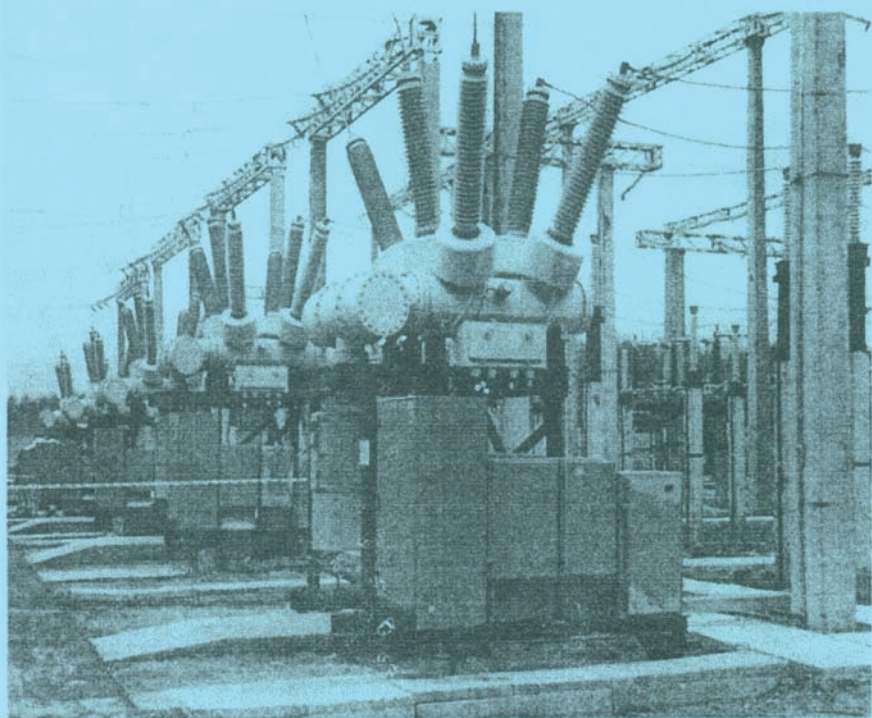


Л 40

Лежнюк П.Д., Зелінський В.Ц.

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ



Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

П.Д. Лежнюк, В. Ц. Зелінський

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів енергетичних спеціальностей. Протокол № 9 від 23 березня 2006 р.

Вінниця ВНТУ 2007

Рецензенти:

Журахівський А.В., доктор технічних наук, професор

Кутін В.М., доктор технічних наук, професор

Рогальський Б.С., доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Лежнюк П.Д., Зелінський В. Ц.

Л 49 **Електричні апарати. Фізичні основи електричних апаратів.**

Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 184 с.

Дана книга є першою частиною серії навчальних посібників, які видаються згідно з програмою дисципліни "Електричні апарати" для студентів електроенергетичних спеціальностей вузів. В першій частині розглядаються фізичні явища, основні співвідношення і залежності, що використовуються при вивченні принципів дії електротехнічних пристроїв розподільних установок. Наведені основні терміни та означення, класифікація електричних апаратів, основи розрахунку електродинамічних сил та теплові розрахунки. Проаналізовані фізичні процеси теорії запалювання та згасання електричної дуги, розглянуті основні методи та способи її гасіння в електричних апаратах. Посібник призначений для студентів спеціальностей "Електричні станції", "Електричні системи та мережі", "Електротехнічні системи електроспоживання" і може бути корисний для студентів інших енергетичних спеціальностей.

УДК 621.313

ВСТУП	5
1 Основні означення та терміни	7
1.1 Класифікація електричних апаратів.....	7
1.2 Основні вимоги	9
1.3 Основні матеріали, які застосовують в апаратобудуванні	11
Контрольні запитання.....	11
2 Електродинамічні сили в струмоведучих частинах електричних апаратів	12
2.1 Основні означення.....	12
2.2 Методи розрахунку електродинамічних сил.....	13
2.3 Електродинамічні сили між паралельними провідниками.....	15
2.4 Електродинамічні сили між взаємно перпендикулярними провідниками.....	20
2.5 Електродинамічні сили в кільцевому витку і між кільцевими витками.....	21
2.6 Електродинамічні сили в провідниках змінного перерізу.....	23
2.7 Сили взаємодії між провідниками із струмом та феромагнітною масою.....	24
2.8 Електродинамічні сили при змінному струмі	26
2.9 Механічний резонанс	31
Контрольні запитання.....	32
3 Основи теплових розрахунків струмоведучих частин електричних апаратів	33
3.1 Втрати в деталях електричних апаратів	30
3.2 Віддача теплоти нагрітим тілом	37
3.3 Нагрівання і охолодження однорідного провідника у часі при тривалому режимі роботи.....	40
3.4 Нагрівання та охолодження однорідного провідника при короткочасному навантаженні.....	46
3.5 Нагрівання і охолодження однорідного провідника при повторно-короткочасному навантаженні.....	47
3.6 Нагрівання однорідного провідника при короткому замиканні.....	48
3.7 Нагрівання провідника змінного перерізу.....	50
3.8 Нагрівання котушок.....	51
3.9 Допустима температура нагріву частин апаратів. Термічна стійкість.....	54
3.10 Рідинне (водяне) охолодження в електричних апаратах.....	54
Контрольні запитання.....	59
4 Основи теорії горіння та згасання електричної дуги	60
4.1 Процеси у дуговому проміжку.....	60
4.2 Умови гасіння та вольт-амперні характеристики дуги	67
4.3 Умови гасіння дуги постійного струму.....	70
4.4 Опір та потужність дуги. Енергія, що виділяється в дузі.....	73

4.5 Особливості горіння та згасання дуги змінного струму.....	78
4.6 Відновлення електричної міцності дугового проміжку. Відновлювальна напруга.....	81
4.7 Особливості гасіння дуги змінного струму підвищеної частоти.....	89
Контрольні запитання.....	90
5 Способи гасіння електричної дуги в електричних апаратах.....	91
5.1 Характеристика способів гасіння електричної дуги.....	91
5.1.1 Загальні положення.....	91
5.1.2 Основні способи гасіння дуги в комутаційних апаратах напругою до 1 кВ.....	93
5.1.3 Основні способи гасіння дуги в комутаційних апаратах напругою вище 1 кВ.....	94
5.2 Гасіння дуги в поздовжніх щілинах.....	95
5.3 Гасіння відкритої дуги в магнітному полі.....	104
5.4 Способи збудження магнітного поля дугогасіння.....	107
5.5 Полум'я дуги та боротьба з ним.....	109
5.6 Допустима частота вимикань апаратів з закритими камерами.....	111
5.7 Гасіння дуги високим тиском.....	113
5.8 Гасіння електричної дуги в маслі.....	115
5.9 Гасіння електричної дуги повітряним дуттям.....	120
5.10 Гасіння електричної дуги в елегазовому середовищі.....	123
5.11 Гасіння електричної дуги в вакуумі.....	131
5.12 Гасіння електричної дуги в дугогасній ґратці.....	135
5.13 Бездугова комутація кіл змінного струму.....	140
5.14 Потоки плазми та гасіння електричної дуги.....	131
Контрольні запитання.....	142
6 Електричні контакти.....	145
6.1 Основні означення.....	145
6.2 Перехідний опір контакту.....	147
6.3 Температура площини контактування.....	150
6.4 Рідинне охолодження контактних систем.....	152
6.5 Конструкції контактів.....	153
6.6 Параметри контактних конструкцій.....	164
6.7 Зношування контактів.....	165
6.8 Дрижання контактів та способи боротьби з ним.....	170
6.9 Робота контактних систем в умовах коротких замикань.....	174
6.10 Способи компенсації електродинамічних сил.....	176
6.11 Матеріали електричних контактів та контактних з'єднань.....	177
Контрольні запитання.....	181
Література.....	182

ВСТУП

Електроенергетика в нових ринкових умовах переходить на якісно новий рівень свого розвитку, відбуваються значні структурні перетворення у всіх галузях промисловості та енергетики, ґрунтовні зміни у відповідності до нових економічних умов. В першу чергу це стосується розвитку нових енергозберігаючих технологій при виробництві, розподілі та споживанні електричної енергії, скороченні всіх видів витрат і підвищенні рівня використання вторинних енергетичних ресурсів, вдосконаленні та модернізації технологічного енергетичного обладнання електричних станцій та підстанцій.

