

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

В. Д. Козлов

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Модуль 1

Загальні питання електричних апаратів

Посібник

Київ 2005

12,80

УДК 621.31 (042.4)
ББК 3 260 я 7
К 592

Рецензенти: д-р. техн. наук, проф. *Б. І. Доценко*;
канд. техн. наук, старш. наук. співроб. *С. Я. Меженний* –
заступник директора департаменту електроенергетики
Мінпаливенерго України

Затверджено на засіданні науково-методично-редакційної
ради Аерокосмічного інституту НАУ 3 грудня 2004 року.

Козлов В. Д.

К 592 Електричні апарати. Модуль 1. Загальні питання
електричних апаратів: Посібник – К.: НАУ, 2005. –
92 с.

У першій частині посібника розглянуті загальні
питання електричних апаратів: основні вимоги до апаратів,
електродинамічні зусилля, теплові процеси, методи гасіння
електричної дуги, електричні контакти й електромагнітні
пристрої в електричних апаратах.

Для студентів спеціальностей 8.090603 «Електро-
технічні системи електроспоживання», 8.090605 «Світло-
техніка і джерела світла» та 8.090600 «Енергетичний
менеджмент». Може бути корисним студентам напряму
0906 «Електротехніка» та інженерно-технічним праців-
никам електроенергетичних компаній і підприємств.

УДК 621.31 (042.4)
ББК 3 260 я 7

© В. Д. Козлов, 2005

ЗМІСТ

Передмова.....	4
Глава 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ОСНОВНІ ВИМОГИ, ЩО ПРЕД'ЯВЛЯЮТЬСЯ ДО НИХ	5
1.1. Класифікація електричних апаратів.....	5
1.2. Кліматичне виконання. категорії розміщення та захисні оболонки електричних апаратів.....	6
1.3. Номінальні параметри та основні вимоги до електричних апаратів.....	10
Глава 2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ	13
2.1. Поняття електродинамічної стійкості.....	13
2.2. Електродинамічні сили в паралельних провідниках.....	14
2.3. Електродинамічні сили в перпендикулярних провідниках.....	17
2.4. Електродинамічні сили кільцевого витка та між витками.....	19
Глава 3. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ	21
3.1. Проблема нагрівання електричних апаратів.....	21
3.2. Джерела тепла в електричних апаратах.....	23
3.3. Відведення тепла від нагрітого тіла.....	29
3.4. Нагрівання та охолодження апаратів в різних режимах роботи.....	35
3.5. Нагрівання при короткому замиканні, термічна стійкість електричних апаратів.....	39
Глава 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ	41
4.1. Визначення і класифікація контактів.....	41
4.2. Опір контактів.....	43
4.3. Матеріали контактів.....	46
4.4. Нагрівання контактів.....	47
4.5. Електродинамічні сили в контактах.....	48
4.6. Конструкції низьковольтних комутаційних контактів.....	49
4.7. Конструкції високовольтних контактів.....	51
Глава 5. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА ТА МЕТОДИ ЇЇ ГАСІННЯ	54
5.1. Фізичні процеси в дуговому проміжку.....	54
5.2. Електрична дуга постійного струму.....	57
5.3. Електрична дуга змінного струму.....	62
5.4. Основні методи гасіння електричної дуги.....	66
5.5. Вимикаюча спроможність електричних апаратів.....	73
Глава 6. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ	75
6.1. Основні терміни та співвідношення.....	75
6.2. Магнітні кола постійного струму.....	78
6.3. Магнітні кола змінного струму.....	83

Класичні російськомовні підручники з електричних апаратів авторів А.А. Чуніхіна, І.С. Таєва, Г.Н. Александрова та інших призначалися в першу чергу для студентів, які спеціалізуються в електроапаратобудуванні. У них детально розглядалися всі електричні, теплові й електромеханічні процеси, що відбуваються в електричних апаратах у різних режимах їх роботи. У такому глибокому вивченні теорії електричних апаратів для спеціальностей 8.090603 «Електротехнічні системи електро-споживання», 8.090605 «Світлотехніка і джерела світла» та 8.09600 «Енергетичний менеджмент» немає необхідності.

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

Автор висловлює щиро подяку рецензентам С.Я. Меженному та Б. І. Доценко за ретельний перегляд рукопису та зроблені зауваження, котрі були враховані й сприяли покращанню посібника.

Усі зауваження та пропозиції щодо поліпшення посібника автор прийме з вдячністю і врахує в подальшій роботі. Зв'язатись з автором можна за e-mail: KozlovVD@ukr.net.

Глава 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ОСНОВНІ ВИМОГИ, ЩО ПРЕД'ЯВЛЯЮТЬСЯ ДО НИХ

1.1. Класифікація електричних апаратів

Поняття „електричний апарат“ (ЕА) охоплює велике коло електротехнічних пристроїв, що використовуються в електротехніці, промисловості, сільському господарстві та побуті.

Класифікація електричних апаратів може бути виконана за такими ознаками:

- призначенням;
- областю використання;
- принципом дії;
- родом струму;
- величиною напруги;
- способом управління.

Різноманітність електричних апаратів та виконуваних ними функцій, суміщення в одному апараті кількох функцій не дозволяє провести точну їх класифікацію. Автор вважає найбільш доцільним класифікувати електричні апарати за їх призначенням, тобто за основною функцією, яку виконує апарат.

За призначенням електричні апарати можна віднести до таких груп.

Комутаційні апарати (КА) – ЕА, що виконують вмикання і вимикання в електричних мережах. Апарати цієї групи характеризуються низькою інтенсивністю спрацьовувань (мається на увазі необхідна кількість вмикань та вимикань ЕА, яка становить від кількох комутацій на добу до кількох на рік). Комутаційні апарати поділяються на низьковольтні (до 1000 В) та високовольтні (вище 1000 В). До низьковольтних КА відносяться: рубильники, перемикачі, пакетні вимикачі, повітряні автоматичні вимикачі. До високовольтних КА належать роз'єднувачі, відокремлювачі, короткозамикачі, вимикачі навантаження, силові вимикачі та рекроузери. Призначення та конструктивні особливості їх виконання і робота вищезгаданих КА розглядаються у відповідних параграфах.

Пускорегульовані апарати – ЕА, що виконують пуск і управління електричних машин та інших споживачів електричної

енергії. Апарати цієї групи характеризуються великою кількістю вмикачів та вимикачів (до кількох тисяч за годину). До пускорегулювальних апаратів відносяться контактори, пускачі, силові та командні контролери, реостати та резистори.

Захисні апарати – ЕА, що захищають електричні мережі від струму короткого замикання (КЗ) та електричних перевантажень. Захисними апаратами є запобіжники, які поділяють на високовольтні та низьковольтні. Обмеження струму КЗ виконують реактори, а обмеження перенапруг – розрядники.

Контролюючі апарати – ЕА, що виконують контроль заданих електричних і неелектричних параметрів. До цієї групи ЕА належать найрізноманітніші реле (струму, напруги, частоти, тиску, швидкості та ін.) і датчики, які перетворюють зміну якої-небудь контрольованої величини у відповідний змінюваний електричний сигнал.

Вимірювальні апарати – ЕА, що перетворюють первинний вимірюваний параметр у стандартну, зручну для подальшої обробки величину і одночасно ізолюють первинні (силові) мережі від вторинних (допоміжних) мереж. До вимірювальних апаратів відносяться: трансформатори струму та напруги, ємнісні дільники напруги.

Регулюючі апарати – ЕА, що регулюють певний параметр за певним законом. До регулюючих апаратів належать регулятори напруги, частоти, температури, швидкості та ін.

1.2. Кліматичне виконання, категорії розміщення та захисні оболонки електричних апаратів

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

Кліматичне виконання. Згідно з ДСТ [1] всі виробники виробляють за своїм виконанням підрозділяються на виробники, що призначені для експлуатації в умовах суші, рік (озер) та моря. В табл. 1.1 наведена класифікація макрокліматичних районів і маркування виробів, призначених для експлуатації в районах суші та річок (озер). Більшій частині території України притаманний помірний клімат.

Таблиця 1.1

Клімат у макрокліматичному районі	Позначення в маркуванні виробу	
	російське	латинське
Помірний	У	N
Помірно холодний	УХЛ	NF
Холодний	ХЛ	F
Тропічний	Т	T
Тропічно вологий	ТВ	TH
Тропічно сухий	ТС	TA
Всі райони, окрім районів з дуже холодним кліматом	О	U

Категорії розміщення. Згідно з ДСТ [1] всі виробники залежно від навколишнього середовища, де вони повинні експлуатуватися, підрозділяються на п'ять категорій розміщення.

Вироби першої категорії призначені для експлуатації на відкритому повітрі.

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

Вироби третьої категорії призначені для експлуатації в закритих приміщеннях з природною вентиляцією без штучного регулювання клімату, де коливання температури та вологості, дія піску та пилу суттєво менші, ніж на відкритому повітрі (кам'яні, бетонні, дерев'яні і металеві з теплоізоляцією приміщення без опалення або з опаленням, яке здійснюється дуже рідко).

Вироби четвертої категорії призначені для експлуатації в приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами. Ця категорія, в свою чергу, поділяється на підкатегорії: – виробники для експлуатації в приміщеннях з частковим кондиціонуванням повітря, та – виробники для експлуатації в лабораторіях, капітальних, житлових та подібних приміщеннях.

Вироби п'ятої категорії призначені для експлуатації у приміщеннях підвищеної вологості, де можлива довготривала

навіть води та інтенсивна конденсація вологості (шахти, підвали, корабельні приміщення та ін.).

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

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

Захисні оболонки. Згідно з ДСТ [2] ступінь захисту корпусів електрообладнання від проникнення у їх внутрішню середовище сторонніх тіл та захисту обслуговуючого персоналу від контакту з деталями під напругою або рухомими частинами позначають двома латинськими літерами IP та двома цифрами за ними.

Перша цифра (табл. 1.2) характеризує ступінь захисту персоналу від розташованих усередині корпусу елементів під напругою або рухомих частин, а також ступінь захисту внутрішніх частин виробу від попадання всередину твердих тіл.

Друга цифра (табл. 1.3) характеризує захист виробу від проникнення всередину води. Наприклад, ступінь захисту IP54 забезпечує захист від пилу, але не виключає можливості обмеженого проникнення його, а також забезпечує апарату повну бризказахисність, але не витримує попадання на нього потоку води. Корпуси з подібним ступенем захисту найбільш пристосовані для використання в умовах промислового виробництва, але не на вулиці.

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

Таблиця 1.2

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

Таблиця 1.3

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

1.3. Номінальні параметри та основні вимоги до електричних апаратів

Номінальні параметри. Номінальним значенням параметра (номінальним параметром) називається вказане виробником електротехнічного пристрою значення параметра, яке є початковим для підрахунку відхилення від цього значення при експлуатації та випробуваннях пристрою [3].

Загальними для електротехнічного обладнання є такі номінальні параметри.

Номінальна напруга $U_{\text{ном}}$ – напруга, при якій передбачена довготривала нормальна робота електротехнічного пристрою. Вона обумовлює необхідну електричну ізоляцію апарата.

Згідно з ДСТ [4] в Україні прийнята наступна шкала номінальних напруг трифазного змінного струму (діюче значення лінійної напруги між фазами):

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

Номінальний струм $I_{\text{ном}}$ – струм, тривале протікання якого викликає нагрівання струмопровідних елементів та ізоляції електротехнічного пристрою не більше встановлених значень температур при номінальній температурі навколишнього середовища. Номінальні значення струмів електротехнічних апаратів регламентує ДСТ [5]. Значення отримують з приведеного цифрового ряду шляхом перемноження на 1; 10; 100 і т. д.: 1*; 1,25; 1,6*; 2; 2,5*; 3,15; 4*; 5; 6,3*; 8 (* позначені значення для переважного використання).

Номінальна температура навколишнього середовища $\theta_{\text{ном}}$ – умовна температура навколишнього середовища, при якій розраховують інші номінальні параметри. ДСТ [6] визначає номінальними температурами навколишнього середовища такі:

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

Основні вимоги. Електричні апарати та пристрої повинні відповідати технічним вимогам, вимогам безпеки, естетики та ін. До найбільш загальних технічних вимог електротехнічних пристроїв, що використовуються у первинних електричних мережах, відносять такі.

1. Ізоляція електротехнічних пристроїв повинна мати необхідну електричну міцність для тривалого протистояння прикладеній робочій напрузі, а також витримувати короткотривалі (тимчасові) перенапруги. При проектуванні та виготовленні електротехнічних пристроїв їх ізоляція приймається і виконується, як правило, з певним запасом електричної міцності. Під час вибору будь-якого електричного пристрою повинна виконуватись наступна умова:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мер}} \quad (1.1)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга пристрою (апарата); $U_{\text{мер}}$ – напруга електричної мережі, в якій планується використання апарата.

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

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роб. max}} \quad (1.2)$$

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

3. Електротехнічний пристрій повинен бути стійким до механічних зусиль, які виникають в ньому в результаті електродинамічних взаємодій в окремих його елементах. Найбільшими вони стають при проходженні через апарат максимального струму. Як правило, це ударні струми $K3 (i_y)$. Спроможність електричного апарата витримувати виникаючі в ньому механічні зусилля без пошкодження називають *електродинамічною стійкістю*. Електродинамічна стійкість нормується через струм електродинамічної стійкості $I_{\text{дин}}$.

2.1. Поняття електродинамічної стійкості

Із курсу фізики відомо, що якщо в однорідне магнітне поле з індукцією B помістити провідник довжиною l , через який протікає струм i , то на нього буде діяти сила F (рис. 2.1).

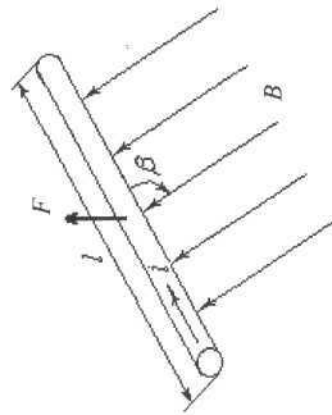


Рис. 2.1

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

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

Це правило широко використовується в електричних машинах (створюється обертовий момент). Слід зауважити, що в ряді випадків дія закону може привести до негативних наслідків та великих матеріальних втрат.

Справа в тому, що при взаємодії струму, який протікає в електричних апаратах, з магнітними полями інших струмів утворюються електродинамічні сили. При номінальних (робочих) струмах ці зусилля незначні і ними можна знехтувати.

Зовсім інший характер мають динамічні зусилля режиму КЗ. Як відомо, при КЗ струми, що протікають мережею та через електричні апарати, в десятки і сотні разів можуть перевищувати номінальні (робочі) струми і досягати десятків кілоампер.

Спричинене КЗ підвищення струму відповідно збільшує електродинамічні сили, які намагаються деформувати як

Перевірка апарата на електродинамічну стійкість базується на виконанні такої умови:

$$I_{дин} \geq I_y. \quad (1.3)$$

Більш докладно питання електродинамічної стійкості буде приділено уваги в гл. 2.

4. У момент проходження через електричні апарати струмів КЗ вони сильно нагріваються. Спроможність апаратів протистояти тепловій дії струмів КЗ без пошкоджень називають *термічною стійкістю*. Електричні апарати перевіряють на термічну стійкість за допомогою виразу:

$$I_T^2 t_T \geq I_{КЗ}^2 t_{вим}, \quad (1.4)$$

де I_T і t_T — величини струму та часу термічної стійкості за даними виробника або довідникової літератури для конкретного типу апарата; $I_{КЗ}$ — струм КЗ; $t_{вим}$ — час вимкнення струмів КЗ.

5. Електричний пристрій повинен мати високий ступінь надійності. Відмови електрообладнання досить часто призводять до повного або часткового порушення електропостачання. Високий ступінь надійності електротехнічних пристроїв повинен враховуватись ще на стадії проектування шляхом використання конструкцій апаратів прогресивних технічних рішень і матеріалів необхідної якості.

В експлуатації високий ступінь надійності досягається виконанням профілактичних та ремонтних робіт кваліфікованим обслуговуючим персоналом у повному обсязі та у встановлені терміни.

6. Конструкція електротехнічного пристрою по можливості повинна бути нескладною і дозволяти проводити необхідні профілактичні та ремонтні роботи з невеликим обсягом складально-розбірних операцій, мати невеликі габарити, масу і вартість.

До конкретних типів електричного обладнання висувається ряд додаткових вимог, які будуть описані під час розглядання цього обладнання.

струмоведучі частини електричних апаратів, так і ізоляторів, якими апарати прикріплюються до заземлених частин електричних установок. Щоб бути цілком впевненим у спроможності електричного апарату протистояти руйнівній дії електродинамічних сил, необхідно вміти розраховувати механічні напруження, створені цими силами у матеріалах апарата.

Електродинамічною стійкістю апарата називається його спроможність протистояти дії електродинамічних сил, які утворюються при протіканні через апарат струмів КЗ. Електродинамічна стійкість характеризується найбільшим струмом, який апарат може витримати, без пошкодження (умова (1.3)).

Наприклад, якщо електричний апарат має електродинамічну стійкість 50 кА, то це означає, що цей апарат здатний витримати без негативних наслідків, що перешкоджають його подальшій роботі, такі механічні напруження, які виникають в ньому при проходженні через апарат струму КЗ, не більше 50 кА.

Значення електродинамічної стійкості апаратів наводиться в довідниках або технічних паспортах у вигляді одного із наступних параметрів:

- а) струму електродинамічної стійкості $i_{\text{дин}}$ — максимального амплітудного значення струму, при якому механічні напруження, що виникають в елементах апарата, не виходять за межі допустимих значень;
- б) електродинамічної кратності відносно амплітуди номінального струму:

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

- в) діючого значення струму електродинамічної стійкості $I_{\text{дин}}$, що оцінюється за перший період струму КЗ.

2.2. Електродинамічні сили в паралельних провідниках

До електротехнічних конструкцій, в яких електродинамічні сили можна розглядати як сили у паралельних провідниках, можна віднести, наприклад, електротехнічні шини (рис. 2.2), в яких утворюються значні взаємні зусилля F_1 ; F_2 ; F_3 під час протікання

по них струмів КЗ. Ці сили намагаються зігнути шини та зламати ізолятори, на яких закріплені шини.

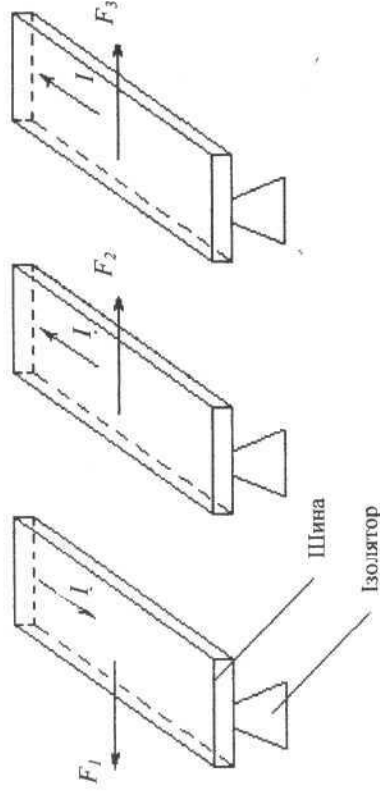


Рис. 2.2

Розглянемо випадок, коли по двох дуже тонких провідниках довжиною l протікають струми i_1 та i_2 (рис. 2.3). Провідники один від одного розміщені на відстані a . Якщо струми i_1 та i_2 зустрічно направлені, то на провідники будуть діяти електродинамічні сили, які прагнуть відштовхнути провідники.

