людини;
3. Способи захисту від прямих та непрямих дотиків.

#### **1. Види небезпек, пов'язаних з електрикою**

Завдяки електричній енергії комфортність життя людей неухильно підвищується. З електрикою ми стикаємося на кожному кроці й постійно користуємося нею. Але, користуючись електрикою, ми повинні пам'ятати про її колосальну (а підчас – смертельну) небезпеку й створювати умови, за яких застосування електрики було б максимально безпечним.

Стандарт, який нині є чинним в Україні в статусі міждержавного стандарту, визначає поняття електробезпеки так: «електробезпека – це система організаційних і технічних заходів та засобів, що забезпечують захист людей от шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики».

Як бачимо, вказане визначення, по-перше, обмежується лише прямою дією таких факторів як вплив електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики, а по-друге, не розповсюджує поняття електробезпеки на тварин, майно й довкілля. В новітніх українських ПУЕ дане поняття визначається так: «електробезпека – це відсутність загрози життю, здоров'ю та майну людей, тваринам, рослинам і довкіллю, яка перевищує допустимий ризик». Як бачимо, це визначення вже враховує, що згубна дія електричної енергії передбачає як прямі, так і непрямі види небезпек.

Прямі небезпеки – це безпосередній вплив на людей, тварин, майно й довкілля електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної

електрики. Непрямі небезпеки – це опосередкований вплив на людей, тварин, майно й довкілля наслідків дії зазначених вище чинників через пожежі, вибухи, розповсюдження небезпечних хімічних речовин, радіації тощо. Прямі й непрямі небезпеки слід розглядати як наслідки аварійних ситуацій, які можуть спричиняти травмування людей або призводити до аварій з непередбачуваними наслідками. Найбільш розповсюдженими аварійними ситуаціями є:

- низький рівень захищеності електричного обладнання від проникнення всередину сторонніх предметів й вологи;
- пошкодження ізоляції в електроустановках;
- надструми: перевантаження та короткі замикання;
- перенапруги: атмосферні, комутаційні, а також викликані пошкодженнями в мережах;
- обриви, падіння і сплітання проводів в електричних мережах;
- електроустановки у приміщеннях з підвищеною небезпекою.

У наведеному переліку присутня низка термінів, які потребують тлумачення.

Електрообладнання (electric equipment) – це вироби, що призначені для виробництва, перетворення, передачі, розподілу та застосування електричної енергії, такі як електричні машини, трансформатори, комутаційна апаратура та апаратура керування, вимірювальні пристрої, пристрої захисту, кабельні системи, електроприймачі. Приклади електрообладнання наведені в самому визначенні, а під електроприймачами розуміють електрообладнання, що призначене для перетворення електричної енергії на інший вид енергії, наприклад, світлову, теплову, механічну енергію (освітлювальні й нагрівальні прилади, а також побутові й промислові пристрої, які мають у своєму складі електричні двигуни, тощо).

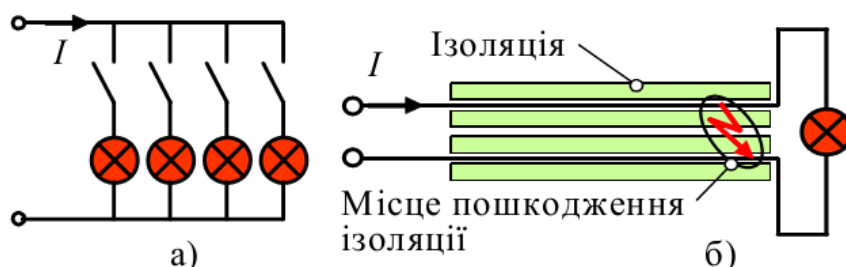
Електроустановка (electrical installation) – це комплекс поєданого електрообладнання з узгодженими властивостями, призначений для досягнення певної мети. Прикладом електроустановки може бути електропроводка (wiring system) з поєднаними з нею вимикачами, розетками, світильниками, побутовими приладами тощо.

Проникнення всередину електричного обладнання сторонніх предметів й вологи може призвести до пошкодження ізоляції, внаслідок чого може виникнути

надструм (over-current) – струм, що перевищує номінативне значення. Надструми призводять до надмірного нагрівання струмопровідних частин й ізоляції, яка їх оточує, і з часом можуть викликати коротке замикання (short circuit), під яким розуміють випадкове або навмисне з'єднання між двома або декількома струмопровідними частинами, що примусово зменшує електричний потенціал між цими струмопровідними частинами до нуля або майже до нуля. При короткому замиканні струм стрімко зростає у десятки й сотні разів, піднімаючи температуру провідників, ізоляції та оточуючих елементів конструкцій до небезпечних рівнів, що викликають займання, вибухи тощо.

Надструми можуть бути викликані й іншими причинами, зокрема перенапругами (over-voltage), як тими, що пов'язані атмосферними та комутаційними імпульсними виплесками, так і з тими, що пов'язані з пошкодженнями у мережах, зокрема з обривом нейтралі.

Надструми можуть виникнути й в електрично не пошкодженому колі внаслідок перевантаження (overload) мережі при надмірній кількості навантажень, одночасно підключених до неї (мал. 2.1-а). На відміну від перевантажень, короткі замикання обов'язково пов'язані з пошкодженням ізоляції (мал. 2.1-б).



Мал. 2.1. Схеми, що ілюструють причини виникнення надструмів внаслідок перевантажень (а) та коротких замикань(б)

Обриви, падіння й сплітання проводів в електричних мережах, окрім небезпек поблизу місця пошкодження, можуть викликати у споживачів перенапруги з аварійними наслідками. Нарешті, будь-які електроустановки, встановлені у приміщеннях з підвищеною безпекою, самі по собі є джерелом безпеки.

Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) так класифікують приміщення щодо безпеки ураження людини електричним струмом:

а) приміщення з підвищеною небезпекою (вологість; струмопровідний пилю, струмопровідна підлога; висока температура; можливість одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, технологічних апаратів, механізмів тощо, які мають з'єднання із землею, з одного боку і до металевих корпусів – з іншого боку);

б) особливо небезпечні приміщення (особлива вологість; хімічно активне середовище; одночасна наявність двох або більше умов, позначених у п. «а»);

в) приміщення без підвищеної небезпеки (відсутні умови, позначені у п. «а» та п. «б»)

## **2. Негативні фактори впливу електричного струму на організм людини**

Електричний струм, проходячи через тіло людини, призводить до негативних теплових, хімічних та біологічних наслідків.

Теплова дія струму проявляється у підвищенні температури тканин тіла людини, а у деяких випадках – до їх обгорання. Крім того, підвищення температури спричиняє зменшення електричного опору тіла людини, а відтак – підсилення впливу струму на людину.

Хімічна дія струму внаслідок електролізу проявляється в зміні хімічного складу крові та інших рідин в тілі людини, порушенню їх функцій.

Біологічна дія струму проявляється в небезпечному збудженні живих клітин організму, зокрема, нервових клітин та усієї нервової системи. Таке збудження може супроводжуватися судомою, явищами паралічу. Інколи можливий параліч дихального апарата, фібриляція й параліч серця.

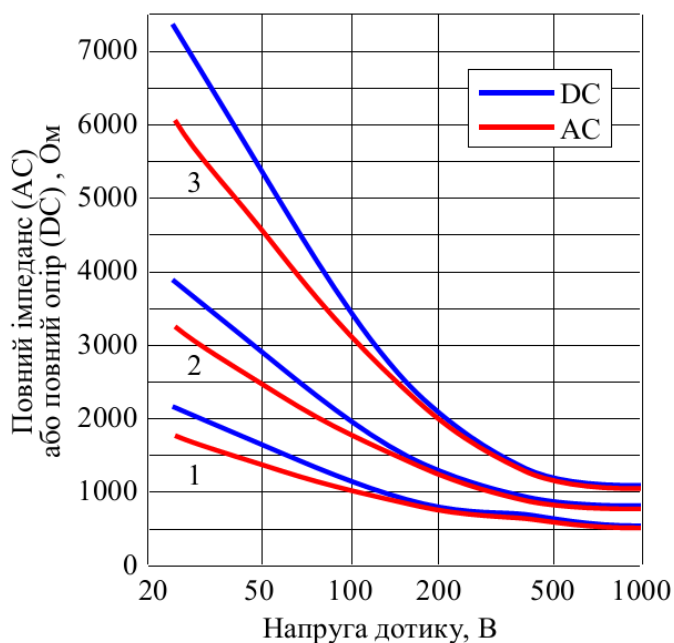
За біологічною дією більш небезпечним є змінний струм, за хімічною дією – постійний струм, а теплова дія постійного та змінного струму є практично однаковою. При цьому слід враховувати, що зі змінним струмом людина стикається набагато частіше, аніж з постійним.

IEV визначає удар електричним струмом (electric shock) як фізіологічний ефект, спричинений проходженням електричного струму через тіло людини або тварини. Електропаталогічні аспекти удару електричним струмом докладно розглянуто у публікації IEC60479-1.

Зокрема у цій публікації наводиться ілюстрація змін у кардіограмі та у кров'яному тиску внаслідок удару людини електричним струмом, яка свідчить, що серцева фібриляція (cardiac fibrillation), тобто хаотичне скорочення м'язів камер серця, яке веде до розладу серцевої діяльності, розпочинається одразу після моменту початку протікання струму через тіло людини. При цьому дуже швидко зменшується кров'яний тиск, припиняється циркуляція крові і, якщо впродовж декількох десятків мілісекунд не припинити протікання струму, це призводить до летального наслідку.

Дослідженнями, результати яких наведено в публікації ІЕС60479-1, встановлено, що патофізіологічна дія електричного струму на людину залежить як від значення струму, що тече через тіло людини, так і від часу його проходження. Значення струму через тіло людини залежить від (реальної) напруги дотику ((effective) touch voltage), а також від імпедансу  $Z_T$  (при постійному струмі – опору  $R_T$ ) тіла людини, які суттєво залежать від напруги дотику, роду струму, шляху струму та інших чинників.

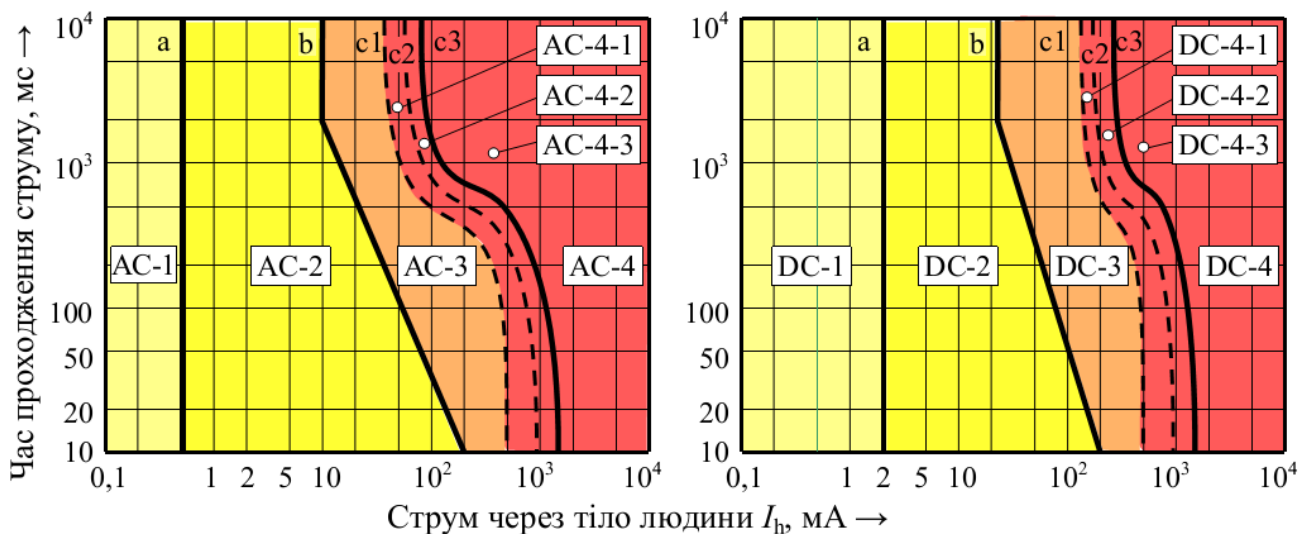
Залежності  $Z_T$  та  $R_T$  на шляху рука-рука при великих вологих поверхнях контактування від напруги дотику наведені на мал. 2.2.



Мал 2.2. Залежності повного імпедансу (при змінному струмі) та повного опору (при постійному струмі) тіла людини на шляху рука-рука від реальної напруги дотику: 1 – 5% населення; 2 – 50% населення; 3 – 45% населення

Як бачимо, імпеданс та опір тіла людини суттєво зростають при зменшенні напруги дотику, причому асимптотичні значення (при великих значеннях напруги) імпедансу та опору збігаються, а при низьких значеннях напруги значення опору  $R_T$  перевищує значення імпедансу  $Z_T$  приблизно на 20%. Відтак, при зменшенні напруги дотику з 200 В до 100 В змінний струм через тіло людини зменшується не вдвічі, а приблизно у 2,5...3,0 рази, а постійний струм – у 2,8 ... 3,5 разів.

Уявлення про вплив тривалості часу дії струму у сукупності зі значенням струму дають часо-струмові зони, що представлені на графіках, наведених на мал. 2.3.



Мал. 2.3. Часо-струмові зони впливу на людину струму при напрямі від лівої руки до ніг: змінний струм (AC) від 15 до 100 Гц – IEC60479-1, Figure 20; постійний струм (DC) – IEC60479-1, Figure 22. Пояснення щодо часо-струмових зон впливу змінного струму на людину: AC-1 (до 0,5 мА) – можливі певні відчуття, але без ефекту «посмикування». AC-2 (від 0,5 мА до ломаної b) – можливі відчутні мимовільні м'язові скорочення, але зазвичай без згубної електрофізіологічної дії. AC-3 (від ломаної b до кривої c1) – сильні мимовільні м'язові скорочення, утруднення дихання, оборотні порушення серцевої функції; зазначені порушення посилюються при зростанні струму; органічні порушення зазвичай не очікуються. AC-4 (вище кривої c1) – патофізіологічна дія може проявлятися у вигляді зупинки серця, зупинки дихання, опіків або інших наслідків на клітинному рівні; вірогідність фібриляції шлуночків зростає зі збільшенням струму та тривалості його дії. AC-4-1 (c1 - c2) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає 5 %. AC-4-2 (c2 - c3) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає приблизно 50 %. AC-4-3 (вище кривої c3)



– вірогідність фібриляції шлуночків перевищує 50 %. При тривалості дії струму менше 200 мс фібриляція шлуночків розпочинається тільки в уразливий період серцевого циклу. Пояснення щодо часо-струмових зон впливу постійного струму на людину DC-1 (2 мА) – а можливі слабкі відчуття поколювання під час вмикання, вимикання та швидкої зміни струму. DC-2 (від 2 мА до ломаної b) – мимовільні м'язові скорочення можливі, головним чином при вмиканні, вимиканні та швидкій зміні струму, але зазвичай без згубної електрофізіологічної дії. DC-3 (від ломаної b до кривої c1) – можуть виникати сильні мимовільні м'язові реакції та оборотні порушення у формуванні та здійсненні серцебиття; зазначені порушення посилюються при зростанні струму та терміну його дії; органічні порушення зазвичай не очікуються. DC-4 (вище кривої c1) – патофізіологічна дія може проявлятися у вигляді зупинки серця, зупинки дихання, опіків або інших наслідків на клітинному рівні; вірогідність фібриляції шлуночків зростає із збільшенням струму та тривалості його дії. DC-4-1 (c1 - c2) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає 5 %. DC-4-2 (c2 - c3) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає приблизно 50 %. DC-4-3 (вище кривої c3) – вірогідність фібриляції шлуночків перевищує 50 %. При тривалості дії струму менше 200 мс фібриляція шлуночків розпочинається тільки в уразливий період серцевого циклу.

Наведені вище графіки дозволяють формулювати вимоги до електричних апаратів захисту стосовно їх швидкодії у залежності від роду струму та номінальної напруги мережі.

### **3. Способи захисту від прямих та непрямих дотиків**

Статистика уражень електричним струмом свідчить, що найнебезпечнішими і частими причинами уражень є так звані прямі й непрямі дотики. Прямий дотик (direct contact) – це електричний контакт людей та тварин з активними частинами електроустановок, а непрямий дотик (indirect contact) – це електричний контакт людей та тварин з відкритими струмопровідними частинами, які стають активними (закороченими) за умови пошкодження (ізоляції).

Ситуації прямого дотику ілюструють схеми, представлені на мал. 2.4 – в усіх випадках людина торкається лінійного виводу навантаження, який при замкнених

контактах апарата захисту від коротких замикань (short-circuit protective device; SCPD) стає активним.

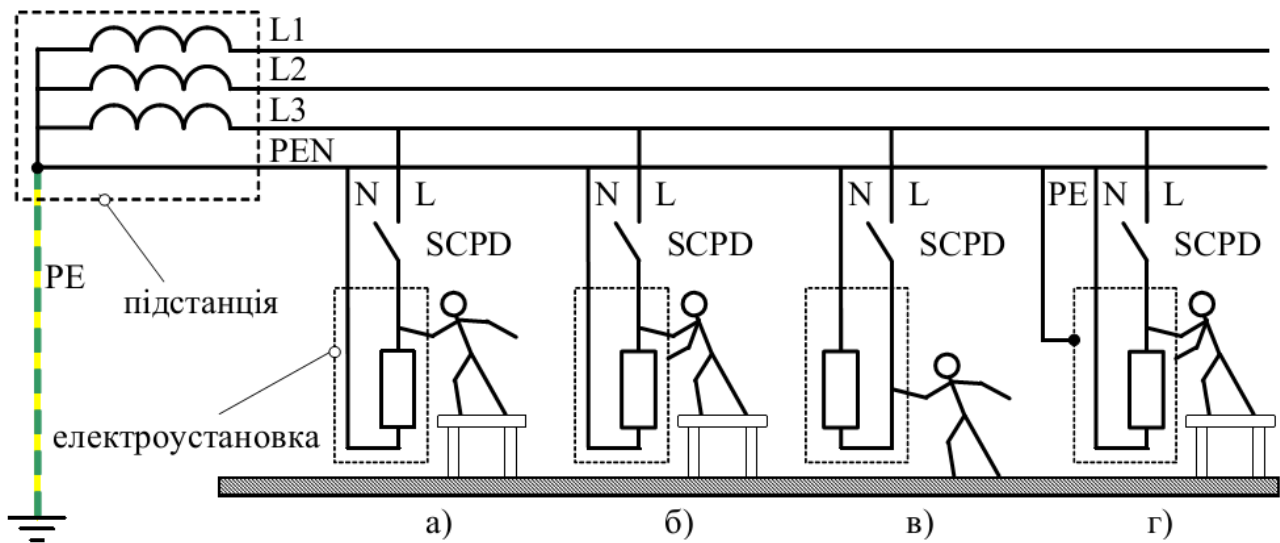
У перших двох ситуаціях (мал. 2.4-а, б) корпуси електроустановок не заземлені і людина, яка стоїть на ізолюваному помості, торкаючись лінійного провідника однією рукою, може не відчувати електричного удару, оскільки в цих випадках, на перший погляд, відсутні замкнені контури, якими міг би текти струм через тіло людини. Але ці ситуації не можна вважати безпечними, оскільки нема жодної гарантії, що в першому випадку людина випадково не торкнеться іншою рукою металевої частини, з'єднаної з землею (наприклад, з водопровідною або газовою трубою), і тоді між його руками почне текти струм, значення якого  $I$  буде визначатися напругою  $U$  між лінією й нейтраллю та імпедансом тіла людини  $Z_T$ :  $I = U / Z_T$ . При  $U = 220$  В та  $Z_T = 1000$  Ом (розрахунковий імпеданс тіла людини) струм  $I$  становитиме 220 мА, що є смертельно небезпечним практично для всіх людей, якщо він буде діяти впродовж хоча б однієї секунди (див. мал. 2.3-а).

Ситуація, яка відповідає мал. 2.4-в, може виявитися смертельно небезпечною, якщо людина у вогкому взутті стоїть на струмопровідній підлозі. У цьому випадку контур між лінійним та нейтральним провідниками через тіло людини може замкнутися через землю, яка є струмопровідною, а імпеданс на цьому шляху може становити від одиниць до декількох десятків Ом. Струм через тіло людини буде майже таким самим, як і у першому випадку. Ситуація, яка відповідає мал. 2.4-г, є смертельно небезпечною за будь-яких умов - струм через тіло людини буде не меншим за 220 мА.

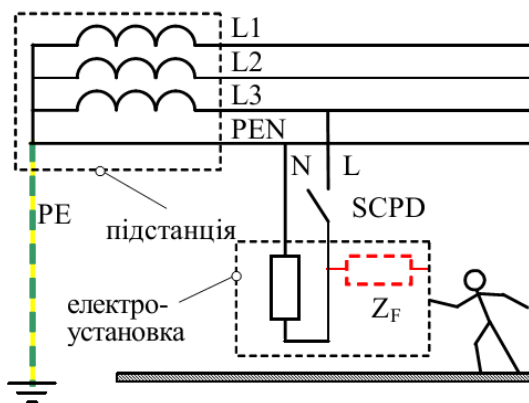
Хоча в усіх зазначених випадках струм, який тече через тіло людини, буде текти й через головне коло SCPD, такий струм є недостатнім для його спрацьовування (для цього необхідно, щоб струм сягав принаймні десятків Ампер) та від'єднання ураженої людини від джерела живлення.

Непрямий дотик може виникнути у разі контакту людини або тварини з незаземленим струмопровідним корпусом електроустановки за умови пошкодження ізоляції всередині установки (мал. 2.5). При цьому ураження людини або тварини електричним струмом може призвести до летального наслідку, навіть якщо в електроустановці буде мати місце не коротке замикання на корпус, а тільки

початкова стадія пробою ізоляції з достатньо високим імпедансом пошкодження  $Z_F$ . Струм через тіло людини чи тварини, який може бути смертельно небезпечним для них у такому випадку, є недостатнім для спрацювання SCPD.



Мал. 2.4. Ілюстрації до різних ситуацій прямого дотику



Мал. 2.5. Ілюстрація до ситуації непрямого дотику

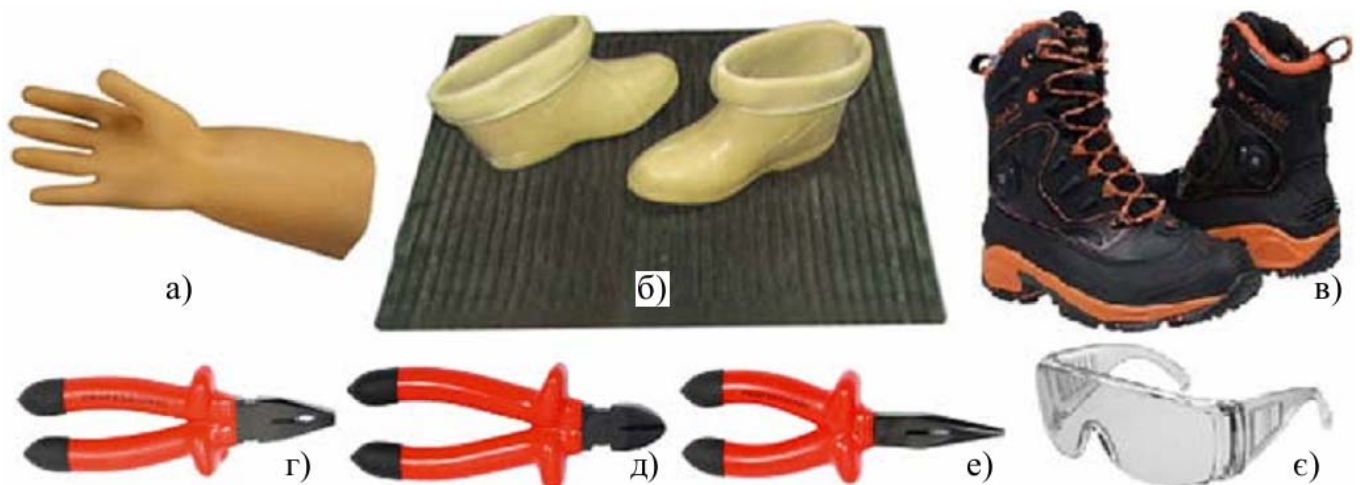
Способи захисту від прямих та непрямих дотиків можна поділити на дві групи: 1) способи, пов'язані з використанням засобів, що зменшують вірогідність проходження струму через тіло людини та 2) способи, пов'язані з обмеженням струму, який може проходити через тіло людини, та часу проходження струму.

***Використання засобів, що зменшують вірогідність проходження струму через тіло людини***

Основними засобами цієї категорії, є: 1) огорожі, бар'єри, ізоляційні оболонки; 2) індивідуальні електрозахистні засоби (гумові рукавички, боти, килимки тощо); 3) пристрої, що забезпечують електричне розділення кіл; 4) застосування обладнання класу II стосовно захищеності від ураження електричним струмом.

Приклади огорож (protective obstacle), бар'єрів (protective barrier) та оболонок (protective enclosure) представлені на мал. 4.113. Доступ до силового трансформатора з небезпечними терміналами середньої та низької напруги (див. мал. 4.113-б) обмежено огорожею жовтого кольору (попередження про небезпеку), шини розподільного пристрою низької напруги покриті ізоляційною поліамідною оболонкою, комутаційні апарати з відкритими струмопровідними частинами також захищені ізоляційними оболонками або мають ізоляційні бар'єри. Зазначимо, що доступ до приміщення, зображеного на мал. 4.113-б, повинні мати лише кваліфіковані особи, а якщо у приміщенні можуть бути присутніми особи, які не мають відношення до електрообладнання, то навіть така безпечна система має бути захищена оболонкою у вигляді металевої шафи (мал. 4.113-а).

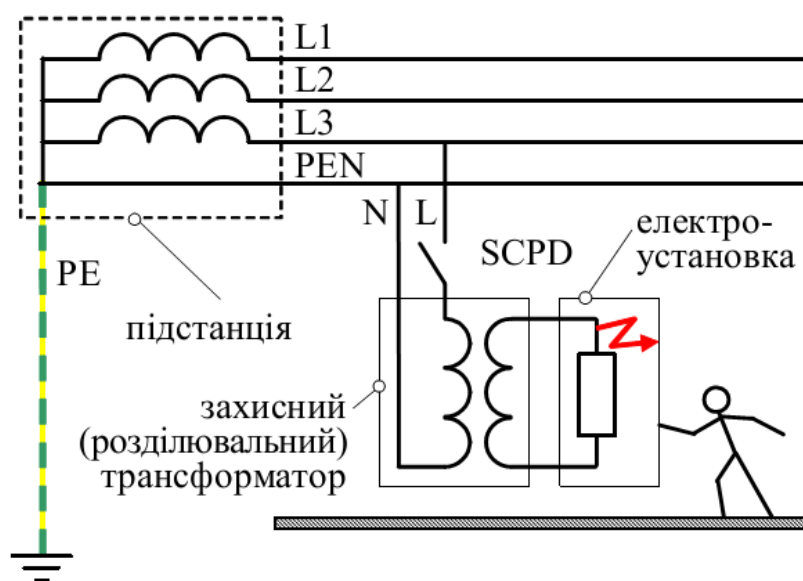
Індивідуальні електрозахистні засоби (мал. 2.6) не тільки суттєво знижують вірогідність проходження електричного струму через тіло людини, а й захищають окремі органи від опіків та потрапляння на них продуктів горіння електричної дуги.



Мал. 2.6. Індивідуальні електрозахисні засоби: а – рукавичка; б – боти та килимок; в – черевики; г, д, е – інструменти з ізольованим руків'ям; є – захисні окуляри

Живлення навантаження через трансформатор з посиленою між обмотковою ізоляцією (захисний розділювальний трансформатор – protective transformer) забезпечує електричне захисне розділення кіл, а саме відділення кола навантаження від кола мережі живлення (мал. 2.7), завдяки чому не тільки непрямий, а й навіть прямий дотик до небезпечних струмопровідних частин стає відносно безпечним. Даний спосіб електропостачання слід застосовувати для електроустановок,

розташованих в особливо небезпечних приміщеннях, наприклад у підвальних приміщеннях зі струмопровідною (земляною) підлогою.



Мал. 2.7. Застосування розділювального трансформатора для запобігання проходженню електричного струму через тіло людини

Базовий стандарт з електробезпеки ІЕС61140 встановлює чотири класи обладнання стосовно захищеності від ураження електричним струмом.

Обладнання класу 0 (class 0 equipment) – це обладнання з основною ізоляцією, що забезпечує основний захист, але це обладнання не передбачає захисту при пошкодженнях. Це обладнання може застосовуватися тільки в умовах неструмопровідного оточення (наприклад, у сухих приміщеннях з неструмопровідною підлогою), або в умовах електричного розділення, наприклад за допомогою розділювальних трансформаторів. Міжнародна електротехнічна комісія передбачає у майбутньому вилучити обладнання класу 0 з міжнародної стандартизації.

Обладнання класу I (class I equipment) – це обладнання, оснащене основною ізоляцією для основного захисту та терміналом для приєднання до системи захисного еквіпотенціального з'єднання електроустановки, що забезпечує захист при пошкодженнях ізоляції.

Обладнання класу II (class II equipment) – це обладнання, оснащене основною ізоляцією для основного захисту та додатковою ізоляцією для захисту при пошкодженнях або посиленою ізоляцією для основного захисту та захисту при пошкодженнях.

Обладнання класу III (class III equipment) – це обладнання, захисні властивості якого пов'язані з обмеженням напруги наднизьким рівнем як засобу основного захисту, а не захисту при пошкодженнях.

Застосування обладнання класу II, з подвійною або посиленою ізоляцією суттєво зменшує вірогідність прямих та непрямих дотиків, а відтак, й вірогідність проходження електричного струму через тіло людини.