Одним з ключових напрямків в реалізації енергозберігаючих технологій, які визначають ефективність роботи як електроенергетики на всіх етапах виробництва, розподілу та споживання електричної енергії, так і інших галузей виробництва є розвиток галузі електроапаратобудування. Виникає необхідність виробництва не просто більшої кількості електричних апаратів, а апаратів, які забезпечили б більш ефективну роботу електроустановок як в галузях промисловості, так і в побутовій сфері.

Актуальною є модернізація існуючих та розробка нових типів електричних апаратів на основі сучасних технологій, підвищення рівня напруг та струмів, зменшення габаритів та маси, підвищення їх надійності, ресурсу та швидкодії. Ці вимоги ставляться тому, що переважна більшість електричних апаратів повинні досить ефективно працювати в сучасних автоматизованих та автоматичних системах керування складними технологічними процесами, агрегатами, машинами та обладнанням на електричних станціях, в електроенергетичних системах та мережах.

Забезпечення цих вимог щодо електричних апаратів є можливим тільки на основі глибоких теоретичних знань про фізику процесів та явищ, які протікають в струмоведучих частинах та самих електричних апаратах при різних режимах їх роботи в електроустановках та вміння застосовувати ці знання, закони електротехніки та нові теоретичні розробки як при проектуванні та виробництві, так і при їх повсякденній експлуатації в електроустановках та енергосистемах.

Окрім підвищених вимог до якості електричних апаратів, поліпшення їх технічних характеристик та культури експлуатації виникають також підвищені вимоги і до підготовки кваліфікованих інженерно-технічних кадрів та науковців, які будуть основною рушійною силою прогресу та ефективного функціонування електроенергетики країни в цілому.

В першому розділі навчального посібника викладено основні терміни та означення, подано класифікацію електричних апаратів та

визначено основні вимоги, які ставляться до них, перераховано основні матеріали, що застосовуються в апаратобудуванні.

Другий розділ присвячено основам теорії розрахунку електродинамічних сил в струмоведучих частинах електричних апаратів та провідників. Розглянуто причини виникнення електродинамічних сил між паралельними та перпендикулярними провідниками, в котушці та особливості їх виникнення при змінному та постійному струмі. Показано причини виникнення механічного резонансу та способи боротьби з ним.

В третьому розділі розглянуто теоретичні основи теплових розрахунків в струмоведучих частинах електричних апаратів та провідників. Проаналізовано фізичні причини нагрівання струмоведучих елементів електричних апаратів, способи тепловіддачі та особливості нагрівання і охолодження провідників в нормальних та аварійних режимах роботи, а також при рідинному охолодженні апаратів.

Четвертий розділ присвячено фізичним основам теорії запалювання, горіння та згасання електричної дуги. Розглянуто основні фізичні причини виникнення електричної дуги при комутації електричних кіл, сформовано основні умови гасіння дуги змінного та постійного струму, фізичні особливості відновлення електричної міцності дугового проміжку.

В п'ятому розділі розглянуто основні способи та методи гасіння електричної дуги в комутаційних електричних апаратах, конструкції дугогасильних пристроїв, фізичні особливості гасіння дуги в маслі, елегазі, вакуумі, магнітним і повітряним дуттям та в дугогасильних решітках. Охарактеризовано причини виникнення та способи боротьби з полум'ям та плазмою в процесі горіння дуги.

Шостий розділ присвячено класифікації та основам формування параметрів контактних конструкцій, режимам їх роботи в різних умовах експлуатації, причинам виникнення та способам боротьби із зношуванням контактів. Значну увагу приділено конструкціям контактних з'єднань, особливостям їх застосування в різного роду комутаційних електричних апаратах та характеристикам матеріалів, які застосовуються для контактних з'єднань.

1 ОСНОВНІ ОЗНАЧЕННЯ ТА ТЕРМІНИ

1.1 Класифікація електричних апаратів

Електричним апаратом називається електротехнічний пристрій, призначений для керування електричними і неелектричними об'єктами, а також для захисту цих об'єктів при ненормальних та аварійних режимах роботи електричних мереж та систем.

Означення "електричний апарат" охоплює дуже широке коло побутових і промислових електричних пристроїв. В даному посібнику розглянуто в основному електричні апарати, що обслуговують електроустановки з виробництва (електростанції), перетворення і розподілу (електричні мережі, системи та підстанції), споживання (електричний привод, побутові споживачі та ін.) електричної енергії в різних галузях виробництва та побуту.

Різноманітність конструкцій електричних апаратів, принципів їх роботи, виконуваних ними функцій в електричних мережах та поєднання в одному апараті, як правило, декількох функцій не дозволяють класифікувати їх за однією якоюсь ознакою. Доцільним є класифікація електричних апаратів за їх призначенням, тобто за основною функцією, яку виконує електричний апарат. У цьому випадку вони можуть бути розподілені на такі основні групи.

Комутаційні, основне призначення яких – вмикати та вимикати електричні кола. До цієї групи відносяться роз'єднувачі, вимикачі високої і низької напруги (автоматичні і неавтоматичні), рубильники, перемикачі тощо.

Захисні, основне призначення яких – захист електричних кіл від струмів короткого замикання і перевантажень. До цієї групи відносяться запобіжники високої і низької напруги, автоматичні вимикачі.

Обмежувальні, призначення яких – обмеження в електричних колах струмів короткого замикання (реактори) і перенапруг (розрядники).

Пускорегулювальні, призначені для керування електроприводами та іншими промисловими споживачами електроенергії. До цієї групи відносяться контактори, магнітні пускачі, силові і командні контролери, реостати.

Контролювальні, основне призначення яких – контроль заданих електричних і неелектричних параметрів в електричних колах. До цієї групи відносяться реле та датчики.

Регулювальні, призначені для автоматичної безупинної стабілізації або регулювання заданого параметра електричного кола або системи.

Вимірювальні, призначені для ізоляції кіл первинної комутації (головного кола струму) від кіл вимірювальних і захисних приладів. Вони пе-

ретворюють вимірювану величину (струм або напругу) до стандартного значення, зручного для вимірювань. До них відносяться вимірювальні трансформатори струму та напруги, а також ємнісні подільники напруги.

Класифікація апаратів по областях застосування більш умовна. Апарати, що обслуговують електричні системи, мережі та системи електропостачання, об'єднують в групу апаратів *розподільних пристроїв* низької і високої напруги.

Велику групу апаратів, які застосовують для схем автоматичного керування електроприводами і для автоматизації виробничих процесів, зручно об'єднати в групу *апаратів керування*. Але одні і ті ж апарати можуть знаходитись і серед апаратів розподільних пристроїв, і серед апаратів керування, наприклад, рубильники, пакетні вимикачі, контактори, автоматичні повітряні вимикачі, вимірювальні трансформатори струму, реле тощо.

В межах однієї групи або типу електричні апарати розрізняються за основними технічними параметрами:

а) *за напругою* – низької напруги (до 660 В включно) та високої напруги (від 1000 В і вище);

б) *за родом струму* – постійного струму, змінного струму промислової частоти та змінного струму підвищеної частоти;

в) *за родом захисту від навколишнього середовища* – у виконаннях: відкритому, захищеному, брызкозахищеному, водозахищеному, герметичному, вибухобезпечному і ряду інших;

г) *за способом дії* – електромагнітні, магнітоелектричні, індукційні, теплові, пневматичні і ін.;

д) *за рядом інших факторів* – швидкодії, надійності, способу гасіння дуги, точності тощо.

За принципом роботи електричні апарати можуть бути розподілені на дві основні групи – *контактні і безконтактні*.

Контактні мають рухомі контактні частини і вплив на кероване електричне коло здійснюється шляхом замикання або розмикання цих контактів.

Безконтактні апарати не мають контактів комування. Ці апарати здійснюють керування шляхом зміни своїх електричних параметрів (індуктивність, ємність, опір).

Контактні апарати можуть виконуватись як в *автоматичному*, так і в *неавтоматичному* виконанні.

Автоматичні – це апарати, що починають діяти від заданого режиму роботи електричного кола, технологічного обладнання або машини.

Неавтоматичні – це апарати, дія яких залежить тільки від волі оператора. Керують ними дистанційно або безпосередньо (рукою, ногою).