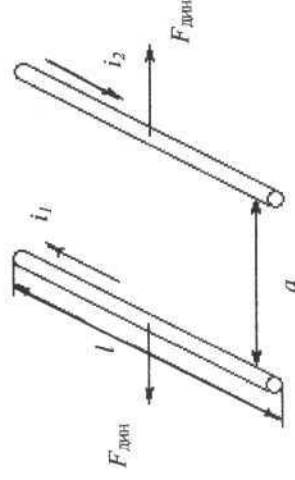


Рис. 2.3

Кількісне значення цієї сили можна визначити за виразом:

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

де K_k — коефіцієнт контуру рівний

$$K_k = \frac{2l}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l}$$

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

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

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

Визначивши відношення $\frac{a}{l} = \frac{0,25}{3} \approx 0,08 \leq 1$, можна з допомогою формули (2.1) знайти $F_{\text{дин}}$:

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

Знак мінус означає, що сили направлені в протилежні боки. У вищезгаданій формулі було прийняте припущення, що провідники дуже тонкі. Реальні провідники мають певні розміри. У круглих та трубчастих провідниках магнітні сили лінії мають форму кіл і на практиці прийнято вважати, що струм протікає в них по їхній осі, тому вищеприведені формули залишаються справедливими і для таких форм реальних провідників.

Магнітні сили лінії провідників прямокутної форми (рис. 2.4) мають форму овалів. Зміна електродинамічних сил для таких провідників враховується введенням спеціального коефіцієнта форми K_Φ .

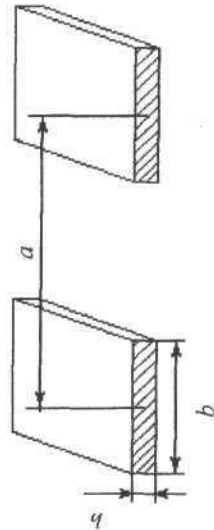


Рис. 2.4

Кількісне значення K_Φ залежить від співвідношень товщини провідника h , його ширини b та відстані між осями провідників a . Коефіцієнт K_Φ визначається за спеціальними кривими [7-9].

Тоді для провідників прямокутної форми електродинамічна сила може бути визначена за формулою

$$F_{\text{дин}} = K_\Phi \frac{2 \cdot l}{a} i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7}. \quad (2.2)$$

2.3. Електродинамічні сили в перпендикулярних провідниках

В електричних апаратах часто зустрічається конструкція, в якій струмоведучі елементи розміщуються перпендикулярно один одному (рис. 2.5, а). Така конструкція може бути подана у вигляді вертикального провідника нескінченної довжини та горизонтального відрізка довжиною a , по яких протікає струм i . Електродинамічну силу $F_{\text{дин}}$ у такій конструкції визначають за формулою:

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

де r – радіус провідника.

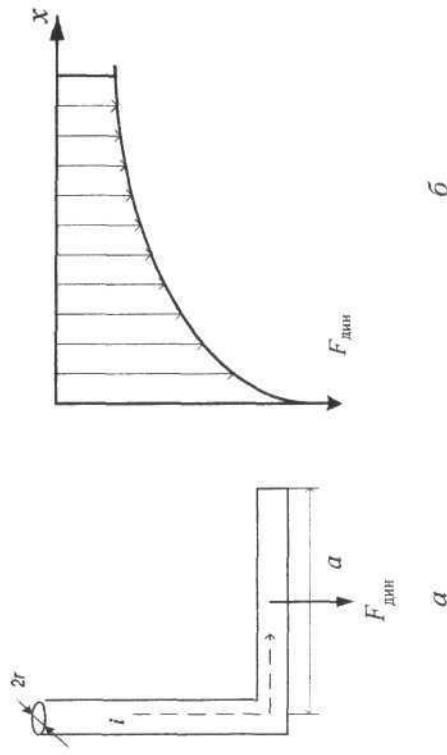


Рис. 2.5

Слід відзначити, що в цьому випадку сила направлена в сторону випрямлення провідника. Найбільше лінійне зусилля спостерігається у місці згину провідника. Якщо побудувати епюру сил уздовж горизонтального провідника, вона буде мати вигляд, зображений на рис. 2.5,б.

В окремих електричних апаратах струмоведучі елементи можуть мати вигляд напівпетлі, наприклад у місткових контактах, рубильниках та ін. Ця конструкція може бути представлена як два вертикальні провідники, з'єднані перемичкою (траверсою) (рис. 2.6,а).

Електродинамічна сила, що діє на перемичку, буде складатися під впливом сил від лівого та правого вертикальних провідників, тобто, буде у два рази більшою порівняно з першим випадком:

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

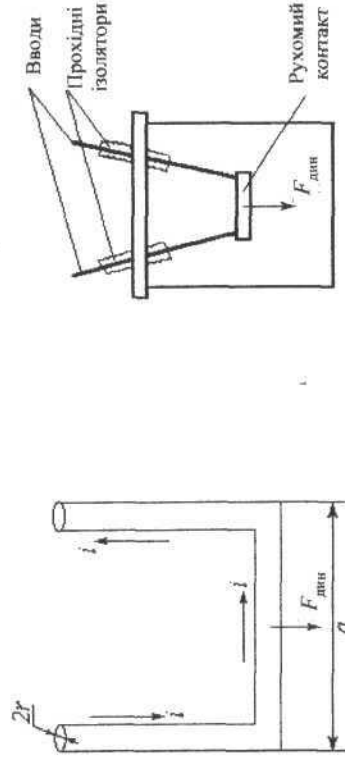


Рис. 2.6

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

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

2.4. Електродинамічні сили кільцевого витка та між витками

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

Якщо $R \gg r$, то сила $F_{\text{дин}}$ розраховується за формулою:

$$F_{\text{дин}} = 10^{-7} \cdot i^2 \left(\ln \frac{8 \cdot R}{r} - 0,75 \right). \quad (2.3)$$

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

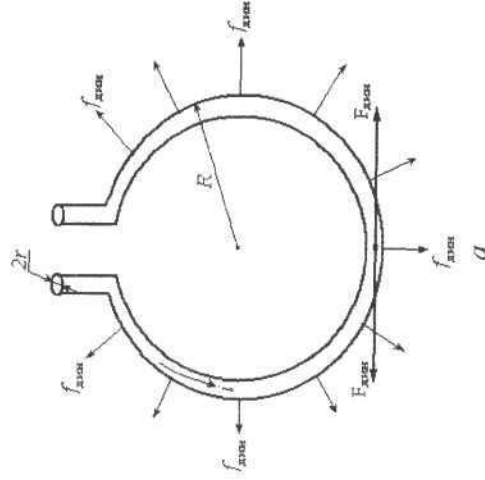


Рис. 2.7

У випадку, коли загальний виток (рис.2.7,б) складається з ω витків проводу (дроту), які складають даний переріз з радіусом r , у формулі (2.3) необхідно прийняти $i = i' \cdot \omega$, де i' – струм в одній дротинці.

У котушках електричних апаратів, окрім сил всередині витка, існують і електродинамічні сили між витками (рис. 2.8). Причому, якщо струми у витках мають один напрямок протікання, то витки прагнуть наблизитися один до одного.

3.1. Проблема нагрівання електричних апаратів

Як тільки через електричний апарат починає протікати струм, в той самий час деяка частина електричної енергії, яка проходить через апарат, перетворюється на теплову, внаслідок чого апарат нагрівається. У загальному випадку окремих частин та апарата в цілому, витрачається на нагрівання окремих частин та апарата в цілому, інша — розсіюється у навколишнє середовище. Нагрівання електричних апаратів є актуальною і достатньо складною проблемою з наступних причин.

По-перше, з підвищенням температури струмоведучих частин також нагрівається і поруч розміщена ізоляція. Висока температура є однією з головних причин старіння електричної ізоляції, тобто незворотного погіршення її властивостей в процесі роботи. При старінні ізоляція стає крихкою і в ній з'являються тріщини та пори, які приводять до зниження її електричної міцності. Окрім цього, на старіння ізоляції впливають перепади температури по товщині ізоляції. Великі перепади температури викликають в ізоляції надмірні механічні напруження, за рахунок чого вона тріскається. Наприклад, при тривалому перевищенні температури ізоляції лише на 8 °С (вище номінальної) термін придатності її використання скорочується удвічі.

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

По-третє, при значному нагріванні помітно знижується механічна міцність металів, використаних в конструкції апарата. Наприклад, при підвищенні температури від 100 до 250 °С механічна міцність міді знижується на 40 %. Як відомо (див. п. 2.1), при КЗ в електричних апаратах виникають значні електродинамічні зусилля. При одночасній втраті механічної

При рівних радіусах обох витків R , віддалених на відстань h один від одного, силу зближення можна визначити за формулою:

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

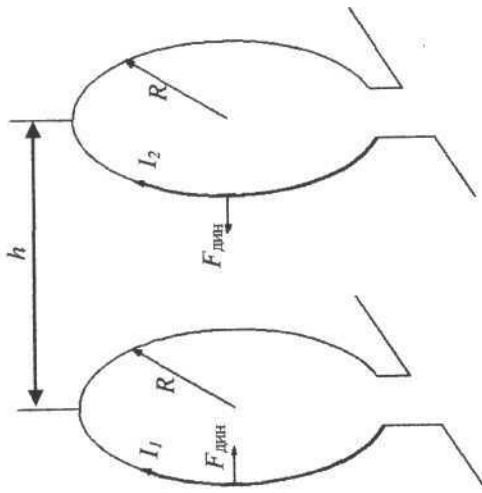


Рис. 2.8

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

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

Як висновок слід відзначити, що електродинамічні сили в котушці направлені так, щоб стиснути котушку по довжині та товщині і збільшити її діаметр (рис. 2.9).

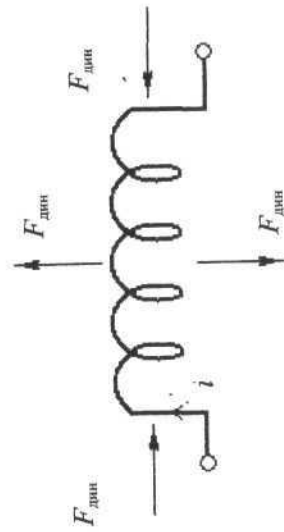


Рис. 2.9

міцності внаслідок швидкого прогрівання до 200-300 °С ці зусилля можуть привести до поломки апарата.

Таким чином, нагрівання електричних апаратів в значній мірі визначає його надійність. Для тривалої і безвідмовної роботи електричний апарат не повинен нагріватися вище тих температур, котрі були прийняті при його проектуванні. Значення гранично-допустимої температури для різних класів ізоляції при тривалій роботі подані у табл. 3.1 (ДСТ [6]).

Таблиця 3.1

Клас нагрівостійкості	Температура, °С	Характеристика основних груп електроізоляційних матеріалів, відповідних даному класу нагрівостійкості
Y	90	Не просочені і не занурені у рідкий електроізоляційний матеріал волокнисті матеріали з целюлози, бавовни та шовку, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші з'єднувальні матеріали
A	105	Просочені або занурені у рідкий електроізоляційний матеріал волокнисті матеріали з целюлози, бавовни та шовку, а також відповідні даному класу інші з'єднувальні матеріали
E	120	Деякі синтетичні та органічні плівки, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші поєднання матеріалів
B	130	Матеріали на основі слюди (в тому числі на органічних підкладках), азбесту та скловолокна, використовувані з органічними зв'язуючими та просоченими сполуками, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші поєднання матеріалів
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, використовувані у поєднанні з синтетичними зв'язуючими та просоченими сполуками, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші поєднання матеріалів
H	180	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, використовувані у поєднанні з кремнійорганічними сполуками та просоченими сполуками, кремнійорганічні еластомери, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші поєднання матеріалів

Частина електричної енергії, яка перетворюється у теплову, називають „втратами” — підкреслюючи тим, що дана частина енергії не використовується корисно. Тому необхідно проектувати електричні апарати так, щоб ці втрати були мінімальними.

3.2. Джерела тепла в електричних апаратах

В електричних апаратах можна виділити наступні конструктивні елементи, котрі можуть бути джерелами виділення тепла, а саме:

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

Втрати в струмоведучих частинах при постійному струмі.
При постійному струмі нагрівання здійснюється тільки за рахунок активного опору струмопровода. Потужність $P_{\text{в}}$, виділена у провіднику з опором $R_{\text{в}}$, розраховується за відомою формулою:

$$P_{\text{в}} = I^2 \cdot R_{\text{в}}$$

де $R_{\text{в}}$ — активний опір постійному струмові, $R_{\text{в}} = \rho l / S$ (ρ — питомий опір провідника, l і S відповідно його довжина та площа перерізу).

Відомо також, що питомий опір суттєво залежить від температури. Тому при обчисленнях необхідно здійснювати коректування значення ρ . Наприклад, питомий опір міді при 20 °С дорівнює 0,0178 Ом·мм²/м, а при 100 °С він становить 0,0233 Ом·мм²/м, тобто збільшується на 30%. Алюміній має $\rho_{20} = 0,0283$ і $\rho_{100} = 0,0371$ Ом·мм²/м (збільшення на 31%).

Приклад. Визначити потужність втрат у рухомому мідному контакті вимикача, який має форму стрижня з розмірами $l = 1$ м, $D = 20$ мм, якщо в момент КЗ по ньому протікає струм 50 кА. Температуру стрижня приймаємо за 100 °С.

Опір стрижня

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

Потужність втрат

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

Втрати у струмоведучих частинах при змінному струмі. При змінному струмі втрати у струмоведучих частинах становлять більшу величину, ніж на постійному струмі при тих самих умовах. Зростання опору відбувається за рахунок двох явищ: поверхневого ефекту та ефекту близькості.

Поверхневий ефект (скін-ефект) – явище витискання струму з середини провідника до поверхні, внаслідок чого найбільша щільність струму спостерігається на поверхні провідника. З переміщенням до центру щільність струму швидко спадає, тобто середина провідника ніби не проводить електричний струм. Це явище можна уявити як зменшення перерізу провідника, тобто збільшення опору, за рахунок чого утворюються додаткові втрати.

Коефіцієнт додаткових втрат, обумовлений поверхневим ефектом, позначають:

$$K_{п.е} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$$

Значення коефіцієнта $K_{п.е}$ збільшується з підвищенням частоти струму та зменшенням питомого опору провідника. Значний вплив на величину $K_{п.е}$ має форма і розміри провідника: чим товщий провідник, тим сильніше проявляється поверхневий ефект. Залежно від частоти і розмірів провідника кількісне значення коефіцієнта лежить у межах $K_{п.е} = 1 \dots 3$. В інженерній практиці $K_{п.е}$ визначають за допомогою спеціальних кривих [7].

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

Ефект близькості. Розглянемо два паралельних провідники змінного струму (мал. 3.1). Провідник A зі струмом I_A знаходиться у змінному магнітному полі Φ_B провідника B .

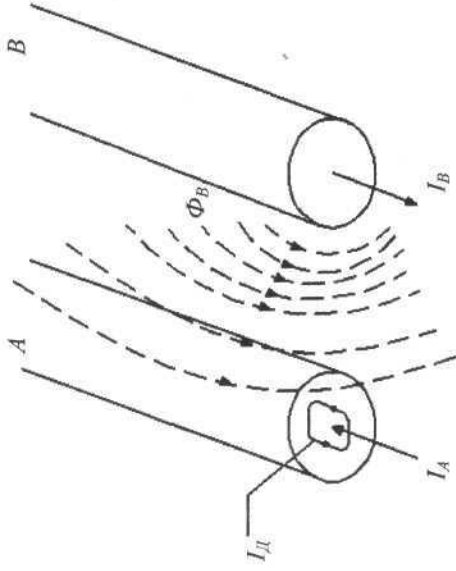


Рис.3.1

У тілі провідника A наводиться електрорушійна сила самоіндукції і утворюється струм I_D , який геометрично сумується з основним струмом i_A . В результаті щільність струму у провіднику A по його зрізу неоднакова. Якщо струми у провідниках A і B направлені зустрічно, то їх щільність у ближніх зменшується. Якщо шари провідників збігаються, а в дальніх зменшується. Якщо струми i_A і i_B мають однаковий напрям, то щільність струму у віддалених шарах підвищується. Це явище викликає зміну опору провідника і, у більшості випадків, веде до утворення додаткових втрат, які враховуються коефіцієнтом ефекту близькості:

$$K_{е.б} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma-поод}}$$

де R_{Σ} – активний опір провідника, що знаходиться у магнітному полі іншого провідника; $R_{\Sigma-поод}$ – активний опір поодинокого провідника.

Ефект близькості підсилюється з підвищенням частоти струму та електричної провідності матеріалу. Коефіцієнт $K_{е.б}$ також залежить

від взаємного розташування провідників і їх форми. Числове значення коефіцієнта $K_{e,6}$ знаходять також за спеціальними графіками [7].

Узагальнюючи вплив ефекту близькості та поверхневого ефекту на зміну опору провідника при протіканні по ньому змінного струму, рівняння визначення опору можна записати у вигляді:

$$R_{\Sigma} = K_{п.е} K_{e,6} R_{\Sigma} = K_{\text{дод}} R_{\Sigma},$$

де $K_{\text{дод}} = K_{п.е} K_{e,6}$ — коефіцієнт додаткових втрат у провіднику при змінному струмі.

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

Вихрові струми (струми Фуко). Фізичку виникнення вихрових струмів можна пояснити, розглянувши рис. 3.2. Якщо суцільний феромагнітний стрижень пронизується змінним магнітним потоком Φ_{Σ} , то під дією цього потоку у тілі стрижня індукується електрорушійна сила, яка у свою чергу викликає виникнення вихрових струмів $i_{в}$.

Далі, вихрові струми утворюють свої магнітні потоки $\Phi_{в}$, які протидіють зміні основного магнітного потоку Φ_{Σ} .

Рис 3.2

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

$$P_{в} = k_{в} \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot G,$$

де $k_{в}$ — коефіцієнт втрат від вихрових струмів; f — частота струму, Гц; B_m — максимальне значення магнітної індукції у магнітопроводі, Тл; G — маса магнітопроводу, кг.

Для трансформаторних сталей, що застосовуються в електричних апаратах, $k_{в} = 0,4 \dots 1,2$.

Для зменшення втрат від вихрових струмів, магнітопроводи електричних пристроїв, які працюють на змінному струмі, виконують *шлітованими* — набраними з тонких пластин завтовшки 0,2 — 0,5 мм. Для ізоляції пластин однієї від іншої на них з однієї сторони наноситься лак.