***Способи обмеження струму, який може проходити через тіло людини, та часу проходження струму***

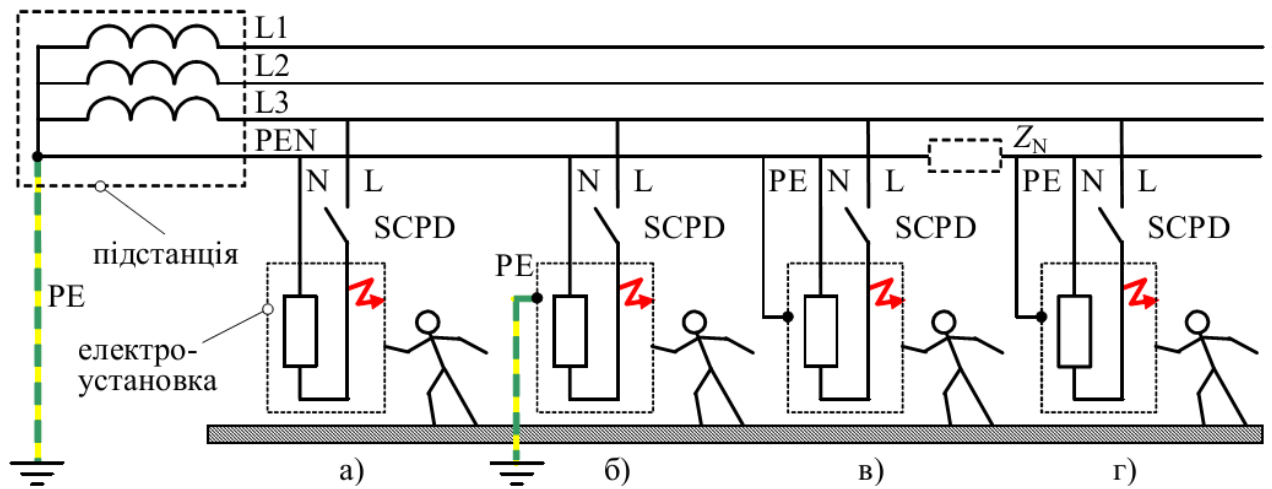
Основними способами цієї категорії є: 1) застосування апаратів, які автоматично відмикають живлення при коротких замиканнях в електроустановках; 2) застосування засобів вирівнювання потенціалів; 3) застосування апаратів автоматичного відмикання живлення при виникненні струму витоку.

**Апарати, які автоматично відмикають живлення при коротких замиканнях** в електроустановках (short-circuit protective device; SCPD), – це запобіжники й автоматичні відмикачі. Основним призначенням цих апаратів є захист ліній живлення від надструмів. Як це не прикро констатувати, в переважній більшості вітчизняних помешкань, зазначені апарати виконують саме ці функції, захищаючи людей лише від згубних наслідків надструмів (у першу чергу – від пожеж), жодним чином не реагуючи на такі небезпечні для людей чинники, як прямі й непрямі дотики, останні з яких виникають внаслідок пошкодження ізоляції в електроприймачах.

Проаналізуємо, наскільки непрямі дотики є небезпечними у різних ситуаціях, і як електричні апарати захисту від коротких замикань можуть допомогти уникнути цих небезпек (мал. 2.8).

Ситуація, що зображена на мал. 2.8-а є типовою для переважної більшості вітчизняних житлових помешкань – людина, стоячи на підлозі, торкається незаземленого металевого корпусу електроустановки (холодильника, пральної машини тощо). Дотик до корпусу електроустановки з пошкодженою ізоляцією між лінійним провідником та корпусом, залежно від низки чинників, може супроводжуватися різними наслідками – від відсутності будь-яких відчуттів (якщо людина, взута у сухе взуття, стоїть на сухій підлозі) або легкого поколювання (якщо

невзута людина стоїть на вологій підлозі) до летального наслідку (якщо людина іншою рукою тримається за трубу центрального опалення або за заземлений корпус іншої електроустановки). Оскільки струм через тіло людини не перевищує 1 А, SCPD не реагує на цю ситуацію й не вимикає пошкоджену електроустановку.



Мал. 2.8. Ілюстрації до різних ситуацій непрямого дотику

Приєднання корпусу електроустановки до місцевого заземлювального електроду (мал. 2.8-б) не завжди виправляє ситуацію з непрямыми дотиками – все буде залежати від імпедансу заземлення на підстанції та імпедансу місцевого заземлення. ПУЕ дозволяє мати граничні значення цих імпедансів 4 Ом та 30 Ом відповідно. При таких значеннях імпедансів струм через заземлювальний електрод місцевого заземлення не перевищуватиме 7 А ( $220 \text{ В} / (30 + 4) \text{ Ом}$ ). SCPD не прореагує на такий струм й не відключить електроустановку. Значення струму через тіло людини у цьому випадку важко розрахувати, але при несприятливому поєднанні чинників цей струм може виявитися смертельно небезпечним для людини.

Приєднання корпусу електроустановки до PEN провідника (мал. 2.8-в) призведе до короткого замикання при пошкодженні ізоляції в електроустановці і, як наслідок, до спрацювання SCPD. При цьому корпус електроустановки знеживиться й дотик до нього не призведе до електричного удару. Таким чином, апарат захисту від коротких замикань у деякому розумінні виконує функції апарата захисту від непрямих дотиків.

Слід зауважити, що потенціал на корпусі в момент відмикання електроустановки з пошкодженою ізоляцією в цьому випадку сягатиме значення  $I_{os} \cdot$

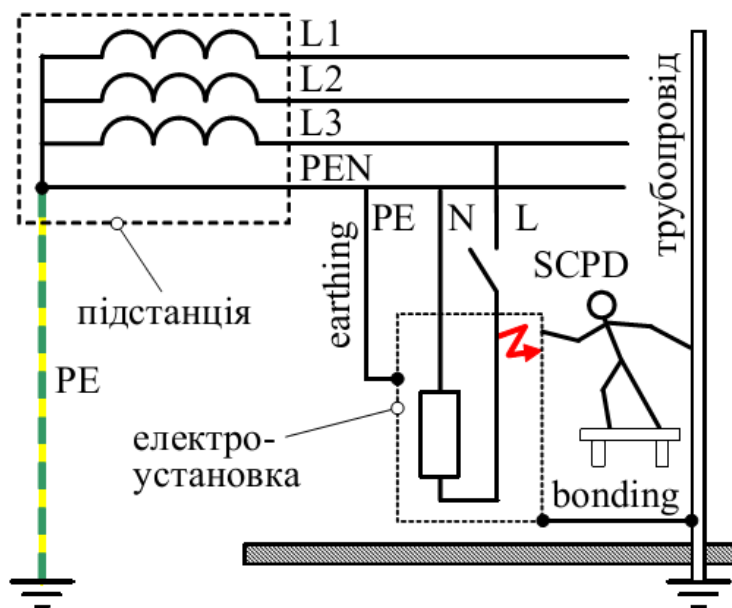
$Z_N$ , де  $I_{os}$  – струм відмикання SCPD, а  $Z_N$  – імпеданс PEN провідника між N терміналом на підстанції та точкою приєднання корпусу електроустановки до PEN провідника (мал. 2.8-г). Враховуючи, що відносно безпечною напругою для переважної більшості людей, є напруга у 50 В, можемо визначити граничне значення імпедансу  $Z_N$  для електроустановки з апаратом захисту від коротких замикань зі струмом відмикання  $I_{os}$ :

$$Z_N \leq 50 / I_{os}. \quad (2.1)$$

Наприклад, якщо апаратом захисту від коротких замикань в електроустановці є автоматичний відмикач побутового призначення з характеристикою C25 (див. п. 4.1.4), то струм його відмикання може становити 250 А, тому значення  $Z_N$  не повинно перевищувати  $50 / 250 = 0,2$  Ом.

**Вирівнювання потенціалів** або еквіпотенціальність (equipotentiality) – це стан, коли струмопровідні частини знаходяться при практично рівному електричному потенціалі. Цей стан забезпечується електричними з'єднаннями між струмопровідними частинами, які не призначені для проведення струму, тобто зрівнювальними або еквіпотенціальними з'єднаннями (equipotential bonding).

Схема, зображена на мал. 2.9, ілюструє принцип побудови захисту від непрямих дотиків за допомогою вирівнювального з'єднання.



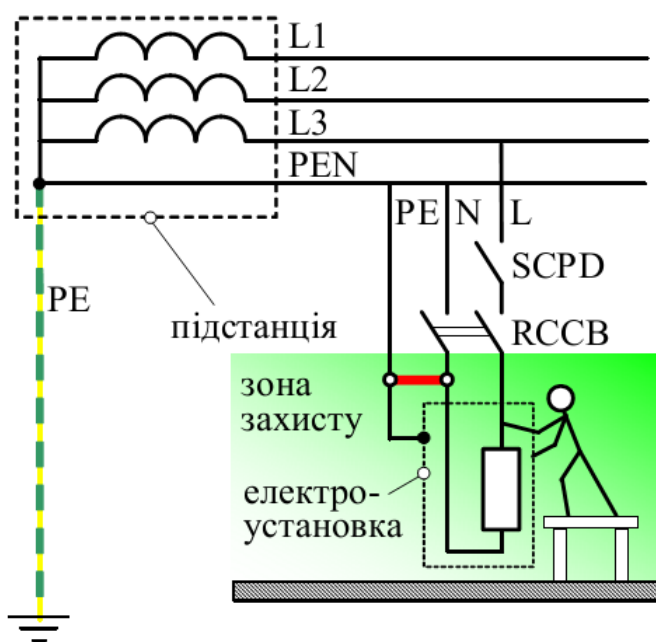
Мал. 2.9. Вирівнювальне з'єднання (bonding) у поєднанні із захисним заземленням (earthing) забезпечує надійний захист від ураження електричним струмом



У випадку пробою на землю (earth fault) в електроустановці внаслідок пошкодження ізоляції між лінійним провідником та металевим корпусом, людина, що торкається однією рукою корпусу електроустановки, а іншою рукою або будь-якою частиною тіла – трубопроводу, не відчує удару електричним струмом навіть при пошкодженні заземлення корпусу, наприклад якщо корпус виявиться не приєднаним до PEN провідника. У цьому випадку може й не спрацювати SCPD, але людина уникне електротравми саме завдяки еквіпотенціальному з'єднанню.

**Апарати, що автоматично відмикають живлення при виникненні струмів витоку** – це відмикачі, керовані різницевиими струмами (residual current operated circuit-breaker, RCCB), або, як їх називають інакше, – апарати різницевих струмів (residual current device; RCD). Принцип дії цих апаратів, їх будова, призначення, способи застосування й деякі характеристики будуть розглянуті в п 4.1.5. Крім того, що апарати різницевих струмів забезпечують ефективний захист від непрямих дотиків, вони також забезпечують захист й від прямих дотиків, на що не здатний будь-який інший апарат.

Схема, зображена на мал. 2.10 ілюструє ситуацію, коли RCCB забезпечує захист від ураження електричним струмом людину, яка однією рукою торкається корпусу пошкодженої електроустановки, а іншою рукою – оголеного лінійного провідника. При цьому людина може стояти як на ізолюваному, так і на струмопровідному помості.



Мал. 2.10. Апарати, що автоматично відмикають живлення при виникненні струмів витоку забезпечують надійний захист людей від ураження електричним струмом в найскладніших ситуаціях прямих та непрямих дотиків

Ефективність захисту при застосуванні RCCB залежить від коректності їх встановлення. Наприклад, неприпустимим є з'єднання PE та N провідників (червона лінія на мал. 2.10) у зоні захисту (нижче RCCB), оскільки у цьому випадку різницевий струм, зафіксований в RCCB, може виявитися суттєво меншим, аніж струм витоку через тіло людини, й недостатнім для спрацьовування RCCB.

#### Література:

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

## **ЛЕКЦІЯ №4.**

### **Тема: «Електробезпека: система захисту від згубної дії електричної енергії»**

#### **План**

1. Види небезпек, пов'язаних з електрикою;
2. Негативні фактори впливу електричного струму на організм людини;
3. Способи захисту від прямих та непрямих дотиків.

#### **1. Види небезпек, пов'язаних з електрикою**

Завдяки електричній енергії комфортність життя людей неухильно підвищується. З електрикою ми стикаємося на кожному кроці й постійно користуємося нею. Але, користуючись електрикою, ми повинні пам'ятати про її колосальну (а підчас – смертельну) небезпеку й створювати умови, за яких застосування електрики було б максимально безпечним.

Стандарт, який нині є чинним в Україні в статусі міждержавного стандарту, визначає поняття електробезпеки так: «електробезпека – це система організаційних і технічних заходів та засобів, що забезпечують захист людей от шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики».

Як бачимо, вказане визначення, по-перше, обмежується лише прямою дією таких факторів як вплив електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики, а по-друге, не розповсюджує поняття електробезпеки на тварин, майно й довкілля. В новітніх українських ПУЕ дане поняття визначається так: «електробезпека – це відсутність загрози життю, здоров'ю та майну людей, тваринам, рослинам і довкіллю, яка перевищує допустимий ризик». Як бачимо, це визначення вже враховує, що згубна дія електричної енергії передбачає як прямі, так і непрямі види небезпек.

Прямі небезпеки – це безпосередній вплив на людей, тварин, майно й довкілля електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної

електрики. Непрямі небезпеки – це опосередкований вплив на людей, тварин, майно й довкілля наслідків дії зазначених вище чинників через пожежі, вибухи, розповсюдження небезпечних хімічних речовин, радіації тощо. Прямі й непрямі небезпеки слід розглядати як наслідки аварійних ситуацій, які можуть спричиняти травмування людей або призводити до аварій з непередбачуваними наслідками. Найбільш розповсюдженими аварійними ситуаціями є:

- низький рівень захищеності електричного обладнання від проникнення всередину сторонніх предметів й вологи;
- пошкодження ізоляції в електроустановках;
- надструми: перевантаження та короткі замикання;
- перенапруги: атмосферні, комутаційні, а також викликані пошкодженнями в мережах;
- обриви, падіння і сплітання проводів в електричних мережах;
- електроустановки у приміщеннях з підвищеною небезпекою.

У наведеному переліку присутня низка термінів, які потребують тлумачення.

Електрообладнання (electric equipment) – це вироби, що призначені для виробництва, перетворення, передачі, розподілу та застосування електричної енергії, такі як електричні машини, трансформатори, комутаційна апаратура та апаратура керування, вимірювальні пристрої, пристрої захисту, кабельні системи, електроприймачі. Приклади електрообладнання наведені в самому визначенні, а під електроприймачами розуміють електрообладнання, що призначене для перетворення електричної енергії на інший вид енергії, наприклад, світлову, теплову, механічну енергію (освітлювальні й нагрівальні прилади, а також побутові й промислові пристрої, які мають у своєму складі електричні двигуни, тощо).

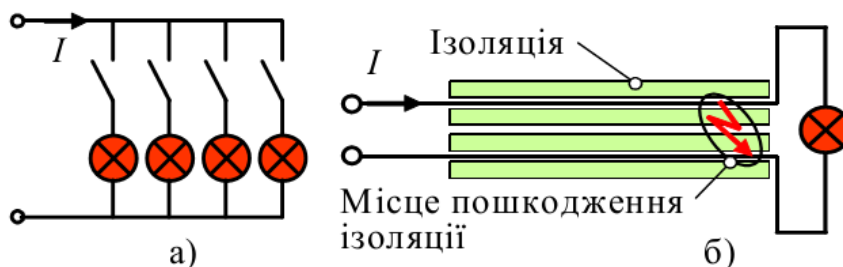
Електроустановка (electrical installation) – це комплекс поєднаного електрообладнання з узгодженими властивостями, призначений для досягнення певної мети. Прикладом електроустановки може бути електропроводка (wiring system) з поєднаними з нею вимикачами, розетками, світильниками, побутовими приладами тощо.

Проникнення всередину електричного обладнання сторонніх предметів й вологи може призвести до пошкодження ізоляції, внаслідок чого може виникнути

надструм (over-current) – струм, що перевищує номінативне значення. Надструми призводять до надмірного нагрівання струмопровідних частин й ізоляції, яка їх оточує, і з часом можуть викликати коротке замикання (short circuit), під яким розуміють випадкове або навмисне з'єднання між двома або декількома струмопровідними частинами, що примусово зменшує електричний потенціал між цими струмопровідними частинами до нуля або майже до нуля. При короткому замиканні струм стрімко зростає у десятки й сотні разів, піднімаючи температуру провідників, ізоляції та оточуючих елементів конструкцій до небезпечних рівнів, що викликають займання, вибухи тощо.

Надструми можуть бути викликані й іншими причинами, зокрема перенапругами (over-voltage), як тими, що пов'язані атмосферними та комутаційними імпульсними виплесками, так і з тими, що пов'язані з пошкодженнями у мережах, зокрема з обривом нейтралі.

Надструми можуть виникнути й в електрично не пошкодженому колі внаслідок перевантаження (overload) мережі при надмірній кількості навантажень, одночасно підключених до неї (мал. 2.1-а). На відміну від перевантажень, короткі замикання обов'язково пов'язані з пошкодженням ізоляції (мал. 2.1-б).



Мал. 2.1. Схеми, що ілюструють причини виникнення надструмів внаслідок перевантажень (а) та коротких замикань(б)

Обриви, падіння й сплітання проводів в електричних мережах, окрім небезпек поблизу місця пошкодження, можуть викликати у споживачів перенапруги з аварійними наслідками. Нарешті, будь-які електроустановки, встановлені у приміщеннях з підвищеною безпекою, самі по собі є джерелом небезпеки.

Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) так класифікують приміщення щодо безпеки ураження людини електричним струмом:

а) приміщення з підвищеною небезпекою (вологість; струмопровідний пилю, струмопровідна підлога; висока температура; можливість одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, технологічних апаратів, механізмів тощо, які мають з'єднання із землею, з одного боку і до металевих корпусів – з іншого боку);

б) особливо небезпечні приміщення (особлива вологість; хімічно активне середовище; одночасна наявність двох або більше умов, позначених у п. «а»);

в) приміщення без підвищеної небезпеки (відсутні умови, позначені у п. «а» та п. «б»)

## **2. Негативні фактори впливу електричного струму на організм людини**

Електричний струм, проходячи через тіло людини, призводить до негативних теплових, хімічних та біологічних наслідків.

Теплова дія струму проявляється у підвищенні температури тканин тіла людини, а у деяких випадках – до їх обгорання. Крім того, підвищення температури спричиняє зменшення електричного опору тіла людини, а відтак – підсилення впливу струму на людину.

Хімічна дія струму внаслідок електролізу проявляється в зміні хімічного складу крові та інших рідин в тілі людини, порушенню їх функцій.

Біологічна дія струму проявляється в небезпечному збудженні живих клітин організму, зокрема, нервових клітин та усієї нервової системи. Таке збудження може супроводжуватися судомою, явищами паралічу. Інколи можливий параліч дихального апарата, фібриляція й параліч серця.

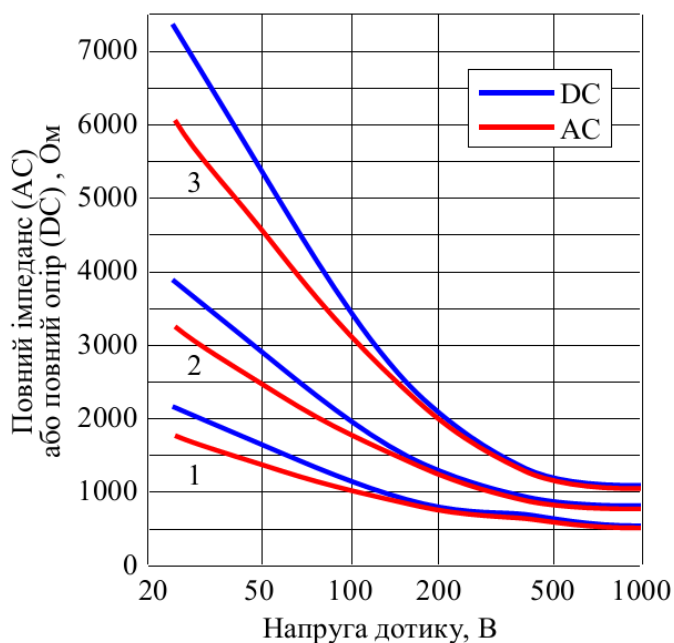
За біологічною дією більш небезпечним є змінний струм, за хімічною дією – постійний струм, а теплова дія постійного та змінного струму є практично однаковою. При цьому слід враховувати, що зі змінним струмом людина стикається набагато частіше, аніж з постійним.

IEV визначає удар електричним струмом (electric shock) як фізіологічний ефект, спричинений проходженням електричного струму через тіло людини або тварини. Електропаталогічні аспекти удару електричним струмом докладно розглянуто у публікації IEC60479-1.

Зокрема у цій публікації наводиться ілюстрація змін у кардіограмі та у кров'яному тиску внаслідок удару людини електричним струмом, яка свідчить, що серцева фібриляція (cardiac fibrillation), тобто хаотичне скорочення м'язів камер серця, яке веде до розладу серцевої діяльності, розпочинається одразу після моменту початку протікання струму через тіло людини. При цьому дуже швидко зменшується кров'яний тиск, припиняється циркуляція крові і, якщо впродовж декількох десятків мілісекунд не припинити протікання струму, це призводить до летального наслідку.

Дослідженнями, результати яких наведено в публікації ІЕС60479-1, встановлено, що патофізіологічна дія електричного струму на людину залежить як від значення струму, що тече через тіло людини, так і від часу його проходження. Значення струму через тіло людини залежить від (реальної) напруги дотику ((effective) touch voltage), а також від імпедансу  $Z_T$  (при постійному струмі – опору  $R_T$ ) тіла людини, які суттєво залежать від напруги дотику, роду струму, шляху струму та інших чинників.

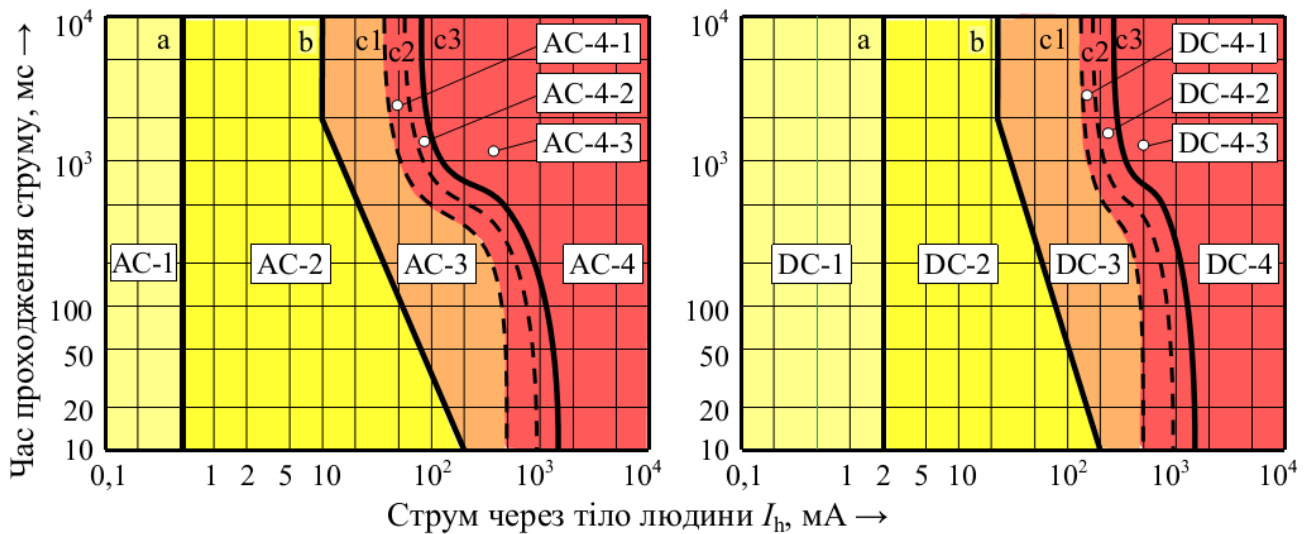
Залежності  $Z_T$  та  $R_T$  на шляху рука-рука при великих вологих поверхнях контактування від напруги дотику наведені на мал. 2.2.



Мал 2.2. Залежності повного імпедансу (при змінному струмі) та повного опору (при постійному струмі) тіла людини на шляху рука-рука від реальної напруги дотику: 1 – 5% населення; 2 – 50% населення; 3 – 45% населення

Як бачимо, імпеданс та опір тіла людини суттєво зростають при зменшенні напруги дотику, причому асимптотичні значення (при великих значеннях напруги) імпедансу та опору збігаються, а при низьких значеннях напруги значення опору  $R_T$  перевищує значення імпедансу  $Z_T$  приблизно на 20%. Відтак, при зменшенні напруги дотику з 200 В до 100 В змінний струм через тіло людини зменшується не вдвічі, а приблизно у 2,5...3,0 рази, а постійний струм – у 2,8 ... 3,5 разів.

Уявлення про вплив тривалості часу дії струму у сукупності зі значенням струму дають часо-струмові зони, що представлені на графіках, наведених на мал. 2.3.



Мал. 2.3. Часо-струмові зони впливу на людину струму при напрямі від лівої руки до ніг: змінний струм (AC) від 15 до 100 Гц – IEC60479-1, Figure 20; постійний струм (DC) – IEC60479-1, Figure 22. Пояснення щодо часо-струмових зон впливу змінного струму на людину: AC-1 (до 0,5 мА) – можливі певні відчуття, але без ефекту «посмикування». AC-2 (від 0,5 мА до ломаної b) – можливі відчутні мимовільні м'язові скорочення, але зазвичай без згубної електрофізіологічної дії. AC-3 (від ломаної b до кривої c1) – сильні мимовільні м'язові скорочення, утруднення дихання, оборотні порушення серцевої функції; зазначені порушення посилюються при зростанні струму; органічні порушення зазвичай не очікуються. AC-4 (вище кривої c1) – патофізіологічна дія може проявлятися у вигляді зупинки серця, зупинки дихання, опіків або інших наслідків на клітинному рівні; вірогідність фібриляції шлуночків зростає зі збільшенням струму та тривалості його дії. AC-4-1 (c1 - c2) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає 5 %. AC-4-2 (c2 - c3) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає приблизно 50 %. AC-4-3 (вище кривої c3)



– вірогідність фібриляції шлуночків перевищує 50 %. При тривалості дії струму менше 200 мс фібриляція шлуночків розпочинається тільки в уразливий період серцевого циклу. Пояснення щодо часо-струмових зон впливу постійного струму на людину DC-1 (2 мА) – а можливі слабкі відчуття поколювання під час вмикання, вимикання та швидкої зміни струму. DC-2 (від 2 мА до ломаної b) – мимовільні м'язові скорочення можливі, головним чином при вмиканні, вимиканні та швидкій зміні струму, але зазвичай без згубної електрофізіологічної дії. DC-3 (від ломаної b до кривої c1) – можуть виникати сильні мимовільні м'язові реакції та оборотні порушення у формуванні та здійсненні серцебиття; зазначені порушення посилюються при зростанні струму та терміну його дії; органічні порушення зазвичай не очікуються. DC-4 (вище кривої c1) – патофізіологічна дія може проявлятися у вигляді зупинки серця, зупинки дихання, опіків або інших наслідків на клітинному рівні; вірогідність фібриляції шлуночків зростає із збільшенням струму та тривалості його дії. DC-4-1 (c1 - c2) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає 5 %. DC-4-2 (c2 - c3) – вірогідність фібриляції шлуночків досягає приблизно 50 %. DC-4-3 (вище кривої c3) – вірогідність фібриляції шлуночків перевищує 50 %. При тривалості дії струму менше 200 мс фібриляція шлуночків розпочинається тільки в уразливий період серцевого циклу.

Наведені вище графіки дозволяють формулювати вимоги до електричних апаратів захисту стосовно їх швидкодії у залежності від роду струму та номінальної напруги мережі.

### **3. Способи захисту від прямих та непрямих дотиків**

Статистика уражень електричним струмом свідчить, що найнебезпечнішими і частими причинами уражень є так звані прямі й непрямі дотики. Прямий дотик (direct contact) – це електричний контакт людей та тварин з активними частинами електроустановок, а непрямий дотик (indirect contact) – це електричний контакт людей та тварин з відкритими струмопровідними частинами, які стають активними (закороченими) за умови пошкодження (ізоляції).

Ситуації прямого дотику ілюструють схеми, представлені на мал. 2.4 – в усіх випадках людина торкається лінійного виводу навантаження, який при замкнених

контактах апарата захисту від коротких замикань (short-circuit protective device; SCPD) стає активним.

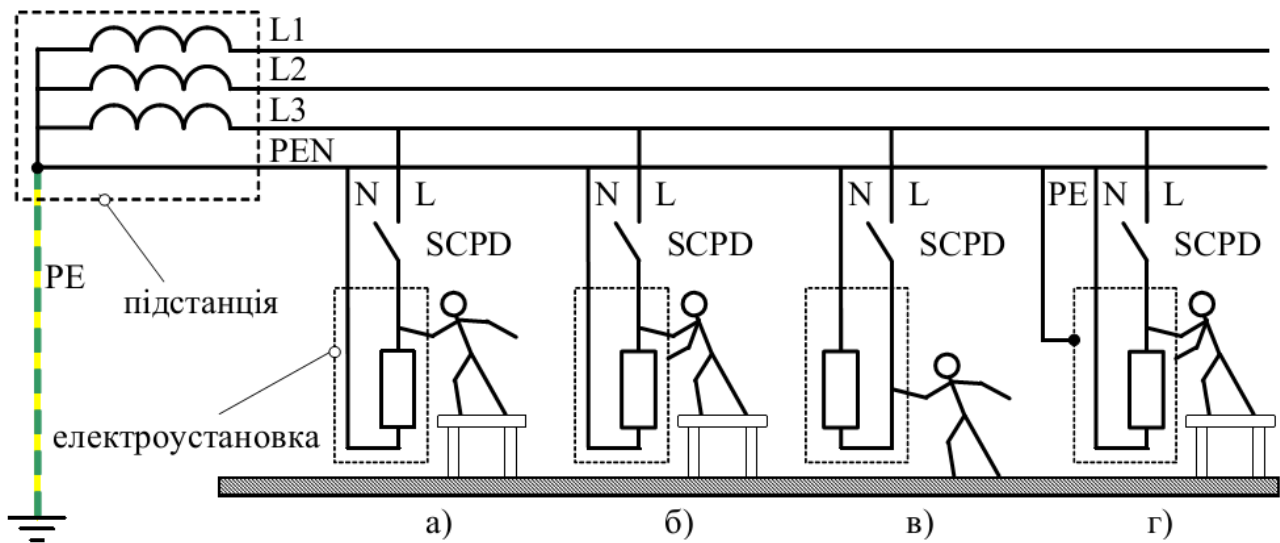
У перших двох ситуаціях (мал. 2.4-а, б) корпуси електроустановок не заземлені і людина, яка стоїть на ізолюваному помості, торкаючись лінійного провідника однією рукою, може не відчувати електричного удару, оскільки в цих випадках, на перший погляд, відсутні замкнені контури, якими міг би текти струм через тіло людини. Але ці ситуації не можна вважати безпечними, оскільки нема жодної гарантії, що в першому випадку людина випадково не торкнеться іншою рукою металевої частини, з'єднаної з землею (наприклад, з водопровідною або газовою трубою), і тоді між його руками почне текти струм, значення якого  $I$  буде визначатися напругою  $U$  між лінією й нейтраллю та імпедансом тіла людини  $Z_T$ :  $I = U / Z_T$ . При  $U = 220$  В та  $Z_T = 1000$  Ом (розрахунковий імпеданс тіла людини) струм  $I$  становитиме 220 мА, що є смертельно небезпечним практично для всіх людей, якщо він буде діяти впродовж хоча б однієї секунди (див. мал. 2.3-а).