1.2 Основні вимоги

Вимоги, які висуваються до електричних апаратів, надзвичайно різні і залежать від призначення, умов застосування та експлуатації, ресурсу та надійності апарата. Крім специфічних вимог, що відносяться до даного апарата, всі електричні апарати повинні задовольняти деякі загальні вимоги.

1. **Термічна стійкість** – кожен електричний апарат при роботі обігрівається певним робочим струмом, при цьому в струмоведучих частинах виділяється певна кількість теплоти і апарат нагрівається. Температура при тривалому режимі експлуатації не повинна перевищувати деякого певного значення, встановленого для даного апарата і його деталей.

2. **Електродинамічна стійкість** – у електричному колі може виникнути ненормальний (перевантаження) або аварійний (коротке замикання) режим роботи. Струм, що протікає по апараті в цих режимах, дуже помітно (у 50 і більш разів) може перевищувати номінальний або робочий струм. Апарат піддається протягом певного часу надмірно великим термічним і електродинамічним впливам струму, але він повинен витримувати ці впливи без будь-яких деформацій та пошкоджень, які перешкождали б подальшій його роботі.

3. **Стійкість до перенапруг** – кожен електричний апарат працює в електричному колі певної напруги, у якому за певних умов можливі також і перенапруги. Однак електрична ізоляція апарата повинна забезпечувати надійну його роботу при заданих значеннях перенапруг.

4. **Комутаційна стійкість** – контактні системи електричних апаратів повинні вмикати і вимикати всі струми робочих режимів, а деякі апарати – також і струми аварійних режимів, що можуть виникнути в керованих ними колах та ланцюгах.

5. До кожного електричного апарата висуваються різні вимоги щодо надійності, точності роботи, швидкодії та ряд інших.

6. Кожен електричний апарат повинен мати якомога менші габарити, масу і вартість, бути простим за будовою, зручним в обслуговуванні та технологічним у виробництві.

Для захисту персоналу від дотику до струмопровідних або рухомих частин електричних апаратів і захисту апарата від попадання в нього чужорідних тіл встановлюються спеціальні оболонки. Згідно з ГОСТом захисні властивості оболонки позначаються буквами IP і двома цифрами. Перша цифра означає ступінь захисту від дотику персоналу до небезпечних деталей апарата, друга характеризує захист від попадання всередину апарата води.

Нижче наводяться захисні властивості оболонок деяких виконань електричних апаратів за ГОСТ.

IP00. *Відкрите виконання.* Захист персоналу від дотику до струмопровідних або рухомих частин відсутній. Чужорідні тіла можуть попадати всередину апарата.

IP20. *Захищене виконання.* Оболонка таких апаратів запобігає випадковому дотику до струмопровідних або рухомих частин, або від проникнення всередину апарата сторонніх предметів. Оболонка не повинна давати можливості дотику до деталей апарата металічним щупом (діаметр 12 мм, довжина 80 мм), кулька діаметром 12 мм не повинна проскакувати всередину апарата.

IP22. В додаток до властивостей IP20 оболонка захищає від негативної дії крапель рідини, які падають на стінку оболонки нахилену до вертикалі під кутом в межах 15°.

IP23. В додаток до властивостей виконання IP20 оболонка захищає від дощу, який падає під кутом 60° до вертикалі.

IP40. Оболонка апарата захищає від попадання всередину апарата мілких предметів (діаметр більше 1мм).

IP42. В додаток до властивостей виконання IP40 оболонка захищає від негативної дії бризків рідини, яка падає під любым кутом до стінок оболонки.

IP50. Оболонка апарата захищає від шкідливої дії пилу (допускається попадання всередину невеликої кількості талькової пудри, яка не порушує нормального режиму роботи апарату).

IP60. *Пилозахисне виконання.* Оболонка повністю запобігає попаданню пилу (талькової пудри).

IP65. *Пилозахисне виконання.* В додаток до властивостей виконання IP60 оболонка захищає від дії струменя води, що падає під любым кутом до її поверхні.

IP66. *Пиловодонепроникне виконання.* В додаток до властивостей виконання IP60 оболонка забезпечує повний захист від попадання води всередину апарата при дії струменя під любым кутом до поверхні (морське виконання).

IP67. *Герметичне виконання.* В додаток до основних властивостей оболонки IP60 оболонка забезпечує повну герметичність апарата.

Класифікація апаратів за принципом дії, родом струму, часом дії, конструктивними особливостями подається в розділах, присвячених їх будові і характеристикам.

1.3 Основні матеріали, які застосовують в апаратобудуванні

Матеріали, які застосовують в апаратобудуванні, можуть бути розподілені на такі групи:

- а) *провідникові* – головним чином мідь, сталь, алюміній, латунь і ін.;
 - б) *магнітні* – різного роду сталі та їх сплави для магнітопроводів;
 - в) *ізоляційні* – для електричної ізоляції струмоведучих частин між собою та від заземлених частин;
 - г) *дугостійкі ізоляційні* – азбест, кераміка, пластмаси – для виготовлення дугогасильних камер;
 - д) *сплави, що мають високий питомий опір* – для виготовлення різних резисторів;
 - е) *контактні* – срібло, мідь, металокераміка – для забезпечення високої електричної зносостійкості контактів;
 - ж) *біметали* – застосовуються в автоматичних апаратах, що використовують лінійне подовження різних металів при нагріванні струмом;
 - и) *конструкційні* – метали, пластмаси, ізоляційні матеріали – для надання апаратам і їх деталям тих або інших форм та для виготовлення деталей, переважним призначенням яких є передавання і сприйняття механічних зусиль.
- Технічний прогрес в апаратобудівництві значною мірою залежить від якості перерахованих матеріалів.

Контрольні запитання

1. Дайте означення терміну “ електричний апарат ” ?
2. Як класифікуються електричні апарати за призначенням ?
3. Як класифікуються електричні апарати за принципом роботи ?
4. На які групи розподіляються електричні апарати за ступенем захисту від навколишнього середовища ?
5. Які групи електричних апаратів розрізняють за способом їх дії ?
6. Сформулюйте основні вимоги, які ставляться до електричних апаратів ?
7. Назвіть ступені захисту від дотику персоналу до небезпечних деталей апаратів.
8. Назвіть основні матеріали, які застосовують для виготовлення контактів.
9. Що таке “біметал” і яким чином він застосовується в конструкціях електричних апаратів ?

2 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В СТРУМОВЕДУЧИХ ЧАСТИНАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

2.1 Основні означення

Прямолінійний провідник довжиною l (рис. 2.1, а), по якому протікає струм i та який розташований в магнітному полі з індукцією B , зазнає дії механічної сили

$$F = ilB \sin \beta, \quad (2.1)$$

де β - кут між напрямком вектора магнітної індукції і напрямком струму в провіднику [1].

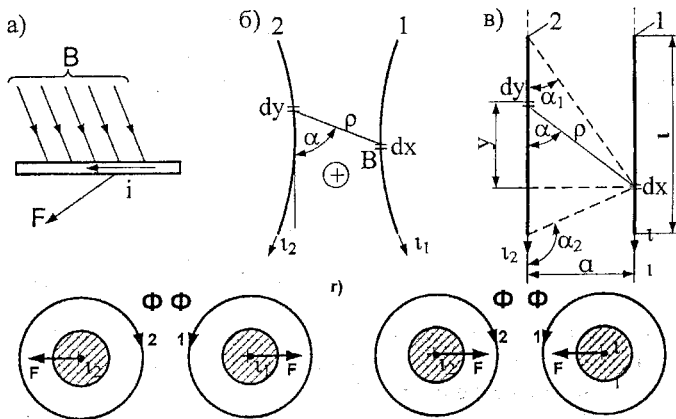


Рисунок 2.1 – До визначення електродинамічної сили між двома провідниками

Для системи з декількох обтічних струмом провідників можна завжди уявити, що будь-який із цих провідників розташований у магнітному полі, яке створено струмами інших провідників і відповідним чином взаємодіє із цим полем (тобто між провідниками охопленими загальним магнітним потоком) завжди виникають механічні сили. Ці сили називаються *електродинамічними*. Аналогічні сили виникають між провідником, що обтікається струмом, і феромагнітною масою. Напрямок дії сили визначається "правилом лівої руки".

Напрямок дії сили може бути також визначений з такого загального положення: сили, що діють у контурі зі струмом, прагнуть змінити конфі-

гурацію контуру таким чином, щоб охоплений контуром магнітний потік збільшився.