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

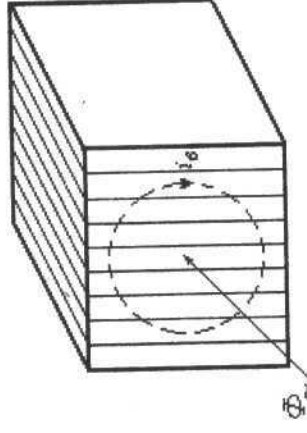


Рис 3.3

Втрати на гістерезис. Магнітопровід з феромагнітного матеріалу, який пронизується змінним магнітним потоком, безперервно перемагнічується. При такому процесі виникає явище магнітного гістерезису — відставання зміни магнітної індукції B від зміни напруженості зовнішнього поля H (рис. 3.4).

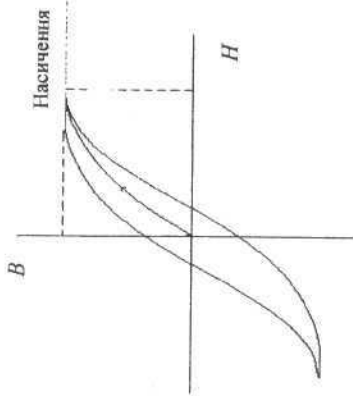
При перемагнічуванні здійснюється робота, і частина енергії витрачається за рахунок виділеного тепла. Величина втрат на гістерезис чисельно дорівнює площі петлі гістерезису. Для зменшення втрат від гістерезису застосовують магнітні сталі, які мають більш вузьку петлю гістерезису (електротехнічні сталі).

Втрати від гістерезису визначають за виразом:

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

де $k_{г}$ — коефіцієнт втрат від гістерезису; f — частота струму, Гц;

B_m — максимальне значення магнітної індукції у магнітопроводі, Тл; G — маса магнітопроводу, кг.

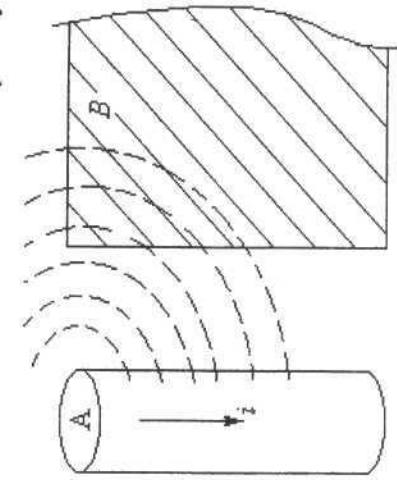


Отже, у сталевому магнітопроводі, по якому замикається змінний магнітний потік, виникають втрати, спричинені вихровими струмами і гістерезисом, тому втрати в сталі складаються з суми цих втрат. Тобто $P_{ст}$ визначається за виразом:

Рис. 3.4

$$P_{ст} = P_v + P_r = (k_v \cdot f \cdot B_m^2 + k_r \cdot B_m^{1.6}) \cdot f \cdot G$$

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



Вихрові струми можуть нагрівати деталі до високих температур. На цьому принципі заснований метод високочастотного розігрівання і плавлення металів. Для зменшення втрат в масивних феромагнітних деталях використовують наступні конструктивні рішення [7]:

Рис. 3.5

- збільшують відстань від провідника зі струмом до феромагнітної деталі (завдяки чому зменшується її магнітний потік);

- на шляху магнітного потоку вводять немагнітні перешкоди (при цьому магнітний опір значно підвищується, а магнітний потік зменшується);

- на шляху магнітного потоку встановлюють короткозамкнутий виток (утворюється додатковий магнітний опір);

- при струмах вище 1000 А масивні конструкційні деталі виготовляють з немагнітних матеріалів (немагнітного чавуну, алюмінієвих сплавів, латуні та ін.).

Втрати в ізоляції високовольтних апаратів. Ізоляцію електричних апаратів можна розглядати як конденсатор, одною із обкладок якого є струмоведучі частини, а іншою – заземлені елементи апарата. Між ними прикладена фазна напруга U_{ϕ} . В цьому випадку втрати в ізоляції (діелектрику) можуть бути визначені виразом:

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

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

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

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

3.3. Відведення тепла від нагрітого тіла

Відомо, що передача тепла завжди проходить від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і відбувається до того часу, поки температура тіл не зрівняється.

Розрізняють три види передачі тепла:

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

зміщуючись, так і *турбулентним* (вихороподібним), коли відбувається інтенсивне переміщення газу (рідини). При турбулентному русі за рахунок переміщення з нагрітої поверхні відбирається набагато більша кількість тепла.

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

$$\Phi_k = \alpha_k \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot S,$$

де Φ_k – тепловий потік, що відбирається за рахунок конвекції з поверхні площею S (м²) при різниці температур нагрітого тіла θ_1 та холодного газу θ_2 , Вт; α_k – коефіцієнт тепловіддачі при конвекції, Вт/град · м².

Значення коефіцієнта α_k залежить від багатьох факторів:

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

Тому, цей коефіцієнт у більшості випадків визначається дослідним шляхом.

Наведемо значення α_k для деяких конструкцій [7]:

- а) для вертикальної площини в трансформаторному маслі

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

- б) для горизонтальної поверхні

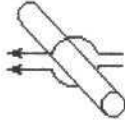
$$\alpha_k = 3,25(\theta_1 - \theta_2)^{0,25};$$

- в) для плоских шин, установлених на ребро

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

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

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



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

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

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

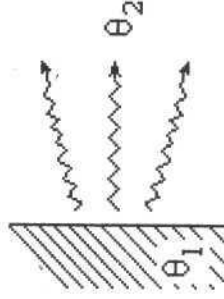


Рис. 3.8

де K_B – коефіцієнт теплового випромінювання, Вт/м²·К⁴ (наводиться у довідниках); θ_1 – температура тіла, °К; θ_2 – температура навколишнього середовища, °К; S – площа поверхні випромінювання, м².

Для того щоб інтенсифікувати віддачу тепла випромінюванням, необхідно підсилити ступінь чорноти поверхні та збільшити розміри тіла випромінювання. Щоб зменшити тепловіддачі випромінюванням застосовують спеціальні екрани, наприклад, з тонкої пластини білого кольору. Такі екрани приблизно удвічі зменшують передачу тепла випромінюванням.

Узагальнення процесів теплопередачі. У загальному випадку тепловіддача з нагрітої частини обладнання передається всіма трьома вище розглянутими способами. Проте для конкретних конструкцій електротехнічних пристроїв переважають один чи два види теплопередачі.

Всередині електричних апаратів по їх твердих елементах (магнітопроводу, обмотках, ізоляції і деталях конструкції) передача тепла проходить шляхом теплопровідності.

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

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

Для спрощення розрахунків тепловіддачі конкретних конструкцій вводять узагальнюючий коефіцієнт K_T — коефіцієнт теплообміну ($\text{Вт/град}\cdot\text{м}^2$), що враховує переважуючий вид теплопередачі конкретної конструкції, різницю температур і тип охолодження середовища.

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

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

де Φ — узагальнений тепловий потік; τ — різниця температур, що дорівнює $\theta_1 - \theta_2$; S — площа поверхні тіла. В табл. 3.2 приведені числові значення K_T при природній конвекції.

Таблиця 3.2

Елементи електрообладнання	Коефіцієнт теплообміну, $\text{Вт/град}\cdot\text{м}^2$	
	у повітрі	у маслі
Пакет листової сталі	10 - 12,5	70 - 90
Обмотка з паперовою ізоляцією	10 - 12,5	25 - 35
Порцеляновий ізолятор у маслі	-	50 - 150
Лакована поверхня	12 - 16	-
Мідні прямокутні шини	6 - 9	-
Горизонтальні круглі мідні стрижні	8,5 - 13	-

3.4. Нагрівання та охолодження апаратів в різних режимах роботи

Рівняння теплового балансу. Виділена в електричному апараті енергія частково йде на підвищення його температури, а інша частина відводиться в навколишнє середовище, тобто має місце рівняння теплового балансу

$$P \cdot dt = C \cdot d\tau + \Phi \cdot dt, \quad (3.2)$$

де P — потужність теплових втрат, що виділяється в апараті (складові цих втрат розглянуті в п. 3.2), Вт. Перший доданок враховує кількість енергії, поглинутої апаратом, при підвищенні його температури на $d\tau$. Він залежить від теплоємності тіла C і дорівнює $C \cdot M$, де c — питома теплоємність матеріалу, $\text{Вт}\cdot\text{с/кг}\cdot\text{град}$; M — маса тіла, кг. Другий доданок враховує кількість тепла, що віддається у навколишнє середовище загальним тепловим потоком Φ за час dt (див. формулу (3.1)). Тоді

$$P \cdot dt = c \cdot M \cdot d\tau + K_T \cdot S \cdot \tau \cdot dt. \quad (3.3)$$

Якщо прийняти, що потужність, яка виділяється в апараті, стала $P = \text{const}$, то рішення рівняння (3.3) відносно τ прийме наступний вигляд:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_y}} + \tau_y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_y}}), \quad (3.4)$$

де τ_0 — перевищення температури на початку процесу ($t = 0$); τ_y — усталене перевищення температури; T — стала часу нагрівання, дорівнює

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

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

Нагрівання з холодного стану. Якщо процес нагрівання розпочинається із холодного стану апарата, коли він має однакову з навколишнім середовищем температуру ($\tau_0 = 0$), нагрівання здійснюється за експонентою (рис. 3.9, крива 2) відповідно до виразу

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

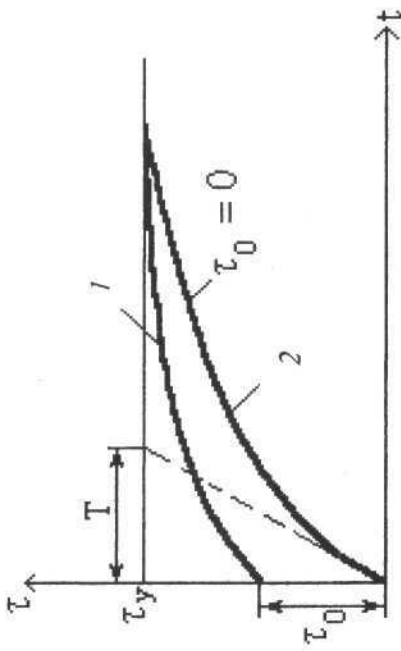


Рис. 3.9

Усталений режим нагрівання. Якщо протягом тривалого часу температура апарата не змінюється, то вважають, що настав усталений тепловий режим. В усталеному режимі тіло апарата уже підігріте і все виділене в ньому тепло віддається у навколишнє середовище, тобто перший доданок виразу (3.3), поєднаний з теплоємністю, дорівнює нулю. Тому, рівняння (3.3) прийме вигляд:

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

Звідки

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

Теоретично, температура досягає усталеного режиму через великий термін часу. Але практично вважають, що $\tau = \tau_y$ уже через 4...5 T.

Процес охолодження. Якщо після усталеного режиму, коли температура апарата досягла τ_y , припинити пропускання через нього струму, то припиниться виділення тепла $Pdt = 0$, тіло почне охолоджуватися і рівняння (3.3) прийме вигляд:

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

розв'язком якого відносно τ є:

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

Крива охолодження є дзеркальним відображенням кривої нагрівання і також здійснюється за експоненційним законом (рис. 3.10).

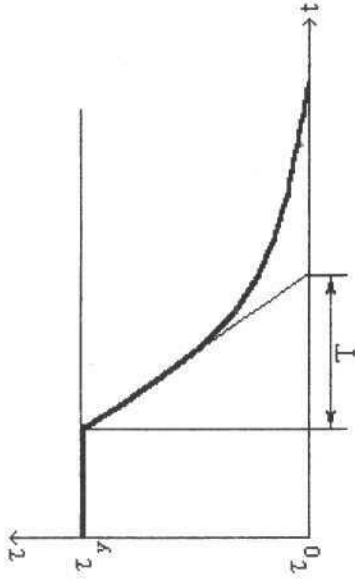


Рис. 3.10

Нагрівання при короткотривалому режимі. При режимі короткотривалого протікання через апарат допустимого струму $I_{\text{доп}}$ температура апарата не встигає досягти усталеного значення. Потім апарат вимикається і охолоджується до температури навколишнього середовища.

Графічно цей процес відображує крива 1 (рис. 3.11). Тобто при струмі $I_{\text{доп}}$ апарат не досягає допустимої температури $\tau_{\text{доп}}$, а значить не ефективно використовується за нагріванням.

При тривалому режимі, тривалій допустимий струм $I_{\text{тр.доп}}$ через апарат вибирається таким чином, щоб усталена температура апарата не перевищувала допустиму $\tau_y \leq \tau_{\text{доп}}$ для даного типу електричного обладнання.

Очевидно, що при короткотривалому режимі можна пропускати більший струм $I_{\text{кр}}$, при проходженні якого за час $t_{\text{кр}}$ температура апарата не перевищує $\tau_{\text{доп}}$ (крива 2). Для характеристики короткотривалого режиму вводять поняття *коефіцієнта перевантаження* $K_n = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{доп}}}$, який показує, в

скільки разів можна збільшити струм при короткотривалому режимі порівняно з тривалим. Величина K_n може бути розрахована за формулою

$$K_n = \sqrt{\frac{t_{сп}}{1 - e^{-t_{сп}/\tau}}}$$

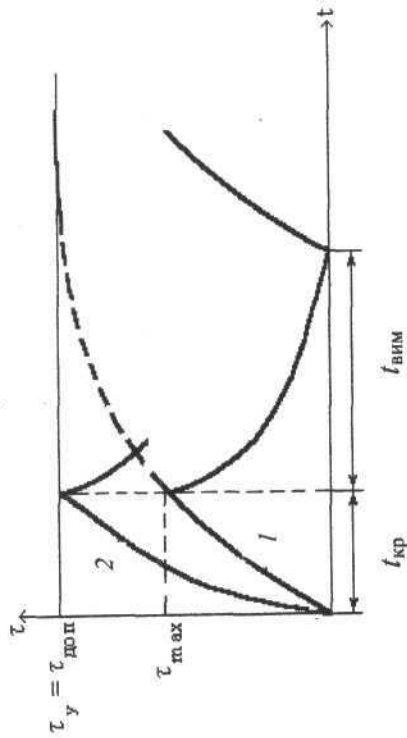


Рис. 3.11

Нагрівання при повторно-короткотривалому режимі. Повторно-короткотривалим називають режим роботи, при якому через апарат протікає струм I_p за час роботи t_p , потім на термін паузи t_n струм вимикається і т. д. Час $t_{ц} = t_p + t_n$ називається циклом (рис. 3.12).

З кожним циклом температура апарата підвищується, однак через кілька циклів процес стабілізується (крива 1), але нижче допустимої температури $\tau_{доп}$, до якої апарат нагрівався би у разі безперервного протікання струму I_p . Тому струм при повторно-короткотривалому режимі можна підвищити до значення $I_{пк}$, за якого процес піде по кривій 2.

Якщо ввести аналогічно короткотривалому режиму коефіцієнт перевантаження

$$K_n = \frac{I_{пк}}{I_{доп}}, \text{ де } K_n = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p/\tau}}{1 - e^{-t_{сп}/\tau}}}$$

то можна визначити допустимий струм при повторно-короткотривалому режимі за формулою

$$I_{пк} = K_n \cdot I_{доп}$$

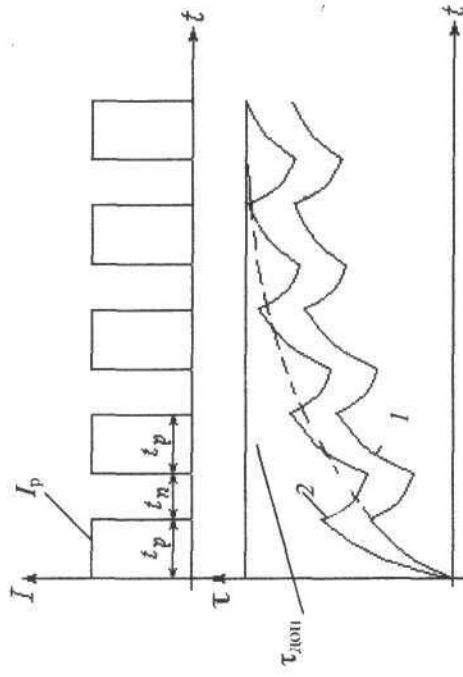


Рис. 3.12

3.5. Нагрівання при короткому замиканні, термічна стійкість електричних апаратів

Струми КЗ можуть у деяких випадках і в сотні разів перевищувати струми довготривалого режиму, і тільки наявність захисних пристроїв, що обмежують тривалість протікання струмів КЗ кількома секундами, рятує апарати від недопустимого перегрівання. При надмірному перевищенні температури провідників та частин апаратів можливе розм'якшення і плавлення металу, випалювання ізоляції, руйнування контактів і інші пошкодження.

Для того, щоб система електропостачання працювала надійно, необхідно виключити такі пошкодження. Способи вирішення цієї проблеми можна визначити із рівняння теплового балансу, враховуючи при цьому короткотривалість режиму КЗ. За кілька секунд дії струму КЗ $I_{кз}$ енергія, яка виділяється в апараті,

практично вся йде на його нагрівання, значить тепловіддачею у рівнянні (3.3) можна знехтувати. Тоді маємо:

$$I_{КЗ}^2 \cdot R \cdot dt = c \cdot M \cdot dt. \quad (3.5)$$

Із рівняння (3.5) видно, що зменшити ступінь нагрівання апарату при КЗ можна:

- зменшивши тривалість цього режиму, тобто застосувати швидкодіючий захист;
- обмежуючи максимальні величини струмів КЗ в енергосистемах, використовуючи спеціальні *струмообмежувальні реактори*;
- збільшуючи масу апарата (небажане рішення, оскільки потребує збільшення металемності апарата).

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

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

$$I_T^2 \cdot t_T \geq I_{КЗ}^2 \cdot t_{внм}, \quad (3.6)$$

де I_T і t_T – значення струму та часу термічної стійкості, які подаються в довідковій літературі для конкретного типу апарата; $I_{КЗ}$ – значення струму КЗ; $t_{внм}$ – час вимикання струму КЗ.

Іноді термічна стійкість задається коефіцієнтом термічної стійкості

$$K_T = \frac{I_T}{I_{НОМ}}.$$

Глава 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ

4.1. Визначення і класифікація контактів

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

Поверхня твердого тіла, навіть ретельно оброблена, все ж має певні нерівності. Тому при відсутності зусилля, яке буде притискати контакти, вони торкатимуться лише у декількох точках, що призведе до викривлення ліній струму (рис. 4.1,а). Зі збільшенням сили притискання бугорки на поверхні контактів деформуються (частково пружно, частково пластично), та утворюють більшу поверхню, що сприймає тиск і з'являються нові точки контактування.