Ситуація, яка відповідає мал. 2.4-в, може виявитися смертельно небезпечною, якщо людина у вогкому взутті стоїть на струмопровідній підлозі. У цьому випадку контур між лінійним та нейтральним провідниками через тіло людини може замкнутися через землю, яка є струмопровідною, а імпеданс на цьому шляху може становити від одиниць до декількох десятків Ом. Струм через тіло людини буде майже таким самим, як і у першому випадку. Ситуація, яка відповідає мал. 2.4-г, є смертельно небезпечною за будь-яких умов - струм через тіло людини буде не меншим за 220 мА.

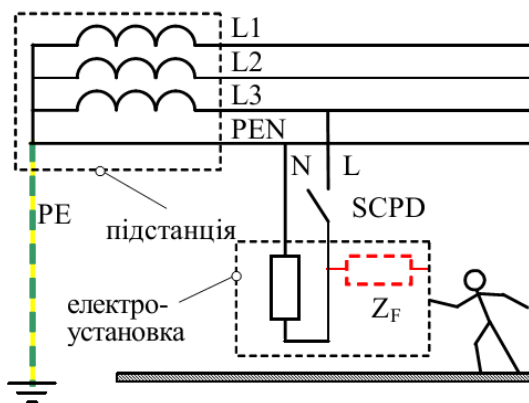
Хоча в усіх зазначених випадках струм, який тече через тіло людини, буде текти й через головне коло SCPD, такий струм є недостатнім для його спрацьовування (для цього необхідно, щоб струм сягав принаймні десятків Ампер) та від'єднання ураженої людини від джерела живлення.

Непрямий дотик може виникнути у разі контакту людини або тварини з незаземленим струмопровідним корпусом електроустановки за умови пошкодження ізоляції всередині установки (мал. 2.5). При цьому ураження людини або тварини електричним струмом може призвести до летального наслідку, навіть якщо в електроустановці буде мати місце не коротке замикання на корпус, а тільки

початкова стадія пробою ізоляції з достатньо високим імпедансом пошкодження  $Z_F$ . Струм через тіло людини чи тварини, який може бути смертельно небезпечним для них у такому випадку, є недостатнім для спрацювання SCPD.



Мал. 2.4. Ілюстрації до різних ситуацій прямого дотику



Мал. 2.5. Ілюстрація до ситуації непрямого дотику

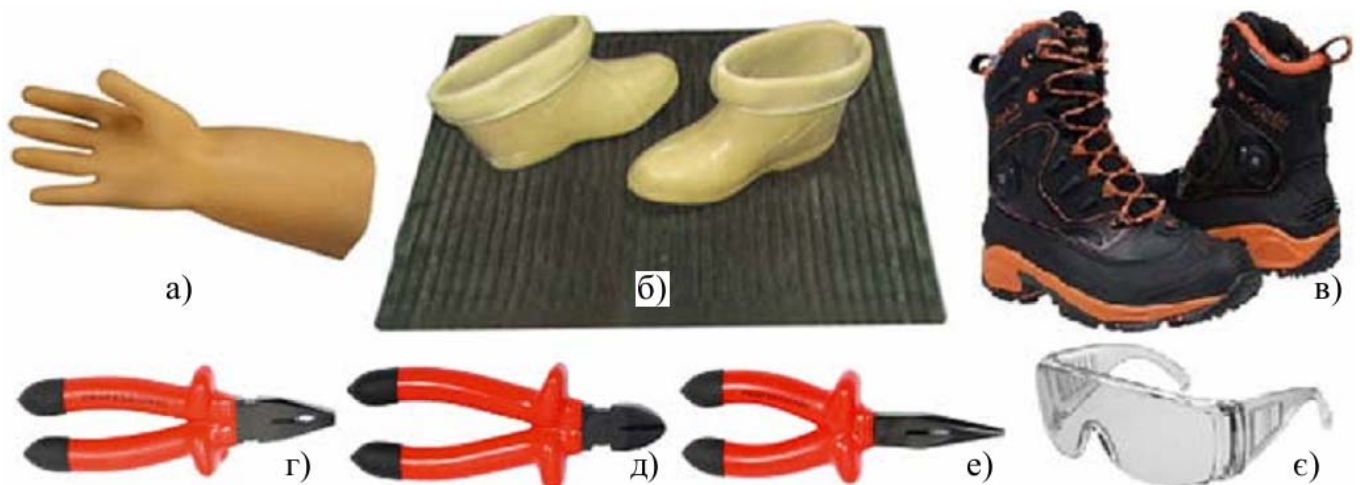
Способи захисту від прямих та непрямих дотиків можна поділити на дві групи: 1) способи, пов'язані з використанням засобів, що зменшують вірогідність проходження струму через тіло людини та 2) способи, пов'язані з обмеженням струму, який може проходити через тіло людини, та часу проходження струму.

***Використання засобів, що зменшують вірогідність проходження струму через тіло людини***

Основними засобами цієї категорії, є: 1) огорожі, бар'єри, ізоляційні оболонки; 2) індивідуальні електрозахистні засоби (гумові рукавички, боти, килимки тощо); 3) пристрої, що забезпечують електричне розділення кіл; 4) застосування обладнання класу II стосовно захищеності від ураження електричним струмом.

Приклади огорож (protective obstacle), бар'єрів (protective barrier) та оболонок (protective enclosure) представлені на мал. 4.113. Доступ до силового трансформатора з небезпечними терміналами середньої та низької напруги (див. мал. 4.113-б) обмежено огорожею жовтого кольору (попередження про небезпеку), шини розподільного пристрою низької напруги покриті ізоляційною поліамідною оболонкою, комутаційні апарати з відкритими струмопровідними частинами також захищені ізоляційними оболонками або мають ізоляційні бар'єри. Зазначимо, що доступ до приміщення, зображеного на мал. 4.113-б, повинні мати лише кваліфіковані особи, а якщо у приміщенні можуть бути присутніми особи, які не мають відношення до електрообладнання, то навіть така безпечна система має бути захищена оболонкою у вигляді металевої шафи (мал. 4.113-а).

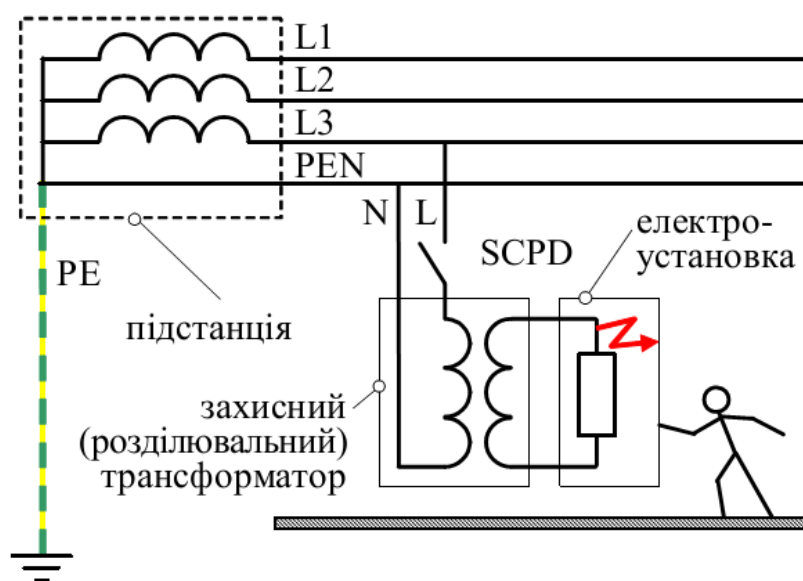
Індивідуальні електрозахистні засоби (мал. 2.6) не тільки суттєво знижують вірогідність проходження електричного струму через тіло людини, а й захищають окремі органи від опіків та потрапляння на них продуктів горіння електричної дуги.



Мал. 2.6. Індивідуальні електрозахистні засоби: а – рукавичка; б – боти та килимок; в – черевики; г, д, е – інструменти з ізольованим руків'ям; є – захисні окуляри

Живлення навантаження через трансформатор з посиленою між обмотковою ізоляцією (захисний розділювальний трансформатор – protective transformer) забезпечує електричне захисне розділення кіл, а саме відділення кола навантаження від кола мережі живлення (мал. 2.7), завдяки чому не тільки непрямий, а й навіть прямий дотик до небезпечних струмопровідних частин стає відносно безпечним. Даний спосіб електропостачання слід застосовувати для електроустановок,

розташованих в особливо небезпечних приміщеннях, наприклад у підвальних приміщеннях зі струмопровідною (земляною) підлогою.



Мал. 2.7. Застосування розділювального трансформатора для запобігання проходженню електричного струму через тіло людини

Базовий стандарт з електробезпеки IEC61140 встановлює чотири класи обладнання стосовно захищеності від ураження електричним струмом.

Обладнання класу 0 (class 0 equipment) – це обладнання з основною ізоляцією, що забезпечує основний захист, але це обладнання не передбачає захисту при пошкодженнях. Це обладнання може застосовуватися тільки в умовах неструмопровідного оточення (наприклад, у сухих приміщеннях з неструмопровідною підлогою), або в умовах електричного розділення, наприклад за допомогою розділювальних трансформаторів. Міжнародна електротехнічна комісія передбачає у майбутньому вилучити обладнання класу 0 з міжнародної стандартизації.

Обладнання класу I (class I equipment) – це обладнання, оснащене основною ізоляцією для основного захисту та терміналом для приєднання до системи захисного еквіпотенціального з'єднання електроустановки, що забезпечує захист при пошкодженнях ізоляції.

Обладнання класу II (class II equipment) – це обладнання, оснащене основною ізоляцією для основного захисту та додатковою ізоляцією для захисту при пошкодженнях або посиленою ізоляцією для основного захисту та захисту при пошкодженнях.

Обладнання класу III (class III equipment) – це обладнання, захисні властивості якого пов'язані з обмеженням напруги наднизьким рівнем як засобу основного захисту, а не захисту при пошкодженнях.

Застосування обладнання класу II, з подвійною або посиленою ізоляцією суттєво зменшує вірогідність прямих та непрямих дотиків, а відтак, й вірогідність проходження електричного струму через тіло людини.

***Способи обмеження струму, який може проходити через тіло людини, та часу проходження струму***

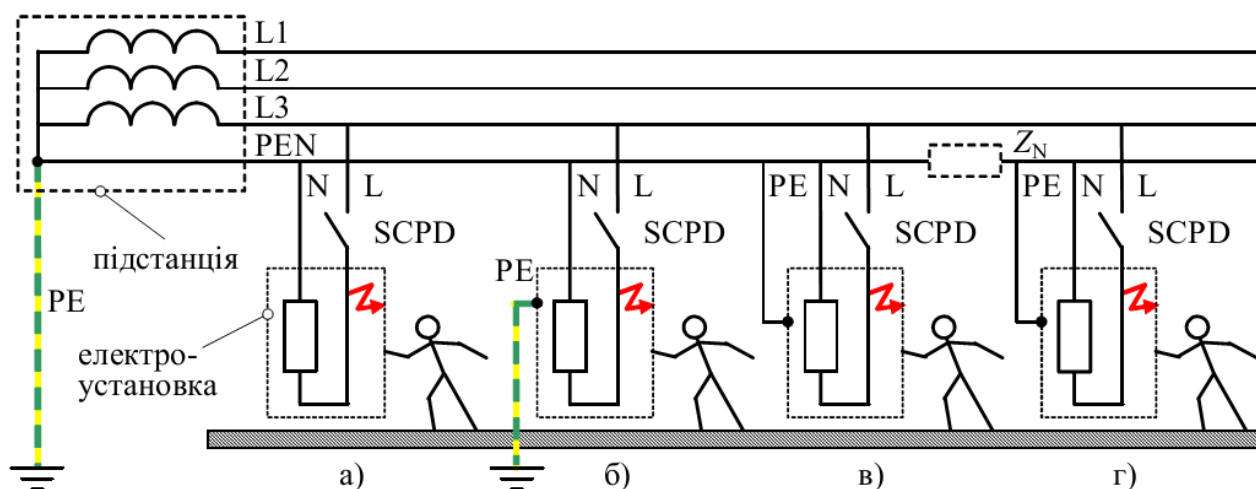
Основними способами цієї категорії є: 1) застосування апаратів, які автоматично відмикають живлення при коротких замиканнях в електроустановках; 2) застосування засобів вирівнювання потенціалів; 3) застосування апаратів автоматичного відмикання живлення при виникненні струму витоку.

**Апарати, які автоматично відмикають живлення при коротких замиканнях** в електроустановках (short-circuit protective device; SCPD), – це запобіжники й автоматичні відмикачі. Основним призначенням цих апаратів є захист ліній живлення від надструмів. Як це не прикро констатувати, в переважній більшості вітчизняних помешкань, зазначені апарати виконують саме ці функції, захищаючи людей лише від згубних наслідків надструмів (у першу чергу – від пожеж), жодним чином не реагуючи на такі небезпечні для людей чинники, як прямі й непрямі дотики, останні з яких виникають внаслідок пошкодження ізоляції в електроприймачах.

Проаналізуємо, наскільки непрямі дотики є небезпечними у різних ситуаціях, і як електричні апарати захисту від коротких замикань можуть допомогти уникнути цих небезпек (мал. 2.8).

Ситуація, що зображена на мал. 2.8-а є типовою для переважної більшості вітчизняних житлових помешкань – людина, стоячи на підлозі, торкається незаземленого металевого корпусу електроустановки (холодильника, пральної машини тощо). Дотик до корпусу електроустановки з пошкодженою ізоляцією між лінійним провідником та корпусом, залежно від низки чинників, може супроводжуватися різними наслідками – від відсутності будь-яких відчуттів (якщо людина, взута у сухе взуття, стоїть на сухій підлозі) або легкого поколювання (якщо

невзута людина стоїть на вологій підлозі) до летального наслідку (якщо людина іншою рукою тримається за трубу центрального опалення або за заземлений корпус іншої електроустановки). Оскільки струм через тіло людини не перевищує 1 А, SCPD не реагує на цю ситуацію й не вимикає пошкоджену електроустановку.



Мал. 2.8. Ілюстрації до різних ситуацій непрямого дотику

Приєднання корпусу електроустановки до місцевого заземлювального електроду (мал. 2.8-б) не завжди виправляє ситуацію з непрямими дотиками – все буде залежати від імпедансу заземлення на підстанції та імпедансу місцевого заземлення. ПУЕ дозволяє мати граничні значення цих імпедансів 4 Ом та 30 Ом відповідно. При таких значеннях імпедансів струм через заземлювальний електрод місцевого заземлення не перевищуватиме 7 А ( $220 \text{ В} / (30 + 4) \text{ Ом}$ ). SCPD не прореагує на такий струм й не відключить електроустановку. Значення струму через тіло людини у цьому випадку важко розрахувати, але при несприятливому поєднанні чинників цей струм може виявитися смертельно небезпечним для людини.

Приєднання корпусу електроустановки до PEN провідника (мал. 2.8-в) призведе до короткого замикання при пошкодженні ізоляції в електроустановці і, як наслідок, до спрацювання SCPD. При цьому корпус електроустановки знеживиться й дотик до нього не призведе до електричного удару. Таким чином, апарат захисту від коротких замикань у деякому розумінні виконує функції апарата захисту від непрямих дотиків.

Слід зауважити, що потенціал на корпусі в момент відмикання електроустановки з пошкодженою ізоляцією в цьому випадку сягатиме значення  $I_{os} \cdot$

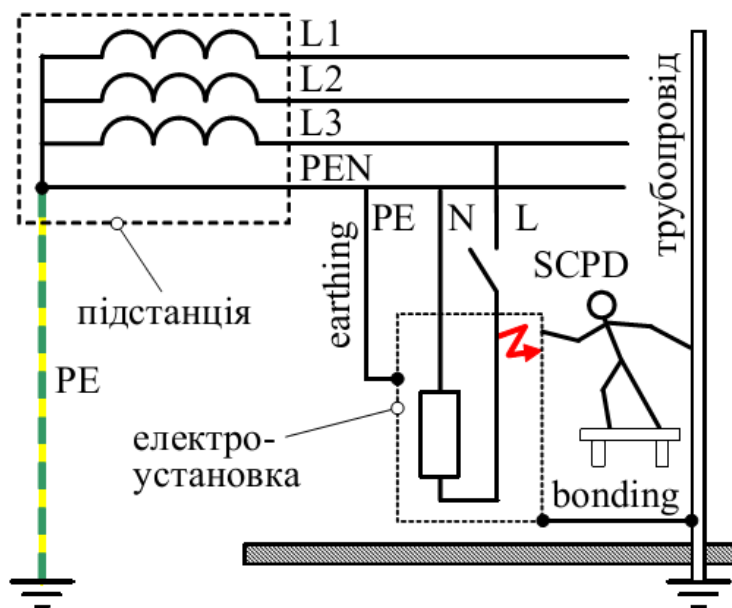
$Z_N$ , де  $I_{os}$  – струм відмикання SCPD, а  $Z_N$  – імпеданс PEN провідника між N терміналом на підстанції та точкою приєднання корпусу електроустановки до PEN провідника (мал. 2.8-г). Враховуючи, що відносно безпечною напругою для переважної більшості людей, є напруга у 50 В, можемо визначити граничне значення імпедансу  $Z_N$  для електроустановки з апаратом захисту від коротких замикань зі струмом відмикання  $I_{os}$ :

$$Z_N \leq 50 / I_{os}. \quad (2.1)$$

Наприклад, якщо апаратом захисту від коротких замикань в електроустановці є автоматичний відмикач побутового призначення з характеристикою C25 (див. п. 4.1.4), то струм його відмикання може становити 250 А, тому значення  $Z_N$  не повинно перевищувати  $50 / 250 = 0,2$  Ом.

**Вирівнювання потенціалів** або еквіпотенціальність (equipotentiality) – це стан, коли струмопровідні частини знаходяться при практично рівному електричному потенціалі. Цей стан забезпечується електричними з'єднаннями між струмопровідними частинами, які не призначені для проведення струму, тобто зрівнювальними або еквіпотенціальними з'єднаннями (equipotential bonding).

Схема, зображена на мал. 2.9, ілюструє принцип побудови захисту від непрямих дотиків за допомогою вирівнювального з'єднання.



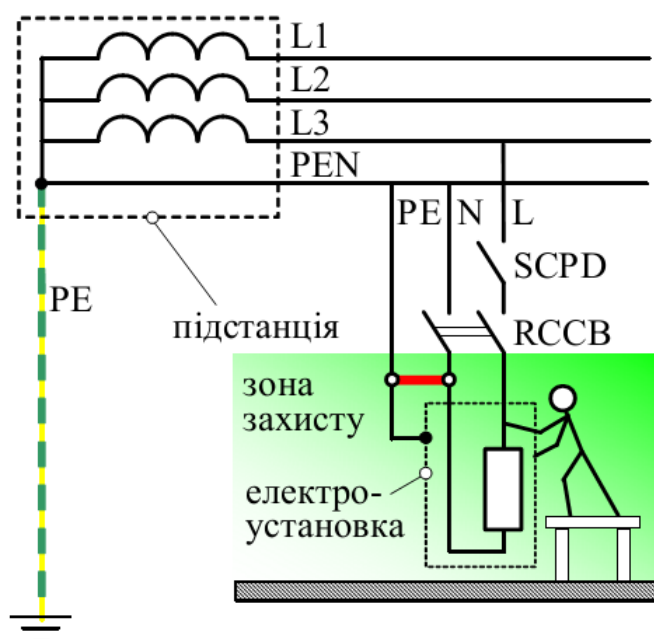
Мал. 2.9. Вирівнювальне з'єднання (bonding) у поєднанні із захисним заземленням (earthing) забезпечує надійний захист від ураження електричним струмом



У випадку пробою на землю (earth fault) в електроустановці внаслідок пошкодження ізоляції між лінійним провідником та металевим корпусом, людина, що торкається однією рукою корпусу електроустановки, а іншою рукою або будь-якою частиною тіла – трубопроводу, не відчує удару електричним струмом навіть при пошкодженні заземлення корпусу, наприклад якщо корпус виявиться не приєднаним до PEN провідника. У цьому випадку може й не спрацювати SCPD, але людина уникне електротравми саме завдяки еквіпотенціальному з'єднанню.

**Апарати, що автоматично відмикають живлення при виникненні струмів витоку** – це відмикачі, керовані різницевиими струмами (residual current operated circuit-breaker, RCCB), або, як їх називають інакше, – апарати різницевих струмів (residual current device; RCD). Принцип дії цих апаратів, їх будова, призначення, способи застосування й деякі характеристики будуть розглянуті в п 4.1.5. Крім того, що апарати різницевих струмів забезпечують ефективний захист від непрямих дотиків, вони також забезпечують захист й від прямих дотиків, на що не здатний будь-який інший апарат.

Схема, зображена на мал. 2.10 ілюструє ситуацію, коли RCCB забезпечує захист від ураження електричним струмом людину, яка однією рукою торкається корпусу пошкодженої електроустановки, а іншою рукою – оголеного лінійного провідника. При цьому людина може стояти як на ізолюваному, так і на струмопровідному помості.



Мал. 2.10. Апарати, що автоматично відмикають живлення при виникненні струмів витоку забезпечують надійний захист людей від ураження електричним струмом в найскладніших ситуаціях прямих та непрямих дотиків

Ефективність захисту при застосуванні RCCB залежить від коректності їх встановлення. Наприклад, неприпустимим є з'єднання PE та N провідників (червона лінія на мал. 2.10) у зоні захисту (нижче RCCB), оскільки у цьому випадку різницевий струм, зафіксований в RCCB, може виявитися суттєво меншим, аніж струм витоку через тіло людини, й недостатнім для спрацьовування RCCB.

#### Література:

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.

**Семестр 5 навчальна дисципліна «Апарати керування і захисту»**  
галузь знань 14 – Електрична інженерія  
спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

## **ЛЕКЦІЯ № 6.**

**Тема: «Захисні властивості та захищеність електричної апаратури»**

### **План**

1. Захисні властивості електричної апаратури;
2. Захищеність електричної апаратури від проникнення сторонніх предметів та вологи.

### **1. Захисні властивості електричної апаратури**

Електромеханічні апарати, тобто апарати з контактними комутаційними елементами, та напівпровідникові комутаційні конкурують між собою в різних сегментах ринку комутаційної апаратури. Аналіз реальної ситуації свідчить про те, що в системах розподілу електричної енергії електромеханічні комутаційні апарати (роз'єднувачі, вимикачі, відмикачі, контактори, пускачі, апарати кіл керування тощо) міцно утримують ринок і за прогнозами виробників цей ринок в майбутньому буде зростати. Це пояснюється такими унікальними властивостями електромеханічних комутаційних апаратів, як незначне падіння напруги на замкнених контактах при проходженні через них робочого струму (див. п. 1.3.2), а також можливістю забезпечувати функцію роз'єднання, гальванічний розділ та гарантовану (жорстку) операцію розмикання – функції, які є дуже важливими з точки зору електробезпеки.

Функція роз'єднання (isolation) – це функція, призначенням якої є переривання живлення від усієї або окремої частини електроустановки шляхом відділення установки або її частини від будь-якого джерела електричної енергії з міркувань безпеки.

До апарата, придатного до роз'єднання, висуваються вимоги щодо імпульсної витримуваної напруги та струмів витоку.

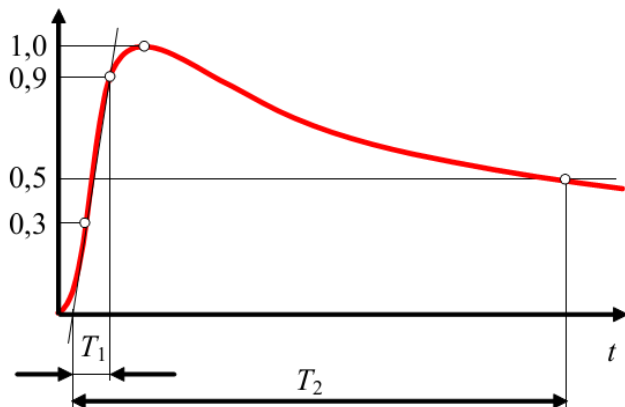
Значення імпульсної витримуваної напруги ставиться у залежність від номінальної напруги системи живлення та категорії перенапруги (over-voltage

category) обладнання, до якого має відношення відповідний апарат. В міжнародному стандарті стосовно координації ізоляції IEC60664-1 визначаються чотири категорії для обладнання, призначеного для роботи в мережах низької напруги:

- обладнання категорії IV – це обладнання, призначене для застосування у початковій точці електричної установки (origin of the electrical installation), наприклад вимірювальні трансформатори струму, апарати захисту від імпульсних випадків струму та напруги тощо;
- обладнання категорії III – це обладнання стаціонарних електроустановок, коли до надійності та працездатності обладнання висуваються спеціальні вимоги, наприклад, вимикачі та відмикачі стаціонарних промислових установок;
- обладнання категорії II – це обладнання, що споживає енергію та живиться від стаціонарних електроустановок, наприклад, електропобутові апарати, електроінструмент та інші побутові та аналогічні навантаги;
- обладнання категорії I – це обладнання, призначене для приєднання до кіл, у яких застосовуються заходи щодо обмеження перехідних перенапруг до відповідного низького рівня, наприклад, обладнання, що містить електронні пристрої.

В стандарті IEC60947-1 наводяться значення номінальної імпульсної витримуваної напруги (rated impulse withstand voltage;  $U_{imp}$ ) для апаратів залежно від номінальної напруги мережі живлення та категорії перенапруги. Зокрема, при номінальній напрузі мережі живлення 220 /380 В (230 / 400 В) пікові значення витримуваних імпульсів певної форми мають бути такими: для обладнання категорії IV – 6 кВ; категорії III – 4,5 кВ; категорії II – 2,5 кВ та категорії I – 1,5 кВ.

Форма випробувальних імпульсів (мал. 2.23) регламентується стандартом IEC 61180-1 й позначається двома числами, розділеними похилою рисою. Перше число  $T_1$ , виражене у мікросекундах, позначає віртуальну тривалість фронту (virtual front time), а друге число –  $T_2$ , також виражене у мікросекундах, позначає віртуальний час пів спаду (virtual time to half-value). При випробуваннях електричних апаратів та суміжного обладнання найчастіше застосовуються імпульси 1,2/50; 8/20 та 10/350.



Мал. 2.23. Форма випробувального імпульсу напруги (у відносних одиницях) за ІЕС 61180

Випробування електромеханічних комутаційних апаратів на здатність витримувати імпульсні перенапруги полягає у перевірці відсутності пробоїв під час прикладання до певних частин апарата випробувальної імпульсної напруги 1,2/50. Схема випробувань наведена на мал. 2.24. Порядок випробувань, тобто кількість імпульсів, їх полярність та тривалість пауз між імпульсами встановлюється стандартами на відповідні апарати.

Зокрема при випробуваннях автоматичних відмикачів побутового та аналогічного застосування стандарт на відповідний продукт (ІЕС 60898-1) встановлює такий порядок випробувань.

За трьома імпульсами позитивної полярності слідує три імпульси негативної полярності з інтервалами між імпульсами однієї полярності не менше 1 с та інтервалами між імпульсами різної полярності не менше 10 с. При випробуваннях відмикач встановлюється на металевій основі.

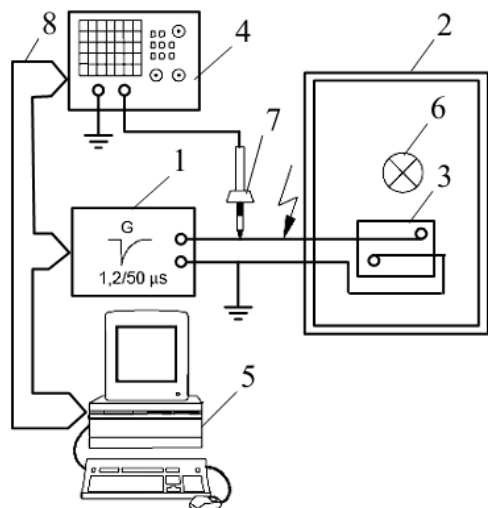
У першій серії дослідів випробувальна напруга прикладається між з'єднаними разом терміналами з боку джерела живлення та з'єднаними разом терміналами з боку навантаження. При цьому контакти повинні бути у розімкненому стані. У другій серії дослідів випробувальна напруга прикладається між лінійними полюсами, з'єднаними разом, та нейтральним полюсом (якщо він є). У третій серії дослідів випробувальна напруга прикладається між металевою основою, приєднаною до терміналу заземлення (якщо він є) та з'єднаними разом лінійними полюсами й нейтральним полюсом (якщо він є).

Значення піків випробувальної напруги мають бути більшими за номінальну імпульсну витримувану напругу й залежать від висоти над рівнем моря місцевості,

де проводяться випробування, та від номінальної напруги мережі. Зокрема, у більшості європейських країн застосовуються трифазні мережі з номінальною напругою 230/400 В, а номінативна імпульсна витримувана напруга для відмикачів, що застосовуються у цих мережах встановлюється на рівні 4 кВ. Побутова апаратура випробується при більших значеннях напруги. Зокрема стандарт ІЕС 60898-1 визначає такі пікові значення (у кіловольтах) імпульсів випробувальної напруги залежно від висоти над рівнем моря (табл. 2.1):

Таблиця 2.1. Пікові значення імпульсів випробувальної напруги

Серія дослідів при випробуваннях на здатність витримувати імпульсні перенапруги	Висота над рівнем моря, м				
	0	200	500	1 000	2 000
Серія 1	6,2	6,0	5,8	5,6	5,0
Серія 2, Серія 3	4,9	4,8	4,7	4,4	4,0

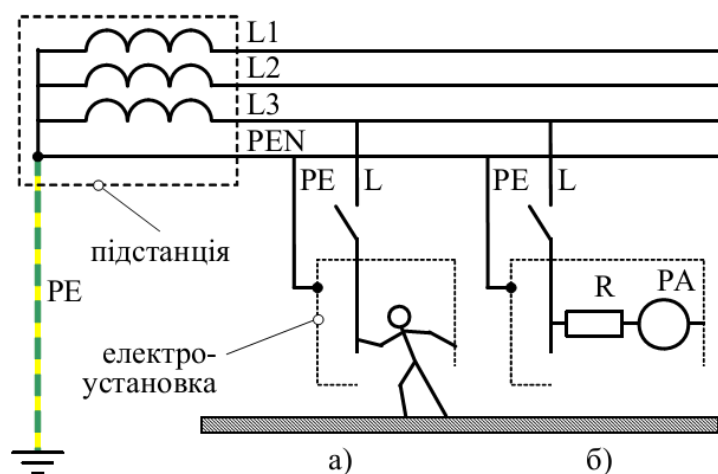


Мал. 2.24. Схема випробувань електромеханічних комутаційних апаратів на здатність витримувати імпульсні перенапруги: 1 – генератор імпульсів (impulse generator); 2 – кліматична камера (climatic cabinet); 3 – зразок для випробувань (test specimen); 4 – цифровий запам'ятовувальний осцилограф (digital storage oscilloscope); 5 – комп'ютер (computer); 6 – ультрафіолетове підсвічування (UV illumination); 7 – високовольтний щуп (high voltage probe); 8 – шина даних (data-bus).