Дуже зручним для визначення напрямку дії електродинамічної сили є метод, запропонований академіком В. Ф. Миткевичем [3], заснований на уявленні бічного розпору і тяжіння магнітних ліній. Цей метод базується на тому, що рисують і накладають одна на одну картини магнітних полів, створених струмом кожного з провідників. Завдяки бічному розпору магнітних силових ліній сила, що діє на провідник, спрямована в бік, де поле ослаблене (рис. 2.1, з).

При нормальних експлуатаційних умовах електродинамічні сили, як правило, малі і не викликають яких-небудь деформацій та поломок деталей в апаратах. Однак при коротких замиканнях ці сили досягають дуже великих значень і можуть викликати деформацію або руйнацію не тільки окремих деталей, але і всього апарата. Ця обставина вимагає проведення розрахунку апарата (або окремих його вузлів) на електродинамічну стійкість, тобто на спроможність витримати без ушкоджень проходження найбільшого можливого в експлуатаційних умовах (або заданого) струму короткого замикання. Такий розрахунок необхідний для того, щоб одержати мінімальні габарити електричних апаратів, намагаючись розташувати струмоведучі частини якнайближче між собою.

2.2 Методи розрахунку електродинамічних сил

Розрахунок електродинамічних сил ведеться звичайно або на підставі закону взаємодії провідника зі струмом і магнітним полем (*перший метод*), або за зміною запасу магнітної енергії системи (*другий метод*).

Розглянемо перший метод – *розрахунок електродинамічних сил на підставі закону взаємодії провідника зі струмом і магнітним полем*. Візьmemo систему з двох довільно розташованих провідників 1 і 2 (рис. 2.1, б), по яких протікають струми i_1 і i_2 . Напруженість магнітного поля, яке створюється елементом dy провідника 2 в місці розташування елемента dx провідника 1, буде

$$dH_{dx} = \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha, \quad (2.2)$$

де α - кут між вектором ρ і напрямком струму на елементі dy .

Весь провідник 2 створить у місці розташування елемент dx напруженість магнітного поля

$$H_{dx} = \int_{l_2} dH_{dx} = \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha, \quad (2.3)$$

Елементарна сила, що діє на елемент dx , обтічний струмом i_1 ,

$$dF_{dx} = \frac{\mu_0}{4\pi} H_{dx} i_1 dx \sin \beta = i_1 dx \sin \beta \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{i_2} \frac{dy}{\rho^2} \sin \alpha, \quad (2.4)$$

де β - кут між вектором магнітної індукції та вектором струму i_1 .

Повну силу F взаємодії між провідниками 1 та 2 отримуємо після інтегрування dF_{dx} по всій довжині провідника 1:

$$F = \int_{l_1} dF_{dx} = \int_{l_1} i_1 dx \sin \beta \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{i_2} \frac{dy}{\rho^2} \sin \alpha, \quad (2.5)$$

Вважаючи струми i_1 та i_2 незмінними по всій довжині провідника, рівняння (2.5) можна переписати у вигляді добутку членів:

$$F = \left(i_1 i_2 \frac{\mu_0}{4\pi} \right) \left(\int_{l_1} dx \sin \beta \int_{i_2} \frac{dy}{\rho^2} \sin \alpha \right). \quad (2.6)$$

Перший член цього виразу залежить тільки від значення струмів. Другий член залежить тільки від взаємного геометричного розташування провідників і являє собою безрозмірну величину. Ця величина часто називається коефіцієнтом контуру, що позначається літерою c . Тоді

$$F = c i_1 i_2 \frac{\mu_0}{4\pi}, \quad (2.7)$$

тобто сила взаємодії між двома провідниками, по яких протікають струми i_1 та i_2 , пропорційна добутку цих струмів (квадрату струму при $i_1 = i_2$) і залежить від геометрії провідників.

Підставивши в (2.7) значення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ і розраховуючи силу в ньютонках отримуємо

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 c. \quad (2.8)$$

Другий метод - розрахунок електродинамічних сил за зміною запасу електромагнітної енергії контурів. Електромагнітне поле навколо провідників і контурів зі струмом має певний запас енергії. Електромагнітна енергія контуру, який обтікає струм i ,

$$W = L_1 \frac{i_1^2}{2}. \quad (2.9)$$

Електромагнітна енергія двох контурів, обтічних струмами i_1 та i_2 ,

$$W = L_1 \frac{i_1^2}{2} + L_2 \frac{i_2^2}{2} + M i_1 i_2, \quad (2.10)$$

де L_1 та L_2 - індуктивності контурів; M - взаємна індуктивність контурів.

Всяка деформація контуру (зміна розташування окремих його елементів або частин) або зміна взаєморозташування контурів призводять до зміни запасу електромагнітної енергії. При цьому робота сил у будь-якій системі дорівнює зміні запасу енергії цієї системи:

$$F dx = dW, \quad (2.11)$$

тут dW – зміна запасу енергії системи при деформації системи в напрямку x під дією сили F .

На вказаному законі (2.11) і заснований другий метод визначення електродинамічних сил у контурах. Електродинамічна сила в контурі або між контурами, що діє в напрямку x , дорівнює швидкості зміни запасу енергії системи при деформації її в тому ж напрямку:

$$F_x = \frac{dW}{dx}. \quad (2.12)$$

Відповідно до вищезазначеного, електродинамічна сила в контурі, по якому протікає струм i , визначається

$$F_x = \frac{i^2 dL}{2 dx}, \quad (2.13)$$

а електродинамічна сила між двома взаємозалежними контурами зі струмами i_1 та i_2 буде

$$F_x = \frac{i_1^2 dL_1}{2 dx} + \frac{i_2^2 dL_2}{2 dx} + i_1 i_2 \frac{dM}{dx}. \quad (2.14)$$

2.3 Електродинамічні сили між паралельними провідниками

Візьмемо два рівнобіжних круглих провідники 1 і 2 (рис. 2.1, в), розташованих в одній площині на відстані a один від одного й обтічних струмами i_1 та i_2 . Розрахунок будемо робити першим методом. Проробивши всі операції аналогічно (2.2)-(2.8) і враховуючи те, що $\sin \beta = 1$, та оскільки провідники розташовані в одній площині, і вектор індукції в даному випадку перпендикулярний цій площині ($\beta = 90^\circ$), отримаємо

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 c, \quad (2.15)$$

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

Подамо підінтегральні змінні другого інтегралу через одну з змінних, тобто через кут α . Приймемо за початок координат елемент dy і напрямок струмів, що збігається з позитивним напрямком координат. У цьому випадку поточна координата

$$y = a \operatorname{ctg} \alpha; \quad \rho = \frac{a}{\sin \alpha}; \quad dy = -a \frac{d\alpha}{\sin^2 \alpha}. \quad (2.16)$$

Підставивши отримані вирази в (2.15) і вважаючи, що провідник 2 має довжину від $-\infty$ до $+\infty$, чому відповідає зміна кута α від π до 0 , отримаємо

$$c = \int_4^0 dx \int_{\pi}^{\sin \alpha} \frac{da}{a} = \frac{2}{a} \int dx. \quad (2.17)$$

Ймовірно, якщо провідник 1 (L_1) так само як і провідник 2, має довжину в межах $\pm\infty$ то c буде прямувати до нескінченності. Якщо провідник 1 має скінченну довжину, то

$$c = \frac{2l}{a}. \quad (2.18)$$

Відповідно до (2.8) сила, яка діє на провідник 1, дорівнює

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}. \quad (2.19)$$

Рівняння (2.19) визначає силу взаємодії між двома провідниками, один з яких нескінченно довгий, а другий має скінченну довжину l і розташований симетрично відносно першого. У випадку, коли обидва провідники будуть мати скінченну довжину

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right). \quad (2.20)$$

В рівнянні (2.20) множник перед дужкою – це сила взаємодії між двома провідниками, один із яких має нескінченну довжину. Позначимо цю силу через F_{∞} . Коефіцієнт, поданий у дужках, являє собою величину меншу одиниці. При $a/l < 0.2$ (на практиці, як правило, $a/l \ll 0.2$) величиною $(a/l)^2$ стосовно одиниці можна знехтувати. Тоді рівняння (2.20) буде мати вигляд

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left(1 - \frac{a}{l} \right) = F_{\infty} \left(1 - \frac{a}{l} \right). \quad (2.21)$$

На практиці дуже часто провідники мають різну довжину. Силу взаємодії між такими провідниками можна знайти наведеним вище способом, проводячи інтегрування кожного разу в відповідних межах. Це завдання можна вирішити, використовуючи рівняння (2.20).