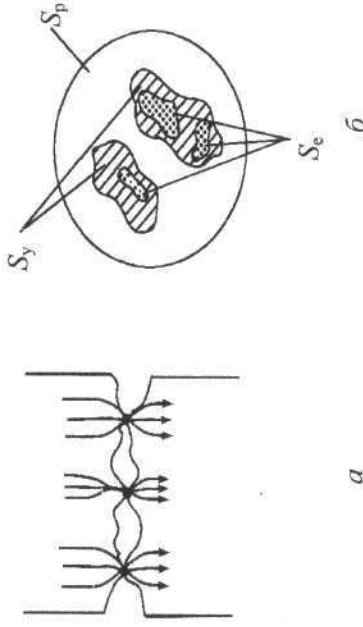


Рис. 4.1

Відомо також, що поверхня металів завжди вкрита окисною плівкою, яка в більшості випадків погано проводить електричний струм. При стикуванні частина окисної плівки руйнується, а частина залишається і сприймає тиск. Вся поверхня контакту згідно з ДСТ [12] поділяється на наступні ділянки (рис. 4.1,б):

робоча поверхня контакту S_p , яка дорівнює геометричній площі поверхні контакту;

умовна поверхня контакту S_y , яка дорівнює площі поверхні, що сприймає тиск;

ефективна поверхня контакту S_e , яка дорівнює площі поверхні контакту, що проводить електричний струм.

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

Класифікація. Класифікувати різноманітні конструкції контактів можна за наступними ознаками:

а) за умовами роботи контакти можна поділити на нерухомі, ковзаючі (струмомоз'ємні) і комутуючі.

Нерухомі контакти в процесі роботи не переміщуються відносно один одного (з'єднання шин, дротів і шин до апаратів тощо).

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

Комутуючі контакти забезпечують замикання і розмикання електричного кола (контакти вимикачів, рубильників, автоматів тощо);

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

Точкові контакти забезпечують контактування на малій поверхні при торканні контактів типу „конус” і „напівсфера” з собі подібними або площиною. При точковому контактуванні легко отримати необхідний тиск в місці контакту і зруйнувати окисну плівку. Такий контакт добре фіксується, що забезпечує постійність перехідного опору. Однак, завдяки малій площі контактування і важкості відводу тепла при невеликій масі, точкові контакти можуть використовуватись лише при невеликих струмах (до одиниць ампер).

Лінійні контакти забезпечують контактування вздовж лінії торкання контактів типу „циліндр” та „клин” з собі подібними або з площиною. В лінійному контакті неважко досягти необхідного тиску в місці контактування і організувати самоочищення при

невеликому проковзуванні. Лінійні контакти легко регулюються, вони є основним видом контактів для середньо- та сильно-струмових комутаційних апаратів.

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

в) за функціональним призначенням комутуючі контакти можна розділити на основні, дугогасильні і допоміжні.

Основні (робочі) контакти призначені для тривалого проходження через них номінального струму і повинні мати невеликий перехідний опір, який буде ненабагато змінюватись при окисленні контактів.

Дугогасильні контакти призначені для вимкнення значних струмів КЗ і повинні мати високу дугостійкість. У багатьох типах комутаційних апаратів вдається сумістити функції основних і дугогасильних контактів в одному контактному вузлі.

Допоміжні контакти (блок-контакти) служать для синхронної з основними контактами комутації допоміжних кіл керування і сигналізації. Вони механічно пов'язані з основними контактами.

4.2. Опір контактів

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

Електричний (перехідний) опір *не окисленого* контакту такої форми буде визначатись, по-перше, наявністю сильного звуження шляху струму, по-друге, наявністю між комутуючими поверхнями шару плівки, що містить молекули газів та водяної пари, завжди присутніх у повітрі, тобто

$$R_k = R_3 + R_n,$$

де R_k – опір контакту; R_3 – опір звуження; R_n – опір шару плівки.

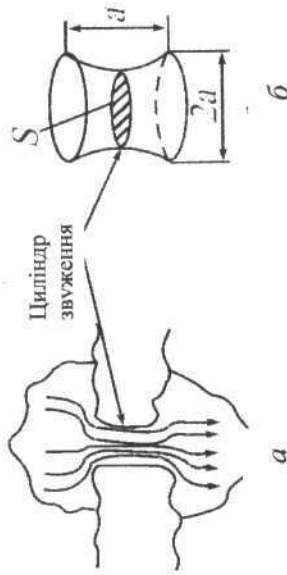


Рис. 4.2

Опір точкового контакту. При сильному стисканні в точковому контакті товщина півки доходить до молекулярного рівня (20...30 Å) і вже не спирається значного опору. Тому для точкового контакту можна прийняти

$$r_k \approx r_3.$$

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

Тому опір циліндра звуження буде пропорційний величині $a_3/a_3^2 = 1/a_3$. Дослідним шляхом встановлено, що

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

Площа контактування $S = \pi \cdot a_3^2$ залежить від сили стискування F_{ct} і твердості матеріалу контакту, яка характеризується коефіцієнтом твердості за Брінеллем σ_T :

$$S = \pi \cdot a_3^2 = \frac{F_{ct}}{\sigma_T}.$$

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

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

У загальній формі перехідний опір контактів дорівнює

$$r_k \approx r_3 = \frac{K}{F_{ct}^m}, \quad (4.2)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу контактів (ρ та σ_T) і приблизно дорівнює для свіжозачищеного контакту зі: срібла $0,5 \times 10^{-3}$, міді 1×10^{-3} , алюмінію $1,6 \times 10^{-3}$, латуні $6,7 \times 10^{-3}$ та заліза $7,6 \times 10^{-3}$ Ом·Н^{0,5}; F_{ct} – сила стискування контактів, Н; m – показник степені, що характеризує число точок дотику і дорівнює: для точкового контакту – 0,5, для лінійного – 0,7...0,8, для площинного – 1.

Слід відзначити, що при однаковій силі стискування одного і того самого контакту перехідний опір буде змінюватися в широких межах. Це зумовлено індивідуальним, неповторним при кожному стисканні рельєфом контактної поверхні. Відхилення (розкид) значень перехідного опору зменшується при збільшенні сили стискування.

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

- при механічному руйнуванні окислів у момент стискування контактів, опір значно зменшиться при взаємному проковзуванні (самоочищенні контактів);

- при електричному пробі крізь тріщини в шарі окисла.

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

4.3. Матеріали контактів

До матеріалів контактів висуваються наступні вимоги: висока електрична провідність і теплопровідність, стійкість до корозії, струмопровідність окисної плівки, дугостійкість, достатня твердість і механічна міцність, легкість механічної обробки, невисока вартість. Знайти природний матеріал, що задовольняє таким різностороннім вимогам одночасно, практично неможливо. В контактних пристроях застосовуються наступні матеріали:

Срібло. Завдяки своїй високій електро- та теплопровідності, легкому руйнуванню окисної плівки при невеликих механічних зусиллях срібло могло б широко використовуватися в контактних пристроях. Однак недостатня дугостійкість (невисока температура плавлення і випаровування) при проходженні великих струмів і висока вартість значно звужують сферу використання срібла. Срібні (посріблені) контакти використовуються в відповідальних колах керування з невеликими струмами. В апаратах з великими струмами використовують срібні накладки на основних контактах, що виконані з міді.

Мідь. Задовольняє майже всім вищеперахованим вимогам за виключенням антикорозійності, поганій провідності окисної плівки та низької температури плавлення. Але створення в контактах тиску більше 3 Н і взаємного проковзування дозволяє зруйнувати плівку окисла міді. Ці якості поряд з невисокою вартістю міді зробили її найпоширенішим матеріалом для контактів комутаційних пристроїв.

Алюміній. Із-за невисокої механічної міцності, низької дугостійкості та окисної плівки, яку практично неможливо прибрати, алюміній як конструкційний матеріал в комутуючих контактах не використовується. Він застосовується в розбірних нерухомих контактних з'єднаннях силових провідів, шин та шинопроводах.

Вольфрам. Висока електрична зносостійкість (дугостійкість) зумовила широке використання вольфраму в дугогасильних контактах при комутації великих струмів (більше 10 кА). Сплави вольфраму з молібденом, платиною та іридієм усувають його головний недолік – високий електричний опір, підвищують електропровідність вольфраму. Ці сплави широко використо-

вуються в контактах на невеликій струми, але з високою частотою вимкнення.

Металокераміка. Сплави деяких металів отримати практично неможливо. Вихід знаходять у використанні *металокераміки* – матеріалу, отриманого механічним змішуванням порошків двох металів (одного з гарною провідністю, іншого з високою дугостійкістю) та витриманих при високій температурі до спікання.

Найбільш розповсюджені композиції металокераміки: срібло-молібден, срібло-нікель, мідь-вольфрам, мідь-молібден тощо. Металокераміка використовується в головних контактах на струми до 600 А, а в дугогасних контактах і на великі струми.

4.4. Нагрівання контактів

Підвищений опір електричного контакту зумовлює його нагрівання при протіканні струму. Враховуючи рельєфні зміни поверхні контакту при нагріванні (поступове змінання бугорків за наявності стискуючого зусилля), збільшення опору контактів при підвищенні температури може бути оцінено за допомогою формули

$$r_{\theta} = r_{\text{хол}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \Delta\theta \right), \quad (4.3)$$

де r_{θ} – опір контакту при температурі θ ; $r_{\text{хол}}$ – опір холодного контакту ($\theta_0 = 20$ °C); α – температурний коефіцієнт питомого опору; $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ – перевищення температури контакту над θ_0 .

Коефіцієнт $\frac{2}{3}$ враховує зниження твердості матеріалу при нагріванні.

На рис. 4.3 приведена залежність зміни перехідного опору контакту від температури. Спочатку, при підвищенні температури, опір контактів зростає згідно з виразом (4.3). При температурі θ_1 відбувається розм'якшення металу (для міді $\theta_1 \approx 180$ °C), різко збільшується ефективна площа контактування і опір контакту значно знижується. Подальше нагрівання продовжує збільшувати опір контакту. При температурі θ_2 (для міді близько 900 °C)

відбувається розплавлення металу, контакти зварюються та їх перехідний опір різко знижується.

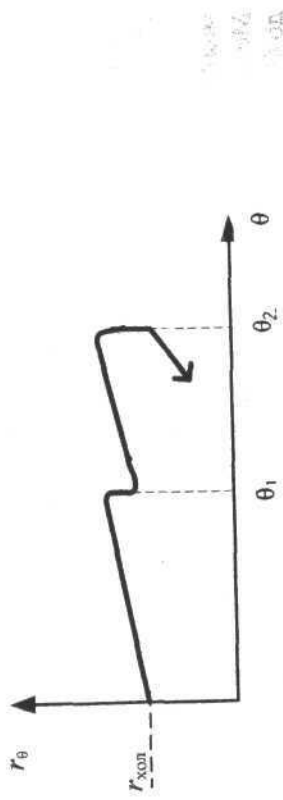


Рис. 4.3

У правильно спроекттованих контактах та при виконанні правил їх експлуатації температура контактуючих поверхонь не повинна перевищувати середню температуру тіла контакту більше ніж на 10°C .

4.5. Електродинамічні сили в контактах

Викривлення ліній струму в місця звуження (див. рис. 4.1, а) спричиняє подовжене електродинамічне зусилля, що намагається розсунути контакти. У випадку точкового контакту значення електродинамічної сили розсушення F_d знаходимо за виразом

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

де S_p – робоча поверхня контакту; S_e – ефективна площа контакту; i – середнє значення струму через контакти.

При протіканні робочих струмів (до сотень ампер) значення електродинамічних сил розсушення в контактах практично непомітно. Зовсім іншу картину спостерігаємо при проходженні наскрізних струмів КЗ. Відштовхуючі зусилля можуть досягати сотень ньютонів і, при розсушенні контактів, спричинити між ними електричну дугу струму КЗ, що може вивести апарат із ладу.

Щоб компенсувати електродинамічні зусилля використовують різноманітні технічні рішення. На рис. 4.4 зображено приклад

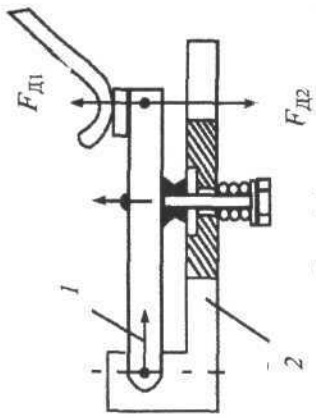


Рис. 4.4

компенсації динамічних зусиль F_d в контактах за допомогою рухомої частини 1. Струми КЗ, що проходять через вигнуте тіло контакту 2, намагаються розсунути частини 1 та 2, створюючи силу F_d , яка направлена на зустріч силі F_d .

4.6. Конструкції низьковольтних комутаційних контактів

Конструкції комутаційних контактів низьковольтних апаратів різноманітні. Широко розповсюджені *врубні контакти*. Найпростіший з них (рис. 4.5,а) складається з нерухомих ламелей 2, виконаних з пружного матеріалу (твердотягнутої міді, латуні тощо). Рухомий ніж 1 при вході в контакт розсуває ламелі. Така конструкція має суттєві недоліки: змінний і значний перехідний опір, неможливість регулювання притискувачого зусилля, мала стійкість при КЗ і можливість втрати пружності ламелей 2 при проходженні струму КЗ або поганому контакті (відпалення матеріалу ламелей).

Значно краща конструкція врубних контактів з кільцевою пружиною 3 (рис. 4.5,б), де ламелі 2 виконані з контактними виступами 4, які забезпечують лінійне контактування. Врубні контакти використовуються в рубильниках, запобіжниках і роз'єднувачах для внутрішнього встановлення.

Місткові контакти (рис. 4.5,в) широко використовуються в контакторах на середні струми і магнітних пусках. Необхідний тиск в контактах забезпечує пружина 3. В них відсутнє проковзування, тому виконувати їх лише з міді не можна. Контактні бугорки 1 часто виконують з металокераміки на основі срібла. Головними перевагами місткових контактів є: подвійний розрив, тобто утворення двох електричних дуг в одній фазі,

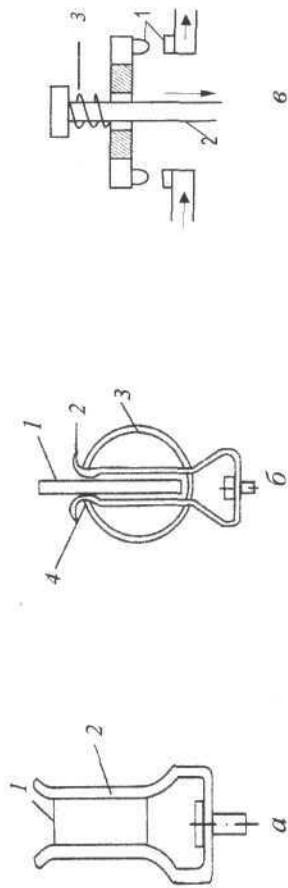


Рис. 4.5

і малий хід штока 2, що дозволяє конструювати малогабаритні контактні пристрої.

Важільні (плечові) контакти (рис. 4.6), завдяки тому, що вісі обертання рухомої частини Q_1 і самого контакту Q_2 не співпадають, забезпечують переключення і проковзування площини контактування. При цьому лінія початкового контактування 1 (або заклоного – при розімкненні), на якій утворюється дуга, виявляється зміщеною відносно лінії тривалого контактування 2.

Це забезпечує значно краще збереження контактів і можливість виготовлення їх з міді. Важільні контакти широко використовуються в контакторах і автоматах на середні струми.

Двоступеневі (дворієвеві) контакти (рис. 4.7) складаються з паралельно ввімкнених основних 1 та дутогасильних 2 контактів.

Рис. 4.6

Основні контакти виконують із міді, на поверхню яких припаюють срібні пластини. Дутогасильні контакти також виконують із міді, але вони мають накладки з дутогасильного матеріалу – вольфраму або металокераміки.

При вимкненні електричного кола спочатку розмикаються основні контакти. Дуга між ними не загоряється, оскільки весь струм починає текти через дутогасні контакти. Потім розмикаються дутогасильні контакти і дуга, що виникає між ними, гаситься в дутогасильній камері. Така конструкція контактів забезпечує

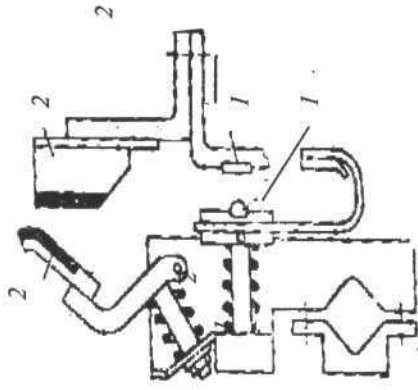


Рис. 4.7

4.7. Конструкції високовольтних контактів

Конструкції комутаційних контактів високовольтних апаратів також різноманітні. На рис. 4.8 приведені варіанти найбільш простих *торцевих контактів*. В торцевому контакті (рис. 4.8,а) поверхня контактування незначна, самоочищення відсутнє, все це разом зі значними електродинамічними відштовхуючими зусиллями, що викликані малою кількістю точок контактування, потребує великих стискуючих зусиль. Щоб зменшити інтенсивність руйнування поверхні контактів і їх швидкої заміни, використовують змінні наконечники 1, виконані з тугоплавких матеріалів.

На рис. 4.8, б зображено торцевий трубчастий контакт, який широко використовується в повітряних вимикачах. Дуга 1 якщо на неї дмухати, втягується всередину контакту, зменшуючи тим самим опалення торців контактів.

У вимикачах та роз'єднувачах як основні часто використовують різновид врубних контактів – *пальцеві контакти* (рис. 4.9). В положенні „Ввімкнено” рухомий контакт 5 входить в зазор (щілину) між пальцями 2, притискаючи другу сторону

пальців до контактної пластини 3. Необхідне зусилля притискання забезпечують пружини 1 та 4.

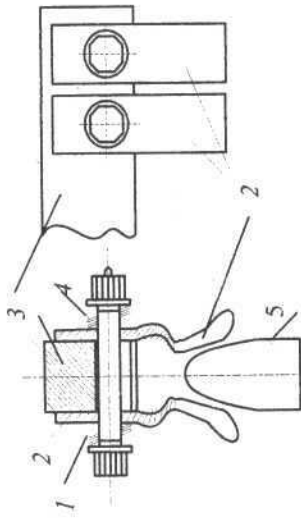


Рис. 4.9

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

Недолік такого пристрою, — практично відсутнє самозачищення в місці контактування пальців з пластинною 3.

Розеткові контакти (рис. 4.10), завдяки своїй надійності, широко використовуються в високовольтних вимикачах. Вони складаються з декількох контактних сегментів 2. Кожний сегмент власною пружиною 3 упирається в кільце 4.

Струмоз'ємними 5 з'єднують сегменти з основою контакту 6. Рухомий контакт 1 при вході в розетку розсуває сегменти, виконує їх самозачищення і забезпечує в кожному з них лінійне контактування.

Ковзи і контакти замінили менші надійні при великих струмах та значних переміщеннях гнучкі струмопідводи. На рис. 4.11 приведена конструкція такого контакту з використанням роликів.