Окрім здатності витримувати імпульсні перенапруги, для апаратів низької напруги, придатних до роз'єднання, стандарт ІЕС 60947-2 встановлює також вимоги щодо струму витоку через контакти, що знаходяться у розімкненому стані. Згідно з цими вимогами, при напрузі  $1,1 \cdot U_e$ , де  $U_e$  – номінативна робоча напруга (rated operational voltage), цей струм не повинен перевищувати 0,5 мА на кожний полюс

нового апарата та 2 мА на кожен полюс апарата, який вже здійснював операції вмикання та відмикання згідно з умовами випробувань, що встановлюються стандартом на відповідний апарат. Струм витoku у 6 мА при  $1,1 U_e$  є граничним значенням для апаратів, придатних до роз'єднання і не може перевищуватися за будь-яких обставин.

Апарати, придатні до роз'єднання, мають забезпечувати еквівалент основної ізоляції, тобто гарантувати такі ж ізоляційні властивості, як і основна ізоляція між активними частинами мережі живлення та тими частинами, до яких буде необхідно дотикатися після розведення контактів у полюсі, наприклад, з метою демонтажу обладнання (мал. 2.25-а). Інакше кажучи, апарати, придатні до роз'єднання, при розімкнених контактах мають забезпечувати основний захист від ураження електричним струмом. Базовий стандарт з електробезпеки ІЕС 61140 рекомендує перевіряти здатність ізоляції апарата (зокрема, між розімкненими контактами) обмежувати струм дотику до рівня, допустимого для людини, вимірюючи струм в резисторі з опором 2000 Ом, що приєднується між двома доступними частинами (мал. 2.25-б). Цей струм не повинен перевищувати 0,5 мА у колах змінного струму або 2 мА у колах постійного струму.



Мал. 2.25. Робота, що вимагає дотику до апарата, придатного до роз'єднання (а) та перевірка придатності до роз'єднання(б)

До апаратів, придатних до роз'єднання, стандарт ІЕС 60947-1 висуває вимоги щодо положення головних контактів, згідно з якими індикація положення головних контактів (замкнене чи розімкнене) повинна забезпечуватися одним чи декількома із зазначених нижче засобів: положенням актуатора; окремим механічним індикатором; видимістю рухомих контактів. Якщо корпус апарата є непрозорим,

отже, рухомий контакт не можна розгледіти ззовні, то про положення головних контактів можна судити, виходячи з положення актуатора та/або з показання механічного індикатора. Зокрема, у разі приварювання головних контактів актуатор не повинен знаходитися у положенні **0** та/або індикатор положення контактів не повинен показувати їх розімкнений стан.

Здатність до роз'єднання не слід плутати з гальванічним розділенням (galvanic separation) – запобіганням виникненню електричної провідності між двома електричними колами, призначеними для передачі енергії та/або сигналів.

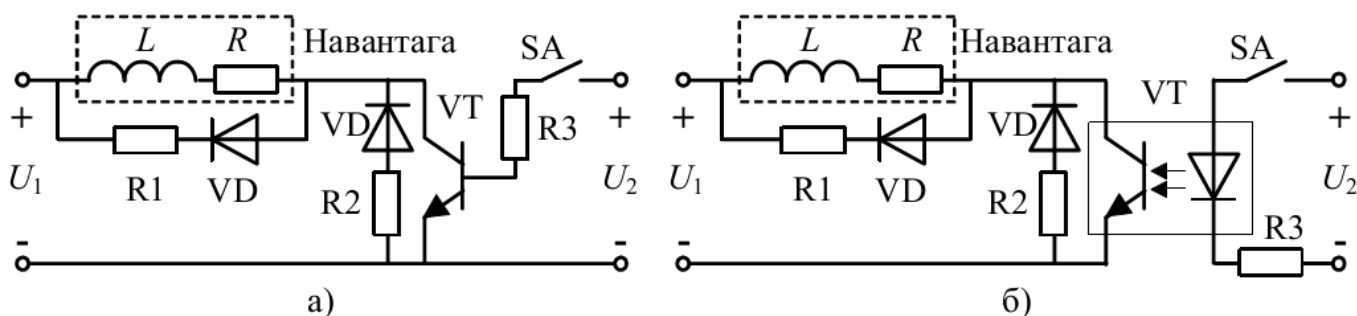
Залежно від конструкції, комутаційні апарати з контактними комутаційними елементами можуть бути придатними або не придатними до роз'єднання, хоча переважна більшість таких апаратів забезпечує гальванічне розділення кіл. На мал. 2.26 наведено фото реле з високим рівнем гальванічного розділення. Виробник гарантує електричну міцність ізоляції між контактами та котушкою 4000 В (rms), між сусідніми контактними елементами – 3000 В, а між розімкненими контактами одного контактного елемента, які мають комутаційну здатність 5 А при резистивному навантаженні й напрузі до 250 В змінного струму, – лише 1000 В, що не відповідає вимогам до апаратів, придатних до роз'єднання. Те ж саме стосується й деяких апаратів кіл керування. Багатополюсні апарати, призначені для роботи у силових колах, наприклад, відмикачі промислового призначення (див. п. 4.1.3) або побутового застосування (див. п. 4.1.4) згідно з вимогами профільних стандартів мають задовольняти вимогам щодо функції роз'єднання й забезпечують гальванічне розділення кіл окремих полюсів головних кіл та кіл керування.



Мал. 2.26. Електромагнітне реле, яке забезпечує гальванічне розділення кіл, але не задовольняє вимогам щодо функції роз'єднання



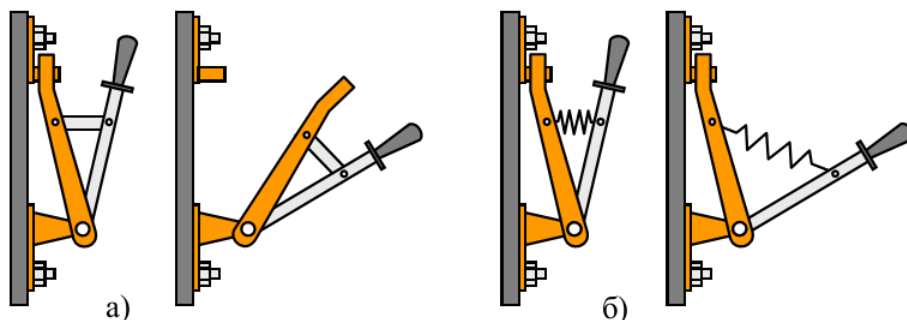
Апарати з напівпровідниковими комутаційними елементами зазвичай не відповідають вимогам щодо придатності до роз'єднання. Вимикання кола таким апаратом не забезпечує рівня основної ізоляції щодо здатності витримувати імпульси випробувальної напруги, хоча напівпровідникові апарати можуть забезпечувати гальванічне розділення. Наприклад, схема комутаційного апарата постійного струму, побудована за допомогою біполярного транзистора (мал. 2.27-а), не забезпечує гальванічне розділення головного кола та кола керування. На базі сучасних оптотранзисторів можна створити комутаційний апарат (мал. 2.27-б), який забезпечує гальванічне розділення головного кола та кола керування.



Мал. 2.27. Електричні схеми напівпровідникових комутаційних апаратів а – без гальванічного розділення; б – з гальванічним розділенням головного кола з напругою живлення  $U_1$  та кола керування з напругою живлення  $U_2$

Ще одна важлива функція, яку можуть забезпечувати електромеханічні комутаційні апарати, – це гарантована або примусова операція розмикання (positive opening operation), яка, відповідно до визначених вимог, гарантує, що усі головні контакти будуть у розімкненому стані, коли актуатор апарата знаходиться у положенні, яке відповідає розімкненому положенню апарата.

Гарантована операція розмикання забезпечується, зазвичай, в апараті з жорстким механічним зв'язком (принаймні, у частині робочого ходу) між рухомим контактом та актуатором ( мал. 2.28-а). Інакше (мал. 2.28-б), операція розмикання не гарантується (за рахунок зварення, заклинення тощо). Функція гарантованої операції розмикання є дуже важливою для апаратів з непрозорими оболонками, які мають задовольняти вимогам щодо функції роз'єднання.



Мал. 2.28. Комутаційні апарати, що забезпечують (а) та не забезпечують (б) функцію гарантованої операції розмикання

Функція гарантованої операції розмикання є також дуже важливою для таких апаратів кіл керування як позиційні перемикачі (див. п. 4.1.7).

У новітній англомовній технічній літературі, зокрема, у стандарті ІЕС 60947-5-1, а відтак і у каталогах фірм, поряд з терміном «positive opening operation» вживається близький за змістом термін «direct opening action». Переклад терміну «direct opening action» на українську мову має адекватно характеризувати цей тип розмикання: «розмикання прямої дії». Наприклад, «control switch with direct opening action» – це «перемикач кіл керування з розмиканням прямої дії».

## **2. Захищеність електричної апаратури від проникнення сторонніх предметів та вологи**

Вимоги щодо захищеності електричної апаратури від проникнення сторонніх предметів та вологи сформульовано в міжнародному стандарті ІЕС 60529 – ступені захисту, що забезпечуються оболонками (коди ІР).

Оболонка (enclosure) – це кожух (housing), що забезпечує тип та ступінь захисту відповідно до призначеного застосування. Серед інших призначень оболонок, дуже важливим є забезпечення захисту людей та свійських тварин від доступу до небезпечних частин й можливого ураження електричним струмом.

Згаданий стандарт містить низку визначень, важливих для розуміння призначення й сфери його застосування.

Ступінь захисту (degree of protection) – це міра захисту, що забезпечується оболонкою від доступу до небезпечних частин, від потрапляння твердих зовнішніх предметів та (або) води та яка перевіряється стандартними методами випробувань.

**Код IP (IP Code)** – це система кодування, яка застосовується для позначення ступенів захисту, що забезпечуються оболонкою, від доступу до небезпечних частин, від потрапляння твердих зовнішніх предметів й води та для надання додаткової інформації, стосовно такого захисту.

Небезпечна частина (hazardous part) – це частина, наблизитися до якої або торкатися якої небезпечно. Небезпечні частини стандарт поділяє на небезпечні активні частини (hazardous live parts) – частини, дотик до яких може викликати ураження електричним струмом, та небезпечні механічні частини (hazardous mechanical parts) – рухомі частини (крім гладких валів) що обертаються, яких небезпечно торкатися.

Структура коду IP зображена на рис. 2.29.




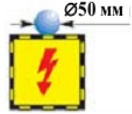





Мал. 2.29. Структура коду IP (літеру X записують, якщо нема необхідності нормувати характеристичну цифру)

Перша характеристична цифра вказує, що оболонка забезпечує:

- захист людей від доступу до небезпечних частин, запобігаючи або обмежуючи проникнення якої-небудь частини тіла людини або предмету, що знаходиться в руках людини;
- захист обладнання, що знаходиться всередині оболонки, від проникнення зовнішніх твердих предметів.

Значення першої характеристичної цифри коду IP наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Значення першої характеристичної цифри коду IP

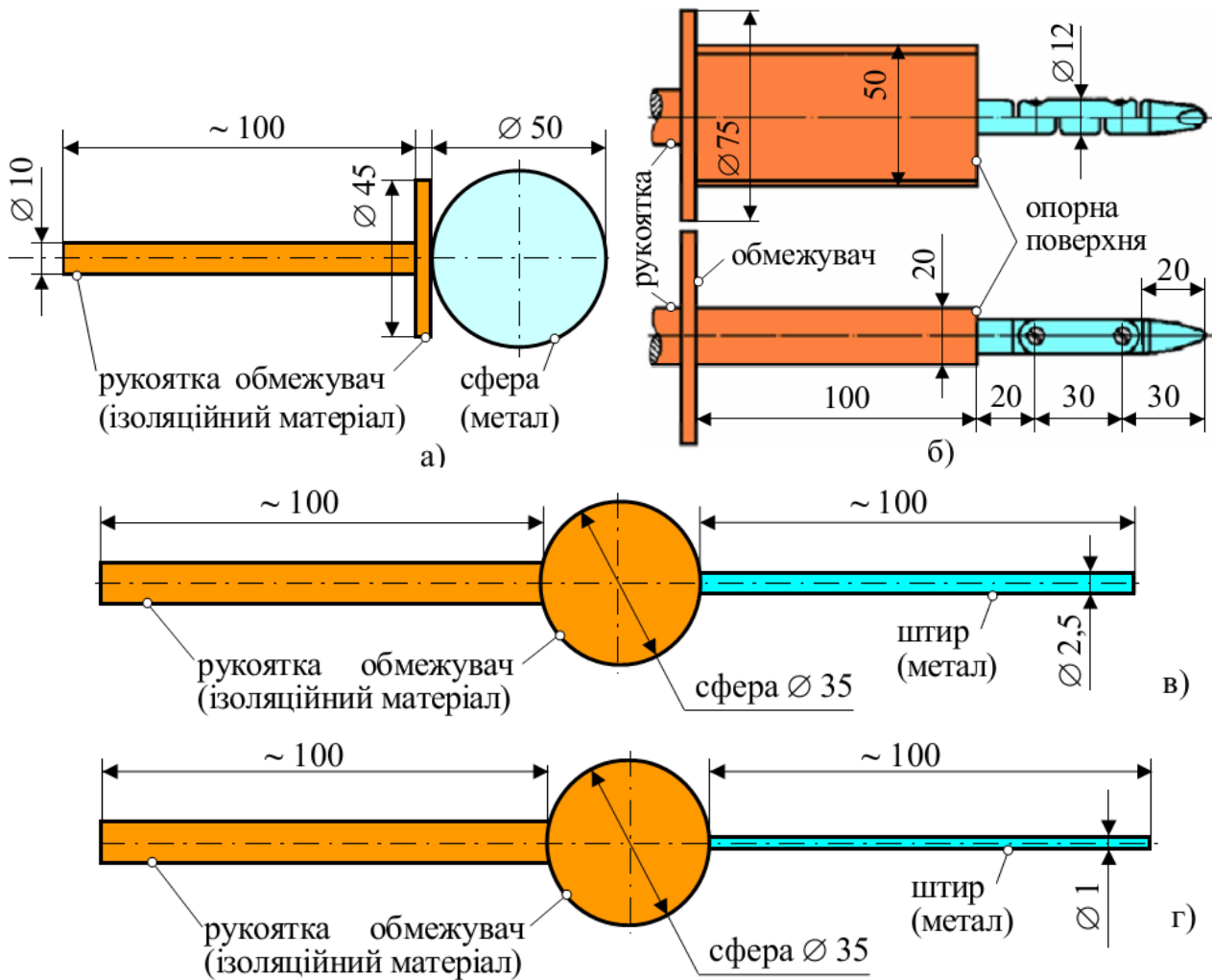
Цифра	0	1	2	3	4	5	6
Значення для захисту апаратів	Нема захисту	Захист від проникнення твердих предметів діаметром $\geq 50$ мм	Захист від проникнення твердих предметів діаметром $\geq 12,5$ мм	Захист від проникнення твердих предметів діаметром $\geq 2,5$ мм	Захист від проникнення твердих предметів діаметром $\geq 1,0$ мм	Пилозахищене виконання	Пилонепроникне виконання
Значення для захисту людей	Нема захисту	Захист від доступу тильним боком руки	Захист від доступу пальцем руки	Захист від доступу інструментом	Захист від доступу дротом	Захист від доступу дротом	Захист від доступу дротом
Мнемоніка							

Захист від потрапляння зовнішніх предметів передбачає, що щупи доступу (мал. 2.30-а, б) не повинні проходити через отвори в оболонці повністю. Об'єктні щупи (мал. 2.30-в, г) не повинні проникати в оболонку.

Пилозахищені оболонки (цифра 5) за певних умов можуть пропускати обмежену кількість пилю. Пилонепроникні оболонки (цифра 6) не повинні допускати проникнення будь-якого пилю.

Друга характеристична цифра означає ступінь захисту від шкідливого впливу на обладнання води, яка проникає крізь оболонку. Значення другої характеристичної наведені в табл. 2.3.

Позначення другою характеристичною цифрою до 6 включно означає відповідність усім вимогам для менших цифр. Оболонки, які позначаються лише однією цифрою 7 або 8 не обов'язково повинні витримувати впливи струменів води. Якщо необхідно позначити, що обладнання здатне витримувати як занурення, так і вплив струменів, треба застосовувати подвійне кодування, наприклад IPX5/IPX8 або IPX6/IPX7 тощо.



Мал. 2.30. Стандартні щупи доступу та об'єктні щупи (IEC 60529): а – щуп доступу для перевірки захисту від проникнення всередину оболонки тильним боком руки; б – щуп доступу для перевірки захисту від проникнення всередину оболонки пальцем (шарнірний випробувальний палець – jointed test finger); в – об'єктний щуп для перевірки захисту від проникнення всередину оболонки інструментом; г – об'єктний щуп для перевірки захисту від проникнення всередину оболонки дротом

Таблиця 2.3. Значення другої характеристичної цифри коду IP

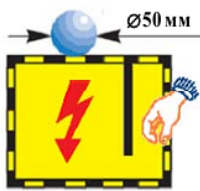
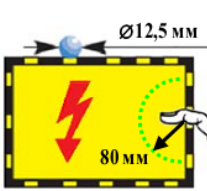
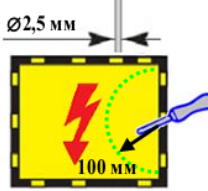
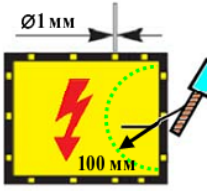
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення для захисту апаратів	Нема захисту	Захист від вертикального падіння крапель	Захист від падіння крапель під кутом до 15°	Захист від дощу	Захист від суцільного оббризкування	Захист від водяних струменів	Захист від потужних водяних струменів	Захист при тимчасовому неглибокому зануренні (до 30 хв.; 0,15 ... 1,0 м)	Захист при тривалому глибокому зануренні ( $t > 30$ хв.; $h > 1,0$ м)
Мнемоніка									

Додаткова літера позначає ступінь захисту людей від доступу до небезпечних частин, й застосовується лише у випадках, коли:

- реальний захист людей від доступу до небезпечних частин є більшим ніж захист, позначений першою характеристичною літерою;
- захист людей від доступу до небезпечних частин обладнання визначено, але перша характеристична літера замінена символом Х.

Наприклад, більший захист може бути забезпечений встановленням бар'єрів, спеціальною формою отворів або за рахунок відстаней всередині оболонки. Значення додаткової літери коду IP наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Значення додаткової літери коду IP

Літера	A	B	C	D
Значення для захисту людей	Захист від доступу тильним боком руки	Захист від доступу пальцем руки	Захист від доступу інструментом	Захист від доступу дротом
Мнемоніка				

Допоміжна літера, яка записується після другої характеристичної цифри або додаткової літери, позначає деяку допоміжну інформацію (табл. 2.5).

Таблиця 2.5. Значення допоміжної літери коду IP

Літера	Значення
H	Апарат (обладнання) високої напруги
M	Випробувано на шкідливі впливи проникнення води, коли рухомі частини обладнання (наприклад ротор електричної машини) рухаються
S	Випробувано на шкідливі впливи проникнення води, коли рухомі частини обладнання (наприклад ротор електричної машини) не рухаються

На закінчення цієї теми наведемо два приклади позначень кодами IP.

IP44 означає, що оболонка захищає людей, що тримають в руках дроти діаметром 1 мм та більше від доступу до небезпечних частин та захищає обладнання всередині оболонки, від проникнення сторонніх твердих предметів діаметром 1 мм та більше (перша цифра – 4), а також захищає обладнання, що знаходиться всередині оболонки, від шкідливих впливів внаслідок оббризування оболонки водою з усіх боків (друга цифра – 4).

IP23CS означає, що оболонка захищає людей від доступу до небезпечних частин пальцями та захищає обладнання від проникнення сторонніх твердих предметів діаметром 12,5 мм та більше (2); захищає обладнання, що знаходиться всередині оболонки, від шкідливих впливів води у вигляді дощу (3); захищає людей, що тримають в руках інструмент діаметром 2,5 мм та більше й довжиною до 100 мм від доступу до небезпечних частин (С); оболонка випробувана на шкідливі впливи проникнення води, коли всі рухомі частини обладнання всередині оболонки не рухалися (S).

#### Література:

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.

**Семестр 5 навчальна дисципліна «Апарати керування і захисту»**  
галузь знань 14 – Електрична інженерія  
спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

## **ЛЕКЦІЯ № 7.**

### **Тема: «Вимоги до електричних апаратів»**

#### **План**

1. Класифікація вимог до електричних апаратів;
2. Вимоги щодо безпечності конструкцій електричних апаратів;
3. Загальні експлуатаційні вимоги до електричних апаратів.

#### **1. Класифікація вимог до електричних апаратів**

Величезну кількість вимог до електричних апаратів поділяють на дві групи:

- 1) вимоги щодо безпеки;
- 2) експлуатаційні вимоги.

Сукупність вимог щодо безпеки (безпечності конструкції) електричних апаратів можна також поділити на дві групи:

- 1) вимоги щодо запобігання створенню небезпечних ситуацій для людей, майна й довкілля;
- 2) вимоги щодо запобігання утворенню перешкод для нормальної роботи інших елементів системи, у якій апарат працює.

Вимоги щодо запобігання небезпеки для людей, майна й довкілля:

- застосування обладнання відповідного класу захисту;
- застосування оболонки;
- застосування блокувальних пристроїв;
- попередження травмування іскрою та дугою;
- попередження опіків при дотиках до нагрітих частин;
- попередження травмування рухомими частинами;
- пожежна безпечність;
- вибухобезпечність;
- запобігання утворенню шкідливих хімічних сполук, аерозолів;
- запобігання утворенню дискомфортних умов.



Вимоги щодо запобігання утворенню перешкод для нормальної роботи інших елементів системи, у якій апарат працює:

- запобігання утворенню комутаційних перенапруг;
- запобігання утворенню електромагнітних перешкод;
- запобігання утворенню механічних перешкод;
- запобігання впливу на форму струму у мережі;
- запобігання зниженню коефіцієнту потужності –  $\cos \varphi$

Сукупність експлуатаційних вимог до електричних апаратів можна також поділити на дві групи:

- 1) загальні вимоги, які висуваються до всіх апаратів;
- 2) специфічні вимоги до різних типів апаратів, що висуваються відповідними профільними стандартами.

Перелік вимог зазначених двох груп наведено нижче. При цьому специфічні вимоги представлені лише деякими прикладами з огляду на різноманітність електричних апаратів за призначенням та застосуванням.

### **Загальні експлуатаційні вимоги до електричних апаратів**

До електричних апаратів висувається низка вимог щодо їх експлуатаційних властивостей, а саме:

- надійності;
- ремонтпридатності;
- зручності монтування та демонтування;
- зручності оперування;
- ізоляції, відстаней витоку та зазорів;
- експлуатаційних витрат;
- компактності, трудомісткості та матеріаломісткості;
- естетичності конструкції;
- працездатності у різних кліматичних умовах та умовах розміщення;
- працездатності в умовах механічних впливів.

**Специфічні експлуатаційні вимоги до окремих груп електричних апаратів (приклади)**

Ці вимоги висуваються профільними стандартами на конкретні види електричних апаратів. Наведемо декілька прикладів таких вимог:

- висока механічна та електрична зносостійкість (для реле та контакторів);
- струмообмежувальна здатність (для окремих видів відмикачів та запобіжників);
- здатність до відмикання коротких замикань (для запобіжників та окремих видів відмикачів);
- здатність витримувати наскрізні струми коротких замикань впродовж визначеного часу (вимикачі, роз'єднувачі, перемикачі заземлення тощо);
- визначена форма часо-струмової характеристики (для окремих видів реле, а також відмикачів та запобіжників);
- чутливість (для окремих видів реле, а також відмикачів, керованих різницевиими струмами).

Деякі експлуатаційні вимоги, що висуваються до окремих видів апаратів будуть розглядатися у четвертій главі даного посібника при розгляді відповідних апаратів.

## **2. Вимоги щодо безпечності конструкцій електричних апаратів**

Розглянемо ці вимоги у послідовності, наведеній в п. 3.1.1.

### **Вимоги щодо запобігання небезпеки для людей, майна й довкілля**

#### ***Застосування обладнання відповідного класу захисту***

Базовий міжнародний стандарт з електробезпеки IEC 61140 встановлює для електрообладнання чотири класи захисту від ураження електричним струмом (див. п. 2.1.3).

Відкриті струмопровідні частини (exposed-conductive-part) обладнання класу 0 не мають терміналів заземлення, це обладнання є найбільш небезпечним, але нажаль достатньо розповсюдженим серед побутових приладів (мал. 3.1-а). IEC передбачає у майбутньому вилучити цей клас з міжнародної стандартизації.

Відкриті струмопровідні частини обладнання класу I мають бути приєднані до системи вирівнювання потенціалів за допомогою терміналу, розташованому на цій частині й позначеному спеціальним символом (мал. 3.1-б), або за допомогою вилок

й розеток ЩУКО (мал. 3.1-в). Обладнання класу I забезпечує захист при пошкодженнях у разі непрямих дотиків.

Основний захист та захист при пошкодженнях в обладнанні класу II забезпечується виключно ізоляцією – основною разом із додатковою або посиленою. Обладнання класу II зазвичай не має відкритих струмопровідних частин й відповідно не має терміналів для заземлення цих частин (мал. 3.1-г, ліворуч). Для позначення обладнання класу II застосовується спеціальний символ.

Обладнання класу III слід вважати найбільш безпечним, оскільки напруга в ньому обмежується рівнем наднизької напруги (extra-low voltage; ELV), тобто до 50 В змінного струму (rms значення між лінійним провідником та землею або між лінійними провідниками) та до 120 В постійного струму (IEC60449). Обладнання класу III має бути позначене спеціальним символом (мал. 3.1-г), за винятком, коли воно приєднується до джерела наднизької напруги системи SELV або PELV (SELV system; PELV system). Особливості захисту за допомогою систем SELV та PELV визначені в IEC61140.

Особливості SELV системи:

- обмеження напруги в колі SELV системи рівнем наднизької напруги;
- захисне розділення (наприклад, подвійною ізоляцією, посиленою ізоляцією або захисним екрануванням) кола SELV системи стосовно усіх кіл, крім інших SELV кіл та PELV кіл;
- просте розділення (за допомогою тільки робочої ізоляції) кола SELV системи стосовно інших SELV кіл, PELV кіл та землі.

Безпечність SELV систем забезпечується наднизькою напругою, низьким рівнем ризику випадкового контакту з частинами, що знаходяться під більш високою напругою та відсутністю зворотного кола через землю, який підтримував би струм у разі контакту людини з активними провідниками. Будова SELV кіл зазвичай передбачає наявність ізолювального трансформатора, гарантованої мінімальної відстані між провідниками, а також захисних електричних бар'єрів. Електричні з'єднувачі SELV кіл мають бути побудовані так, щоб вони не могли бути сполучені із з'єднувачами, призначеними не для SELV кіл. Типовим прикладом

SELV системи є побутовий апарат класу III (мал. 3.1-г, праворуч), який живиться від джерела живлення класу II (мал. 3.1-г, ліворуч).

Особливості PELV системи:

- обмеження напруги в колі PELV системи рівнем наднизької напруги;
- електричне захисне розділення PELV кола стосовно усіх кіл, крім інших SELV кіл та PELV кіл.

На відміну від кіл SELV систем, кола PELV систем можуть бути зв'язані з іншими колами SELV систем, PELV систем та землею. Типовим прикладом PELV системи є стаціонарний комп'ютер, в якому застосовуються наднизькі напруги, з джерелом живлення класу I.



Мал. 3.1. Приклади обладнання різних класів захисту: а – побутовий прилад класу 0; б – термінал заземлення апарата класу I та його позначення згідно з ІЕС60417, 5019; в – побутовий прилад з вилкою ЩУКО, який стає приладом класу I лише при його приєднанні до розетки ЩУКО, захисний контакт якої приєднаний до РЕ провідника; г – побутовий прилад класу III та відповідне позначення (праворуч), а також його джерело живлення класу II та відповідне позначення

Розглянуті положення базового стандарту з електробезпеки слід у повній мірі застосовувати до електричних апаратів. Зокрема, слід уникати застосування апаратів, які можуть бути віднесені до обладнання класу 0, а якщо апарат має відкриті струмопровідні частини, вони обов'язково мають бути електрично з'єднані між собою та приєднані до терміналу заземлення, позначеного відповідним символом.

### **Застосування оболонок та блокувальних пристроїв**

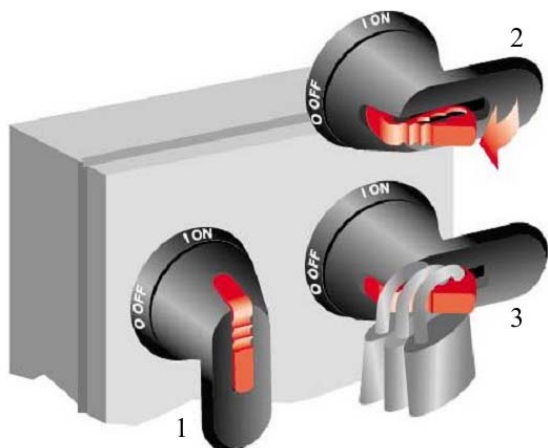
Застосування оболонок є ефективним засобом електробезпеки. Підвищуючи рівень IP (див. п. 2.3.2), оболонка не тільки захищає апарати, розміщені всередині неї, а й відвертає можливості прямих дотиків. Оболонки, виконані з ізоляційних

матеріалів (див. мал. 4.36), надають апаратурі властивостей обладнання класу II, а оболонки, виконані зі струмопровідних матеріалів, для запобігання ураженню електричним струмом при непрямих дотиках у разі пошкодження ізоляції, обов'язково мають бути електрично з'єднані з відкритими струмопровідними частинами апаратів та елементів конструкцій, розташованих всередині оболонки, і мати термінал заземлення, розміщений на видному місці й позначений відповідним символом.