На рис.2.2 наведено два провідники різної довжини l_1 і l_2 , які розташовані один від одного на відстані a і по них протікають струми i_1 і i_2 . Збільшимо довжину провідника l_2 на відрізок l_3 до довжини, яка дорівнює l_1 . Провідник l_1 можна також подати у вигляді двох відрізків l_2 і l_3 . Тоді можемо написати, що сила взаємодії між провідниками довжиною l_1 та l_2 ($F_{l_1 l_2}$) дорівнює сумі сил взаємодії між двома провідниками l_2 однакової довжини (F_{l_2}) і двома провідниками довжиною l_2 і l_3 ($F_{l_2} F_{l_3}$):

$$F_{l_1 l_2} = F_{l_2} + F_{l_2 l_3}. \quad (2.22)$$

Аналогічно можна записати

$$F_{l_1 l_2} = F_{l_1 l_1} - F_{l_2 l_3} - F_{l_3 l_3}. \quad (2.23)$$

Додавши рівняння (2.22) та (2.23), отримаємо

$$2F_{l_2} = F_{l_1} + F_{l_2} - F_{l_3}. \quad (2.24)$$

Таким чином, сила взаємодії між двома провідниками різної довжини складається з сили взаємодії провідників однакової довжини:

$$F_{l_2} = \frac{1}{2}(F_{l_1} + F_{l_2} - F_{l_3}). \quad (2.25)$$

При цьому для l_1 і l_2 розміри задані, а $l_3 = l_1 - l_2$.

Сила взаємодії між паралельними круглими провідниками може бути також визначена за зміною запасу електромагнітної енергії, тобто - другим методом.

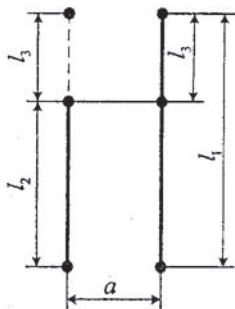


Рисунок 2.2 - До визначення електродинамічної сили між паралельними провідниками різної довжини

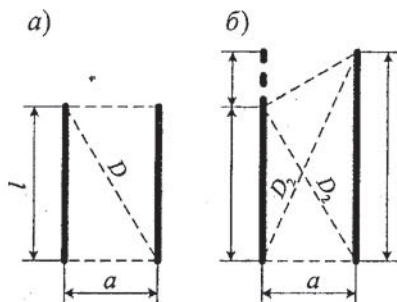


Рисунок 2.3 - До визначення електродинамічної сили графічним методом

Перший випадок - обидва провідники належать до однієї системи. Індуктивність системи з двох рівнобіжних провідників радіусом r і довжиною l , що знаходяться на відстані a , за умови, що l не дорівнює a , визначається за формулою

$$L = 4l \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right). \quad (2.26)$$

Нас цікавить сила, що діє в напрямку a . Відповідно до (2.13) визначимо

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{da}, \quad (2.27)$$

а з рівняння (2.26)

$$\frac{dL}{da} = \frac{4l}{a}.$$

Тоді

$$F = 10^{-7} \frac{1}{2} i_1^2 \frac{4l}{a} = 10^{-7} i_1^2 \frac{2l}{a}. \quad (2.28)$$

З рівняння (2.28) видно, що результат ми отримали такий же, як при визначенні цих сил першим методом.

Другий випадок – провідники належать до двох різних систем, при цьому самі системи зазнають деформації. Взаємна індуктивність між двома провідниками довжиною l , які знаходяться один від одного на відстані a за умови, що l не дорівнює a , визначається за формулою

$$M = 2l \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right). \quad (2.29)$$

Згідно з (2.14) сила, що діє у напрямку a ,

$$F = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{da} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{da} + i_1 i_2 \frac{dM}{da},$$

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

та оскільки самі системи зазнають деформації, а з (2.29) визначаємо

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

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}. \quad (2.30)$$

тоді

Тобто результат, як і треба було очікувати, вийшов такий же як і у першому випадку.

Для двох паралельних провідників, розташованих з будь-яким зсувом, існує зручна для розрахунків коефіцієнта контуру формула, заснована на геометричній інтерпретації приведених вище рівнянь.

Величина $\sqrt{l^2 - a^2}$ – це довжина діагоналі D (рис. 2.3, а) прямокутника зі сторонами l та a . Отже, згідно з (2.20) для провідників рівної довжини

$$c = \frac{2(D-a)}{a}, \quad (2.31,а)$$

а згідно з (2.25) для провідників різної довжини (рис. 2.3, б)

$$c = 2 \left(\frac{D_1 - a}{a} + \frac{D_2 - a}{a} - \frac{s - a}{a} \right), \quad (2.31,б)$$

тобто коефіцієнт контуру дорівнює різниці сумарних діагоналей і бокових сторін чотирикутника (прямокутника, трапеції, паралелограма), побудованого на даних відрізках провідників, поділених на його висоту.

Аналогічну, але більш складну інтерпретацію можна отримати і для перпендикулярно розташованих провідників.

Приведені вище рівняння справедливі для провідників круглого та трубчатого перерізів, для яких можна вважати, що струм протікає по їх геометричній осі. Для провідників прямокутного перерізу (шин) треба вводити поправочний коефіцієнт – коефіцієнт форми k_ϕ , який залежить від розмірів провідників та відстаней між ними (рис. 2.4):

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} k_\phi. \quad (2.32)$$

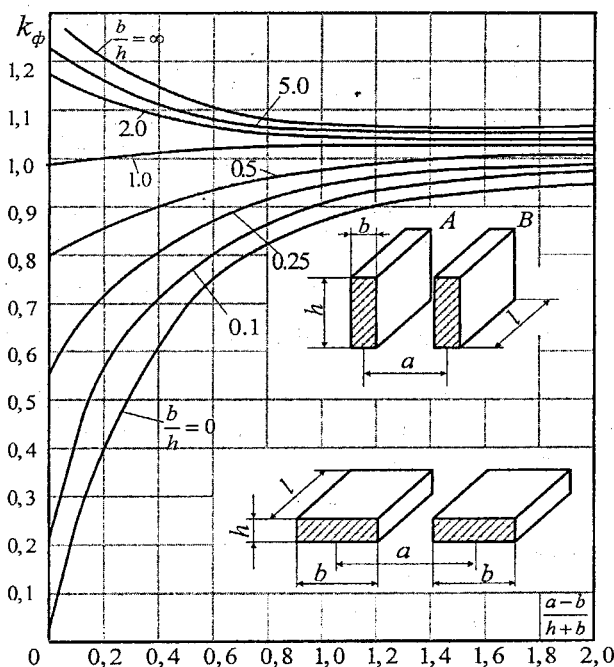


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта форми k_ϕ від розмірів провідника

2.4 Електродинамічні сили між взаємно перпендикулярними провідниками

На рис. 2.5 наведені форми перпендикулярно розташованих провідників, які часто зустрічаються в апаратах, наприклад, в рубильниках, місткових контактних системах та в багатьох інших апаратах та вузлах.