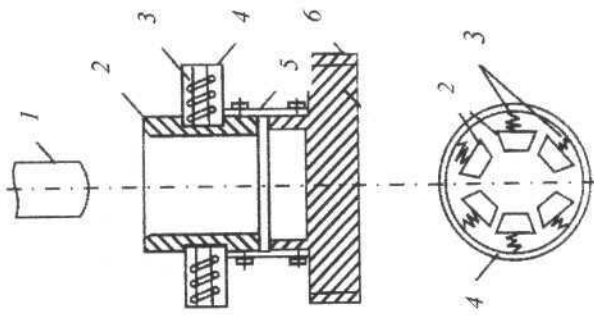


Рис. 4.10

Між двома нерухомими направляючими стрижнями 1 по конічних роликах 3 переміщується рухомий контакт — стрижень 2. Кількість пар роликів вибирають залежно від номінального струму.

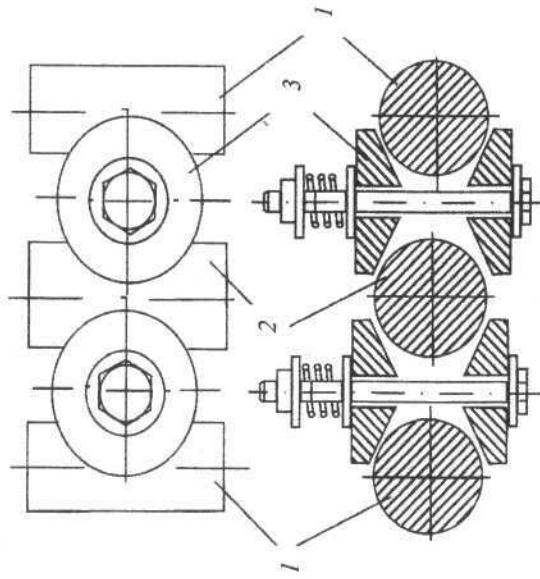


Рис. 4.11

Наприклад, вимикач типу ВМП-10, який широко використовується в сучасних мережах 10 кВ, при номінальному струмі 630 А має шість пар роликів.

5.1. Фізичні процеси в дуговому проміжку

У звичайних умовах повітря – достатньо хороший ізолятор. Для пробивання 1 см повітря необхідно близько 20-30 кВ.

При пробую в повітрі з'являється відповідна концентрація заряджених частинок – вільних електронів і позитивних іонів.

Фізичний процес перетворення нейтральних атомів і молекул газів у разі відщеплення від них електронів в позитивні іони називається іонізацією. Атоми газу можуть бути іонізовані шляхом впливу на них високої напруженості електричного поля, світлових і рентгенівських випромінювань, високої температури, космічних випромінювань і рядом інших фізичних впливів. Вплив космічних випромінювань призводить до того, що в повітрі в звичайних умовах завжди є невелика кількість іонізованих атомів і вільних електронів.

Для дугових процесів, що протікають в електричних апаратах, найбільше значення мають термоелектронна та автоелектронна емісії, що виникають під час розходження контактів (електродів), а також термічна й ударна іонізації, що спостерігаються в стовбурі палаючої дуги.

Термоелектронною емісією називається явище випускання електронів розпеченими твердими або рідкими тілами. В початковий момент розімкнення контактів швидко зменшується ефективна площа контактування (див. п.4.1), в результаті чого густина струму в останніх площадках контактування різко збільшується. Це призводить до їх розігрівання і розплавлення. Між контактами створюються містки із розплавленого металу, які розриваються при подальшому розходженні контактів. Відбувається випаровування металу, і на від'ємному електроді виникає катодна пляма – розпечена площадка, що випромінює електрони в міжконтактний простір.

Автоелектронною емісією називається явище виривання електронів із катода під дією сильного електричного поля. В момент розриву містків із розплавленого металу відстань між контактами, що розходяться, ще дуже мала. Прикладена до них напруга зумовлює значну напруженість електричного поля (більше

100 МВ/см), під дією якого електрони вириваються з холодних ділянок поверхні катода.

Таким чином, до вільних електронів і іонів повітря, що знаходяться в проміжку між контактами, добавляються ще й розпечені пари металу та електрони, що виділяються катодом в результаті спільної дії термоелектронної і автоелектронної емісій. При достатній концентрації заряджених частинок між контактами виникає дуговий розряд. Залежно від величини струму і напруги в електричному колі, матеріалу і чистоти поверхні контактів, швидкості їх розходження і ряду інших факторів дуговий розряд може погаснути або під дією ударної і термічної іонізації перейти в стійко палаючу електричну дугу.

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

Потенціал іонізації атомів азоту, водню, кисню – 13...16 В, гелію – до 25 В, а парів металів значно нижче (у міді – 8 В). Потенціал іонізації суміші газів і парів металу, характерний для короткої дуги, визначається самим низьким із потенціалів іонізації її компонентів. Тобто, ударній іонізації в початковий момент горіння дуги в більшій мірі підлягають пари металу, що з'явилися в міжконтактному проміжку, а по мірі розходження контактів – і атоми газів повітря.

Щойно отримані електрони, в свою чергу, розганяються й іонізують наступні атоми, цим самим виникають нові заряджені частинки в дуговому проміжку. При цьому підвищується температура дуги.

Термічною іонізацією називається іонізація під дією високої температури. В стовбурі палаючої дуги температура досягає 15000 °К. При такій температурі різко збільшується швидкість руху

молекул і атомів газів. У разі їх зігкнення в великій кількості створюються заряджені частинки, тобто відбувається іонізація газу. Термічна іонізація газів починається при температурі близько 10000 °К, а парів металу – 4000 °К. Вона є основним видом іонізації газу в стійко і вільно палаючій електричній дузі. Висока температура дуги підтримується за рахунок теплової енергії, що виділяється в ній електричним струмом.

У вільно палаючій дузі одночасно з процесами іонізації безперервно відбуваються і зворотні процеси – деіонізація.

Деіонізація – процес взаємної нейтралізації заряджених частинок або їх видалення із дугового простору. Деіонізація дугового проміжку відбувається головним чином за рахунок рекомбінації і дифузії заряджених частинок.

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

Рекомбінація в об'ємі стовбура дуги відбувається з допомогою нейтральної частинки. Електрон спочатку якби приліпає до неї, а потім утворені негативний і позитивний іони, що мають приблизно рівні швидкості і вагу, взаємно притягуються. Безпосереднє з'єднання електронів і позитивних іонів малоймовірно через значну різницю в їх швидкостях.

Інтенсивність рекомбінації в об'ємі суттєво залежить від напруженості електричного поля. Так, при малих напруженостях швидкості заряджених частинок невеликі і ймовірність їх рекомбінації значно збільшується (що суттєво для гасіння дуги змінного струму).

Рекомбінація на поверхні твердого діелектрика проходить в наступному порядку: більш рухомі електрони утворюють на діелектрику поверхневий заряд, від якого негативні іони і електрони відштовхуються, а позитивні іони – притягуються й рекомбінують.

Дифузією називають явище виносу заряджених частинок із стовбура дуги в навколишнє середовище. Дифузія призводить до зменшення концентрації позитивних іонів в стовбурі дуги. Явище дифузії обумовлене значною різницею густини іонів в центрі і в оточуючому дугу середовищі, а також температур (до 15000 °К в центрі і 3000...4000 °К у поверхні). Різниця густини позитивних

іонів створює електричне поле, що примушує іони рухатися від центра дуги до периферії. Туди само направлено теплове переміщення частинок. Покинувши стовбур дуги, заряджені частинки рекомбінують уже в навколишньому середовищі.

Якщо гази навколо дуги нерухомі, то дифундуючи іони накопичуються навколо стовбура дуги, утворюючи своєрідну позитивно заряджену оболонку, що перешкоджає подальшій дифузії. В цьому випадку роль дифузії в загальному процесі деіонізації вкрай мізерна. Значно збільшується ефективність дифузії, якщо дугу обдувати холодним повітрям чи швидко переміщувати сам стовбур дуги.

5.2. Електрична дуга постійного струму

Вольтамперні характеристики дуги. На рис. 5.1 показані вольтамперні характеристики електричної дуги (залежність напруги на дузі від струму в ній $U_d = f(I_d)$). Характеристики мають падаючий характер, тобто зі збільшенням струму в дузі напруга, необхідна для підтримання її горіння, зменшиться. Пояснюється це тим, що електричний опір дугового проміжку зменшується швидше, ніж збільшується струм.

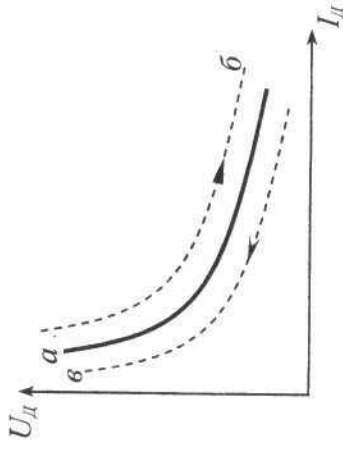


Рис. 5.1

При повільній зміні струму в дузі для кожного його значення встигає встановлюватися рівноважний стан, коли процеси іонізації врівноважуються процесами деіонізації, тобто коли кількість заряджених частинок в стовбурі дуги при заданому струмі

залишається приблизно однаковою. Стабілізуються електричний опір і падіння напруги на дузі. Такий режим горіння дуги називають *статичним*, а залежність $U_d = f(I_d)$, отримана при повільній зміні струму, — *статичною характеристикою дуги* (рис. 5.1, крива а).

При достатньо швидкій зміні струму в дузі (наприклад, в мережі з частотою 50 Гц) іонізаційні процеси не встигають перебудуватися. Так, при швидкому зменшенні струму додаткова деіонізація дугового проміжку потребує певного часу. Тому провідність дугового проміжку в першочерговий момент залишається тою самою, відповідаючи великому струму, а, відповідно, і падіння напруги на дузі буде меншим, ніж при статичному режимі (рис. 5.1, крива б). У випадку швидкого збільшення струму вольтамперна характеристика буде розміщуватися вище статичної (рис. 5.1, крива в). Ці вольтамперні характеристики, отримані при швидкій зміні струму в дузі, називають *динамічними*.

Розподіл напруги в стовбурі дуги. Прикладена до дуги напруга розподіляється вздовж її стовбура нерівномірно. Можна виділити три характерних зони: зона *катодного спаду напруги* (катодна зона), сам *стовбур дуги* і зона *анодного спаду напруги* (анодна зона) (рис. 5.2). Поблизу електродів, в катодній і анодній зонах спостерігаються різкі зміни напруги, викликані наступними причинами.

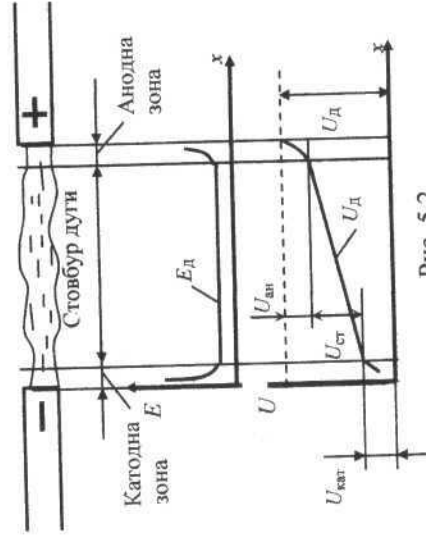


Рис. 5.2

Створені в стовбурі дуги позитивні іони під дією прикладеної напруги зміщуються до катода. На дуже малій відстані ($10^{-4} \dots 10^{-5}$ см) від поверхні катода відбувається концентрація іонів і утворюється об'ємний позитивний заряд, який створює поблизу поверхні катода електричне поле з дуже великою напруженістю (рис. 5.2, ліва частина кривої E_d). Це поле сильно розганяє важкі позитивні іони, що рухаються до катода, і бомбардує його поверхню, вибивають із катода електрони і одночасно сильно його нагрівають. Утворюється *катодна пляма*, що випромінює електрони. Частина електронів, що вилетіла з катода, рекомбінує із зустрічними позитивними іонами, інша частина під дією електричного поля дуги рухається до анода.

Таким чином, в катодній зоні відбувається безперервне зникнення позитивних іонів, внаслідок чого електрична провідність на одиницю довжини в катодній зоні значно менше, ніж в стовбурі дуги, від чого спостерігається значне падіння напруги (рис. 5.2, ліва частина кривої U_d), що називається *катодним* $U_{кат}$. Аналогічне зниження густини заряджених частинок спостерігається і в анодній зоні, і викликає появу *анодного спаду напруги* $U_{ан}$.

Величина катодного спаду напруги не перевищує $10 \dots 20$ В і залежить від матеріалу і середовища, в якому горить дуга. Анодний спад напруги менше $5 \dots 10$ В, а при великих струмах близький до нуля.

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

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

Для з'ясування умов розглянемо електричне коло з опором R , індуктивністю L і дуговим проміжком D (рис. 5.3, а), до якого прикладена напруга джерела $U_{дж}$. В будь-який момент часу для цього кола буде справедлива рівність

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

де iR – спад напруги на активному опорі; $L \frac{di}{dt}$ – спад напруги на індуктивності при зміні струму; $U_{д}$ – спад напруги на дуговому проміжку.

Дуга погасне, якщо струм в ній буде зменшуватися, тобто при $di/dt < 0$, а напруга, необхідна для підтримання її горіння $U_{д}$, буде перевищувати джерела напругу джерела $U_{дж}$ за-за спаду напруги на опорі R .

$$U_{д} > U_{дж} - iR. \quad (5.1)$$

Ця нерівність представляє умову, при якій дуга гасне.

Рівняння (5.1) зручно рішення графічно. На рис. 5.3,б крива A – це вольтамперна характеристика дуги, пряма B – напруга джерела $U_{дж}$, пряма B – спад напруги на опорі R , що відраховується від значення $U_{дж}$.

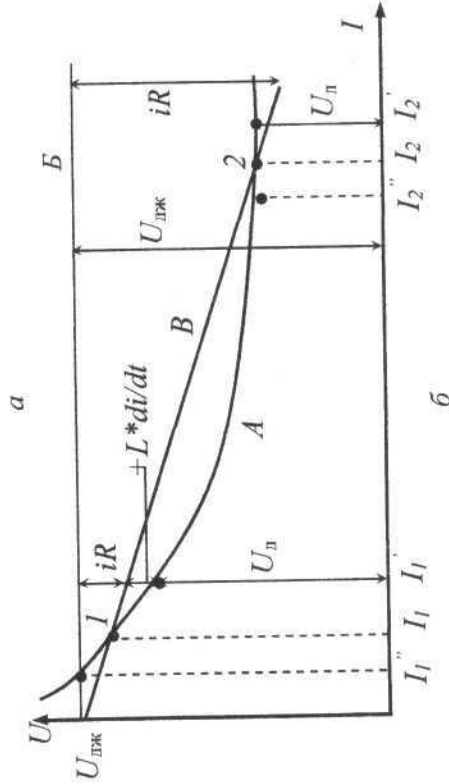
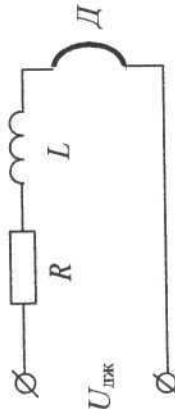


Рис. 5.3

В точках перетину кривої A з прямою B (точки 1 і 2) виконуються умови $L \frac{di}{dt} = 0$ і $U_{д} = U_{дж} - iR$, тобто зміна струму за відсутності зовнішніх впливів не повинна відбуватися. Але в точці 1 цей стан нестійкий, а в точці 2 – стійкий. Дійсно, якщо за якоїсь причиною струм в точці 1 стане трохи більшим (I_1), то буде справедлива нерівність $U_{д} < U_{дж} - iR$. В колі виявиться “надлишок” напруги на значення $L \frac{di}{dt}$, який призведе до подальшого зростання струму до величини I_2 . Якщо ж струм I_1 зменшиться до значення I_1'' , напруги для підтримання дуги знадобиться більше, ніж є: $U_{д} > U_{дж} - iR$, що призведе до подальшого зменшення струму і загасання дуги.

При величині струму I_2 (точка 2) дуга горить стійко, оскільки у випадку збільшення струму до величини I_2 необхідна напруга для горіння дуги $U_{д}$ потрібна буде більш ніж $U_{дж} - iR$, а тому струм зменшиться до значення I_2 . При зменшенні струму до значення I_2'' з'явиться певний “надлишок” напруги і струм збільшиться до значення I_2 . Як видно з рис. 5.3,б, доки лінії A і B мають хоч би одну точку перетину, буде виконуватись умова стійкого горіння дуги. Для виключення такої умови необхідно підняти вольтамперну характеристику дуги (криву A) вище прямої B , або збільшити опір кола R (пряма B піде крутіше вниз). Підняти вольтамперну характеристику найбільш просто збільшенням довжини дуги або охолодженням.

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

У колах постійного струму використовують комутаційні апарати, що мають різні конструкції дугогасних камер, але в усіх апаратах дуга гаситься в повітрі. Це забезпечує прийнятний рівень комутаційних перенапруг (до 3...4 $U_{мер}$), що витримується

ізоляцією апаратів постійного струму. На рис. 5.4 показано приклад осцилограм струму і напруги на контактах повітряного вимикача постійного струму в момент вимкнення мережі $U_{\text{мер}} = 220 \text{ В}$.

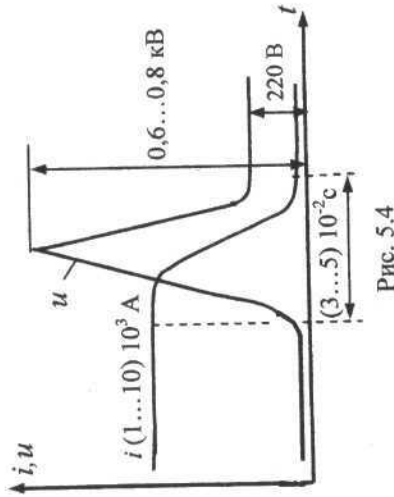


Рис. 5.4

Використання масла та інших спеціальних засобів в дутогасильних камерах апаратів постійного струму призвело б до суттєвого зменшення часу вимкнення, що викликало б більш значні комутаційні перенапруги, небезпечні для ізоляції.

5.3. Електрична дуга змінного струму

В колах змінної напруги значення струму періодично зменшується до нуля, що суттєво полегшує гасіння дуги.

Електрична міцність дугового проміжку. В момент зменшення струму в колах до нуля дуга гасне. Інтенсивно зростаючі деіонізаційні процеси відновлюють електричну міцність (ізоляційні властивості) дугового проміжку. Найбільш швидко (частки мікросекунд) деіонізується катодна зона, в якій проходить інтенсивна рекомбінація позитивних іонів з вилітаючими із катодної плями електронами (див. п. 5.1). Електрична міцність катодної зони збільшується до $150...250 \text{ В}$ (рис. 5.5, а ділянка кривої *oa*). Більш повільно відновлюється електрична міцність основної частини дугового проміжку – стовбура (ділянка *ab*).