Безпечність розподільних пристроїв у вигляді металевих шаф або окремих апаратів, розміщених в оболонках, суттєво підвищують блокувальні пристрої, які відвертають прямі дотики. Наприклад, застосування спеціального актуатора, який розміщується на дверцях оболонки (мал. 3.2) й за допомогою якого здійснюється оперування увідного комутаційного апарата, розміщеного всередині оболонки, забезпечує блокування відкриття дверець у двох випадках:

1) коли актуатор знаходиться у положенні **I (ON)**, що відповідає замкненому положенню увідного апарата;

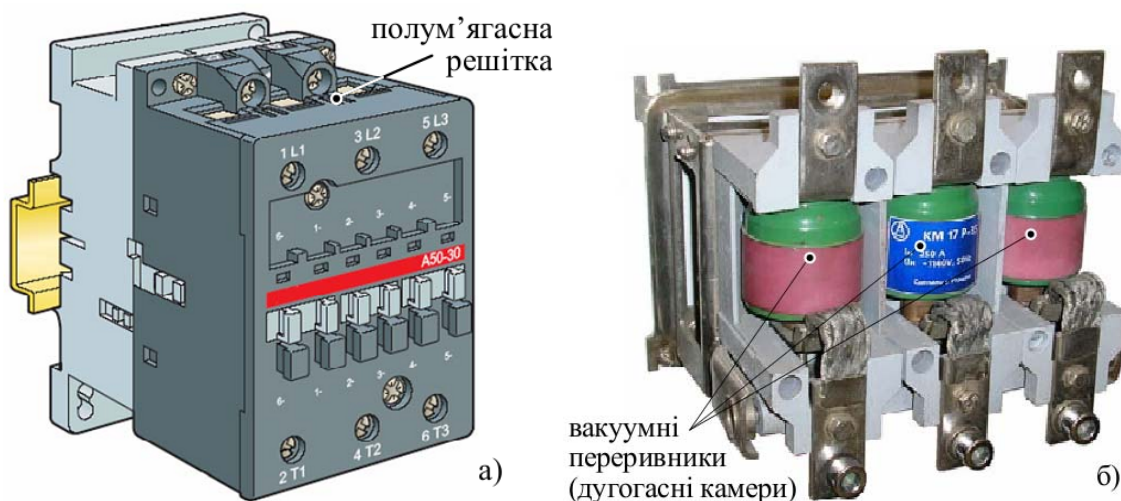
2) коли актуатор знаходиться у положенні **O (OFF)**, що відповідає розімкненому положенню увідного апарата, але при цьому відкидається важіль червоного кольору на актуаторі і в його отвори вставляються висячі замки (один чи декілька – для надійності). У першому випадку блокування відкриття дверець унеможливорює прямі дотики, а у другому випадку актуатор не тільки блокує відкриття дверець, а й можливість ввімкнути увідний апарат, що робить можливі ремонтні роботи набагато безпечнішими, ніж у випадку, коли на актуатор вішають табличку «НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ».



Мал. 3.2. Актуатор, який забезпечує блокування дверець, які можна відкрити лише у положенні **0** (OFF): 1 – актуатор знаходиться у положенні **I** (ON), на що вказує важіль червоного кольору, й блокує відкриття дверець; 2 – актуатор знаходиться у положенні **0** (OFF) й дверці можна відкрити, але лише у випадку, коли важіль заглиблено в рукоятку актуатора, а при відкинутому важелі відкриття дверець заблоковано; 3 – в отвори важелю вставлені висячі замки для блокування вмикання увідного апарата й відкриття дверець

### Попередження травмування іскрою та дугою

Електрична іскра або дуга, які виникають при розмиканні контактів комутаційного апарата, можуть травмувати людей, які знаходяться поблизу апарата. Тому апарати, у яких іскра, дуга або супроводжувальне полум'я можуть виходити за межі їх габаритів, мають експлуатуватися лише у закритих металевих шафах. Конструкції апаратів, які можуть експлуатуватися в інших умовах, повинні передбачати наявність закритих оболонок, всередині яких мають знаходитися дугогасні пристрої, та полум'ягасні решітки на поверхнях оболонок (мал. 3.3-а). Застосування вакуумних дугогасних камер у контакторах (мал. 3.3-б) локалізує електричну дугу й відвертає травмування нею.



Мал. 3.3. Апарати з захистом від травмування електричною дугою: а – повітряний контактор з полум'ягасними решітками; б – вакуумний контактор

### Попередження опіків при дотиках до нагрітих частин

В конструкціях апаратів мають бути передбачені заходи щодо попередження опіків при дотиках до нагрітих частин. Вітчизняні й міжнародні стандарти (зокрема,

IEC60947-1) рекомендують обмежувати перевищення температури доступних частин електричних апаратів граничними значеннями, наведеними нижче.

Елементи для оперування рукою або пальцем:

металеві – 15°C неметалеві – 20°C

Частини, доступні для дотику, але ті, що не оперуються рукою:

металеві – 30°C неметалеві – 40°C

Частини, які при нормальному оперуванні не доступні для дотику:

Зовнішні поверхні оболонок поблизу вводу кабелів:

металеві – 40°C неметалеві – 50°C

Зовнішні поверхні оболонок для резисторів – 200°C

Вентиляційні отвори оболонок для резисторів – 200°C

Вказані перевищення відносять до температури навколишнього повітря 40°C.

### **Попередження травмування рухомими частинами**

Апарати з доступними рухомими частинами, які можуть травмувати людину (наприклад, контактори, зображені на мал. 4.34 та 4.35), мають експлуатуватися лише у закритих металевих шафах. Конструкції апаратів, які можуть експлуатуватися в інших умовах (наприклад, контактор, зображений на мал. 3.3-а), не повинні мати доступних рухомих частин.

### **Пожежна безпека**

Пожежна безпека (як стан) будь-якого об'єкту в Україні регулюється вимогами стандарту ГОСТ12.1.004-85 (Система стандартів безпеки праці. Пожежна безпека. Загальні вимоги). Згідно з цим стандартом пожежна безпека має забезпечуватися:

- 1) системою попередження пожежі;
- 2) системою протипожежного захисту;
- 3) організаційно-технічними заходами.

Пожежна безпека електричних апаратів є невід'ємною складовою системи попередження пожежі, яка складається з:

- 1) попередження утворення горючого середовища;
- 2) попередження утворення джерел займання.

Зазначені чинники мають безпосереднє відношення до електричних апаратів, попередження утворення горючого середовища в яких має забезпечуватися:

- 1) застосуванням матеріалів, що не підтримують горіння;
- 2) обмеженням маси та об'єму горючих матеріалів;
- 3) ізоляцією (локалізацією) горючого середовища.

Матеріали або компоненти, що не підтримують горіння (non-flame propagating component) – це компоненти, які можуть займатися в результаті прикладення зовнішнього полум'я, але у яких полум'я не розповсюджується та які гасять самі себе впродовж обмеженого часу після віддалення полум'я. В електричних апаратах та суміжному обладнанні мають застосовуватися саме такі матеріали та компоненти. Дія полум'я на компонент (матеріал), що не підтримує горіння зображена на мал. 3.4.



Мал. 3.4. Дія полум'я на компонент (ізоляційну оболонку), що не підтримує горіння: а – зовнішнє полум'я підводиться до оболонки; б - зовнішнє полум'я прикладається до оболонки, оболонка займається; в – полум'я відводиться від оболонки, оболонка згасає.

Маса та об'єм горючих матеріалів, які у разі необхідності застосовуються в електричних апаратах, мають бути обмежені, а горюче середовище – ізольованим (локалізованим).

Попередження утворення джерел займання в електричних апаратах забезпечується:

- 1) застосуванням надійної ізоляції (для запобігання виникненню коротких замикань, внаслідок яких можуть виникати пожежі);
- 2) застосуванням надійних контактних з'єднань як всередині апаратів, так і в їх терміналах (для запобігання їх надмірного нагрівання та/ або іскріння);



- 3) локалізацією або обмеженням дії електричної дуги, яка може бути джерелом займання;
- 4) застосуванням надійних полум'ягасників на виході дугогасних пристроїв;
- 5) застосуванням протипожежних відмикачів, керованих різницевиими струмами, що реагують на небезпечні струми витоку, які можуть бути джерелами займання.

### **Вибухобезпечність**

Електрична дуга або іскра є невід'ємними супутниками електромеханічних комутаційних апаратів, тому, якщо апарат має застосовуватися у вибухонебезпечному середовищі, його необхідно помістити у спеціальну вибухозахисну оболонку (мал. 3.5).



Мал. 3.5. Вакуумний контактор та допоміжні апарати у вибухозахисній оболонці

### ***Запобігання утворенню шкідливих хімічних сполук, аерозолів***

Донедавна в комутаційних апаратах, зокрема у контакторах, широко застосовувалися металокерамічні контакти марки КМК-А10 (85% срібла та 15% оксиду кадмію), які мають унікальну дугогасну здатність, стабільність контактного опору, а також відносно високу стійкість до ерозії та зварювання. Цей чудовий контактний матеріал багато років застосовувався в електричних контактах по всьому світі. Але, враховуючи, що під час горіння дуги він виділяє в аерозольній формі кадмій, який є надзвичайно токсичним, зараз його застосування в електричних апаратах фактично заборонено як в Європі, так і в Україні (див. п. 1.2.3). Те ж саме стосується й ізоляційних матеріалів на основі фенолформальдегідних смол.

### ***Запобігання утворенню дискомфортних умов***

Під дискомфортними умовами слід розуміти такі шкідливі для людей явища як шум, вібрацію, шкідливі високочастотні поля та випромінювання. Зокрема, однією з перешкод застосування вакууму як дугогасного середовища в комутаційних апаратах високої напруги є рентгенівське випромінювання, яке виникає при напругах 110 кВ та вище.

**Вимоги щодо запобігання утворенню перешкод для нормальної роботи інших елементів системи, у якій апарат працює**

### ***Запобігання утворенню комутаційних перенапруг***

Комутаційні перенапруги, які виникають внаслідок надмірно швидкого зменшення струму при відмиканні струмів короткого замикання та внаслідок ефекту зрізу струму, можуть бути суттєво зменшені за рахунок застосування спеціальних контактних матеріалів, а також за рахунок застосування обмежувачів імпульсних виплесків (surge arrester; SA).

### ***Запобігання утворенню електромагнітних перешкод та стійкість до них***

Запобігання утворенню електромагнітних перешкод та стійкість до них слід розглядати в контексті електромагнітної сумісності (electromagnetic compatibility; EMC) як здатності обладнання або системи задовільно функціонувати у власному електромагнітному оточенні, не створюючи неприпустимих електромагнітних перешкод будь-чому в цьому оточенні. Електричні апарати не повинні створювати неприпустиме електромагнітне випромінювання (electromagnetic emission) – явище, відповідно до якого електромагнітна енергія походить від джерела. Окремим випадком електромагнітного випромінювання є електромагнітна радіація (electromagnetic radiation) – явище, відповідно до якого енергія потрапляє у простір у вигляді електромагнітних хвиль. Іншим аспектом електромагнітної сумісності є стійкість до збурень (immunity to a disturbance) – здатність пристрою, обладнання або системи функціонувати без погіршення характеристик за наявності електромагнітного збурення (electromagnetic disturbance).

Нормативи щодо неприпустимих рівнів високочастотних або імпульсних випромінювань встановлюються міжнародними стандартами групи IEC 61000. Електромеханічні апарати, зазвичай, не створюють неприпустимих випромінювань

та не погіршують своїх характеристик за наявності електромагнітних збурень у власному електромагнітному оточенні. Втім, в електромеханічних апаратах, які містять у своєму складі напівпровідникові прилади (в пристроях керування тощо) мають здійснюватися заходи щодо обмеження випромінювання та забезпечення необхідної стійкості до зовнішніх електромагнітних збурень. При відносно невисоких частотах ефективне обмеження випромінювання пристроїв керування тощо та їх захист від зовнішніх збурень забезпечують звичайні металеві (сталеві) екрани.

### ***Запобігання утворенню механічних перешкод***

Електромеханічні комутаційні апарати містять рухомі частини, тому спрацьовування апарата супроводжується ударами та вібрацією. Конструкція апарата має передбачати заходи щодо обмеження інтенсивності ударів та вібрацій з метою зменшення перешкод для нормальної роботи інших елементів системи, у якій апарат працює.

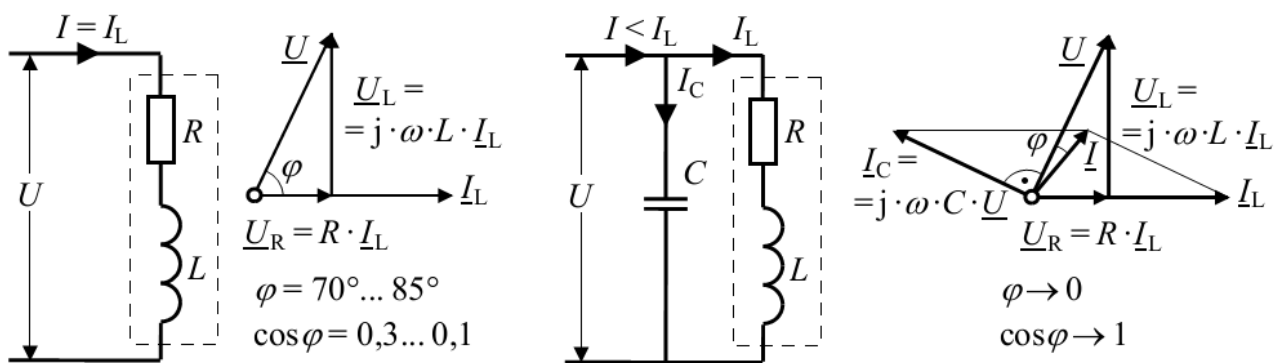
### ***Запобігання впливу на форму струму у мережі***

Електромеханічні апарати, зазвичай, не впливають на форму струму в головних колах, оскільки падіння напруги на комутаційних контактних елементах не перевищує декількох десятків мілівольт. Втім, апарати з електромагнітними приводами можуть суттєво впливати на форму змінного струму в колах керування, оскільки котушки електромагнітів завдяки феромагнітним осердям набувають нелінійних властивостей, а відтак в мережі з'являються вищі гармоніки струму. Нормативи щодо гармонічного складу струму наводяться в міжнародному стандарті IEC60555. Якщо склад гармонік не відповідає вимогам зазначеного стандарту, в колі керування апарата слід передбачити застосування пристроїв заглушення вищих гармонік (фільтрів вищих гармонік).

### ***Запобігання зниженню коефіцієнту потужності – $\cos \varphi$***

Електромеханічні апарати, зазвичай, не знижують у головному колі коефіцієнт потужності, значення якого визначається виключно опором та індуктивністю навантаження, оскільки опір та індуктивність головного кола апарата на декілька порядків менші за опір та індуктивність навантаження.

Натомість коефіцієнт потужності кола керування комутаційного апарата з електромагнітним приводом змінного струму залежить лише від опору та індуктивності обмотки електромагніта. У переважній більшості електромагнітів змінного струму коефіцієнт потужності знаходиться в інтервалі  $0,1 \dots 0,3$ . У цьому випадку для підвищення коефіцієнта потужності слід застосовувати ємнісні компенсатори – конденсатори, які підключають паралельно до обмоток електромагнітів. Застосування таких компенсаторів, збільшуючи коефіцієнт потужності, суттєво зменшує струм  $I$ , який тече у лінії, що живить коло керування апарата, лишаючи незмінним струм  $I_L$  в обмотці (мал. 3.6). Хоча шунтування конденсаторами обмоток електромагнітів зустрічається рідко, але цей спосіб має широке застосування для збільшення  $\cos\varphi$  потужних індуктивних навантажень, що дозволяє суттєво розвантажити лінії живлення їх головних кіл або підключити до існуючих ліній додаткові навантаження, не перевантажуючи лінії.



Мал. 3.6. Збільшення коефіцієнта потужності шунтуванням індуктивних навантажень конденсаторами

### 3. Загальні експлуатаційні вимоги до електричних апаратів

Розглянемо ці вимоги у послідовності, наведеній в п. 3.1.1.

#### *Вимоги щодо надійності*

Враховуючи надзвичайно важливі функції електричних апаратів (розподіл електричної енергії, керування обладнанням, захист людей, тварин, майна й довкілля), їх надійність слід розглядати як одну з найважливіших властивостей апарата. Під надійністю (dependability) розуміють властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати очікувані функції в заданих режимах й умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. Даний термін застосовується лише

для загальної, не кількісної характеристики об'єкту (низька надійність, висока надійність). Насправді ж надійність є комплексною властивістю, яка залежно від призначення об'єкту та умов його застосування може включати такі чинники, як безвідмовність (reliability), довговічність (durability), ремонтпридатність (maintainability), забезпеченість (зручність, доступність) технічного обслуговування (main-tenance support performance) та їх поєднання.

Зазначені чинники можуть розглядатися як кількісні показники. Наприклад, безвідмовність якісно характеризується як властивість об'єкту безперервно зберігати працездатний стан впродовж деякого часу або наробку. У той же час безвідмовність має низку кількісних характеристик, зокрема вірогідність безвідмовної роботи,  $\gamma$ -відсотковий наробок до відмови тощо.

Для експериментального визначення показників надійності електричних апаратів необхідно проводити довготривалі (від декількох місяців до декількох років) випробування великої кількості зразків даного типу (від декількох сотень до декількох тисяч). Такі випробування реально проводяться провідними виробниками відносно дешевих масових апаратів.

Якщо ж апарат коштує декілька тисяч доларів чи євро, очікувати, що виробник буде проводити подібні випробування – марно. Застосовуючи такі апарати, слід покладатися на авторитет виробника, його досвід, стабільність технології, якість технологічного обладнання, відгуки споживачів тощо.

### ***Вимоги щодо ремонтпридатності***

Ремонтпридатність – один з чинників надійності, сутність якого полягає у пристосованості до підтримки та відновлення працездатного стану будь-якого технічного об'єкту за рахунок технічного обслуговування та ремонту. Ремонтпридатність електричного апарата або комплектного пристрою передбачає:

- 1) можливість швидкої заміни в комплектному пристрої апарата або якоїсь іншої частини, що вийшли з ладу, у тому числі під напругою;
- 2) можливість швидкої заміни в апараті складових частин, що зносилися або вийшли з ладу, на запасні.

Прикладом високого рівня ремонтпридатності є розподільна система Kabeldon (п. 4.4.1). Ця система дозволяє проводити заміну комутаційних апаратів за лічені хвилини й цілком безпечно робити це під напругою.

Можна навести й приклад протилежного характеру. Ще не так давно ремонтпридатність плавких вставок запобіжників розглядалася як їх перевага. На багатьох великих заводах працювали дільниці, які здійснювали ремонт плавких вставок. Але ж плавка вставка, яка виконує надзвичайно важливу функцію захисту мереж від надструмів та їх наслідків, – це пристрій, який не можна випробувати, не зруйнувавши його. Тому довіряти захисним властивостям запобіжників та їх основним елементам – плавких вставкам можна лише тоді, коли їх виробництво здійснюється на спеціалізованих заводах, оснащених досконалим технологічним обладнанням в умовах суворого технологічного контролю, у тому числі й вхідного контролю якості матеріалів.

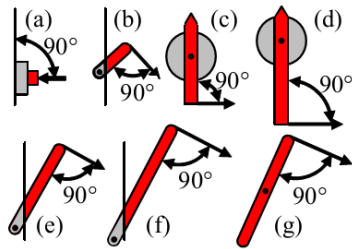
Такі можливості на непрофільних заводах відсутні, тому характеристики реставрованих плавких вставок можуть спричинити серйозні аварії, якщо плавка вставка не спрацює, коли вона повинна спрацювати, або несанкціоновану зупинку виробництва й недовипуск продукції, якщо плавка вставка спрацює, коли вона не повинна спрацьовувати.

### ***Вимоги щодо зручності монтування та демонтування***

Ці вимоги тісно пов'язані з ремонтпридатністю, оскільки заміна апарата передбачає швидке демонтування апарата, що вийшов з ладу, та швидке монтування нового апарата. Наприклад, застосування DIN рейок(п. 4.1.4) суттєво прискорює механічне монтування апаратів, а застосування втичних та викатних конструкцій (п. 4.1.3) поєднує в одній операції механічне монтування/дemonтування та електричне приєднання/від'єднання.

### ***Вимоги щодо зручності оперування***

Комутаційні апарати з неелектричним керуванням залежно від номінативного струму можуть мати актуатори різних конструкцій, сила зовнішнього впливу до якого прикладається дією одного пальця оператора, двох пальців, однієї руки, двох рук або ноги.



Мал. 3.7. Типи актуаторів з ручним керуванням

Стандарт ІЕС60947-1 надає рекомендації щодо меж сили оперування при тестуванні таких апаратів (табл. 3.1). Отже, сила оперування має бути меншою за нижню межу тестової сили.

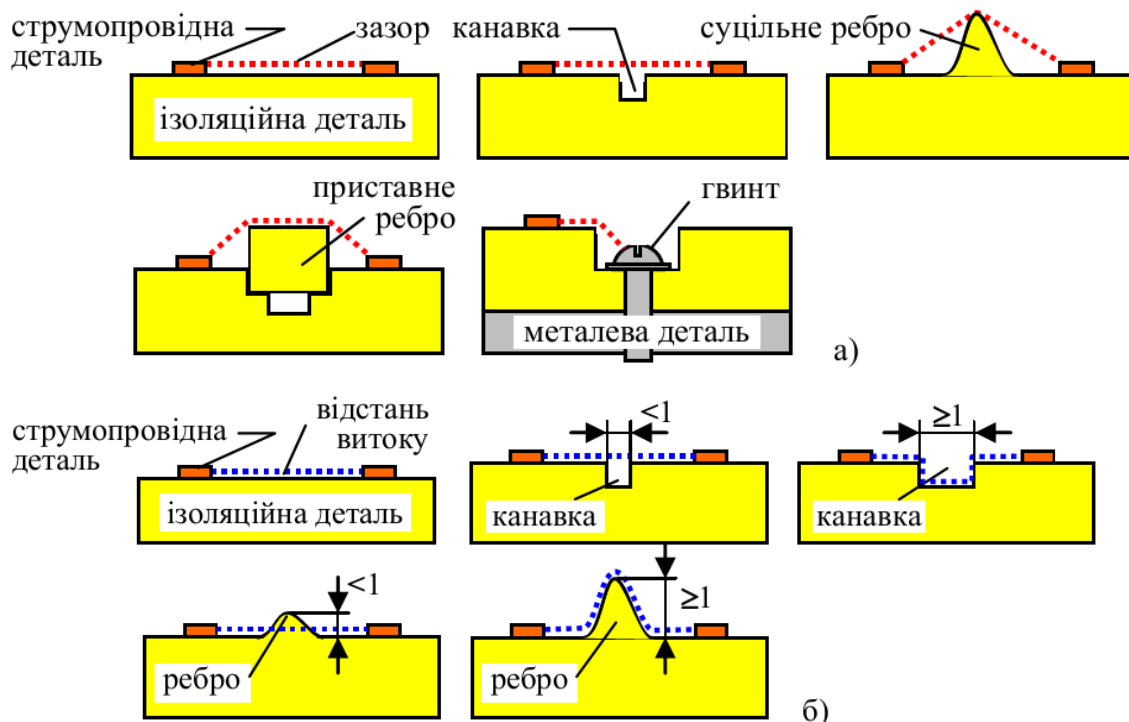
Таблиця 3.1. Рекомендовані значення сили оперування залежно від типу актуатора та типу оперування при тестуванні апаратів з ручним керуванням

Тип актуатора (за рис. 3.7) та тип оперування	Нижня межа сили Н	Верхня межа сили Н
(a) одним пальцем, кнопка	50	150
(b) одним пальцем, важіль	50	150
(c) двома пальцями	100	200
(d, e) однією рукою	150	400
(f, g) двома руками	200	600

### ***Вимоги щодо ізоляції, відстаней витоку та зазорів***

Струмопровідні частини електричних апаратів ізолювані між собою повітряними проміжками (в апаратах з повітряною ізоляцією) та проміжками, створеними твердими ізоляційними матеріалами. Базовий міжнародний стандарт з координації ізоляції ІЕС60664-1 визначає це поняття (insulation co-ordination) як взаємну кореляцію ізоляційних властивостей електричного обладнання з урахуванням можливого мікрооточення та зовнішніх впливів. Мікрооточення (micro-environment) – це безпосереднє оточення ізоляції, яке суттєво впливає на визначення зазорів та відстаней витоку.

Зазор (clearance) – це відстань у повітрі між двома струмопровідними частинами вздовж найкоротшої лінії між цими частинами, а відстань витоку (creepage distance) – це найкоротша відстань по поверхні ізоляційного матеріалу між двома струмопровідними частинами. Деякі приклади (ІЕС60947-1) визначення зазорів між струмопровідними деталями, які змонтовані на ізоляційних частинах апаратів, наведено на мал. 3.8-а, а приклади визначення відстаней витоку – на мал. 3.8-б.



Мал. 3.8. Деякі приклади визначення зазорів між струмопровідними частинами електричних апаратів (а) та відстаней витоку між ними (б)

Значення зазорів та відстаней витоку міжнародні стандарти, зокрема ІЕС 60947-1, ставлять у залежність від ступеня забруднення мікрооточення, номінальної напруги ізоляції, номінальної імпульсної витримуваної напруги та номеру групи, до якої відноситься ізоляційний матеріал.

Забруднення (pollution) – це будь-яка домішка сторонньої речовини, твердої, рідкої або газоподібної, яка може викликати стійке зниження електричної міцності діелектрика або поверхневого питомого опору ізоляції, а ступінь забруднення (pollution degree) – числова характеристика очікуваного забруднення мікрооточення:

- ступінь забруднення 1: без забруднення або тільки із сухими неструмопровідними забрудненнями;
- ступінь забруднення 2: у нормальних умовах спостерігаються тільки неструмопровідні забруднення, проте є можливою тимчасова провідність внаслідок конденсації;
- ступінь забруднення 3: можливі струмопровідні забруднення або сухі неструмопровідні забруднення, які можуть стати струмопровідними внаслідок очікуваної конденсації;
- ступінь забруднення 4: забруднення зумовлює стійку провідність внаслідок, наприклад, струмопровідного пилу, дощу або снігу.



Номінативна напруга ізоляції (rated insulation voltage  $U_i$ ) – це середньоквадратичне значення витримуваної напруги, призначене виробником для апарата, що характеризує здатність його ізоляції довгочасно витримувати певну тестову напругу. Якщо апарат має декілька номінативів (рейтингів) робочої напруги, то номінативна напруга ізоляції не повинна бути меншою за найбільший номінатив робочої напруги. Наприклад, якщо виробник апарата призначає для нього три номінативи робочої напруги – 380, 550 та 690 В, то номінативна напруга ізоляції не повинна бути меншою, ніж 690 В. Насправді ж апарат повинен витримувати більші значення напруги – не менше тестової напруги, визначеної в стандарті ІЕС60947-1. Ці значення наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Значення тестової АС напруги залежно від номінативної напруги ізоляції

Номінативна напруга ізоляції, $U_i$ , В	$\leq 60$	60 ... 300	300 ... 690	690 ... 800	800 ... 1000
Тестова напруга, В	1000	1500	1890	2000	2200

Базовий стандарт з координації ізоляції поділяє всі ізоляційні матеріали органічного походження на чотири групи: I, II, IIIa та IIIb. Критерієм віднесення ізоляційного матеріалу до певної групи є стійкість до трекінгу (tracking) – прогресуючого утворення струмопровідних каналів, що виникають на поверхні твердого ізоляційного матеріалу під спільним впливом електричного поля та електролітичного забруднення цієї поверхні. Показником стійкості до трекінгу є так званий відносний індекс трекінгу (comparative tracking index; CTI) – значення максимальної напруги у вольтах, при якому матеріал витримує в електричному полі цієї напруги вплив 50 крапель певного випробувального розчину без пробою.

При випробуванні матеріалу щодо визначення його CTI значення напруги змінюють кратно 25 В. Способи прикладання випробувальної напруги та склад розчину визначені у стандарті ІЕС60112.

Значення CTI для матеріалів вказаних чотирьох груп наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Значення відносного індексу трекінгу для ізоляційних матеріалів на основі органічних речовин

Група ізоляційних матеріалів	I	II	IIIa	IIIb
Значення відносного індексу трекінгу (CTI), В	> 600	400 ... 600	175 ... 400	100 ... 175

Стандарт ІЕС60947-1 визначає мінімальні значення зазорів між струмопровідними частинами електричних апаратів в умовах неоднорідного електричного поля залежно від номінальної імпульсної витримуваної напруги, яка залежить від категорії перенапруги обладнання, до якого має відношення відповідний апарат (див. п. 2.3.1) та ступені забруднення мікрооточення. Відповідні мінімальні значення зазорів наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Мінімальні значення зазорів (у міліметрах) між струмопровідними частинами електричних апаратів змінного струму в умовах неоднорідного електричного поля

Ступінь забруднення	1	2	3	4	
Номінальна імпульсна витримувана напруга $U_{imp}$ , кВ	1,5	0,5	0,8	1,6	
	2,5	1,5		1,6	
	4,0	3,0			
	6,0	5,5			
	8,0	8,9			
	12,0	14,0			

Мінімальні значення відстаней витoku стандарт ІЕС60947-1 визначає залежно від номінальної напруги ізоляції, ступень забруднення мікрооточення та групи матеріалів, до якої належить ізоляція апарата. Ці значення наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Мінімальні значення відстаней витoku (у міліметрах) між струмопровідними частинами електричних апаратів змінного струму з ізоляцією на основі органічних речовин

Ступінь забрудн.	1	2				3				4			
Група матеріалів	усі	I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb
Номінальна напруга ізоляції апарата, $U_i$	250	0,56	1,25	1,8	2,5	3,2	3,6	4,0		5,0	6,3	8,0	
	320	0,75	1,6	2,2	3,2	4,0	4,5	5,0		6,3	8,0	10,0	
	400	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3		8,0	10,0	12,5	
	500	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0		10,0	12,5	16,0	
	630	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0		12,5	16,0	20,0	
	800	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11,0	12,5		16,0	20,0	25,0	
	1000	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14,0	16,0	-	20,0	25,0	32,0	
	1250	4,2	6,3	9,0	12,5	16,0	18,0	20,0		25,0	32,0	40,0	

Примітки. 1. Матеріали групи IIIb не рекомендуються до застосування при ступені забруднення 3 та напругах понад 630 В, а також при ступені забруднення 4.