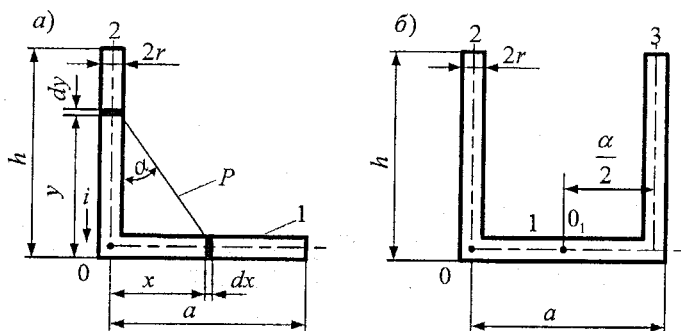


Рисунок 2.5 – До визначення електродинамічної сили між перпендикулярно розташованими провідниками

Виконуючи розрахунки, аналогічні попереднім (перший метод), отримаємо такі вирази для сил, які діють на провідник 1: за рис. 2.5, а при $h \rightarrow \infty$

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}; \quad (2.33)$$

та при h - скінченному

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{\frac{a}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}}, \quad (2.34)$$

за рис. 2.5, б сила буде відповідно в два рази більшою:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}, \quad (2.35)$$

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{\frac{a}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}}. \quad (2.36)$$

Моменти відносно точки O , які діють на провідник l ($h \rightarrow \infty$) за рис. 2.5, а

$$M_0 = 10^{-7} i^2 (a-r), \quad (2.37)$$

$$M_{01} = 10^{-7} i^2 a \left(\ln \frac{a-r}{r} + r \right), \quad (2.38)$$

Момент відносно точки O_1 , діючий на половину провідника l (рис.2.5,б),

$$M_{01} = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2} \left(\ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} \right). \quad (2.39)$$

2.5 Електродинамічні сили в кільцевому витку і між кільцевими витками

В кільцевому витку (рис. 2.6, а) зі струмом i виникають радіальні сили f_R , які намагаються збільшити його периметр, тобто розірвати виток. Якщо вважати, що переріз провідника не деформується, то згідно з (2.13) загальна радіальна сила, яка діє на виток, буде

$$F'_R = \frac{i^2 dL}{2 dR}. \quad (2.40)$$

На одиницю довжини витка припадає сила

$$f_r = \frac{F'_R}{2\pi R}, \quad (2.41)$$

Для того щоб знайти силу f_R , яка намагається розірвати виток, необхідно проінтегрувати проекції радіальних сил, які діють на чверть витка.

На елемент окружності витка $Rd\phi$ діє сила $f_r R d\phi \cos \phi$, проекція якої на вісь x дорівнює $f_r R d\phi \cos \phi$. Звідки

$$F_R = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_r R \cos \phi d\phi = f_r R = \frac{i^2}{2 \cdot 2\pi} \frac{dL}{dR}, \quad (2.42)$$

Для витка круглого перерізу

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right) \quad (2.43)$$

і

$$F_R = \frac{i^2}{2 \cdot 2\pi} 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right). \quad (2.44)$$

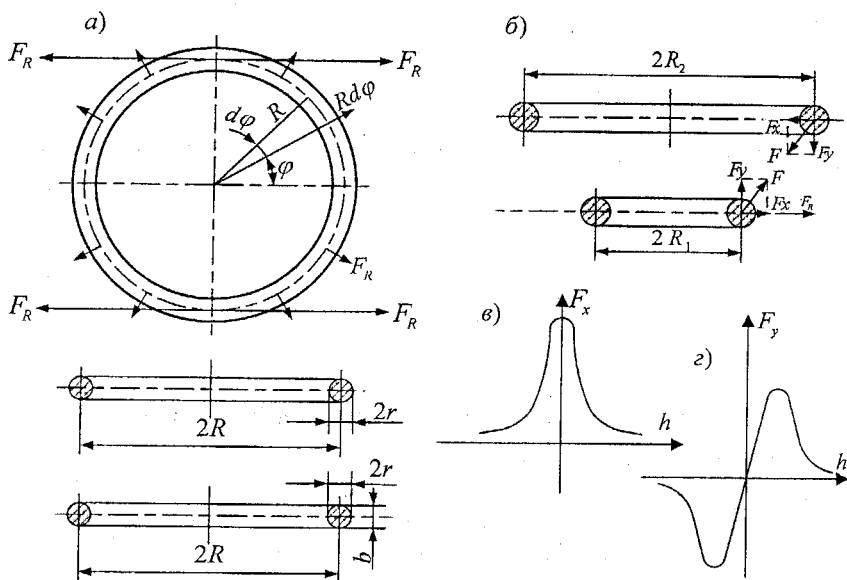


Рисунок 2.6 - Електродинамічні сили в кільцевих витках

Аналогічно для витка прямокутного перерізу

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,5 \right), \quad (2.45)$$

$$F_R = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} + 0,5 \right). \quad (2.46)$$

Наведені формули для електродинамічних сил застосовуються не тільки до одного витка, але і до обмоток із будь-якою кількістю витків n , що займають даний переріз. У цьому випадку за значення струму варто приймати сумарне значення струмів усіх витків $i = ni_0$. В котушках апаратів, крім сил, що діють всередині кожного витка, будуть існувати електродинамічні сили між витками. Між витками (рис. 2.6, б), якщо вважати що струми в них спрямовані однаково, виникає сила тяжіння F . Силу F можна подати як результуючу двох складових, сили F_y , що намагається притягти витки один до одного, та сили F_x , яка намагається один із витків (при однаково спрямованих струмах – виток з меншим діаметром) розтягти, а інший виток (у даному випадку виток більшого діаметра) – стиснути. Таким чином, в одному із витків сила F_x буде додаватися із силою F_R , а в іншому – відніматися із неї.

Значення складової сили взаємодії між двома витками визначаються рівняннями:

$$F_y \approx 10^{-7} \cdot 4\pi i_1 i_2 \frac{R_1 h}{h^2 + c^2}; \quad (2.47)$$

$$F_x \approx 10^{-7} \cdot 4\pi i_1 i_2 \frac{R_1 c}{h^2 + c^2}, \quad (2.48)$$

де $c = R_2 - R_1$; $R_2 > R_1$.

Графіки залежності сил F_x та F_y від відстані між витками подані на рис. 2.6, в і г.

2.6 Електродинамічні сили в провідниках змінного перерізу

В провіднику сили взаємодії окремих ліній струму з власним магнітним полем провідника спрямовані перпендикулярно лініям струму. При незмінному перерізі провідника всі лінії струму рівнобіжні і сили не мають складової осі (в циліндричному провіднику вони спрямовані по радіусу, $F = F_r$, на рис. 2.7).

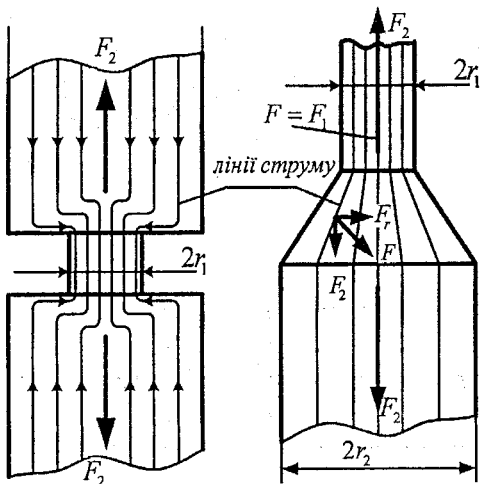


Рисунок 2.7 – Електродинамічні сили в провідниках змінного перерізу

При зміні перерізу провідника лінії струму скривлюються і, крім поперечної F_r , з'являється поздовжня складова F_l , що намагається розірвати місце переходу вздовж осі провідника. Ця сила завжди спрямована у бік більшого перерізу і дорівнює

$$F_l = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.49)$$

Формула є дійсною для будь-якого переходу.

2.7 Сили взаємодії між провідником із струмом та ферромагнітною масою

Поблизу ферромагнітної маси магнітне поле навколо провідника зі струмом (рис. 2.8, а) спотворюється. Магнітні силові лінії прагнуть замкнутися по масі і виникають сили, що намагаються притягти провідник до цієї маси.

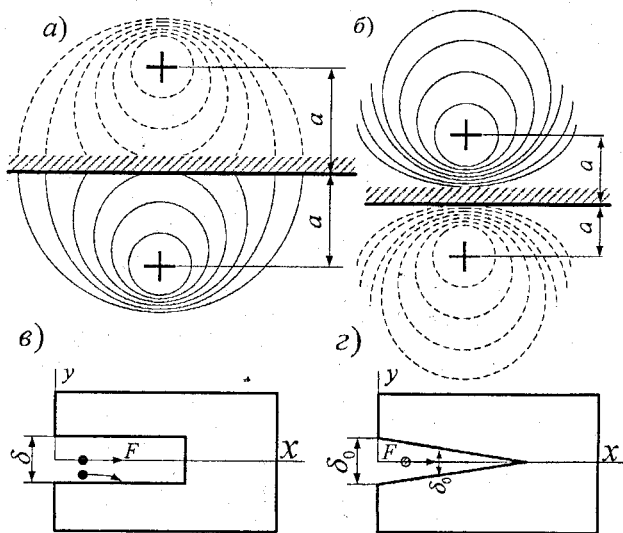


Рисунок 2.8 – До визначення сил взаємодії між провідниками із струмом та ферромагнітною масою

Значення сили тяжіння може бути визначене з таких міркувань. Замінімо дію ферромагнітної маси другим провідником із струмом того ж напрямку, розташованим на такій же відстані від межі розділення середовищ. Картина поля при цьому не порушиться, тому що одночасно з подвоєнням довжини магнітної силової лінії подвоїлася і магніторушійна сила ($2i$ замість i). Тобто така заміна цілком правомірна.