Конкретна величина відрізка *oa* і нахил кривої *ab* залежать від конструкції дутогасної камери. Чим досконаліша камера, тим

більше відрізок *oa* і крутіше піднімається крива *ab*, тобто швидше збільшується електрична міцність $U_{\text{міц}}$ дугового проміжку.

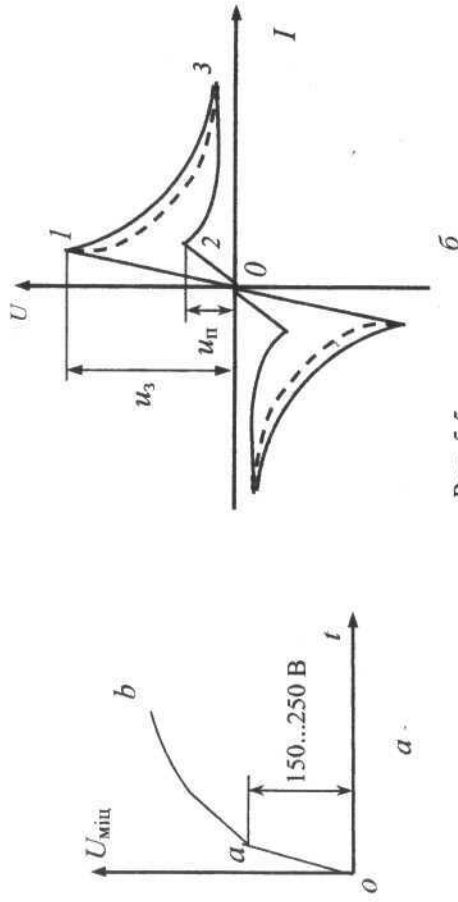


Рис. 5.5

Вольтамперна характеристика дуги змінного струму. При змінній напрузі величина електричного струму в колі безперервно змінюється за величиною і знаком. Це викликає необхідність використання не статичних, а динамічних вольтамперних характеристик дугового розряду (див. рис. 5.1).

Розглянемо детальніше процес загорання і гасіння дуги при змінному струмі. При зростанні напруги в дуговому проміжку спочатку виникає тліючий розряд, що характеризується малими струмами (рис. 5.5, б, відрізок $0 - I$). В точці *I* напруга, прикладена до контактів, досягає величини пробою, що називається *напругою запалення* u_3 . Тліючий розряд переходить в дуговий і в колі починає протікати струм, змінний за часом залежно від зміни напруги джерела. При збільшенні струму динамічна вольтамперна характеристика (відрізок *I - 3*) пройде трохи вище статичної (пунктирна лінія). В наступній чверті періоду струм зменшується і динамічна характеристика піде нижче статичної (відрізок *3 - 2*). Зменшуючись, струм при відповідному значенні вже не зможе підтримувати горіння дуги і вона гасне (точка 2). Цей момент характеризується *напругою погасання* $u_п$. Дуговий розряд

переходить в тліючий (відрізок 2 - 0). Якщо відстань між контактами залишається незмінною, процес повторюється і при від'ємній напівхвилі струму та повторюється необмежений час.

Умови гасіння дуги змінного струму. Розглянемо осцилограму навантаженні (cos φ = 1), показану на рис. 5.6, а. За відсутності струму міжконтактний проміжок відновлює свою електричну міцність по кривій *o a b*. Напряга на контактах, що розходяться, зростає по синусоїді напруги джерела $u_{дж}$, показаної на рисунку пунктирною лінією. В момент t_1 , коли напруга на контактах перевищить електричну міцність проміжку (точка 1), відбувається запалювання дуги, і в колі з'являється струм i . Зростання струму в колі, викликане подальшим збільшенням напруги джерела, призводить до зменшення напруги на дузі u_d (контактах). Далі при зменшенні напруги джерела також зменшується і струм в колі, що викликає деяке підвищення напруги u_d . В момент t_2 (точка 2) дуга гасне, струм i стає рівним нулю.

Наступного напівперіоду процес повторюється з тією різницею, що до моменту t_1' контакти вже розходяться на більшу відстань, а тому електрична міцність дугового проміжку зростає інтенсивніше (відрізок $o a'$ більше відрізку oa , і лінія $a'b'$ піднімається крутіше лінії ab). Загорання дуги (момент t_1') відбувається трохи пізніше, при більшому значенні u_3 .

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

Таким чином, умовою гасіння дуги змінного струму є *випереджаюче зростання електричної міцності дугового проміжку над напругою джерела*. Варто звернути увагу на присутні в осцилограмі струму так звані *безструмові паузи*. На відрізках часу $t_0 \dots t_1$ і $t_2 \dots t_1'$ струм по колу не протікає. Тривалість безструмових пауз на рис. 5.6, а із графічних міркувань значно збільшена. В дійсності їх тривалість при активному навантаженні становить 10...100 мкс, а при індуктивному – на порядок менше. З використанням безструмових пауз зв'язаний один із напрямків

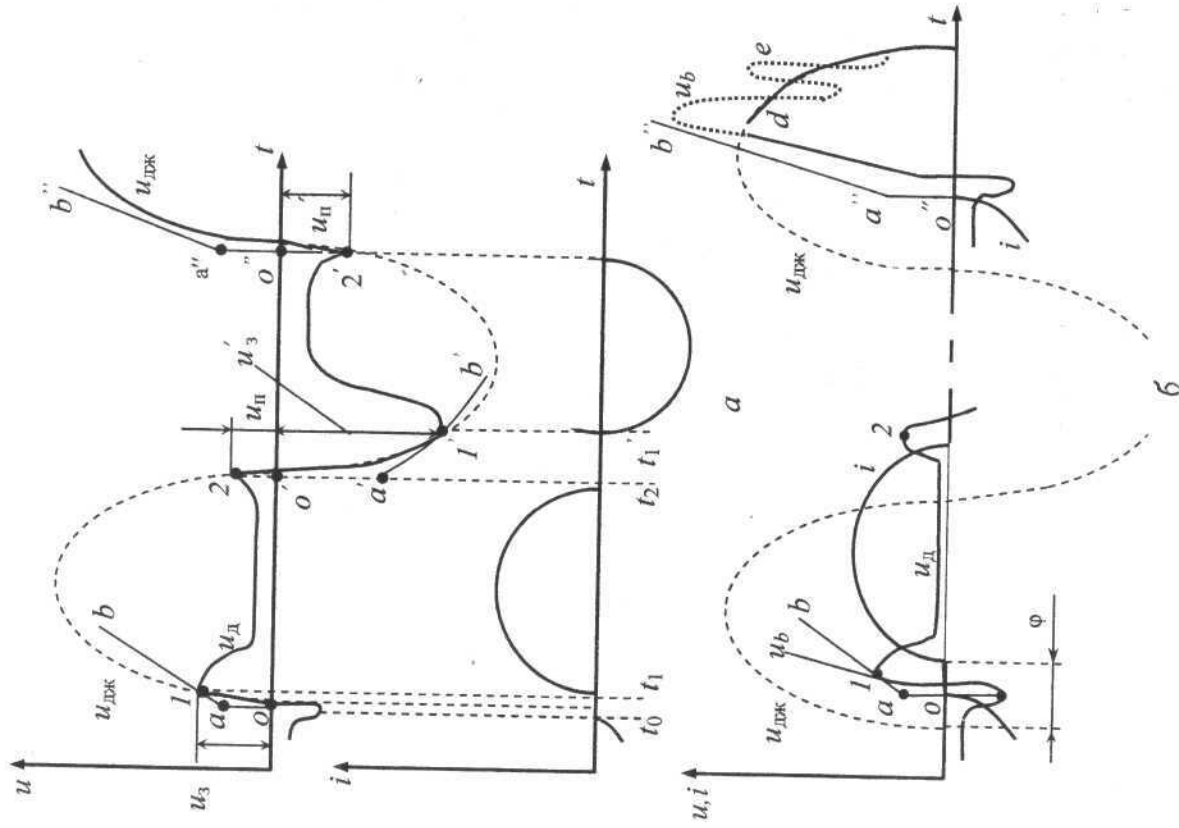


Рис. 5.6

відбувається зменшення напруженості електричного поля, що веде до сповільнення процесу ударної іонізації. Зростаюча поверхня дуги підсилює процес дифузії. Але, як показано в п.5.1, у вільно палаючій стаціонарній дузі ці процеси не є основоположними. Тому, щоб вони вплинули на гасіння дуги, її необхідно розтягнути на значну довжину. Так, вимкнення струму більше 100 А при змінній напрузі 220 В потребує розтягнення дуги на 25...30 см, що неприйнятно із-за зростання габаритів комутаційних апаратів.

Цей метод в чистому вигляді використовується тільки в низьковольтних комутаційних апаратах зі струмами до десятків ампер (в перемикачах, рубильниках, реле та ін.).

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

Переміщення дуги в нерухомому середовищі з більш низькою температурою викликає охолодження стовбура дуги, а також сприяє значному збільшенню дифузії заряджених частинок, оскільки навколо дуги не встигає утворитися оболонка із позитивних іонів (див. п.5.1). Переміщувати дугу можна кількома способами:

- під дією електродинамічних сил F_e , що виникають в самій дузі внаслідок викривлення лінії струму (рис. 5.7,а);

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

- за допомогою зовнішнього магнітного поля, утвореного одним або декількома витками провідника, що підводить струм до контактів (рис. 5.7,в). Котушка електромагніта при “магнітному дугті” (так називається цей метод) розміщена так, щоб її магнітний потік H був перпендикулярний дузі і створював зусилля F_e , що зміщує дугу за правилом лівої руки. Зовнішнє магнітне поле може бути також створене котушкою, ввімкненою паралельно на напругу мережі, або за допомогою постійних магнітів;

- за допомогою радіального магнітного поля, утвореного кільцевим постійним магнітом S і магнітом N (рис. 5.7,г). На дугу D

вдосконалення високовольтних вимикачів, – розробка синхронізованих вимикачів.

При вимкненні індуктивного навантаження ($\cos \varphi < 1$), наприклад, струмів КЗ, процес підвищення напруги на контактах відбувається інакше. Якщо в момент проходження струму через нуль при вимкненні активного навантаження (рис. 5.6,а) на контактах спостерігається невелика напруга погасання $u_{\text{пг}}$ рівна напрузі джерела $u_{\text{дж}}$ в цей момент, то при відключенні індуктивного навантаження при проходженні струму через нуль напруга джерела $u_{\text{дж}}$ значно перевищує напругу погасання (рис. 5.6,б). Тому процес відновлення напруги на контактах вимикача відбувається значно швидше по деякій кривій $u_{\text{в}}$. В момент перетину кривою $u_{\text{в}}$ кривої електричної міцності oab (рис. 5.6,б, точка I) відбувається запалення дуги. Наступні процеси аналогічні вже розглянутому.

Швидкість відновлення напруги на контактах (нахил кривої $u_{\text{в}}$) залежить від індуктивності L і ємності C кола. Зі збільшенням L і C кола швидкість відновлення напруги зменшується.

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

5.4. Основні методи гасіння електричної дуги

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

Розтягнення дуги. Розтягнення стовбура дуги шляхом швидкого збільшення відстані між контактами – найбільш простий, але малоефективний в чистому вигляді метод. При розтягненні дуги

при цьому буде діяти сила F_e , що примушує її переміщуватися по колу трубчастого контакту K .

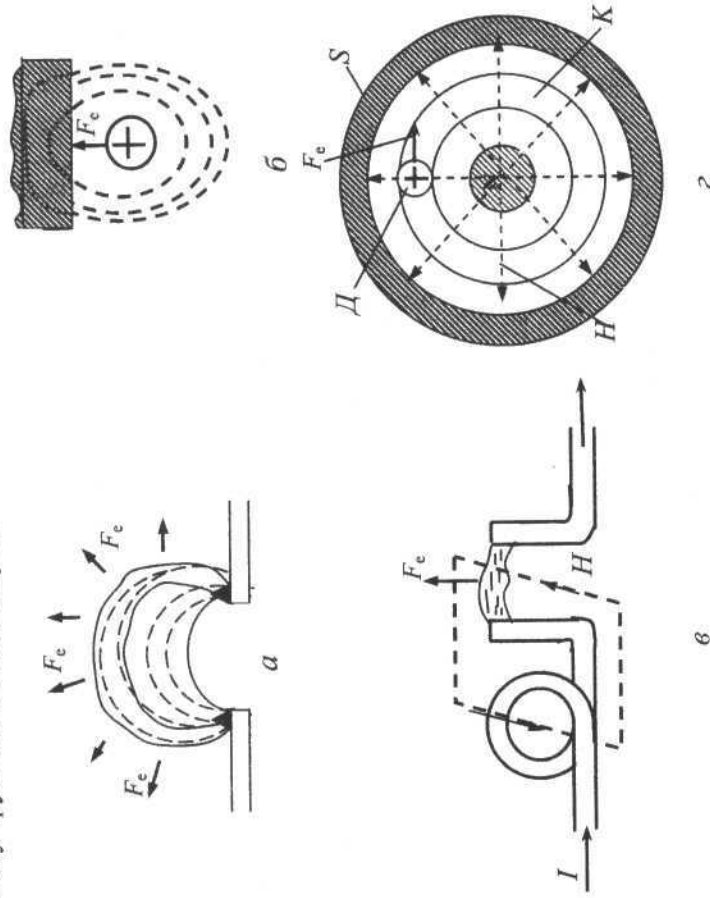


Рис. 5.7

Використання "магнітного дугтя" і радіального магнітного поля забезпечує високу швидкість переміщення дуги в розглянутому методі. Ефективність методу переміщення дуги підтверджує такий приклад: для успішного гасіння відкритої дуги зі струмом більше 100 А при змінній напрузі 220 В і швидкості руху дуги 100 м/с її достатньо розтягнути на 5 см. Метод переміщення дуги знаходить широке використання в комутаційних апаратах високої напруги, а в низьковольтних апаратах він являється основним.

Обдування дуги відносно холодними газами або рідинами також викликає її інтенсивне охолодження і підсилення процесів дифузії. Особливо інтенсивно відбувається деіонізація при турбулентному потоці, коли частинки холодного газу, що

рухаються вихороподібно, проникають у стовбур дуги. Обдування можна виконати кількома способами:

- поздовжнє дугтя — найбільш простий спосіб за конструктивним рішенням дугогасної камери (рис. 5.8, а);
- поздовжнє двостороннє дугтя через трубчасті контакти (рис. 5.8, б) значно підсилює процес охолодження завдяки збільшенню швидкості потоку газу в вузькому каналі в тілі контакту;

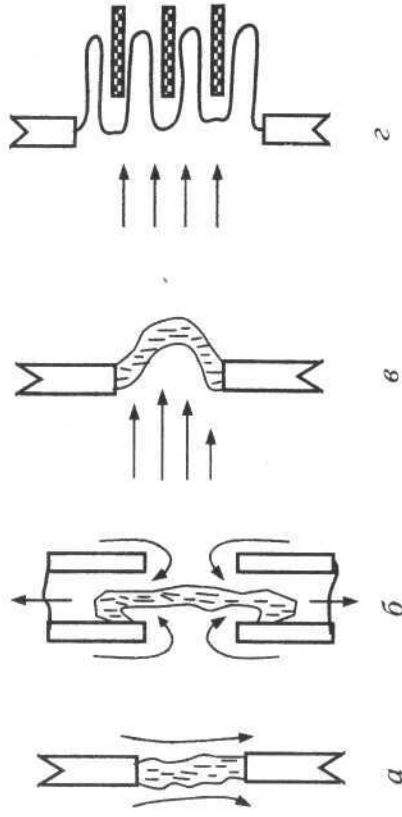


Рис. 5.8

— поперечне дугтя (рис. 5.8, в) достатньо ефективне, оскільки викликає одночасно і видовження стовбура дуги;

— поперечне дугтя з використанням поперечних перегородок із ізоляційного матеріалу (рис. 5.8, г) дозволяє досягти великої довжини і поверхні дуги при незначному її переміщенні. Перегородки забезпечують більш тісне дотикання дуги з потоком газу, сприяють проникненню газу всередину стовбура дуги, інтенсифікуючи деіонізаційні процеси.

Обдув дуги для її гасіння використовують в основному в високовольтних апаратах, бо реалізація цих способів потребує достатньо складних пневматичних пристроїв та смностей з газами під тиском.

Використання спеціальних середовищ. Використання спеціального газоподібного або рідкого середовища дозволяє підвищити інтенсивність деіонізаційних процесів в дугі. Чим вище

теплопровідність і електрична міцність середовища, її теплоємність і температура термічної іонізації, тим легше гасити в ній дугу. По відношенню до повітря, ефективність гасіння дуги в середовищі вуглекислого газу, водяної пари, водно і елегазу більше в 2,5; 3,5; 7 і 100 разів відповідно.

Синтезований спеціально для електричних цілей (звідси його назва - *елегаз*) стійкий інертний газ SF_6 (шестифторна сірка) володіє чудовими дутогасильними властивостями. Він у п'ять разів густіший повітря, його електрична міцність у 2,5 рази, а теплоємність - у чотири рази більша ніж у повітря. Недолік елегазу - його висока температура зрідження. Він переходить в рідкий стан при тиску 1,3 МПа (приблизно 13 атм) вже при температурі 0 °С. Це примушує або підігрівати його, або зменшувати тиск, що знижує ефективність використання газу. Слід також зауважити, що отримати добрі результати можна при використанні лише газу високої хімічної чистоти, що потребує значних матеріальних затрат. Поступове здешевлення елегазу дозволяє все ширше використовувати його в високовольтних комутаційних апаратах, постійно витісняючи гасіння в маслі або повітрі.

Значного підвищення ефективності гасіння дуги можна досягти, виконуючи переміщення або обдув дуги в середовищі раніше названих газів.

Гасіння дуги в маслі. Гасіння дуги в маслі є на разі одним із поширених способів гасіння, що використовуються в високовольтних комутаційних апаратах змінного струму. Електрична дуга, що виникає між контактами, які розходяться в маслі, завдяки високій температурі своєї поверхні, розкладає і випаровує близько розташоване масло. Із 1 г масла виділяється близько 1500 см³ газу, складеного за об'ємом із 70 % - водно, 22 % - ацетилену, 5 % - метану і 3 % - етилену. Утворення газу відбувається дуже швидко, за соті долі секунди, і дуга горить уже не в маслі, а в газовому пузирі, тиск в середині якого досягає 1,5 МПа, що також сприяє її гасінню. Підвищений тиск можна використати для різних видів дугтя. Прикладом такого використання масла може служити високоєфективна дутогасна камера вимикача ВМП - 10.

Гасіння дуги при високому тиску. Інтенсивність процесів іонізації та деіонізації газу залежить від його тиску: чим вище тиск

газу, тим ближче розташовуються між собою його молекули. Це затрудняє процес термічної й ударної іонізації. Одночасно з підвищенням тиску зростає і теплопровідність газу, що приводить до підсилення охолодження дуги.