2. Для неорганічних матеріалів, наприклад, скла або кераміки, які не утворюють трекінгів, відстані витоку необов'язково повинні бути більшими, ніж відповідні зазори, але при цьому слід враховувати можливі ризики пробоїв.

При виборі ізоляції для апарата крім її електричних властивостей слід враховувати також її механічні та теплофізичні властивості.

### ***Вимоги щодо експлуатаційних витрат***

Експлуатаційні витрати складаються з витрат, пов'язаних з виділенням енергії всередині апарата (втратами енергії) та витратами, пов'язаними з технічним обслуговуванням та ремонтом.

Розробка нових конструкцій апаратів має супроводжуватися заходами щодо зменшення потужності втрат. Наприклад, сучасні запобіжники промислового застосування системи NH мають потужності втрат на 30%...40 % менші, ніж їх попередники, відомі у нас, як запобіжники ПН2.

Електромагнітні контактори, частота спрацьовувань яких сягає 1200 циклів вмикання/ вимикання за годину, мають електричну зносостійкість під дією дуги, на порядок меншу, ніж їх механічна зносостійкість, тобто контакти зношуються набагато раніше, ніж весь апарат в цілому. Відтак, конструкція контактора повинна передбачати швидку й зручну заміну контактів, а контакти мають поставлятися виробником як запасні частини.

Також як запасні частини мають поставлятися інші деталі, які швидко зношуються й виходять з ладу – пружини, гнучкі з'єднання, котушки електромагнітів змінного струму, дугогасні камери тощо. Конструкція апарата повинна передбачати легку заміну з використанням звичайного слюсарного інструменту (викрутки, гайкові ключі тощо). Впровадження вакуумних або гібридних контакторів, замість контакторів з гасінням дуги у повітрі, забезпечує суттєве підвищення електричної зносостійкості, зменшення витрат на проведення замін контактів та втрат, пов'язаних із зупинкою виробництва на час проведення таких замін, а також втрат, пов'язаних з недовипуском продукції.

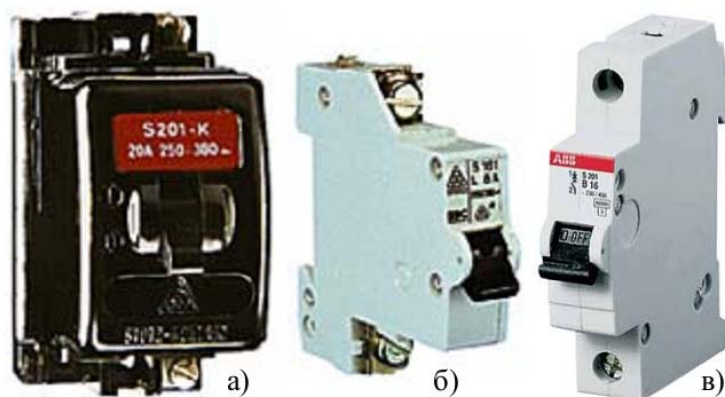
### ***Вимоги щодо компактності, трудомісткості та матеріаломісткості***

Зниження трудомісткості та матеріаломісткості електричних апаратів забезпечує економічний ефект у виробника але, хоч і непрямо, впливає й на ефект у

споживача. Зокрема, зниження трудомісткості часто досягають, застосовуючи блоковість конструкції апарата, зменшуючи кількість деталей, використовуючи стандартизовані й уніфіковані деталі та складальні одиниці. Ці заходи впливають на підвищення надійності апарата й знижують експлуатаційні видатки, пов'язані з проведенням ремонтів. Зниження матеріаломісткості зазвичай призводить до зменшення розмірів апарата, а відтак, й місця, необхідного для його монтування. За рахунок цього виробник комплектних пристроїв, який є споживачем електричних апаратів, може також отримати певний економічний ефект.

### ***Вимоги щодо естетичності конструкції***

Конкуруючи між собою, виробники звертають увагу й на естетичність конструкцій. Особливо це стосується апаратів побутового застосування (вимикачі, вилки, розетки), які становлять невід'ємну частину інтер'єру квартири або офісу. Але тенденції покращення зовнішнього вигляду апаратів торкнулися й тих з них, які монтуються у розподільних пристроях й не впливають на естетику помешкань. З фото, наведених на мал. 3.9, можна скласти уявлення про еволюцію ставлення одного виробника (STOTZ KONTAKT) до питань безпеки, естетичного вигляду та деяких інших властивостей продукції лише за 50 років – з 1957 р. по 2007 р.



Мал. 3.9. Відмикачі для побутових електроустановок виробництва STOTZ KONTAKT: а – 1957 р., IP00; б – 1970 р., IP00; в – 2007 р., IP20

Як бачимо з мал. 3.9, естетичний вигляд відмикачів з часом невпинно покращувався та покращувалася й захищеність від прямих дотиків. Крім того, постійно збільшувалася здатність до відмикання коротких замикань (п. 3.2.3). Перший відмикач, створений у 1923 р. (відомий у нас як пробка-автомат) мав здатність до відмикання 500 А, що тоді здавалося дуже великим досягненням, то з

часом цей показник постійно зростає – у 1957 р. становив 3000 А, у 1970 р. – 4500 А, а зараз він доведений до 12000 А.

### ***Вимоги щодо працездатності у різних кліматичних умовах та умовах розміщення***

Електричні апарати мають працювати в різних кліматичних умовах, які мають місце в різних регіонах земної кулі – від вологих тропіків до Арктики й Антарктики. Створювати універсальні апарати, які б однаково надійно працювали в усіх цих умовах, нерационально – вони виявилися би надто неефективними як з точки зору матеріаломісткості, так і з точки зору енергоспоживання. Тому апарати розраховують на роботу в тих кліматичних районах та умовах розміщення, де буде працювати переважна їх більшість, а для спеціальних умов випускають окремі виконання.

Стандарт ГОСТ15150 встановлює макрокліматичне районування земної кулі, а також виконання, категорії, умови експлуатації, зберігання та транспортування відповідно до впливу різних кліматичних факторів, а також типи кліматичних виконань апаратів й для кожного з них – діапазони коливання температури та вологості повітря, а також інші кліматичні фактори: туман; іній; атмосферний тиск (висота над рівнем моря); типи атмосфери (наявність корозійно активних реагентів); інтенсивність сонячного випромінювання; інтенсивність дощу; швидкість вітру; дія соляного туману, інею; дія пилу; дія плісневих грибів. Кліматичні виконання відповідають групам макрокліматів, найбільш поширеними з яких є помірно-холодний (– УХЛ; Temperate Cold – TC) та тропічний (– Т; Tropical – Tr). Стандарт встановлює також п'ять основних категорій розміщення апаратів:

- 1) експлуатація на відкритому повітрі;
- 2) експлуатація під навісом або у приміщенні, де коливання температури та вологості повітря несуттєво відрізняються від коливань на відкритому повітрі;
- 3) експлуатація у закритих приміщеннях з природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов, де коливання температури та вологості повітря суттєво менше від коливань на відкритому повітрі;
- 4) експлуатація у приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами;

5) експлуатація у приміщеннях з підвищеною вологістю (шахти, корабельні приміщення, деякі виробничі приміщення).

Кліматичне виконання й категорію розміщення стандарт рекомендує включати в позначення апарата, наприклад, УХЛ2 або Т3. Працездатність апарата перевіряють шляхом кліматичних випробувань, які здійснюють у спеціальних випробувальних камерах, всередині яких створюється штучний клімат – температура (холод, тепло, швидка зміна температури) вологість, імітація дощу тощо.

### ***Вимоги щодо працездатності в умовах механічних впливів***

Міждержавний стандарт ГОСТ17516.1 встановлює загальні технічні вимоги щодо стійкості апаратів до впливу зовнішніх механічних факторів, до яких відносять:

1) вібрації (вібростійкість, вібраційна міцність, резонансні частоти, сейсмостійкість);

2) удари (ударостійкість, ударна міцність, поодинокі удари, удари в упаковці при вільному падінні);

3) лінійні прискорення і які відповідають певним умовам експлуатації.

Стандарт встановлює групи виконання апаратів за впливом зовнішніх механічних факторів – від М1 до М47. Для кожної групи, що відповідає певній галузі застосування встановлюються показники синусоїдальної вібрації (діапазон частот, Гц; максимальна амплітуда прискорення,  $\text{м/с}^2$ ; та ступінь жорсткості – діапазон частот, амплітуда прискорення тощо), показники ударів поодинокі дії (пікове ударне прискорення у  $\text{м/с}^2$ ; тривалість дії ударного прискорення у мс та ступінь жорсткості), а також удари багатократної дії (пікове ударне прискорення у  $\text{м/с}^2$ ; тривалість дії ударного прискорення у мс та ступінь жорсткості).

Випробування апаратів на вплив механічних факторів здійснюються на спеціальних стендах для ударних та вібраційних випробувань, які імітують умови механічних зовнішніх впливів відповідно до групи виконання апаратів за впливом зовнішніх механічних факторів. Випробування мають підтвердити або спростувати відсутність несанкціонованих замикань або розмикань контактів апарата, а також механічну міцність його конструкції.

Література:

1. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Видво «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.

**Семестр 5 навчальна дисципліна «Апарати керування і захисту»**  
галузь знань 14 – Електрична інженерія  
спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготував: к.т.н. Ярошенко Леонід Вікторович

**ЛЕКЦІЯ № 8.**

**Тема: «Умови роботи електричних апаратів»**

**План**

1. Нормальні умови роботи електричних апаратів;
2. Ненормальні умови роботи електричних апаратів;
3. Робота електричних апаратів при коротких замиканнях. Струмообмеження та інтеграл Джоуля.

**1. Нормальні умови роботи електричних апаратів**

Прикметник «нормальний» виражає ознаку відповідності певним встановленим умовам, нормам, стандартам. Отже, нормальні умови роботи електричних апаратів – це умови, які встановлюються стандартами на відповідні типи апаратів, і в яких цей апарат має працювати переважно більшість часу з урахуванням кліматичних умов (температура, вологість тощо), механічних впливів, висоти над рівнем моря, ступеня забрудненості середовища, а також умов у головному колі апарата (номінальна напруга й номінальна частота мережі, межі їх коливання, режим роботи, категорія застосування тощо).

Для комутаційних апаратів та апаратів керування низької напруги, а це – велика кількість різновидів (відмикачі промислового застосування, вимикачі, роз'єднувачі, комбінації із запобіжниками, контактори, пускачі, апарати кіл керування), нормальні умови експлуатації, монтування та транспортування (normal service, mounting and transport conditions) встановлюються міжнародним стандартом ІЕС60947-1.

Зазначений стандарт встановлює такі нормальні умови експлуатації.

- Температура навколишнього повітря (ambient air temperature: 6.1.1) не повинна перевищувати +40 °С та її середнє значення впродовж доби (24 години) не повинно перевищувати +35 °С. Граничним нижнім значенням температури навколишнього повітря є –5°С.



- Висота над рівнем моря (altitude: 6.1.2 ) місця встановлення апарата не повинна перевищувати 2 000 м.
- Відносна вологість повітря (humidity: 6.1.3.1) не повинна перевищувати 50 % при максимумі температури +40 °С. Допускається збільшення відносної вологості при нижчих температурах, наприклад 90 % при +20 °С.

У випадках виникнення конденсації внаслідок змін температури повітря можуть бути необхідними спеціальні заходи.

- Ступінь забруднення (див. п. 3.1.3) пов'язують з умовами оточення, для яких обладнання призначене. Якщо не висуваються спеціальні вимоги, для апаратів побутового та аналогічного застосування стандартним (нормальним) вважається ступінь забруднення 2, а для апаратів промислового застосування – ступінь забруднення 3.

Нормальне застосування апарата передбачає його використання відповідно до визначеної виробником для нього певної категорії застосування (utilization category), яка представляє типові сукупності практичних використань, у яких апарат виконує своє призначення (див., наприклад, розділ 4.1 стосовно запобіжників, відмикачів промислового застосування, контакторів та апаратів кіл керування).

Нормальне застосування апарата також передбачає його використання відповідно до визначеного для нього (номінативного) режиму роботи. Стандарт IEC60947-1 визначає такі можливі номінативні режими (rated duties): восьмигодинний, безперервний, переривчастий, короткочасний та періодичний.

Восьмигодинний режим (eight-hour duty) – це режим, у якому головні контакти апарата лишаються замкненими, проводячи усталений струм, достатньо довго, щоб апарат досяг теплової рівноваги (thermal equilibrium), але не більше восьми годин без переривання. Переривання означає відмикання струму шляхом оперування самим апаратом. Цей режим є характерним для апаратів керування двигунами, що приводять у дію обладнання, яке має працювати впродовж робочої зміни без вимикання (на початку зміни апарат вмикає струм, наприкінці зміни – вимикає).

В таких апаратах можна застосовувати мідні контакти, оскільки електрична дуга, яка виникає при вимиканні кола, очищає контакти від оксидів й бруду, запобігаючи їх перегріванню впродовж наступної зміни.

Безперервний режим (uninterrupted duty) – це режим без будь-якого періоду відсутності навантаження, у якому головні контакти апарата лишаються замкненими, проводячи усталений струм без переривання понад восьми годин (впродовж тижнів, місяців або навіть років). Такий спосіб експлуатації відрізняється від восьмигодинного режиму, оскільки на контактах можуть накопичуватися оксиди й бруд, викликаючи поступове збільшення їх нагрівання. Для апаратів, що працюють у безперервному режимі або вводять коефіцієнт зниження (струму, потужності), або застосовують спеціальні конструктивні засоби (наприклад, срібні контакти).

Цей режим характерний, наприклад, для відмикачів побутового застосування, які можуть працювати роками без переривання електричного кола.

Переривчастий режим (intermittent duty) – це режим з періодами навантаження, під час яких головні контакти апарата лишаються замкненими впродовж часу, який знаходиться у визначеному співвідношенні з періодами відсутності навантаження, причому обидва інтервали є надто малими, щоб апарат встиг досягти теплової рівноваги (усталеного теплового стану). Переривчастий режим характеризується значенням струму, тривалістю його проходження та коефіцієнтом навантаження (on-load factor; duty factor) – відношенням у відсотках тривалості періоду проходження струму до тривалості повного періоду (циклу). Стандартними значеннями коефіцієнта навантаження є 15, 25, 40 та 60 %. За кількістю циклів оперування, яке вони можуть здійснити впродовж однієї години, апарати поділяють на такі класи оперувань впродовж однієї години: 1, 3, 12, 30, 120, 300, 1200, 3000, 12000, 30000, 120000, 300000.

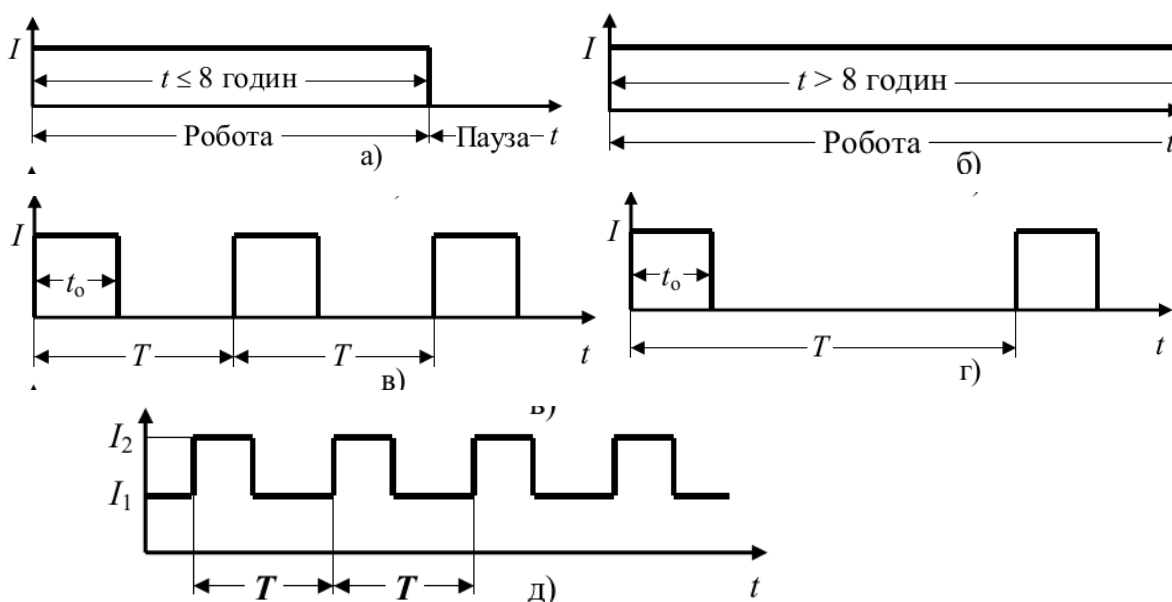
Електромеханічні апарати можуть мати клас 1200 та нижче. Комутаційний апарат, призначений для переривчастого режиму, може бути позначений спеціальною характеристикою цього режиму. Наприклад, якщо апарат циклічно проводить струм 100 А впродовж 2 хв. з паузами у 3 хв. (цикл – 5 хв.), то режим його роботи може бути позначений так: 100 А, class 12, 40 %.

Переривчастий режим характерний, наприклад, для контакторів, які власне й призначені для здійснення частих комутацій електричних кіл.

Короткочасний режим (temporary duty) – це режим, у якому головні контакти апарата лишаються замкненими впродовж періодів, що є надто короткими для досягнення апаратом теплової рівноваги, причому періоди навантаження чергуються з періодами відсутності навантаження, які є достатньо довгими, щоб відновити рівність температури (апарата) з температурою навколишнього середовища. Стандартизованими значеннями (періодів навантаження) для короткочасного режиму є 3, 10, 60 та 90 хвилин при замкнених контактах. Реальні значення періодів навантаження можуть бути набагато меншими, ніж стандартизовані значення. Прикладами таких короткочасних режимів можуть бути режими роботи котушок вмикання та вимикання контакторів з заціпками, контакти яких призначені для роботи у восьмигодинному режимі. Струм через обмотки котушок таких контакторів тече впродовж періодів, які становлять частки секунди, коли контактор вмикається та коли вимикається.

Періодичний режим (periodic duty) – це режим, у якому оперування з постійним або змінним навантаженням регулярно повторюється. Цей режим не характерний для електромеханічних комутаційних апаратів.

Часові діаграми навантаження апаратів у вказаних вище режимах зображені на мал. 3.10.



Мал. 3.10. Часові діаграми режимів роботи електричних апаратів: а – восьмигодинного; б – безперервного; в – переривчастого; г – короткочасного; д – періодичного

Нормальні умови експлуатації комутаційних апаратів стосовно їх головних кіл характеризуються номінативною робочою напругою та номінативним робочим струмом.

Номінативна робоча напруга (rated operational voltage;  $U_e$ ) – це значення напруги, яке, у поєднанні з номінативним робочим струмом, визначає використання апарата та на яке орієнтуються при проведенні відповідних випробувань та встановлення категорії застосування. Номінативна робоча напруга апарата повинна відповідати номінальній напрузі джерела живлення.

Номінативний робочий струм (rated operational current;  $I_e$ ) – це встановлене виробником значення робочого струму з урахуванням номінативної робочої напруги, номінативної частоти, номінативного режиму, категорії застосування та типу захисної оболонки за її наявності. Номінативна частота (rated frequency) – це частота живлення, при якій має працювати апаратура та до якої відносяться інші характеристики. Для деяких апаратів може бути призначено декілька або діапазон частот, або може бути позначено, що апарати можуть працювати як при змінному, так і при постійному струмі. Для апаратів, які здійснюють пряму комутацію головних кіл двигунів, поряд з номінативним робочим струмом або замість нього може бути вказана максимальна номінативна потужність (при певній номінативній робочій напрузі) двигуна, керування яким має забезпечувати даний апарат.

Для апаратів, призначених для роботи у безперервному режимі виробником встановлюється номінативний безперервний струм (rated uninterrupted current;  $I_u$ ) – значення струму, який апарат може проводити у цьому режимі, не спричиняючи неприпустимих перевищень температури (temperature-rise) в контрольних точках.

При випробуваннях апаратів щодо визначення перевищень температури застосовують поняття умовних теплових струмів.

Умовний тепловий струм на відкритому повітрі (conventional free air thermal current;  $I_{th}$ ) – це максимальне значення випробувального струму, яке застосовується при визначенні перевищень температури апаратів відкритого виконання на відкритому повітрі. Значення номінативного робочого струму апаратів відкритого виконання у восьмигодинному режимі не повинно перевищувати значення умовного теплового струму на відкритому повітрі.

Умовний тепловий струм в оболонці (conventional enclosed thermal current,  $I_{the}$ ) – це встановлене виробником значення струму, який має застосовуватися при визначенні перевищень температури апаратів, змонтованих у передбачених для них оболонках. Умовний тепловий струм в оболонці не може бути більшим ніж умовний тепловий струм на відкритому повітрі.

Усі вказані вище величини відносяться до нормальних умов роботи електричного апарата.

## **2. Ненормальні умови роботи електричних апаратів**

Ненормальні умови роботи електричних апаратів, на відміну від нормальних, діють короткочасно і пов'язані з такими чинниками як джерела займання, імпульсні виплески та ненормальні умови у головних колах.

Джерела займання можуть бути як зовнішніми (зовнішнє полум'я, розжарені металеві частини й дроти), так і внутрішніми (електрична дуга).

Стійкість до займань забезпечується підбором ізоляційних матеріалів, до яких застосовують спеціальні тестові процедури: випробування на спалах (flammability test), випробування на стійкість до полум'я (flame test), випробування на стійкість до спалаху під дією розжареного дроту (hot wire ignition test) та випробування на стійкість до спалаху під дією дуги (arc ignition test). Матеріали, які забезпечують високу стійкість до займань добре відомі виробникам, широко представлені на ринку і виробники мають можливість застосовувати саме ці матеріали.

Одним з найнебезпечніших джерел займання є електрична дуга, яка виникає всередині апарата. Тому застосування ефективних дугогасних пристроїв (arc control device), а також надійне ізоляційне розділення (separation) полюсів сприяють суттєвому підвищенню стійкості апарата до займань.

Стійкість до імпульсних виплесків слід розглядати не тільки в контексті функції роз'єднання (див. п. 2.3.1), а й з точки зору захисту від пробоїв між полюсами, які можуть спричинити виникнення дуги між ними.

Ненормальні умови у головному колі – це зміна напрямку (reverse current) постійного струму, надмірне зниження напруги (under-voltage), виникнення струмів витоку у землю (earth leakage current), виникнення струмів пробою на землю (earth

fault current), пошкодження безперервності провідника (conductor continuity fault; open circuit fault), а також виникнення надструмів (over-current) – перевантажень (overload) та коротких замикань (short circuit). Ненормальні умови у головних колах можуть викликати перегрівання струмопроводів та пов'язані з цим пожежі, або бути причиною механічного руйнування конструкцій та виходу з ладу електрообладнання. Вони можуть створити передумови ураження людей електричним струмом, а також бути наслідком дотиків людей до небезпечних струмопровідних частин.

Короткі замикання (КЗ), які виникають у зв'язку із пошкодженням ізоляції або неправильними з'єднаннями в електричних колах (див. п. 2.1), супроводжуються різким збільшенням струму (в десятки й сотні разів). При таких струмах температура провідників також дуже швидко збільшується, сягаючи пожежонебезпечних значень за лічені секунди, й навіть частки секунди. Крім того, у колах змінного струму приблизно через 10 мс після початку КЗ струм сягає пікового значення, яке приблизно у 2,5 разів може перевищувати, середньоквадратичне (rms) значення струму КЗ в усталеному стані. Наприклад, при усталеному rms струмі 20 кА, піковий струм може сягати 50 кА. При такому струмі електродинамічні сили (сили між провідниками зі струмами) в апараті та шинопроводах можуть їх деформувати й навіть зруйнувати. Враховуючи вказані наслідки, струми КЗ треба відмикати якомога скоріше поблизу місця його виникнення, не вимикаючи гілки електричних кіл, вільні від КЗ. Таким чином, щоб не допустити проходження пікового струму, захисні апарати повинні розмикати кола потужних коротких замикань за час, що не перевищує 5 мс.

При перевантаженнях, які виникають в електрично непошкоджених колах за рахунок надмірної кількості навантаження або за рахунок механічного перевантаження електродвигунів, температура нагрівання провідників електромереж або обмоток двигунів зростає відносно повільно, але при тривалих перевантаженнях температура провідників підвищується настільки, що стає небезпечною для ізоляції, яка їх оточує, й призводить до пошкодження ізоляції та короткого замикання. Отже, струми перевантаження також слід відмикати, але не одразу, щоб не переривати технологічний процес при нетривалих перевантаженнях,

а з витримкою часу, яка має зворотно залежати від струму перевантаження (inverse time-delay). Ця витримка часу може становити декілька годин при струмі перевантаження, який на 20...30 % перевищує значення номінативного струму захисного апарата, або не перевищувати 0,2 с, коли струм перевантаження у 10...12 разів перевищує значення номінативного струму захисного апарата. При цьому слід мати на увазі, що захисний апарат (запобіжник або відмикач) буде виконувати свої захисні функції, коли його часострумова характеристика (див. коментарі до рис. 4.2, 4.15 та 4.21) буде розташована нижче характеристики пошкодження обладнання, отже захисний апарат спрацює раніше, ніж відбудеться пошкодження.

Слід зазначити, що апарати, призначені для комутації двигунів, мусять мати здатність витримувати пускові струми перевантаження (ability to withstand motor switching overload currents), тобто здатність витримувати теплові навантаження, що виникають під час пуску та прискорення двигуна до нормальної швидкості, а також впродовж робочих перевантажень. Такі перевантаження слід розглядати як нормальні для цих апаратів, а також і для відповідних мереж, які мають витримувати подібні перевантаження. Отже, при таких перевантаженнях електричні кола не слід відмикати від джерел живлення.

Наслідком зміни напрямку постійного струму, зазвичай, буває розрядження акумуляторних батарей, які застосовуються, наприклад, для живлення електродвигунів підводних човнів. Для зарядження акумуляторів застосовують дизель-генератори. При цьому струм тече від генератора до акумулятора. Якщо генератор зупиняється, струм починає текти у зворотному напрямі, розряджаючи акумуляторні батареї. Тому генератор слід відмикати від акумуляторів, коли зворотний струм сягне певного заданого рівня.

Надмірне зниження напруги призводить до зупинки електродвигунів, а це може викликати ряд негативних наслідків. Якщо не відімкнути від живлення двигун, який зупинився за рахунок зниження напруги, струм в його обмотках може збільшитися внаслідок відсутності проти-ЕРС, яка виникає в обмотках, лише коли ротор двигуна обертається. Отже, зниження напруги може призвести до надструмів в обмотках двигунів, їх перегрівання та виходу з ладу. Якщо ж не відімкнути від живлення двигун, який приводить у дію обладнання, що має працювати під

наглядом оператора і який зупинився за рахунок не зниження, а зникнення напруги, то наслідком наступного поновлення живлення може стати руйнування обладнання й навіть травмування людей, які опинилися поруч з цим обладнанням, якщо оператор залишив його поза увагою в період простою, адже при поновленні живлення обладнання розпочне працювати без нагляду оператора. Комутаційні апарати низької напруги, які здійснюють захист обладнання від зниження напруги, згідно з ІЕС60947-1 повинні відмикати обладнання, коли напруга знижується до рівня від 70 % до 35 % від номінативного значення.

Серед причин виникнення струмів витоку у землю є прямі або непрямі дотики людей або тварин до небезпечних струмопровідних частин пошкодженого обладнання або обладнання, що недбало експлуатується. Іншою причиною виникнення струмів витоку у землю може бути пробій на землю внаслідок погіршення ізоляційних властивостей ізоляції провідників електромереж будівель. Ці струми, що течуть через струмопровідні будівельні конструкції (наприклад, через вогкі дерев'яні конструкції – балки, стропила, перегородки тощо), можуть призвести до коротких замикань і, як наслідок, до пожеж. Таким чином, наявність струмів витоку повинна бути підставою для негайного відмикання електроустановки від живлення.

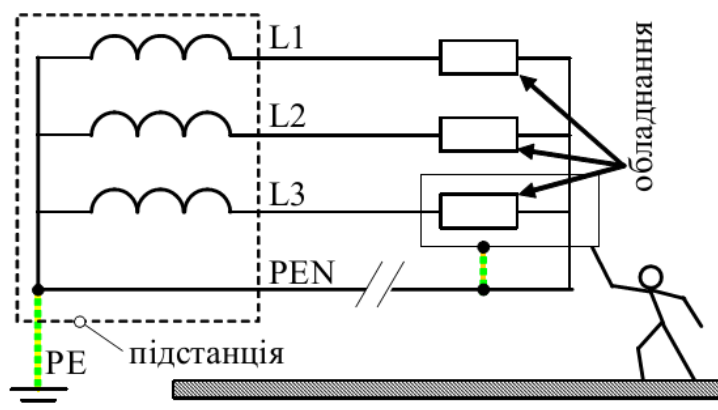
Пошкодження безперервності провідника слід розглядати як надзвичайно небезпечну аварійну ситуацію, якщо у системі з жорстко заземленою нейтраллю заземлення струмопровідного корпусу забезпечується за рахунок приєднання до PEN провідника. Обрив цього провідника на початку лінії призводить до тяжкої аварійної ситуації, зумовленої зсувом точки нейтралі (neutral-point displacement) при асиметрії навантаження, представленої на мал. 3.11 імпедансами  $Z_1$ ,  $Z_2$  та  $Z_3$ . При цьому нейтраль зсувається вбік провідника, до якого приєднане навантаження з найменшим імпедансом, тобто найбільш потужного навантаження, де напруга зменшується, а на навантаженнях з більшими імпедансами – збільшується, суттєво перевищуючи номінативну напругу обладнання, яке за таких умов дуже швидко виходить з ладу.

Іншим наслідком обриву PEN провідника є виникнення небезпечної напруги між корпусом, приєднаним до PEN провідника та заземлювальним провідником або



просто будь-яким заземленим провідником (наприклад, трубою газопроводу) – напруги зсуву нейтралі (neutral-point displacement voltage). Ця напруга може сягати рівня напруги між лінією та нейтраллю (line-to-neutral voltage), яку у нас прийнято називати фазною напругою. Якщо людина одночасно торкається заземлювального провідника, яким може бути будь-яка струмопровідна конструкція, що контактує з землею (наприклад, струмопровідна підлога), та корпусу обладнання, приєднаного до PEN провідника, то за умови його обриву людина може бути уражена електричним струмом.