Сили взаємодії між двома рівнобіжними провідниками підраховуються за рівнянням (2.19) і (2.20). Тільки в даному випадку замість відстані a треба брати $2a$, тобто

$$F = 10^{-7} i^2 \frac{l}{a}. \quad (2.50)$$

Слід при цьому пам'ятати, що наведені міркування цілком справедливі при нескінченно великій проникності магнітних силових ліній у ферромагнітній масі відносно їхньої проникності в повітрі. Фактично з урахуванням магнітного опору маси і при наявності насичення сили будуть де-що меншими.

Якщо провідник із струмом знаходиться всередині ферромагнітної маси (рис. 2.8, б), то ті ж сили будуть відштовхувати його від межі розподілу. Картина поля, а отже, і сила взаємодії будуть такими, як ніби-то за межами ферромагнітної маси на такій же відстані був розташований провідник із таким же струмом, але зворотного напрямку.

Значення сили визначається тим же рівнянням (2.50).

Аналогічна сила тяжіння буде діяти на провідник, розташований у щілині постійного (рис. 2.8, в) або змінного (рис. 2.8, г) перерізу в ферромагнітній масі.

Без урахування насичення

$$F = 0,63 \cdot 10^{-6} i^2 \frac{l}{\delta_x}, \quad (2.51)$$

де l – довжина щілини (перпендикулярно кресленню); δ і δ_x – ширина щілини в місті розташування провідника.

В щілині постійного перерізу сила, яка зтягує провідник всередину, буде незмінною, а в щілині змінного перерізу – змінною. Ця сила буде збільшуватися у міру звуження щілини.

Рівняння (2.51) відноситься до випадку, коли провідник розташований в щілині симетрично та коли сила діє по осі x . Але, якщо провідник зміститься з осі симетрії, то сили тяжіння його до протилежних стінок (по осі y) будуть нерівними. Провідник буде рухатись по деякій кривій, яка показана штриховою лінією, та його положення буде визначатися двома змінними складовими сил F_x та F_y .

2.8 Електродинамічні сили при змінному струмі

Наведені вище рівняння справедливі і для змінного струму, але у цьому випадку сила буде мати змінне значення.

Розглянемо сили, що діють між рівнобіжними провідниками, спочатку при однофазному струмі, а згодом – при трифазному (рис. 2.9).

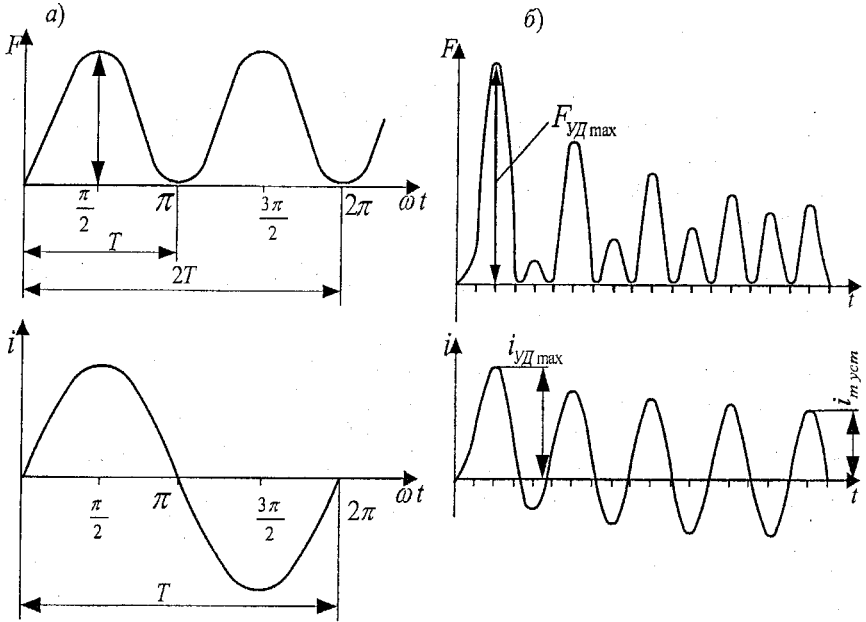


Рисунок 2.9 – Електродинамічні сили при однофазному змінному струмі

Відповідно до (2.15) електродинамічні сили визначаються

$$f = c_1 i^2.$$

При змінному струмі $i = I_m \sin \omega t$ сила

$$f = c_1 I_m^2 \sin^2 \omega t = c_1 I_m^2 \frac{1 - \cos \omega t}{2}. \quad (2.52)$$

тобто, сила змінюється з частотою, удвічі більшою від частоти струму (рис. 2.9, а).

Силу f можна подати як суму двох складових: постійної з $c_1 I_m^2 / 2$ і змінної $c_1 I_m^2 \cos 2\omega t / 2$, що змінюється з подвійною частотою за законом косинуса. Оскільки косинус кута приймає значення від $+1$ до -1 , то сила буде змінюватися від $f = c_1 I_m^2$ до $f = 0$, не змінюючи свого знаку.

В розрахунках враховується максимальне значення сили

$$F_m = c_1 I_m^2 = 2c_1 I^2. \quad (2.53)$$

З (2.53) видно, що при змінному однофазному струмі (діюче значення) максимальна величина електродинамічної сили при тій же величині струму виявляється в два рази більшою, ніж при постійному.

При змінному струмі варто мати на увазі ще одну дуже важливу обставину. На відміну від постійного струму, при якому максимальне значення струму короткого замикання дорівнює його ustalеному значенню $I_{уст}$ (якщо знехтувати зміною опору за рахунок нагріву), при змінному струмі в залежності від моменту короткого замикання перша амплітуда ударного струму $I_{уд.мах}$, може істотно перевищувати амплітудне значення ustalеного струму короткого замикання (рис. 2.9, б):

$$i_{уд.мах} = (1 - 1,8) I_m = k_{уд} I_m = k_{уд} \sqrt{2} I. \quad (2.54)$$

Максимальне зусилля, на яке треба в такому випадку розраховувати пристрій, визначається

$$F_{уд.мах} = c_1 i_{уд.мах}^2 = c_1 (1,8\sqrt{2} I)^2 = c_1 6,48 I^2, \quad (2.55)$$

тобто, при однаковому значенні ustalеного струму короткого замикання, при змінному струмі електродинамічна сила може бути майже в 6,5 разів більшою, ніж при постійному струмі.

При трифазній мережі струми в фазах будуть зсунуті на 120° :

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t; \\ i_2 &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_3 &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Розглянемо випадок, коли провідники розташовані в одній площині (рис. 2.10, а). Провідник 1 буде взаємодіяти з провідниками 2 і 3. Нехай сила взаємодії між провідниками 1 і 2 при одиниці струму дорівнює F_{12} , а між провідниками 1 і 3. – F_{13} . Струми у фазах рівні за величиною. Тоді повна сила, що діє на провідник 1, визначиться з виразу

$$f_1 = F_{12}i_1i_2 + F_{13}i_1i_3 = 0,25[(F_{13} - F_{12})\sqrt{3}\sin 2\omega t - (F_{13} + F_{12})(1 - \cos 2\omega t)]2I^2. \quad (2.56)$$

На відміну від однофазного струму при трифазному струмі сила змінюється не тільки в часі, але і за знаком. При позитивному значенні складових $\sin 2\omega t$ та $\cos 2\omega t$ одержимо силу, що притягує провідник 1 до двох інших. При негативних значеннях $\sin 2\omega t$ та $\cos 2\omega t$ одержимо силу, що відштовхує провідник 1 від двох інших.