В окремих апаратах стінки дутогасильної камери роблять із газогенеруючого матеріалу - *фібри*. При високій температурі дуги фібра виділяє газ і в замкненому об'ємі, за долі півперіода, тиск піднімається до 10 - 15 МПа. Таким способом гаситься дуга в запобіжниках і в пакетних вимикачах.

Гасіння дуги в вакуумі. При високому вакуумі ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па) середня довжина вільного пробігу молекули газу значно перевищує розміри дутогасної камери. Тому термічна іонізація не виникає. Практична відсутність молекул речовини є і причиною високої електричної міцності міжконтактного проміжку, в багатьох разів вищої міцності повітря при нормальному тиску. Пробивна напруга проміжку довжиною 1 мм в вакуумі досягає 100 кВ.

Фактично єдиною речовиною, іонізовані частки якої можуть викликати появу електричної дуги в вакуумі, є пар розплавлених контактів, що утворюється в початковий момент їх розходження. Зменшити кількість парів металу можна, використовуючи на контактних поверхнях тугоплавкі метали, наприклад, вольфрам. В цілому гасіння дуги в вакуумі високоєфективне і дозволяє повністю розмикати електричне коло протягом одного або двох півперіодів. Використання вакууму, а також елегазу є найбільш прогресивним методом гасіння дуги.

Гасіння дуги в дутогасній решітці. Якщо над палаючою дугою встановити декілька поперечних *металевих пластин* (рис. 5.9) і одним із раніше описаних способів перемістити її в решітку, дуга розіб'ється на ряд послідовних дуг і біля кожної металевій пластини утвориться своя катодна зона.

Як уже говорилося в п.5.3, при змінному струмі (в момент його проходження через нуль) в катодній зоні практично миттєво відновлюється електрична міцність 150...250 В (див. рис. 5.5,а). За наявності m пластин, з'являється $m + 1$ катодна зона - відповідно електрична міцність дутового проміжку збільшується в $m + 1$ разів і буде дорівнювати $(150 \dots 250) \times (m + 1)$ В.



Рис. 5.9

При постійному струмі в кожній зоні буде спостерігатись падіння напруги всього на 10...20 В. Тому цей метод практично не знаходить використання в апаратах постійного струму.

Для прискорення затягування дуги в решітку її пластини виконують із магнітного матеріалу – сталі і надають їм спеціальну форму з вирізом (одна із можливих показана на рис. 5.9). В апаратах на великій струмі, для збільшення швидкості руху дуги, розглянутий метод доповнюють “магнітним дуттям” (див. рис. 5.7,в). Дугогасні решітки дозволили значно зменшити розміри дугогасних камер. Вони широко використовуються в низьковольтних апаратах і вимикачах 6...10 кВ змінного струму.

Гасіння дуги в вузьких щільнах. Прагнення зменшити габарити дугогасних камер, знизити звуковий і світловий ефекти при гасінні дуги призвело до використання різних щільн із *твердих ізоляційних матеріалів* (рис. 5.10). Ідея цього методу основана, по-перше, на стимульованні процесів рекомбінації на поверхні діелектрика, по-друге, на підвищенні тиску в вузькій щільні і, по-третє, на охолодженні дуги при дотиканні до холодного діелектрика.

В сучасних вимикачах використовуються подовжені щільни, куди дуга заганяється з допомогою “магнітного дуття”.

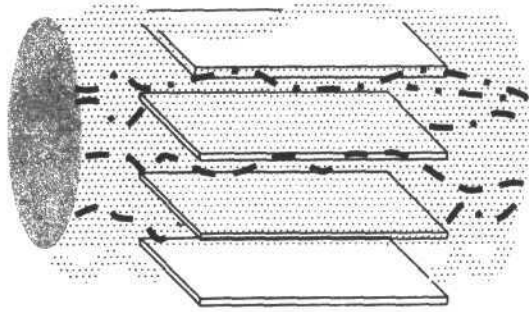


Рис. 5.10

В окремих конструкціях камер стінки щільни чи каналу виготовляють із твердих газогенеруючих матеріалів (органічне скло, фібра та ін.), які під дією високої температури виділяють газ, що збільшує тиск в щільні. Гасіння дуги в щільнах використовується в комутаційних апаратах до 10 кВ.

Використання безструмової паузи. Як уже розповідалось (див. рис. 5.6), при гасінні дуги змінного струму в його графіку утворюються безструмові паузи тривалістю 10...100 мкс. Якщо за цей час розвести контакти на достатню відстань, при якому електрична міцність дугового проміжку виростає до величини, що перевищує ЕРС генератора, дуга більше не загориться.

До недавнього часу реалізація цього методу затримувалась суто технічними труднощами. Необхідно, по-перше, дуже точно визначити за часом момент проходження струму через нуль, по-друге, – мати достатньо потужний привід, що дозволяє за одиниці мікросекунд перемістити контакти вимикача (маса контакту високовольтного вимикача – декілька кілограмів) на відстані десятків сантиметрів. На разі ця важка технічна задача вирішена, і створені так звані *синхронізовані вимикачі*.

Бездугова комутація. Створення силових напівпровідникових приладів (тиристорів), здатних працювати в колах зі струмом до сотень ампер і напругою сотні вольт, дозволило розробити пристрої бездугової комутації, тобто здійснити відключення кола без виникнення електричної дуги. Найбільш ефективне використання тиристорних вимикачів в колах з високою частотою комутації, де у традиційних апаратах швидко зношуються контактні пристрої.

Промисловістю налагоджений випуск тиристорних контакторів, ведуться розробки зі створення високовольтних тиристорних вимикачів.

5.5. Вимикаюча спроможність електричних апаратів

Найбільш важким режимом для комутаційних апаратів є режим вмикання і вимикання струмів КЗ, величина яких може досягати десятків і сотень килоампер. Збереження електроенергетичного обладнання і стійкості паралельної роботи

6.1. Основні терміни та співвідношення

Елементи магнітних систем. Магнітні системи електричних апаратів, у яких магнітний потік збуджується завдяки обмотці, по якій протікає електричний струм, називають *електромагнітами*. Електромагніти слугують для здійснення електромагнітного підсилення та виконання механічної роботи. Наприклад, у електромагнітних приводах різних комутаційних апаратів, електромагнітна енергія перетворюється у механічну для переміщення (ввімкнення та вимкнення) рухомих контактів апарата.

Для утворення магнітного кола потрібної інтенсивності, що необхідно для отримання потрібного механічного зусилля, магнітні системи включають одну або декілька обмоток I та магнітопровід 3 (рис. 6.1). Магнітопровід роблять із феромагнітних матеріалів (заліза, електротехнічної сталі, пермалю), що мають високу магнітну проникливість. Висока магнітна проникливість таких матеріалів дозволяє концентрувати магнітне поле у заданому місці простору.

Рухома частина магнітопроводу 2, що здійснює механічне зусилля, називається *якорем*. Частина магнітопроводу, на якому розміщується котушка, називається *осереддя*.

Для забезпечення поступального чи обертального руху якоря магнітний ланцюг повинен мати зазор 4 довжиною l_0 , який називається *робочим зазором*. Магнітний потік, що проходить через робочий зазор, називається *робочим потоком* Φ_0 .

Магнітні потоки, які не проходять через робочий зазор та не виконують корисну роботу, називаються *потокми розсіювання* Φ_0 .

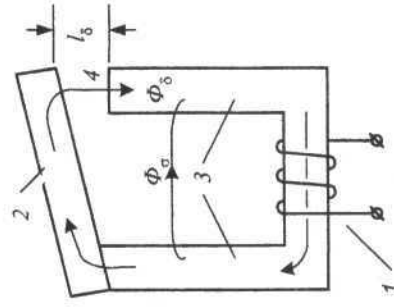


Рис 6.1

електричних систем потребують, щоб тривалість КЗ була якомога меншою і обмежувалась часом $0,05 - 1$ с (залежно від напруги мережі). Тому всі вимикачі обладнуються дугогасною камерою, що забезпечує гасіння електричної дуги в обмеженому об'ємі за досить малий час.

Залежно від використаного способу гасіння дуги (див. п.5.4) і конструкції конкретна дугогасна камера може багаторазово вимикати лише відповідні значення струму КЗ. Для характеристики вимикаючої здатності електричного апарату використовується спеціальна величина – *номінальний струм вимкнення*.

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

Під найбільшим струмом звичайно розуміють діюче значення періодичної складової струму КЗ в момент розходження контактів. Значення $I_{\text{вм.ном}}$ вказується на таблиці вимикачів і приводиться в довідниках [9]. Так, низьковольтні автоматичні повітряні вимикачі залежно від номінального струму мають $I_{\text{вм.ном}} = 1...150$ кА, а високовольтні вимикачі на $6 - 35$ кВ – $I_{\text{вм.ном}} = 30...50$ кА.

Для надійного вимкнення максимальних струмів КЗ при виборі вимикача, необхідно витримати умову

$$I_{\text{вм.ном}} > I_{\text{КЗ}}(\tau) \quad (5.2)$$

де $I_{\text{КЗ}}(\tau)$ – значення струму КЗ в момент вимкнення $\tau = t_3 + t_{\text{в}}; t_3$ – час дії захисту; $t_{\text{в}}$ – власний час вимкнення вимикача, що представляє собою час з моменту подачі команди на вимкнення до початку розходження контактів (приводиться в довідниках). Розрахунок величини $I_{\text{КЗ}}(\tau)$ можна знайти в праці [10].

Раніше вимикаючу здатність вимикачів оцінювали за умовною величиною – номінальною потужністю вимкнення

$$S_{\text{вм.ном}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{вм.ном}}$$

Основні характеристики магнітного поля. Допустимо, що у просторі збуджений *магнітний потік* Φ (Вб). Величину магнітного потоку, що проходить через одиницю площі S (м²), називають *магнітною індукцією* B (Тл).

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

Магнітна індукція є силовою характеристикою магнітного поля.

Якщо магнітний потік пронизує феромагнітне тіло, то для оцінки його інтенсивності використовують іншу фізичну величину — *напруженість магнітного поля* H [А/м], яка зв'язана з магнітною індукцією таким співвідношенням

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

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

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

Закон Ома для магнітного ланцюга. Джерелом магнітного поля є постійний магніт або електромагніт. У випадку електромагніта електричний струм протікає по обмотці, яка має w витків та створює *магнітуючий силу* (МРС) F_M , що вимірюється в ампервитках

$$F_M = I \cdot w. \quad (6.1)$$

Під дією МРС в магнітопроводі створюється магнітний потік Φ . Чим краще матеріал магнітопроводу проводить магнітний потік, тим більший магнітний потік ми одержимо при тій самій МРС.

Величину опору протіканню магнітного потоку оцінюють за величиною магнітного опору R_M . Тоді

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

Останній вираз називається *законом Ома для магнітного кола*. Значення магнітного опору пропорційне довжині магнітопроводу l_M і обернено пропорційне абсолютній магнітній проникливості матеріалу та перерізу магнітопроводу S_M


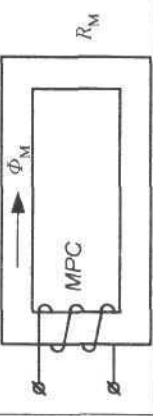
$$R_M = \frac{l_M}{\mu_a \cdot S_M}.$$

У розрахунках краще користуватися величиною, зворотною R_M — *магнітною провідністю* Λ_M

$$\Lambda_M = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu_a \cdot S_M}{l_M}. \quad (6.2)$$

Для кращого запам'ятовування співвідношень між магнітними величинами рекомендовано провести формальну аналогію з електричними величинами (таб.б.1).

Таблиця б.1

Електричне коло	Магнітне коло
	
Електрорушійна сила ЕРС [В]	Магніторушійна сила F_M [А·вит]
Електричний струм $I = U/R$ [А]	Магнітний потік $\Phi = F_M/R_M$ [Вб]
Щільність струму $j = I/S$ [А/мм ²]	Магнітна індукція $B = \Phi/S_M$ [Вб/м ² = Тл]
Електричний опір $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ [Ом]	Магнітний опір $R_M = \rho_M \cdot \frac{l_M}{S_M} = \frac{l_M}{\mu_a \cdot S_M}$ [Гн ⁻¹]
Електрична провідність $\Lambda = 1/R$ [1/Ом]	Магнітна провідність $\Lambda_M = 1/R_M$ [Гн]
Питомий електричний опір ρ [Ом/м]	Питомий магнітний опір ρ_M [м/Гн]

Магнітна провідність повітряного зазору. У робочому зазорі l_g магнітний потік проходить через повітря (рис. 6.2). Оскільки відносна проникливість повітря $\mu = 1$, то її абсолютна проникливість буде дорівнювати магнітній сталі $\mu_a = \mu_0$.

Користуючись співвідношенням (6.2), для магнітної провідності зазору можна записати

$$\Lambda_{M6} = \frac{\mu_a \cdot S}{l_g} = \frac{\mu_0 \cdot S}{l_g}$$

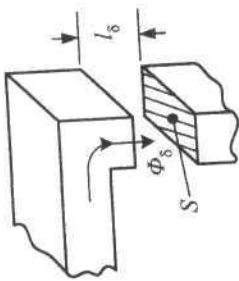


Рис. 6.2

Враховуючи, що у багатьох випадках магнітна провідність повітряного зазору менша провідності інших ділянок магнітного ланцюга, у першому наближенні можна вважати, що МРС контуру прикладається до повітряного зазору:

$$F_M \approx \Phi_g \cdot R_{M6} = \frac{\Phi_g}{\Lambda_{M6}}$$

Знаючи МРС контуру та магнітну провідність повітряного зазору, можна оцінити величину магнітного потоку, утвореного у зазорі:

$$\Phi_g \approx F_M \cdot \Lambda_{M6} = F_M \cdot \frac{\mu_0 \cdot S}{l_g} \quad (6.3)$$

6.2. Магнітні кола постійного струму

Стальний тороїд із розподіленою обмоткою і повітряним зазором. Розглянемо просте магнітне коло (рис. 6.3) – стальний тороїд з середньою довжиною S . Магнітопровід має повітряний зазор l_g . По всьому магнітопроводу намотана обмотка.

Якщо $l_{ct} \gg l_g$, що має місце у більшості електромагнітних систем, то потоками розсіювання можна знехтувати і для магнітного кола

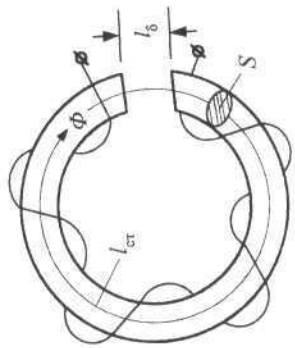


Рис. 6.3

використовується другий закон Кіргофа:

$$F_M = \Phi \cdot R_{ct} + \Phi \cdot R_g = \frac{\Phi \cdot l_{ct}}{\mu_a \cdot S} + \frac{\Phi \cdot l_g}{\mu_0 \cdot S} \quad (6.4)$$

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

Задача перша. Необхідно визначити МРС, для отримання у повітряному зазорі заданого магнітного потоку Φ . Матеріал магнітопроводу та його розміри задані.

Користуючись законом повного струму, маємо

$$F_M = H_{ct} \cdot l_{ct} + H_g \cdot l_g \quad (6.5)$$

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

$$F_M = H_{ct} \cdot l_{ct} + \frac{\Phi \cdot l_g}{\mu_0 \cdot S} \quad (6.6)$$

У цьому виразі Φ – задана величина; l_{ct} , l_g , S – відомі розміри сердечника. Невідомо тільки значення H_{ct} . Цю величину знаходимо наступним методом.

За заданою величиною потоку Φ і перерізом S визначаємо необхідну індукцію в сталі: $B_{ct} = \frac{\Phi}{S}$. Далі,

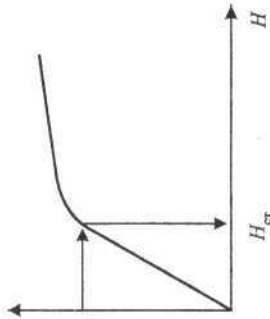


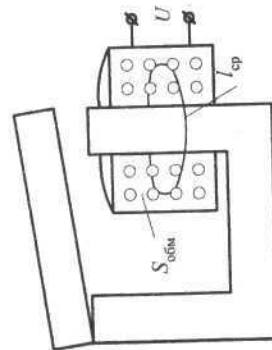
Рис. 6.4

користуючись кривою намагнічування для заданого матеріалу осердя (рис. 6.4),

визначаємо напруженість магнітного поля у сердечнику H_{ct} . Отже, у виразі (6.6) відомі всі величини для визначення необхідної МРС.

Задача друга (зворотна першій). Треба визначити магнітний потік Φ у зазорі, якщо відома МРС котушки: $F_M = I \cdot w$, розміри і матеріал магнітного кола. Цю задачу потрібно вирішувати методом послідовного наближення та графоаналітичним методом, використовуючи криву намагнічування конкретної магнітної системи. Остання будується за допомогою знайомої кривої намагнічування матеріалу $B_{ct} = f(H_{ct})$ та заданої довжини Приклади розв'язання подібних задач можна знайти у праці [13].

Розрахунок обмотки електромагніту постійного струму.
 Даними для розрахунку обмотки електромагніту постійного струму є потрібна чи необхідна МРС. Температура обмотки не повинна перевищувати допустиму. В результаті розрахунку повинні бути отримані: діаметр проводу вибраної марки d ; кількість витків w ; опір котушки R .



Якщо розраховується обмотка *напруги*, то необхідно задатися ще й напругою живлення U .

Оскільки $R = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{l_{\text{сп}} \cdot w}{q}$, де

q – переріз проводу; $l_{\text{сп}}$ – середня довжина витка обмотки (рис. 6.5).

$$\text{Масмо } F_M = I \cdot w = \frac{U \cdot w}{R} = \frac{U \cdot w}{\rho \cdot l_{\text{сп}}} = \frac{U \cdot q}{\rho \cdot l_{\text{сп}}} \quad (6.7)$$

Із виразу (6.7) видно, що при заданій ρ та $l_{\text{сп}}$ отримання МРС F_M залежить від напруги і перерізу провідника.

Якщо при заданій напрузі і середній довжині витка потрібно отримати велику МРС F_M , то треба збільшити переріз проводу, при цьому обмотка буде мати меншу кількість витків та довжину, таким чином зменшиться її опір, що приводить до збільшення крізь неї струму та МРС.

Отримавши переріз проводу q , з асортименту, який випускається промисловістю, вибирається найближчий більший стандартний діаметр, що задовольняє цьому перерізу.

Число витків при заданому перерізі обмотки $S_{\text{обм}}$ (рис. 6.5) визначається за виразом

$$w = \frac{S_{\text{обм}}}{q} \cdot f_M,$$

де f_M – коефіцієнт заповнення обмотки по міді [14].

Сила тяги електромагніту постійного струму. У рівномірному магнітному полі у повітряному зазорі ненасиченої магнітної системи сила тяги, що розвивається електромагнітом, може бути розрахована за формулою:

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

де B_{δ} – індукція в зазорі; Φ_{δ} – магнітний потік у зазорі; S – площа зазору; μ_0 – магнітна стала.