Не слід думати, що аварійна ситуація, пов'язана з обривом нейтралі виникає, коли електропостачання будівель здійснюється через чотири-провідні повітряні лінії (overhead line), що характерно для сільської місцевості та околиць міст. Подібна ситуація часто-густо виникає й тоді, коли електропостачання здійснюється за допомогою кабельних ліній або так званих самонесених ізольованих проводів або СІП (LV aerial bundled cables), обриви проводів у яких є малоймовірними. У цих випадках пошкодження безперервності найчастіше виникає внаслідок порушення електричного контакту у терміналах PEN шини на підстанції, що найбільш характерно для приєднання до тієї шини алюмінієвих проводів за допомогою кабельних наконечників (див. мал. 1.31 та 1.32), коли багатожильні алюмінієві провідники приєднують до кабельних наконечників методом опресовування.



Мал. 3.11. Аварійна ситуація, що пов'язана з обривом PEN провідника

Для захисту від небезпечного підвищення напруги на навантаженні, пов'язаного з порушенням безперервності PEN провідника, застосовують спеціальні захисні апарати, які відмикають навантаження від живлення у разі підвищення напруги на них, або стабілізатори напруги. Надійним захистом від виникнення

небезпечної напруги між корпусом, приєднаним до PEN провідника, та заземлювальним провідником є еквіпотенціальне з'єднання між струмопровідними частинами, які не призначені для проведення струму (див. п. 2.1.3).

### 3. Робота електричних апаратів при коротких замиканнях.

#### Струмообмеження та інтеграл Джоуля

##### Поняття очікуваного струму

Короткі замикання, як зазначалося у п. 3.2.2, супроводжуються різким збільшенням струму (в десятки й сотні разів). Причини такого стану пояснює схема, зображена на мал. 3.12.

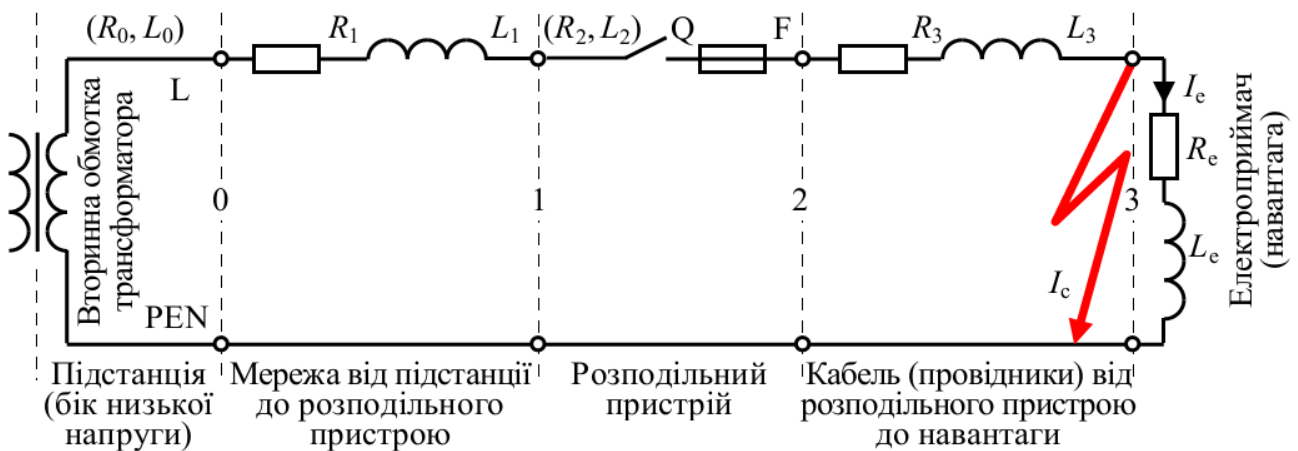


Рис. 3.12. Коротке замикання в однофазному колі

Навантаження електроприймача з опором  $R_e$  та індуктивністю  $L_e$ , у якому в нормальних умовах тече струм  $I_e$  (середньоквадратичне значення – rms), є частиною замкненого кола, до якого входять вторинна обмотка трансформатора підстанції та кола й апарати її розподільного пристрою низької напруги (з загальним опором  $R_0$  та індуктивністю  $L_0$ ), мережа від підстанції до увідно-розподільного пристрою будівлі, де знаходиться електроприймач (з загальним опором  $R_1$  та індуктивністю  $L_1$ ), коло розподільного пристрою, до якого входять комутаційні та захисні апарати, шини та з'єднувальні провідники (з загальним опором  $R_2$  та індуктивністю  $L_2$ ), а також кола кабелів та провідників від розподільного пристрою до навантаження (з загальним опором  $R_3$  та індуктивністю  $L_3$ ). Сумарні опір  $R_\Sigma$ , індуктивність  $L_\Sigma$  та імпеданс  $Z_\Sigma$  цього кола відповідно становлять:

$$R_\Sigma = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + R_e ; \quad (3.1)$$

$$L_\Sigma = L_0 + L_1 + L_2 + L_3 + L_e ; \quad (3.2)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + (\omega \cdot L_{\Sigma})^2} . \quad (3.3)$$

В реальних мережах імпеданс  $Z_e$  навантаження:

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + (\omega \cdot L_e)^2} \quad (3.4)$$

набагато перебільшує загальний імпеданс  $Z_c$  інших частин замкненого кола

$$Z_c = \sqrt{(R_0 + R_1 + R_2 + R_3)^2 + (\omega \cdot (L_0 + L_1 + L_2 + L_3))^2} , \quad (3.5)$$

тому  $Z_{\Sigma} \approx Z_e$ , а rms значення струму  $I_e$  визначається переважно імпедансом навантаження:

$$I_e = U_0 / Z_{\Sigma} \approx U_0 / Z_e , \quad (3.6)$$

де  $U_0$  – напруга холостого ходу (rms значення) вторинної обмотки.

Якщо ж у цьому колі виникне коротке замикання, наприклад, в результаті випадкового з'єднання терміналів навантаження, то при замкненому контакті Q струм у навантаженні зменшиться майже до нуля, а в інших частинах кола – стрімко зросте, оскільки він тепер визначатиметься імпедансом  $Z_c$ , який набагато менший за імпеданс  $Z_e$ . Отже, імпеданс  $Z_c$  є імпедансом кола короткого замикання, який визначає струм у цьому колі. Зокрема, в усталеному режимі rms значення струму короткого замикання  $I_c$  становитиме:

$$I_c = U_0 / Z_c . \quad (3.7)$$

Для кіл з апаратами захисту від коротких замикань (SCPD) вводять поняття очікуваного струму (prospective current), тобто струму, який тік би у колі, якби кожна ділянка головного кола комутаційного апарата та апарата захисту від надструмів (якщо він є) була замінена провідником з мізерно малим імпедансом. Поняття очікуваного струму було введено для того, щоб можна було порівнювати захисні властивості різних апаратів в одному й тому ж колі. Очікуваний струм  $I$  (rms значення) в усталеному режимі можна розрахувати за такою формулою:

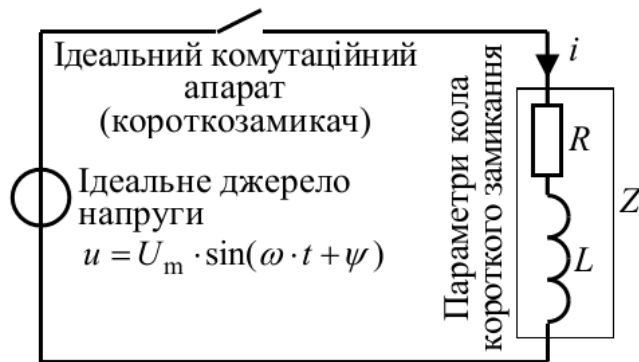
$$I = U_0 / Z , \quad (3.8)$$

де  $Z$  – імпеданс кола короткого замикання, розрахований без урахування опору та індуктивності комутаційного апарата та апарата захисту.

Слід розуміти, що струм у присутності комутаційного апарата та апарата захисту є дещо меншим (іноді – суттєво меншим) за очікуваний струм не тільки за

рахунок власних імпедансів апаратів, а й за рахунок того, що в цих апаратах під час розмикання контактів або внаслідок розплавлення плавкого елемента запобіжника утворюється електрична дуга, яка може суттєво зменшити (обмежити) струм у колі.

Очікуваний струм  $i$  короткого замикання у перехідному режимі розраховується як струм у схемі, представленій на мал. 3.13.



мал. 3.13. Схема до розрахунку очікуваного струму в однофазному колі короткого замикання

В схемі на мал. 3.13 позначено:  $u$  – миттєве значення напруги ідеального джерела;  $U_m$  – амплітуда цієї напруги;  $\omega$  – кругова частота зміни напруги;  $t$  – час;  $\psi$  – фаза початку короткого замикання. Ідеальним вважається джерело, внутрішні опір та індуктивність якого дорівнюють нулю.

Реальне джерело напруги можна розглядати як ідеальне, якщо його внутрішні опір та індуктивність додати до відповідних параметрів кола короткого замикання.

Розрахунок перехідного процесу зміни очікуваного струму  $i$  будемо здійснювати шляхом розв'язання диференційного рівняння, складеного за другим законом Кірхгофа:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = u \quad (3.9)$$

з нульовою початковою умовою

$$i(0) = 0. \quad (3.10)$$

Загальний розв'язок лінійних звичайних неоднорідних диференційних рівнянь першого порядку зі сталими коефіцієнтами, до класу яких відноситься рівняння (3.9), складається з суми довільного часткового розв'язку  $i_1$  вихідного неоднорідного рівняння та загального розв'язку  $i_2$  відповідного однорідного рівняння.

В усталеному режимі rms значення очікуваного струму  $I$  у вказаному колі дорівнює:

$$I = U / Z = U / \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} = (U / R) / \sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2}, \quad (3.11)$$

де  $U$  – rms значення напруги ідеального джерела або номінальне значення напруги мережі живлення;  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ;  $f$  – частота мережі;  $\tau = L / R$  – стала часу кола короткого замикання.

Миттєве значення цього струму можна розглядати як частковий розв’язок рівняння (3.9)

$$i_1 = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi), \quad (3.12)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву фаз між напругою джерела живлення та струмом в усталеному режимі.

Загальний розв’язок однорідного рівняння, відповідного до (3.9), має вигляд:

$$i_2 = C \cdot \exp(-t / \tau), \quad (3.13)$$

де  $C$  – довільна стала;  $p$  – корінь характеристичного рівняння:

$$L \cdot p + R = 0. \quad (3.14)$$

Рівняння (3.14) має перший порядок, а відтак один корінь  $p$ :

$$p = -R / L = -1 / \tau. \quad (3.15)$$

В результаті загальний розв’язок рівняння (3.9) має такий вигляд:

$$i = i_1 + i_2 = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi) + C \cdot \exp(-t / \tau). \quad (3.16)$$

Частковий розв’язок рівняння (3.9) з урахуванням початкової умови (3.10) потребує визначення сталої  $C$  шляхом підстановки початкових умов ( $t = 0$  та  $i = 0$ ) в вираз загального розв’язку (3.16).

$$0 = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\psi - \varphi) + C, \quad (3.17)$$

звідки отримуємо

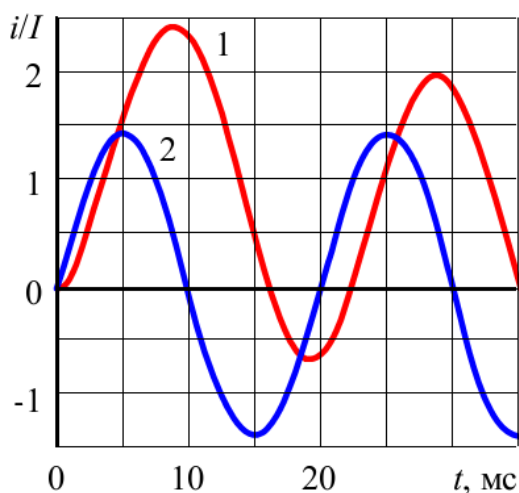
$$C = -I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\psi - \varphi), \quad (3.18)$$

Підставивши (3.18) в (3.16) отримуємо частковий розв’язок рівняння (3.8) з урахуванням початкової умови (3.10)

$$i = I \cdot \sqrt{2} \cdot [\sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi) + \sin(\varphi - \psi) \cdot \exp(-t / \tau)] \quad (3.19)$$

Як бачимо, характер перехідного процесу зміни очікуваного струму в колі короткого замикання при змінному струмі залежить не тільки від параметрів кола ( $U, R, L, \omega$ ), а й від співвідношення фази  $\psi$  початку короткого замикання та кута  $\varphi$  зсуву фаз між напругою джерела живлення та струмом в усталеному режимі. За несприятливих співвідношень  $\varphi$  та  $\psi$  ( $\varphi - \psi \rightarrow \pi/2$ ) залежність  $i(t)$  має яскраво виражений асиметричний характер (крива 1 на мал. 3.14) – найбільше значення струму спостерігається приблизно через пів періоду після початку короткого замикання, точніше трохи раніше – при частоті кола 50 Гц це відбувається не через 10 мс (пів періоду), а через 8...9 мс, причому це значення в 1,6 ... 1,8 разів перевищує амплітуду усталеного струму короткого замикання та у 2,2...2,5 рази перевищує його rms значення. Цей струм називають очікуваним піковим струмом. У реальних колах короткого замикання, на відносно невеликій відстані від трансформатора коефіцієнт потужності кола дуже малий ( $\cos\varphi \approx 0,1$ ) завдяки індуктивності вторинної обмотки трансформатора, отже, асиметричні режими з великими очікуваними піковими струмами у таких колах непоодинокі.

За сприятливих умов ( $\psi = \varphi$ ) після моменту початку перехідного процесу одразу ж настає усталений режим – очікуваний симетричний струм (крива 2 на мал. 3.14).

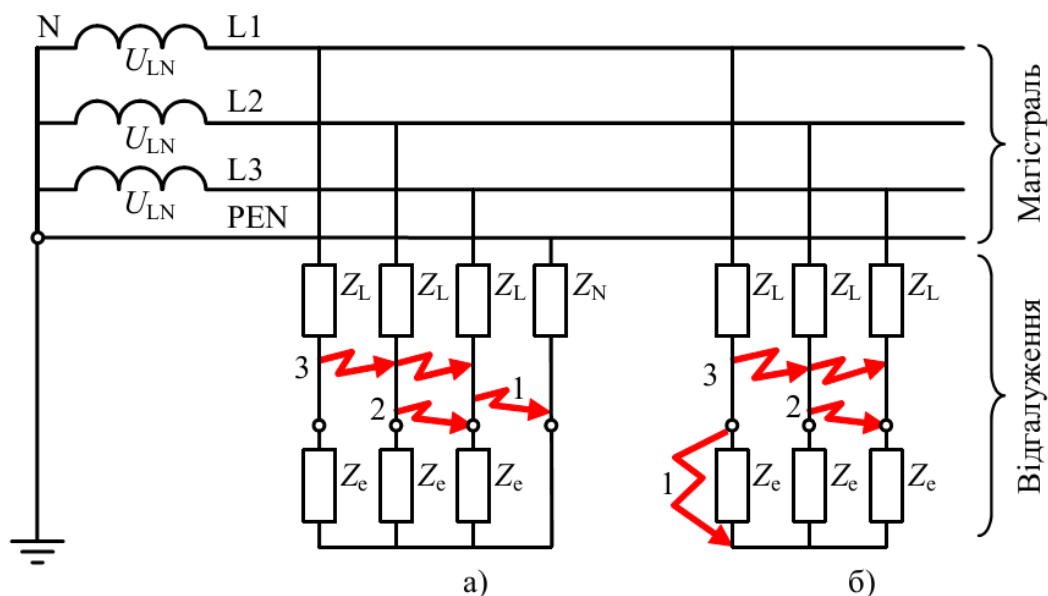


Мал. 3.14. Перехідні процеси зміни очікуваного струму при різних співвідношеннях фази  $\psi$  початку короткого замикання та кута  $\varphi$  зсуву фаз між напругою джерела живлення та струмом в усталеному режимі

У технічній літературі (стандарти, каталоги продукції) під очікуваним струмом, зазвичай, розуміють середньоквадратичне значення очікуваного

симетричного струму або, що те ж саме, очікуваного струму в усталеному режимі. При цьому слід мати на увазі, що амплітуда очікуваного струму приблизно в 1,4 рази, а піковий очікуваний струм приблизно у 2,5 рази перевищує це значення. Наприклад, якщо очікуваний струм становить 20 кА, то його амплітуда становить приблизно 28 кА, а його пікове значення – приблизно 50 кА.

Характер перехідних процесів у трифазних колах суттєво залежить не тільки від виду короткого замикання (однофазне, двофазне, трифазне), а й від способу живлення – з робочим нейтральним N або PEN провідником (так живляться окремі однофазні електроприймачі у будівлях житлового або цивільного призначення) або без робочого нейтрального провідника (так живляться, наприклад, трифазні електродвигуни). Електричні схеми, які ілюструють різновиди коротких замикань у трифазних колах, зображені на мал. 3.15.



Мал. 3.15. Різновиди коротких замикань у трифазних колах: а – з робочим нейтральним провідником; б – без робочого нейтрального провідника

У схемі на мал. 3.15 застосовані такі позначення:  $U_{LN}$  – напруга (rms значення) між лінійним та нейтральним терміналами вторинної обмотки трансформатора на підстанції;  $Z_e$  – імпеданси навантаження (в колах з робочою нейтраллю імпеданси навантаження в окремих фазах зазвичай відрізняються один від одного, а в колах без робочої нейтралі імпеданси навантаження в окремих фазах зазвичай приблизно однакові);  $Z_L$  – імпеданси кіл лінійних провідників (для одного споживача вони приблизно однакові в усіх трьох фазах);  $Z_N$  – імпеданс кола робочого нейтрального провідника (його значення може перевищувати значення імпедансу кола лінійного

провідника, якщо нейтральний провідник має менший перетин ніж лінійні провідники).

Коротке замикання в колі з робочою нейтраллю, яке позначене цифрою 1 на мал. 3.15-а є власне однофазним коротким замиканням, яке було розглянуте вище. Оскільки, як зазначалося,  $Z_N > Z_L$ , очікуваний струм короткого замикання у цьому випадку можна оцінити за таким виразом:

$$I = U_{LN} / Z_{LN} < U_{LN} / (2 \cdot Z_L), \quad (3.20)$$

де  $Z_{LN}$  – імпеданс кола короткого замикання, утвореного колами лінійного та нейтрального провідників.

При двофазному короткому замиканні, яке позначене цифрою 2 на мал. 3.15-а, очікуваний струм короткого замикання щонайменше на 73% перевищує однофазний струм короткого замикання:

$$I = \sqrt{3} \cdot U_{LN} / (2 \cdot Z_L). \quad (3.21)$$

Найбільш небезпечним є трифазне коротке замикання, яке позначене цифрою 3 на мал. 3.15-а. Очікуваний струм у цьому випадку становитиме:

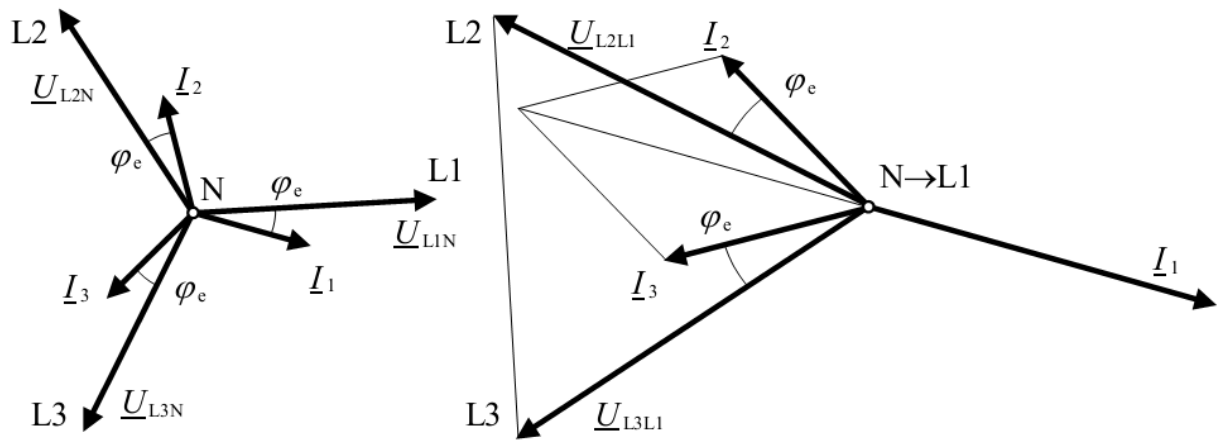
$$I = U_{LN} / Z_L, \quad (3.22)$$

й перевищує двофазний струм короткого замикання приблизно на 15%.

Характерно, що при однофазному та двофазному коротких замиканнях робочий струм у непошкоджених гілках відповідного трифазного кола суттєво зменшується за рахунок падіння напруги у колі нейтрального провідника. У сусідніх трифазних навантаженнях робочий струм також зменшиться, але не так суттєво, оскільки перетин нейтрального провідника магістралі зазвичай перевищує перетин нейтрального провідника на відгалуженні, отже більша частина падіння напруги у колі нейтрального провідника припадає на відгалуження. Останнє стосується й трифазного короткого замикання.

Однофазне коротке замикання в колі без робочого нейтрального провідника, яке позначене цифрою 1 на мал. 3.15-б, призводить до збільшення струму в непошкоджених гілках приблизно в  $\sqrt{3}$  разів (мал. 3.16), а в колі лінійного провідника з коротким замиканням у навантаженні – у три рази.





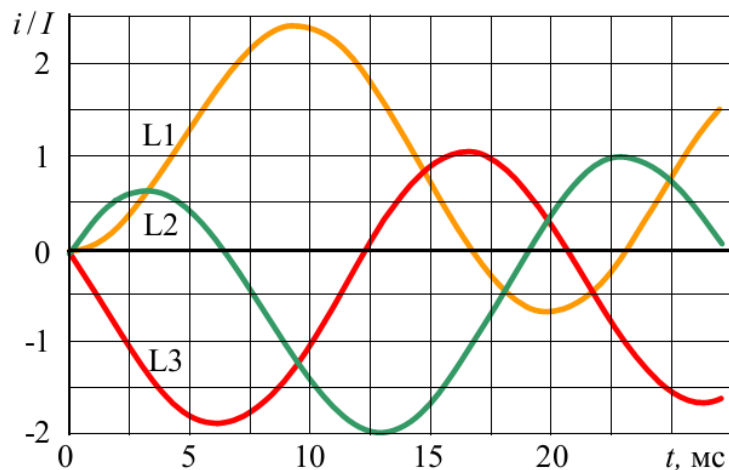
Мал. 3.16. Векторні діаграми для кола без робочого нейтрального провідника: а – в нормальному режимі роботи; б – при однофазному короткому замиканні. ( $\varphi_e$  – кут зсуву фаз напруги та струму у навантаженні)

Як бачимо, однофазне коротке замикання навантаження в колі без робочого нейтрального провідника для лінійних провідників має характер перевантаження. При двофазному та трифазному короткому замиканні у колі без робочого нейтрального провідника очікуваний струм буде майже таким самим, як і у колі з робочим нейтральним провідником.

Найбільш небезпечним режимом з точки зору струму у лінійних провідниках є трифазне коротке замикання як у колах з робочим нейтральним провідником, так і без нього.

Трифазні короткі замикання призводять до перехідних процесів (мал. 3.17) в усіх полюсах, але, на відміну від однофазних коротких замикань, у трифазних колах, завдяки наявності зсуву фаз напруги джерел живлення, значні пікові струми мають місце в одному з полюсів практично при будь-яких фазах початку короткого замикання. У трифазних колах, так само, як і в однофазних, симетричний струм короткого замикання може спостерігатися, але тільки в одному з полюсів (при певній фазі початку короткого замикання), що пояснюється наявністю зсуву фаз напруги у полюсах.

В інших полюсах також можуть виникнути значні пікові струми, а також симетричні струми, але при інших фазах початку короткого замикання.



Мал. 3.17. Приклад кривих перехідних процесів зміни струму у колах лінійних провідників при трифазному короткому замиканні

### ***Здатність електричних апаратів відмикати, проводити та вмикати струми коротких замикань***

Всі електричні апарати комутації, керування та захисту, які призначені для роботи у колах з потужними навантаженнями, можна поділити на дві категорії

– до першої категорії входять апарати, які здатні відмикати струми коротких замикань (це – запобіжники та відмикачі),

- до другої категорії – апарати, які не мають такої здатності.

Поняття здатності до відмикання (breaking capacity), тобто значення очікуваного струму (rms значення), яке комутаційний апарат або запобіжник здатний відмикати при заданій напрузі та приписаних умовах застосування і режимах, відносять до обох категорій апаратів, причому для комутаційних апаратів здатність до відмикання може бути визначена відповідно до роду струму та приписаних умов, наприклад, здатність до відмикання ємнісних струмів лінії, або кабелю, здатність до відмикання конденсаторної батареї тощо.

Деякі комутаційні апарати другої категорії (роз'єднувачі, перемикачі заземлення) не призначені для розмикання кіл зі струмом, отже для таких апаратів вимоги щодо здатності до відмикання не висуваються. Здатність до відмикання інших комутаційних апаратів другої категорії не перевищує значень струмів робочих перевантажень, який перевищує номінальний робочий струм  $I_e$  апарата (див. п. 3.2.1) у декілька разів залежно від категорії його застосування. Наприклад, вимикач-роз'єднувач OT630 (ABB) має умовний тепловий струм на відкритому повітрі  $I_{th} = 630$  А. Цей струм є номінальним робочим струмом  $I_e$  для категорії АС-

20 (апарат має працювати в режимі роз'єднувача). Для категорій АС-22 та АС-23 виробник встановив для цього апарата номінальний робочий струм на тому ж рівні – 630 А при номінальній робочій напрузі  $U_e = 690$  В. Відповідно до ІЕС 60947-3 у категорії АС-22 вимикач не менш ніж п'ять разів має відключити струм  $I_c = 3 \cdot I_e = 3 \cdot 630 = 1890$  А у колі з напругою  $U_r = 1,05 \cdot U_e = 725$  В та коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi = 0,65$ . У категорії АС-23 цей вимикач не менше ніж три рази має відключити струм  $I_c = 8 \cdot I_e = 8 \cdot 630 = 5040$  А у колі з напругою  $U_r = 1,05 \cdot U_e = 725$  В та коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi = 0,35$ .

Для запобіжників та відмикачів поняття здатності до відмикання розглядають як здатність цих апаратів до відмикання коротких замикань (short-circuit breaking capacity). Для сучасних запобіжників та відмикачів цей показник сягає 160...200 кА, що гарантує відсутність згубних наслідків при таких важких аваріях, як короткі замикання. Наприклад, вставки запобіжників OF (ABB) типорозмірів 000...3 мають здатність до відмикання 120 кА та 80 кА при номінальній робочій напрузі 500 В та 690 В відповідно, а вставки типорозміру 4 – 160 кА та 120 кА відповідно. Відмикачі Tmax T4V (ABB) мають граничну здатність до відмикання коротких замикань 150 кА при номінальній напрузі 500 В.

Важливою характеристикою комутаційних апаратів, не призначених для відмикання струмів коротких замикань (вимикачі, роз'єднувачі, перемикачі заземлення тощо), а також для відмикачів категорії В (їх називають також селективними відмикачами), є так званий короткочасно витримуваний струм (short-time withstand current), тобто струм (rms значення), який комутаційний апарат у замкненому положенні може проводити впродовж визначеного короткого часу при приписаних умовах застосування і режимах.

Короткочасно витримуваний струм характеризує термічну стійкість комутаційного апарата. Значення та тривалість цього струму пов'язані з умовами, що визначають відповідні стандарти, за яких комутаційний апарат не втрачає подальшої працездатності. При цьому в апараті не повинна пошкоджуватися ізоляція, деталі конструкції не повинні мати залишкових деформацій, а контакти не повинні зварюватися за рахунок термічної дії струму. Наприклад, для вимикача-

роз'єднувача OT630 виробник гарантує, що цей апарат буде витримувати струм 38 кА впродовж 0,15 с; 36 кА впродовж 0,25 с та 20 кА впродовж однієї секунди.

Іншою важливою характеристикою цих апаратів є витримуваний пік струму (peak withstand current), тобто значення піку струму, яке комутаційний апарат у замкненому положенні може витримувати при приписаних умовах застосування і режимах роботи. Витримуваний пік струму характеризує електродинамічну стійкість комутаційного апарата. Якщо виробник заявляє певне значення витримуваного піку струму, то це означає, що після проходження цього струму через струмопровід апарата він не втрачає подальшої працездатності – в ньому не повинні виникати залишкові деформації струмопроводів, не повинні пошкоджуватися опорні ізолятори, а контакти не повинні зварюватися за рахунок електродинамічного відкидання та термічної дії електричної дуги, яка може виникнути при цьому.

Комутаційні апарати зазвичай спроможні вмикати струми, які набагато перевищують їх номінативні значення і при цьому не втрачати подальшої працездатності. Значення очікуваного струму (миттєве значення), яке комутаційний апарат здатний вмикати при заданій напрузі та приписаних умовах застосування і режимах, називають його здатністю до вмикання (making capacity (of a switching device)). Про комутаційні апарати, які спроможні вмикати струми коротких замикань (у тому числі струми коротких замикань на терміналах апарата), кажуть, що вони мають здатність до вмикання коротких замикань (short-circuit making capacity;  $I_{cm}$ ).

Здатність до вмикання коротких замикань може мати апарат, який не призначений для відмикання струмів короткого замикання, наприклад, роз'єднувач, перемикач заземлення, контактор чи вимикач.

До комутаційних апаратів, які не мають здатності до відмикання коротких замикань (контактори, вимикачі, відмикачі різницевих струмів тощо) застосовують поняття умовного струму короткого замикання (conditional short-circuit current), тобто очікуваного струму (rms), який комутаційний апарат, що захищається певним струмообмежувальним захисним апаратом, повинен задовільно витримувати

(зберігати працездатність) впродовж часу спрацьовування вказаного струмообмежувального апарата при приписаних умовах застосування і режимах.

Вимикач-роз'єднувач ОТ630, який згадувався вище, має здатність до вмикання коротких замикань  $I_{cm} = 80$  кА (пікове значення), а умовний струм короткого замикання цього апарата, захищеного запобіжником виробника класу gG або aM (п. 4.1.1) з номінативним струмом відповідно 800 А та 1000 А, становить 90 кА.

### ***Струмообмеження в колах з комутаційними апаратами та запобіжниками***

При підрахунку очікуваного струму не враховують імпеданси комутаційних апаратів та апаратів захисту в колі короткого замикання. Насправді ці апарати дещо зменшують струм короткого замикання, але це зменшення є суттєвим лише для кіл, в яких встановлені апарати з відносно малими номінативними струмами.