У звичайних конструкціях електромагнітів магнітний потік у зазорі Φ_{δ} залежить від довжини зазору l_{δ} (6.3):

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

Інакше кажучи, сила тяги електромагніту зворотно пропорційна квадрату величини зазору. Тому спочатку, коли зазор максимальний, сила тяги невелика. При наближенні якоря до сердечника сила тяги $P_{\text{ем}}$ збільшується. Залежність $P_{\text{ем}} = f(l_{\delta})$ при $I = \text{const}$ називають *статичною тяговою характеристикою електромагніту*.

Для магнітної системи, зображеної на рис. 6.6,а (така конструкція називається *клатанною*), тягова характеристика буде падаючою (рис. 6.6,б). Для цієї системи електромагнітна сила може бути розрахована за виразом:

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

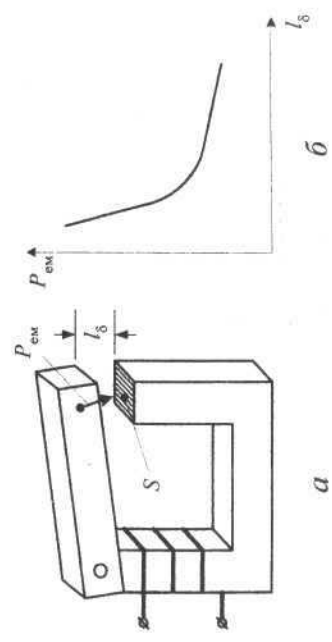


Рис. 6.6

6.3. Магнітні кола змінного струму

Вивчаючи магнітні кола змінного струму, треба мати на увазі важливі відмінності їх від магнітних ланцюгів постійного струму.

По-перше, при змінному магнітному потоці у магнітопроводі з'являються втрати енергії на гістерезис та вихрові струми (див. п. 3.2), тому тільки частина струму, що тече по котушці, є намагнічуваним, а частина струму йде на покриття названих втрат. Для зменшення цих втрат магнітопровід роблять шихтованим.

По-друге, напруга мережі U , підведена до обмотки, врівноважується активним та реактивним падінням напруги:

$$U^2 = (I \cdot R)^2 + (I \cdot X)^2, \quad (6.8)$$

де I та U – діючі значення струму й напруги в мережі. На постійному струмі і в статичному режимі прикладена напруга врівноважується тільки активним падінням напруги $U = I \cdot R$.

Для обмотки, яка має феромагнітне осердя, активний опір, як правило, значно менше реактивного: $R \ll X$ ($X = \omega L$), тому першим доданком у виразі (6.8) можна знехтувати. Тоді:

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

де f – частота змінного струму; w – кількість витків; Φ_m – амплітуда магнітного потоку.

Отже, магнітний потік у зазорі дорівнює:

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

При $U = \text{const}$ потік Φ_m майже сталий (не залежить від довжини зазору l_δ). Це пояснюється тим, що зі зростанням довжини зазору зменшується індуктивний опір котушки, що приводить до підвищення струму в обмотці і зростанню магнітотривної сили F_M , оскільки $U = \text{const}$. Але зі зростанням зазору збільшується і магнітний опір R_M .

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

Розрахунок обмотки електромагніту змінного струму.
Початковими даними для розрахунку обмотки є потрібні амплітуди МРС F_m та магнітного потоку Φ_m при заданій напрузі мережі U .

Для мостової магнітної системи (рис. 6.7) сила тяги в два рази менше ніж у клапанній (повний зазор удвічі більший).

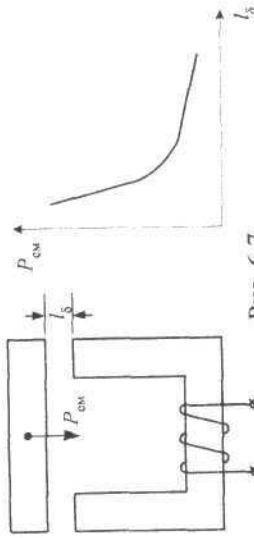


Рис. 6.7

Для броньової магнітної системи (соленоїд) сила тяги при втягуванні якоря спочатку зростає, а потім зменшується (рис. 6.8).

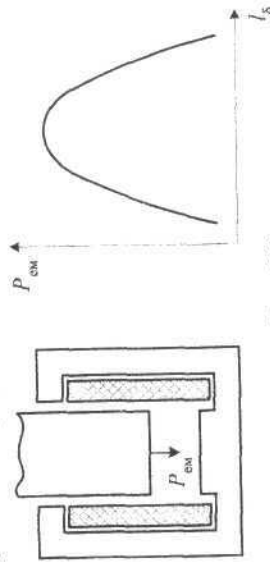


Рис. 6.8

Клапанні та мостові магнітні системи знаходять використання при малому ході якоря (до десяти міліметрів). Броньові системи використовуються при ході якоря до ста міліметрів.

При обертальному русі якоря використовують систему, зображену на рис. 6.9.

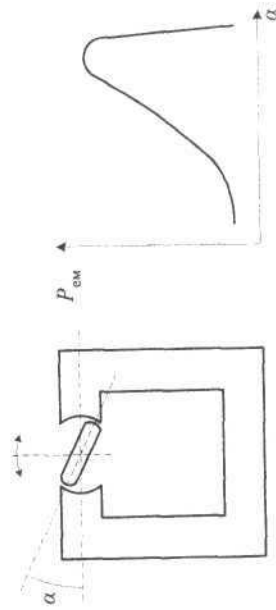


Рис. 6.9

На початку параграфа вже вказувалось, що напруга мережі прикладена до обмотки змінного струму, врівноважується активним та реактивним падінням напруги:

$$U^2 = (I \cdot R)^2 + (4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m)^2 \quad (6.9)$$

У цьому рівнянні три невідомі величини: струм в обмотці I , активний опір обмотки R , кількість витків w . Тому одразу задача не розв'язується. Її можна розв'язати методом послідовних наближень.

У першому наближенні активним падінням напруги можна знехтувати. Якщо на початку розрахунків прийняти $R = 0$, тоді $U = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m$ та можна знайти число витків для отримання потрібного магнітного потоку Φ_m :

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

Знайдене число витків необхідно трошки зменшити, оскільки ми знехтували активним падінням напруги. Звичайно розрахункове значення $w_{роз} = (0,7 \div 0,8)w$.

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

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

Далі задається щільність струму j та визначається необхідний переріз проводу $S_{пр} = I / j$. Рекомендується наступна щільність струму:

- 2 ... 4 А/мм² – для тривалого ввімкнення обмотки;
- 5 ... 12 А/мм² – для повторно-короткотривалого режиму;
- 13 ... 30 А/мм² – для короткотривалого режиму.

Отриманий переріз округляють до стандартного.

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

$$R = \frac{\rho \cdot l_{ср} \cdot w_{роз}}{S_{пр}}$$

Отже, ми маємо всі величини для підстановки у формулу (6.9). Якщо після підстановки права та ліва частини рівняння відрізняються більш, ніж на 10%, то необхідно змінити число витків для отримання врівноваженого результату.

У кінці розрахунку виконується перевірка обмотки на нагрівання. При цьому необхідно урахувати додатковий нагрів магнітопроводу за рахунок втрат від вихрових струмів та гістерезису.

Сила тяги електромагніту змінного струму. У електромагнітах постійного струму при фіксованому положенні якоря магнітний потік Φ постійний у часі, оскільки по обмотці протікає постійний струм.

У електромагнітах змінного струму по обмотці протікає струм, що змінюється за знайомим синусоїдальним законом: $i = I_m \cdot \sin \omega \cdot t$. Також змінюється і магнітний потік у зазорі Φ_s : $\Phi_s = \Phi_m \cdot \sin \omega \cdot t$.

Сила тяги електромагніту змінного струму також, як і електромагніту постійного струму, визначається за формулою Максвелла:

$$P_{ем} = \frac{(\Phi_m \cdot \sin \omega \cdot t)^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{\Phi_m^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S} \sin^2 \omega \cdot t = P_m \cdot \sin^2 \omega \cdot t, \quad (6.10)$$

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

Використовуючи знайоме з тригонометрії співвідношення $\sin^2 \omega \cdot t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2 \cdot \omega \cdot t)$, вираз (6.10) можна записати:

$$P_{ем} = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t}{2} = P_{ср} - P_{ср} \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t, \quad (6.11)$$

де $P_{ср}$ – середнє значення сили тяги за період (рис 6.10).

З виразу (6.11) масмо три важливих висновки.

По-перше, електромагнітна сила змінюється від нуля до максимуму і ніколи не буває негативною, електромагніт завжди тільки притягує якір зі змінною силою і ніколи його не відштовхує.

По-друге, електромагнітна сила змінюється з подвійною частотою електротоку (рис. 6.10).

По-третє, при інших рівних умовах середнє значення електромагнітної сили $P_{сп}$, діючої на якорі у електромагніті змінного струму, у два рази менше ніж у електромагніті постійного струму. Тому ефективність використання феромагнітних матеріалів при змінному струмі у два рази менша, ніж при постійному струмі.

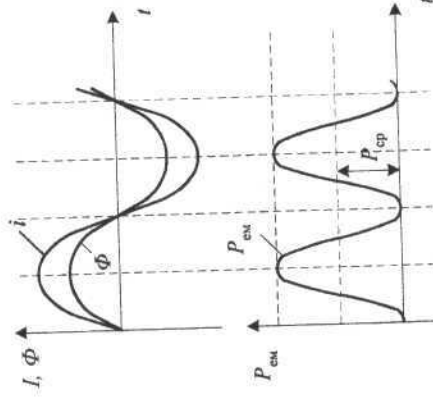


Рис. 6.10

Якщо якорі електромагніту має зворотну пружину I (рис. 6.11), то на нього діє одночасно дві сили: перша – електромагнітна сила $P_{ем}$, яка притягує якорі до магнітпроводу, змінюючись від 0 до P_m з подвійною частотою; друга – механічна сила зворотної пружини $I P_{пр}$, що тягне якорі назад.

Коли сила $P_{ем} > P_{пр}$ (ділянка від А до В), якорі буде притягнутим. На ділянці від В до С – $P_{ем} < P_{пр}$, якорі почне відтягуватися пружиною і вібрувати. Вібрація якоря не бажана в зв'язку з трьома причинами:

1) вібрація призводить до швидкого зносу магнітної системи у місці кріплення якоря;

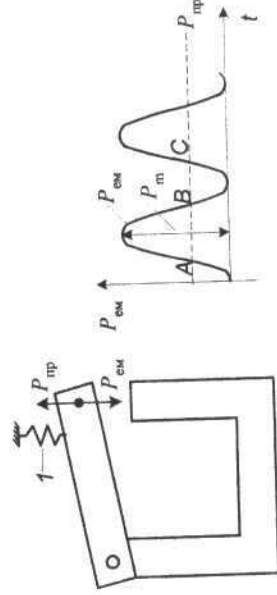


Рис. 6.11

2) вібрація передається на контакти, що призводить до швидкого їх зносу (підгорання із-за іскор);
3) вібрація супроводжується шумом.

Для нейтралізації вібрації в електромагнітах змінного струму було знайдено просте рішення – короткозамкнений виток (рис. 6.12).

У магнітопроводі I роблять паз 2 і у нього вкладають короткозамкнений виток з міді чи лагуни. Виток охоплює 70 – 80% перерізу магнітопроводу. Ідея полягає в тому, що в зазорі створюється два магнітних потоки Φ'_1 та Φ'_2 , зміщених за фазою один відносно другого і рознесених у просторі.

Принцип роботи витка наступний (рис. 6.12, 6.13). Загальний магнітний потік Φ у повітряному зазорі поділяється на два потоки: Φ_1 – пронизує не обхвачену витком частину магнітопроводу, Φ_2 – обхвачену. При цьому у витку індукуються ЕРС і виникає струм i_k короткозамкненого витка. Цей струм збуджує магнітний потік Φ_k , який замикається через короткозамкнений виток та ліву частину магнітопроводу. В лівій частині зазору потік Φ_k напрямлений згідно з Φ_1 , тому результуюча потік дорівнює $\Phi'_1 = \Phi_1 + \Phi_k$; у правій частині – зустрічно, тому $\Phi'_2 = \Phi_2 - \Phi_k$. Отже, між двома результуючими потоками Φ'_1 та Φ'_2 являється кут ψ .

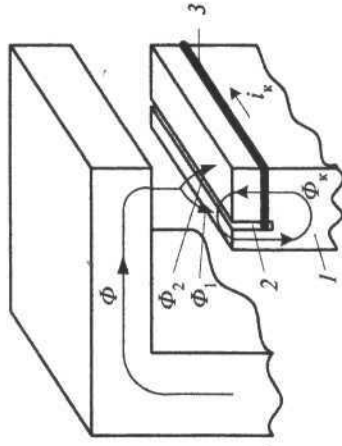


Рис. 6.12

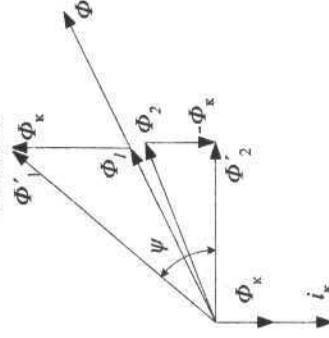


Рис. 6.13

Кожний із потоків ініціює свою силу тяги $P_{ем1}$ та $P_{ем2}$, зсунутих у часі (рис. 6.14). Завдяки цьому зсуву, результуюча сила

P_{em} пульсує менше і ніколи не зменшується до нуля. Можна також так підібрати кут ψ ($50 - 80^\circ$) та силу пружини $P_{пр}$, щоб P_{em} була завжди більше ніж $P_{пр}$, тим самим знищити вібрацію.

Порівняння тягових характеристик електромагнітів постійного та змінного струмів.
Електромагніти постійного струму забезпечують велику силу тяги при менших зазорах (при малому ході якоря), оскільки сила тяги зворотно пропорційна квадрату величини зазору. В електромагнітах змінного струму середнє значення сили тяги у два рази менше, ніж у електромагнітів постійного струму при тій самій магнітній індукції, але зі зростанням зазору магнітний потік зменшується не сильно. Тому електромагніти змінного струму краще працюють при відносно великому ході якоря.

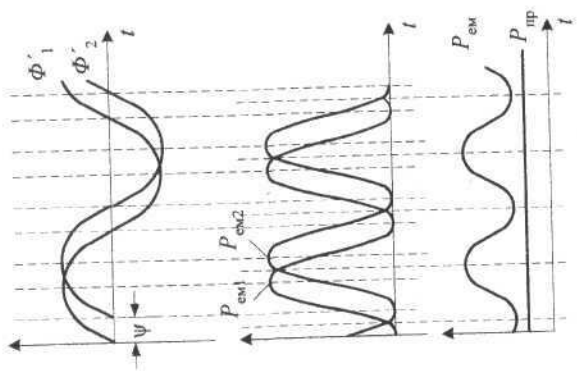


Рис. 6.14

Величина та її позначення	Одиниці СИ	
	найменування	розмірність
Довжина l	метр	м
Маса G, g	кілограм	кг
Час t	секунда	с
Електричний струм I, i	ампер	А
Термодинамічна температура T	кельвін	К
Кількість речовини N	моль	моль
Сила світла J	кандела	кд
Площиний кут α	радіан	рад
Тілесний кут ω	стерадіан	ср
Ємність електрична C	фарада	Ф (Кл/В)
Індукція магнітна B	тесла	Тл (Вб/м ²)
Індукція особлива L	генрі	Гн (Вб/А)
Індукція взаємна M	генрі	Гн (Вб/А)
Кількість електриці Q	кулон	Кл (А·с)
Напряга електрична U	вольт	В
Напруженість електричного поля E	вольт на метр	В/м
Напруженість магнітного поля H	ампер на метр	А/м
Період коливання T	секунда	с
Потужність активна P	ватт	Вт (Дж/с)
Потужність реактивна Q	вар	вар
Потужність повна S	вольт-ампер	В·А
Густина струму j	ампер на м ²	А/м ²
Провідність електрична G, g	сименс	См (1/Ом)
Провідність удільна γ	сименс на метр	См/м
Проникність діелектрична: абсолютна ϵ_a відносна ϵ	фарад на метр	Ф/м
Проникність магнітна: абсолютна μ_a відносна μ	генрі на метр	Гн/м
Стала електрична ϵ_0	фарад на метр	Ф/м
Стала магнітна μ_0	генрі на метр	Гн/м
Потенціал електричний V, ϕ	вольт	В

Закінчення додатка

Величина та її позначення	Одиниці СИ	
	найменування	розмірність
Потік магнітний Φ	вебер	Вб (Вб·с)
Потокозчелення Ψ	вебер	Вб
Робота, енергія, кількість теплоти W	джоуль	Дж (Вт·с)
Сила електрорушійна E	вольт	В
Сила магніторушійна F_m	ампер	А
Опір електричне R, r	ом	Ом
Опір питомий ρ	ом·метр	Ом·м
Частота кутова електрична або магнітна ω, Ω	радіан в секунду	рад/с
Частота коливань електрична або магнітна f	герц	Гц (1/с)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортировки в части воздействия климатических факторов внешней среды.
2. ГОСТ 14254-96. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками. Код IP.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
4. ГОСТ 721-77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.
5. ГОСТ 6827-76. Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов.
6. ГОСТ 8024-84. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Норма нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.
7. Чухин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.

8. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
9. Электротехнический справочник. Том 1. / Под общей ред. П. Г. Грудинского и др. – М.: Энергия, 1974. – 776 с.
10. Козлов В. Д. Электрооборудование трансформаторных подстанций аэропортов. – М.: Воздуш. трансп., 1993. – 248 с.
11. Рожкова Л.Д. Козулин В.С. Электрические станции и подстанции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
12. ГОСТ 14312-79. Контакты электрические. Термины и определения.
13. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 508 с.
14. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1971. – 324 с.
15. Теория электрических аппаратов. / Под ред. Г. Н. Александрова. – М.: Высш. шк., 1985. – 312 с.
16. Русско-украинский толковый словарь по электроэнергетике. / Под ред. С. Я. Меженного. – К.: НИИЭнергетики, 1998. – 174 с.
17. Справочник-каталог. Часть 1. Электротехнические изделия общепромышленного исполнения до 1000 В. / Под ред. В.Д. Козлова и Е. И. Удода. – К.: «Варта», 1995. – 136 с.
18. Справочник-каталог. Часть 2. Электротехнические изделия общепромышленного исполнения выше 1000 В. / Под ред. В.Д. Козлова и С. Я. Меженного. – К.: НАУ, 1998. – 172 с.

Навчальне видання

КОЗЛОВ Віктор Дмитрович

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Модуль 1

Загальні питання електричних апаратів

Посібник

В авторській редакції

Підп. до друку 23. 09. 05. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. фарбовідб. 24. Ум. друк. арк. 5,35. Обл.-вид. арк. 5,75.
Тираж 100 пр. Замовлення № 210-1. Вид. № 14/1.

Видавництво НАУ
03680. Київ-680, проспект Космонавта Комарова, 1.
Свідчення про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05. 07. 2002.