Дійсно, якщо в колі з очікуваним струмом короткого замикання 10 кА (rms значення) встановлений автоматичний відмикач побутового призначення (п. 4.1.4) з номінативним струмом 6 А, який відповідає вимогам стандарту IEC60898-1, то потужність втрат у ньому не повинна перевищувати 3 Вт. Якщо знехтувати індуктивною складовою його імпедансу, то опір полюсу цього відмикача становитиме  $3 / 6^2 = 0,083$  Ом. При номінальній напрузі мережі 220 В імпеданс кола короткого замикання, який відповідає очікуваному струму 10 кА, становитиме  $220 / 10000 = 0,022$  Ом.

Припустимо, що коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) кола короткого замикання дорівнює 0,3. Це означає, що імпеданс 0,022 Ом утворюється опором  $0,022 \cdot 0,3 = 0,0066$  Ом, та індуктивним реактансом  $((0,022)^2 - (0,0066)^2)^{0,5} = 0,021$  Ом. З урахуванням опору відмикача, імпеданс кола короткого замикання становитиме  $((0,083 + 0,0066)^2 + (0,021)^2)^{0,5} = 0,092$  Ом, а струм короткого замикання (rms значення в усталеному режимі) не перевищуватиме  $220 / 0,092 = 2,4$  кА. Як бачимо, тільки наявність апарата захисту в цьому колі (без урахування електричної дуги) зменшує струм короткого замикання більше ніж у чотири рази. Якщо у тому ж колі встановлено відмикач з номінативним струмом 16 А (потужність втрат 3,5 Вт), то його опір становитиме  $3,5 / 16^2 = 0,0137$  Ом, імпеданс кола короткого замикання з

урахуванням опору відмикача –  $((0,0137 + 0,0066)^2 + (0,021)^2)^{0,5} = 0,0292$  Ом, а струм короткого замикання  $220 / 0,0292 = 7,5$  кА. У цьому випадку струм короткого замикання зменшується не у чотири рази, а лише на 25%. Нарешті, якщо у колі з таким самим очікуваним струмом встановлено відмикач з номінативним струмом 63 А (потужність втрат до 13 Вт), то його опір становитиме  $13 / 63^2 = 0,0033$  Ом, імпеданс кола короткого замикання з урахуванням опору відмикача –  $((0,0033 + 0,0066)^2 + (0,021)^2)^{0,5} = 0,0232$  Ом, а струм короткого замикання  $220 / 0,0232 = 9,5$  кА.

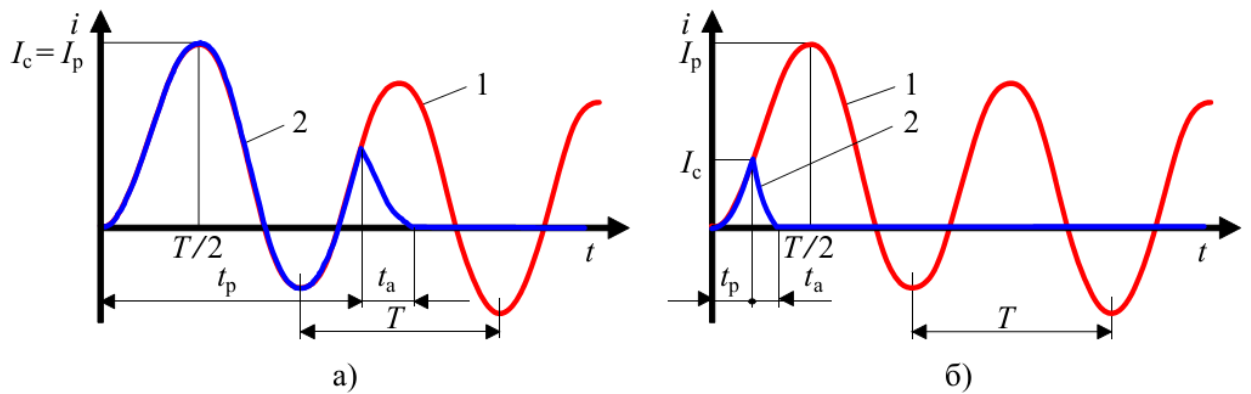
У цьому випадку струм короткого замикання зменшується лише на 5%. При більших значеннях номінативних струмів апаратів захисту вплив їх імпедансів на очікуваний струм стає мізерно малим.

Але апарати захисту з певними характеристиками здатні суттєво зменшити струм короткого замикання за рахунок додаткового опору, який вносить у коло електрична дуга, яка виникає у комутаційних апаратах на контактах, що розмикаються, або у вставках запобіжників, коли розплавлюються їх плавкі елементи.

На мал. 3.18, де показані приклади перехідних процесів у колах з апаратами захисту від коротких замикань, застосовані такі позначення: 1 – очікуваний струм короткого замикання; 2 – струм короткого замикання за наявності апарата захисту;  $T$  – період коливань напруги у мережі ( $T = 20$  мс при частоті 50 Гц);  $t_p$  – переддуговий час (pre-arcing time), тобто проміжок часу між моментом початку короткого замикання та моментом виникнення дуги на контактах комутаційного апарата або на плавкому елементі запобіжника;  $t_a$  – час горіння дуги (arcing time), тобто проміжок часу між моментом виникнення дуги у полюсі або запобіжнику та моментом остаточного її згасання у цьому полюсі або запобіжнику;  $I_p$  – пікове значення очікуваного струму (prospective peak current);  $I_c$  – пропущений струм (cut-off current; let-through current), тобто максимальне миттєве значення струму, досягнуте при виконанні операції відмикання комутаційним апаратом або запобіжником.

До моменту виникнення дуги перехідний процес у колі з апаратом захисту практично співпадає з очікуваним струмом, а після виникнення дуги струм стрімко спадає до нуля (впродовж декількох мілісекунд – завдяки потужним дугогасним

системам апаратів захисту від коротких замикань) і струм у колі переривається остаточно.



Мал. 3.18. Приклади перехідних процесів у колах з апаратами захисту від коротких замикань а – з низькою швидкодією (без струмообмеження); б – з високою швидкодією (зі струмообмеженням)

При відносно низькій швидкодії ( $t_p > T/2$ ) пропущений струм співпадає з піковим струмом, а при відносно високій швидкодії ( $t_p < T/2$ ) пропущений струм менше пікового. Апарати захисту з високою швидкодією прийнято називати струмообмежувальними (current-limiting SCPD).

Для апаратів захисту від коротких замикань вводять поняття характеристики пропущеного струму (cut-off (current) characteristic; let-through (current) characteristic), кривої, що показує залежність пропущеного струму від очікуваного струму при заданих умовах роботи. У випадку змінного струму значеннями пропущеного струму є максимальні значення, що можуть бути досягнуті при будь-якому ступені асиметрії. У випадку постійного струму значеннями пропущеного струму є максимальні значення, що можуть бути досягнуті при визначеній сталій часу.

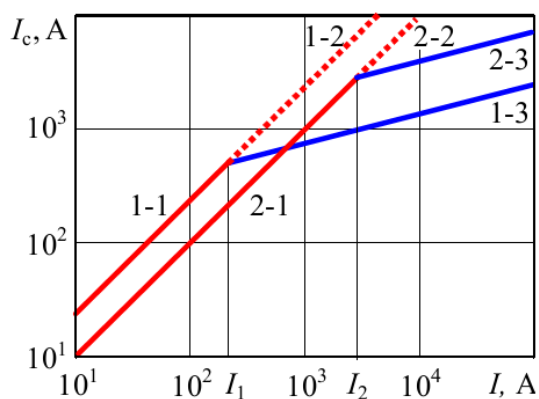
Типові характеристики пропущеного струму для апаратів змінного та постійного струму зображені на мал. 3.19.

При відносно малих значеннях очікуваного струму пропущений струм  $I_c$  – це піковий струм, який в колах змінного струму може бути у 2,5 рази більшим за rms значення очікуваного струму  $I$ . Отже характеристика пропущеного струму у цьому діапазоні струмів є прямою лінією  $I_c = 2,5 \cdot I$  (відрізок 1-1). Якщо апарат не є струмообмежувальним, ця ж залежність діє і при більших струмах (відрізок 1-2). Якщо ж апарат є струмообмежувальним, то, починаючи з деякого значення

очікуваного струму  $I_1$ , спрацьовування апарата відбувається настільки швидко, що струм не досягає пікового значення – апарат набуває струмообмежувальних властивостей (відрізок1-3). Як бачимо, струмообмежувальний апарат стає таким лише при відносно великих струмах. При відносно малих струмах (неструмообмежувальна зона) цей апарат не має струмообмежувальних властивостей.

У колах постійного струму найбільше значення очікуваного струму має місце в усталеному режимі, тому характеристика пропущеного струму у неструмообмежувальній зоні струмообмежувальних апаратів або для неструмообмежувальних апаратів є прямою лінією  $I_c = I$  (відрізки2-1 та 2-2). При струмах, що є більшими за деяке значення  $I_2$ , апарат стає струмообмежувальним (відрізок2-3).

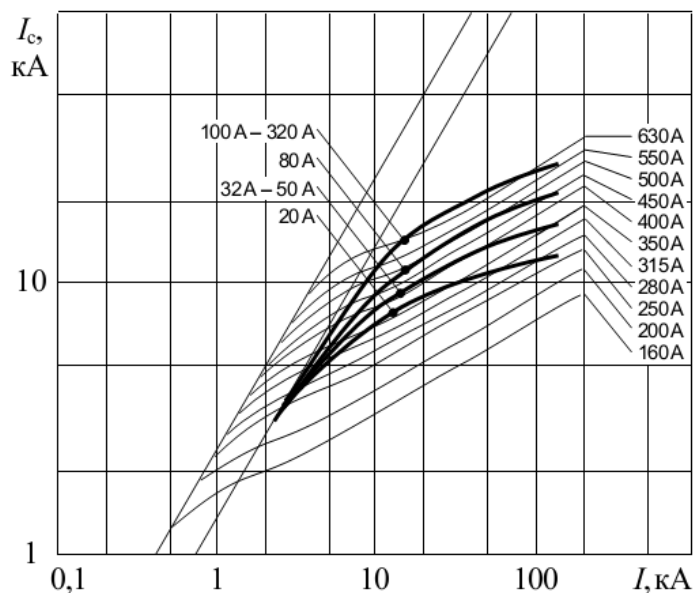
У прикладі характеристики пропущеного струму для апарата змінного струму, що зображена на мал. 3.19, при очікуваному струмі 10 кА пропущений струм становить лише 1,6 кА, а якби апарат не був струмообмежувальним, пропущений струм міг би бути майже у16 разів більшим – 25 кА. Апарати постійного струму також можуть мати струмообмежувальні властивості, але з набагато меншою ефективністю. Наведена на тому ж мал. 3.19 характеристика пропущеного струму апарата постійного струму показує, що при очікуваному струмі 10 кА пропущений струм становить приблизно 5 кА, а якби апарат не був струмообмежувальним, пропущений струм мав становити 10 кА, тобто пропущений струм зменшився лише у два рази. В потужних апаратах коефіцієнт зменшення пропущеного струму може бути ще меншим.



Ма. 3.19. Характеристики пропущеного струму апаратів захисту від коротких замикань змінного струму (лінії 1-1, 1-2, 1-3) та постійного струму (лінії2-1, 2-2, 2-3)



На мал. 3.20 представлені характеристики пропущених струмів реальних електричних апаратів – швидкодіючих запобіжників для захисту напівпровідникових приладів (Ferraz, PC 71 UD, aR – тонкі лінії) та відмикачів (ABB, Tmax T4, 250/320 – жирні лінії). Як бачимо, при однакових номінальних струмах швидкодіючі запобіжники пропускають менші струми, аніж відмикачі.



Мал. 3.20. Характеристики пропущених струмів швидкодіючих запобіжників (тонкі лінії) та відмикачів (жирні лінії)

Наведені на мал. 3.20 дані свідчать про високу струмообмежувальну здатність сучасних апаратів захисту від коротких замикань.

### **Інтеграл Джоуля**

Якщо руйнівна електродинамічна дія струмів коротких замикань характеризується найбільшим пропущеним струмом, то термічна дія цих струмів характеризується так званим інтегралом Джоуля (Joule integral;  $I^2t$ ), який визначається як інтеграл від квадрату струму за певний проміжок часу:

$$I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 \cdot dt, \quad (3.23)$$

де  $I^2t$  – стандартне позначення інтегралу Джоуля;  $t_0$ ,  $t_1$  – відповідно початкова та скінченна границі визначення інтегралу.

Стандартне позначення інтегралу Джоуля (застосовується в стандартах ІЕС) не слід ототожнювати з добутком квадрату струму  $I$  на час  $t$  його дії, хоча таке визначення може застосовуватися для оцінки теплової дії струмів перевантаження

на струмопроводи, якщо теплові сталі часу струмопроводів набагато перевищують час дії цих струмів.

Розмірність інтегралу Джоуля  $[I^2t] = A^2 \cdot c = \text{Дж}/\text{Ом}$  визначає його фізичний зміст: енергія у Джоулях, що виділяється у колі з опором 1 Ом, яке захищене апаратом захисту (відмикачем або запобіжником), дорівнює значенню  $I^2t$  спрацьовування, вираженому у  $A^2 \cdot c$ .

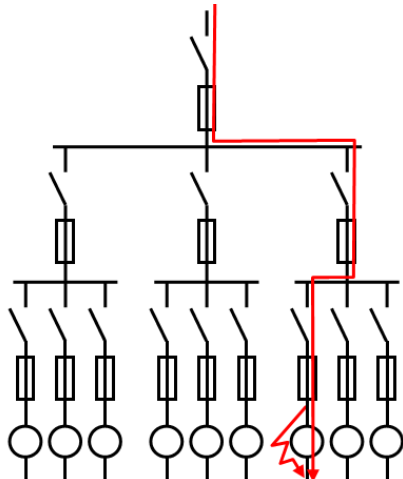
Якщо  $t_0$  – це момент початку короткого замикання, а  $t_1$  – момент остаточного згасання дуги на контактах комутаційного апарата або у запобіжнику, то відповідний інтеграл називають інтегралом спрацьовування (operating  $I^2t$ ) або повним інтегралом Джоуля. Для запобіжників вводять поняття переддугового інтегралу Джоуля (pre-arcing  $I^2t$ ), який також називають інтегралом плавлення ( $t_0$  – момент початку короткого замикання,  $t_1$  – момент виникнення дуги у вставці запобіжника). Якщо поняття повного інтегралу застосовують для оцінки термічної дії струму, то поняття переддугового інтегралу застосовують для перевірки селективної роботи послідовно з'єднаних запобіжників або запобіжника та відмикача.

Під селективністю при надструмах (over-current discrimination) розуміють координацію робочих характеристик двох або декількох пристроїв захисту від надструмів таким чином, що при виникненні надструмів у визначених межах, пристрій, призначений спрацьовувати у цих межах, спрацьовує, у той час, як інші пристрої не спрацьовують. Розрізняють послідовну селективність, за якої через різні пристрої захисту від надструмів проходить, переважно, той самий струм, та мережеву селективність, за якої через ідентичні захисні апарати, що розташовані на різних рівнях розподільних мереж, проходять різні частини надструму.

У деяких випадках захист від надструмів у розподільних мережах будують за допомогою запобіжників (мал. 3.21). При виникненні аварійного надструму у розподільній мережі, яка, зазвичай, має віялоподібний вигляд, спрацьовувати повинен той захисний апарат, який розташований найближче до місця аварії (мережева селективність). Якщо коротке замикання виникає на найнижчому рівні розподільної мережі, аварійний струм тече через апарати усіх рівнів мережі. При цьому плавкий елемент будь-якого запобіжника, встановленого на більш високому

рівні розподільної мережі, не повинен розплавитися, а відмикання струму короткого замикання відбудеться за рахунок запобіжника, встановленого на найнижчому рівні розподільної мережі, якщо його інтеграл спрацьовування буде меншим, ніж переддугові інтеграли запобіжників, розташованих на більш високих рівнях.

Якщо захист деякого об'єкту здійснюється двома захисними апаратами, наприклад, запобіжником та автоматичним відмикачем, то один з апаратів (відмикач) виконує функції основного захисту (main protection), а інший апарат (запобіжник, який має більшу здатність до відмикання) – функції резервного захисту (back-up protection). Цей апарат має спрацьовувати лише при потужних коротких замиканнях, коли очікуваний струм перевищує здатність до відмикання, яку має автоматичний відмикач, і не спрацьовувати, якщо з відмиканням струму короткого замикання впорається автоматичний відмикач.



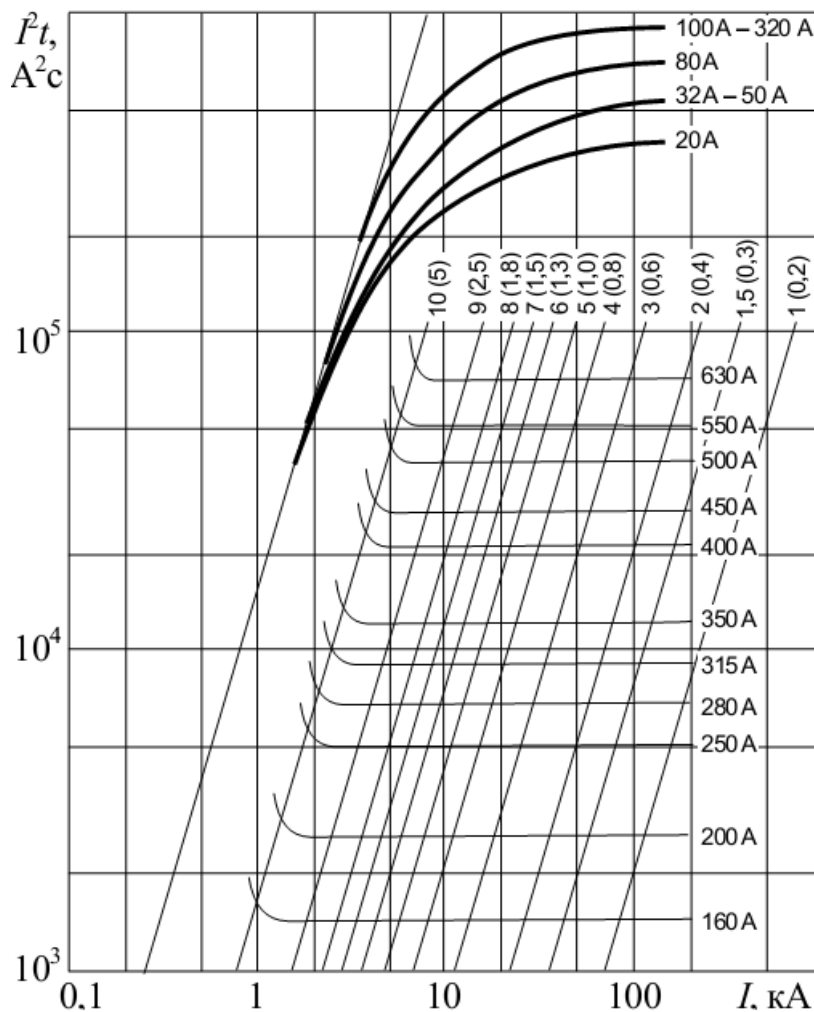
Мал. 3.21. Схема розподільної мережі із захистом від надструмів за допомогою запобіжників

Однією з найважливіших характеристик апарата захисту від коротких замикань є характеристика  $I^2t$  – залежність інтегралу Джоуля (перед-дугового інтегралу або інтегралу спрацьовування) від очікуваного струму при визначених умовах у колі (напруга,  $\cos \varphi$ , тощо). Оскільки міжнародні стандарти щодо запобіжників та відмикачів висувають вимоги до характеристик  $I^2t$ , то провідні виробники електричної апаратури у своїх каталогах наводять відповідні характеристики.

На мал. 3.22 представлені характеристики  $I^2t$  (повні інтеграли) швидкодіючих запобіжників для захисту напівпровідникових приладів класу aR (Ferraz, PC 71 UD –

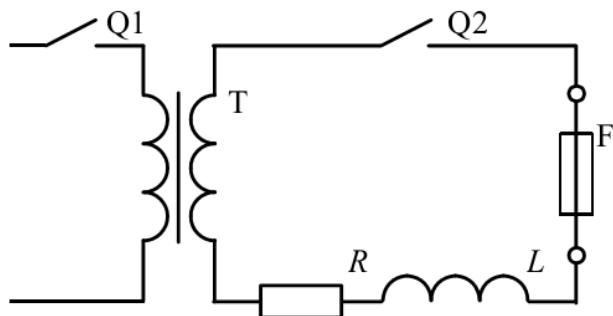
тонкі лінії з горизонтальними ділянками) та відмикачів (АВВ, Tmax Т4, 250/320 – жирні лінії). Похилі лінії, що перетинають характеристики  $I^2t$  запобіжників, показують їх час спрацьовування (вертикальні надписи, у дужках – переддуговий час). Надписи, що розташовані поруч з характеристиками  $I^2t$ , показують номінальний струм відповідних вставок запобіжників та відмикачів.

Як бачимо з наведених графіків, інтеграли Джоуля запобіжників при відносно великих очікуваних струмах практично не залежать від rms значення очікуваного струму (у деяких типів запобіжників збільшення очікуваного струму призводить навіть до зменшення  $I^2t$ ). У запобіжників класів gG та aM, призначених для захисту мереж (див. п. 4.1.1) інтеграли Джоуля також не залежать від очікуваного струму, тому виробники надають у каталогах лише кількісні значення цих характеристик, які майже на порядок перевищують відповідні характеристики швидкодіючих запобіжників. Приблизно такі ж значення  $I^2t$  мають й відмикачі.



Мал. 3.22. Характеристики повних інтегралів Джоуля швидкодіючих запобіжників (тонкі лінії) та відмикачів (жирні лінії)

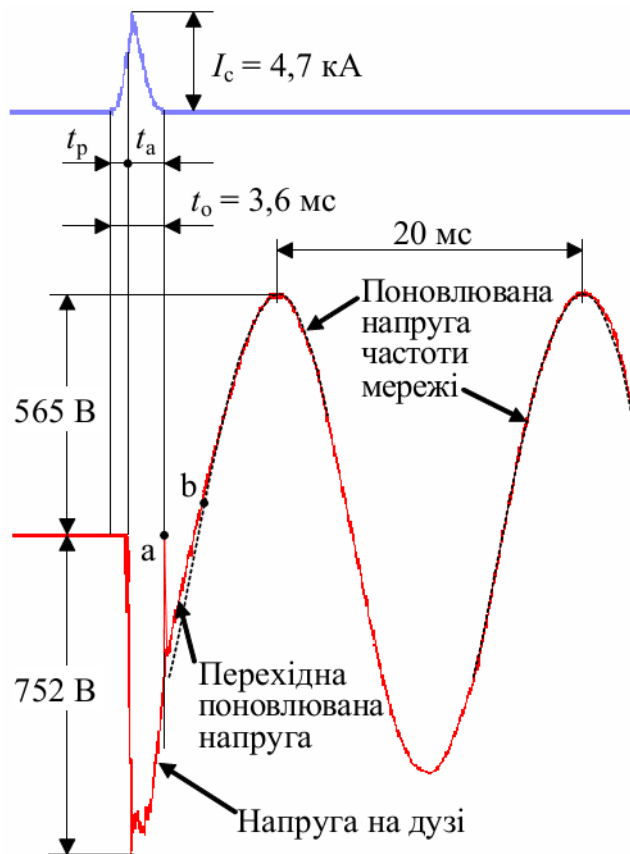
Інтегралі Джоуля визначають експериментально за рахунок штучного створення коротких замикань в експериментальних установках, зібраних за схемами, подібними до тієї, що зображена на мал. 3.23. В цій установці струм у колі короткого замикання, який створюється при вмиканні короткозамикача Q2, та напруга на запобіжнику реєструються за допомогою осцилографа (на схемі не зображений).



Мал. 3.23. Схема для експериментального визначення інтегралів Джоуля запобіжників: Т – силовий трансформатор; Q1 – відмикач середньої напруги; Q2 – короткозамикач; F – досліджуваний запобіжник; R, L – опір та індуктивність кола короткого замикання.

Осцилограма, на якій зафіксовано струм при короткому замиканні у колі з дослідним зразком запобіжника з номінальним струмом 100 А та напруга на його терміналах, зображена на мал. 3.24. Дослід проводився при напрузі кола  $1,05 \cdot 380 = 400$  В. Очікуваний струм короткого замикання становив 50 кА при параметрах кола, підібраних таким чином, що очікуваний піковий струм дорівнював 125 кА. При цьому пропущений струм у досліді становив лише 4,7 кА (менше ніж 4% від очікуваного піку).

Момент початку короткого замикання визначається з осцилограми струму як момент початку зростання струму. Момент початку плавлення плавкого елемента – з осцилограми напруги на терміналах запобіжника (момент початку зростання напруги). Як бачимо, переддуговий час  $t_p$  у даному випадку становить приблизно 1,2 мс, причому момент появи електричної дуги не співпадає з моментом максимуму пропущеного струму  $I_c$ . Час горіння дуги  $t_a$  становить приблизно 2,4 мс, отже час спрацювання (або час відмикання)  $t_o$  цього запобіжника становить приблизно 3,6 мс.



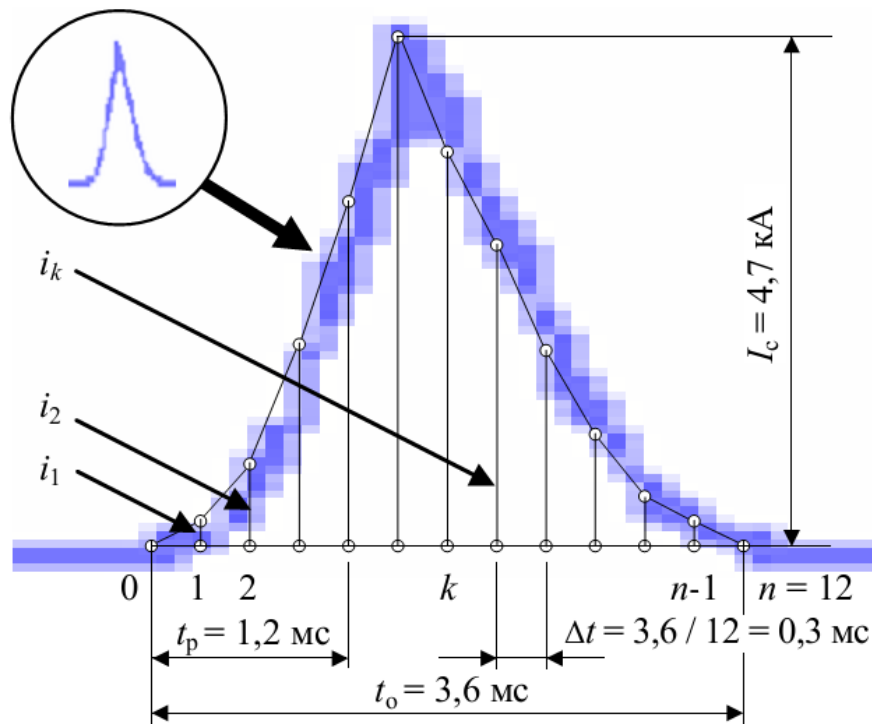
Мал. 3.24. Осцилограми струму та напруги на терміналах запобіжника при відмиканні ним кола короткого замикання

З осцилограми напруги на дузі чітко видно, що ця напруга не співпадає з напругою мережі та у деякі проміжки часу перевищує її за рахунок розсіювання дугою енергії, яка була накопичена в індуктивності кола короткого замикання. Пік напруги на дузі (peak arc voltage) становить приблизно 752 В, що перевищує амплітуду напруги мережі (565 В).

В момент згасання дуги струм практично спадає до нуля, також до нуля спадає і напруга на терміналах запобіжника (точка «а» на мал. 3.24), але вслід за цим починається стрімкий процес поновлення напруги на запобіжнику. Поновлювана напруга (recovery voltage), тобто напруга, що виникає між терміналами запобіжника після відмикання струму, може розглядатися у двох послідовних інтервалах часу: під час першого інтервалу з'являється перехідна напруга (transient recovery voltage; TRV), за цим інтервалом слідує другий, коли існує тільки поновлювана напруга частоти мережі, яка власне співпадає з напругою мережі (після точки «b» на мал. 3.24). Перехідний процес поновлення напруги може бути аперіодичним (як у даному випадку), або коливальним, іноді з великими амплітудами коливань. У таких

випадках комутаційна напруга (switching volt-age), тобто максимальне миттєве значення напруги, що виникає між терміналами комутаційного апарата або запобіжника під час його спрацьовування, може бути напругою дуги або може виникати під час перехідного процесу поновлення напруги.

Наявність осцилограми струму надає можливість розрахувати чисельними методами інтегралі Джоуля – переддуговий та повний. Для цього треба, збільшивши масштаб осцилограми струму (мал. 3.25), розбити відрізок, що відповідає часу спрацьовування, на  $n$  рівних ділянок (у розглянутому прикладі  $n = 12$ ) та на кінцях цих ділянок визначити значення струмів  $i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_{n-1}, i_n$ .



Мал. 3.25. До розрахунку інтегралів Джоуля чисельними методами

Застосувавши метод трапецій, отримаємо вираз для чисельного визначення повного інтегралу  $(I^2t)_o$ :

$$(I^2t)_o \approx \frac{\Delta t}{2} \cdot (i_0^2 + 2 \cdot i_1^2 + 2 \cdot i_2^2 + \dots + 2 \cdot i_{n-1}^2 + i_n^2). \quad (3.24)$$

З урахуванням того, що  $i_0 = i_n = 0$ , вираз для визначення повного інтегралу спрощується:

$$(I^2t)_o \approx \Delta t \cdot (i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_{n-1}^2). \quad (3.25)$$

Переддуговий інтеграл  $(I_2t)_p$  може бути визначений за (3.24) з урахуванням того, що  $i_0 = 0$ , а  $n$  – це кількість ділянок в межах перед дугового часу (у даному прикладі  $n = 4$ ) за таким виразом:

$$(I^2t)_p \approx \Delta t \cdot (i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_{n-1}^2 + i_n^2 / 2). \quad (3.26)$$

Характеристика інтеграла Джоуля має надавати інформацію про найбільше його значення, тому при одному значенні очікуваного струму досліди проводять при різних фазах початку короткого замикання і для побудови характеристики  $I^2t$  обирають найбільше з розрахованих значень.

Література:

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
2. Загирняк М.В., Кузнецов Н.И. Электрические аппараты. – Учебное пособие. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – 320 с.