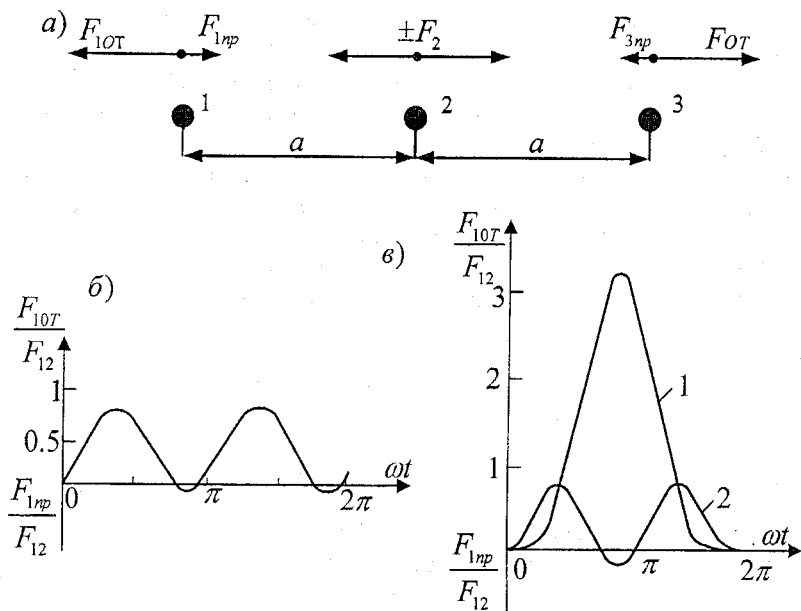


Рисунок 2.10 - Електродинамічні сили при трифазному змінному струмі (провідники розташовані в одній площині)

Провідники, звичайно, розташовуються на однаковій відстані один від одного. У такому випадку $F_{13} = 0.5F_{12}$ і тоді в сталому режимі (рис. 2.10, б) максимальна сила

$$F_{1np} = 0,055F_{12} \cdot 2I^2, \quad (2.57)$$

а максимальна сила відштовхування

$$F_{1om} = 0,805F_{12} \cdot 2I^2, \quad (2.58)$$

де $F_{12} = 10^{-7}c(1)^2 = c_1(1)^2$.

Сили, що діють на провідник 3, будуть такими ж, як і сили, що діють на провідник 1, але протилежними за напрямком. Зусилля F_2 , що діють на середній провідник, визначатимуться рівняннями, аналогічними попереднім.

Якщо прийняти силу взаємодії при одиниці струму між провідниками 2 і 3 рівній F_{23} , а між провідниками 2 і 1 – рівній $F_{21} = F_{12}$, то при однакових за величиною струмах і рівних відстанях між провідниками $F_{23} = F_{21} = F_{12}$, максимальна сила, що діє на середній провідник, визначиться з рівняння

$$F_2 = \pm 0,87 F_{12} \cdot 2I^2. \quad (2.59)$$

Таким чином, при розташуванні провідників в одній площині сила, що діє на середній провідник, виявляється більшою, ніж сила, що діє на крайні провідники.

З врахуванням перехідної складової, що виникає в момент короткого замикання, максимальні сили будуть більшими, ніж приведені вище. Максимальна відштовхувальна сила буде мати місце при короткому замиканні в момент $\varphi = -15^\circ$ і складе

$$F'_{1np\max} = 3,24 F_{12} \cdot 2I^2. \quad (2.60)$$

Притягувальна сила при $\varphi = -15^\circ$ буде близькою до нуля. Максимум притягувальної сили має місце при короткому замиканні в момент $\varphi = 75^\circ$:

$$F'_{1np\max} = 0,23 F_{12} \cdot 2I^2. \quad (2.61)$$

Значення відштовхувальної сили при $\varphi = 75^\circ$ складе $0,75 F_{12}$. Зміна сил у часі при $\varphi = -15^\circ$ (крива 1) і $\varphi = 75^\circ$ (крива 2) у перехідному режимі короткого замикання наведена на рис. 2.10, в.

Розглянемо ще один випадок, коли провідники трифазного кола розташовані правильним трикутником (рис. 2.11). Визначимо сили, що діють на провідник 1. Сила взаємодії між провідниками 1 і 2 (F_{12}) буде направлена по прямій I, а сила взаємодії між провідниками 1 і 3 (F_{13}) – по прямій II. Кожна із сил буде змінною в часі, а загальна сила (F_1) отримана шляхом геометричного додавання змінних за значенням сил F_{12} і F_{13} , буде змінною не тільки в часі, але і за напрямком.

Зміна отриманої сили F_1 за напрямком і за значенням може бути охарактеризовано вектором OA, кінець якого буде ковзати по колу, як це показано на рис. 2.11, а:

$$F_1 = \pm 0,87 F_{12} \cdot 2I^2 \sin 2\omega t. \quad (2.62)$$

Проекція сили на вісь x завжди спрямована в одну сторону. Знак \pm у рівнянні (2.62) означає, що для $2\omega t > 180^\circ$ варто брати знак мінус. Зміна сили в часі не пов'язана із зміною знаку.

На кожний із двох інших провідників діють такі ж сили, але з відповідним зсувом у часі і просторі.

З врахуванням ударного струму максимум сили отримаємо за умови, що $\varphi = 0$. Сила змінюється за законом

$$F_1 = \pm 2\sqrt{3}F_{12} \cdot 2I^2 \sin^3 \frac{\omega t}{2}. \quad (2.63)$$

Знак мінус варто брати для всіх негативних значень $\sin^2 \frac{\omega t}{2}$. Напрямок і значення сили для будь-якого моменту часу визначається вектором OA , що ковзає по кривій рис. 2.11,б і відкладений під кутом $\frac{\omega t}{2}$ до осі ординат.

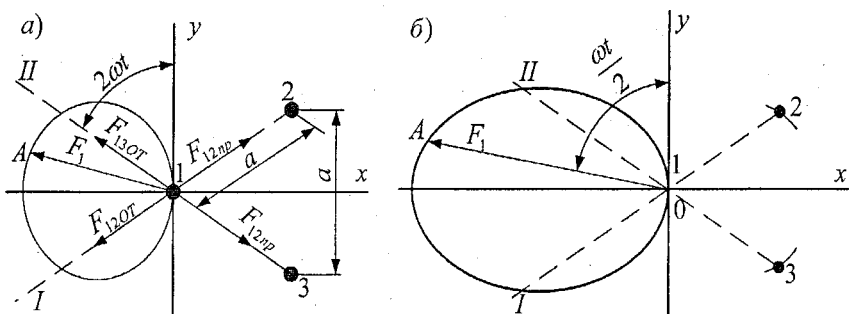


Рисунок 2.11 – Електродинамічні сили при трифазному змінному струмі
(провідники розташовані трикутником)

У трифазній мережі можуть мати місце однофазні, двофазні і трифазні короткі замикання, але тому що струмоведучі частини повинні протидіяти електродинамічним силам при будь-якому виді короткого замикання, то розрахунок треба вести на той вид короткого замикання, при якому сили набувають максимального значення.

При двофазному короткому замиканні електродинамічні сили будуть більшими, ніж при трифазному, якщо припустити, що ударний струм в обох випадках однаковий. Практично ударний струм при двофазному короткому замиканні менший, ніж при трифазному. Тому розрахунок струмів короткого замикання рекомендується вести завжди на випадок трифазного короткого замикання. Розрахунок ведеться на максимальне зусилля, яке буде мати місце при ударному струмі. Але з огляду на те, що величина сили має змінний характер і її максимум існує дуже короткий час, для визначення допустимих напруг у матеріалі беруть більші значення, ніж при постійно діючій силі.

2.9 Механічний резонанс

Всяка механічно пружна система має так звану власну частоту коливань. Якщо яка-небудь сила зрушить цю систему з рівноваги (деформує її яким-небудь чином не переходячи межі пружності), а потім перестане діяти, то система буде деякий час коливатися біля свого положення рівноваги. Частота цих коливань і називається *власною частотою коливань* системи. Швидкість їх затухання залежить від пружних властивостей, маси системи і її деталей, а також від сил тертя і не залежить від сили, що викликала коливання.

Якщо сила, що виводить механічну систему з рівноваги, буде змінюватися з частотою, рівною частоті власних коливань системи, то на деформацію одного періоду буде накладатися деформація наступного періоду і система буде розгойдуватися з амплітудою, що зростає, теоретично до нескінченності. Природно, що ніяка конструкція не може протистояти такій всезростаючій деформації і вона руйнується.

Збіг частоти власних коливань із частотою зміни електродинамічної сили називається *механічним резонансом*.

Повний резонанс спостерігається при точному збігу частоти коливань сили з частотою власних коливань конструкції і рівних позитивних і негативних амплітудах, частковий – при неповному збігу частот і нерівних амплітудах.

Для запобігання механічного резонансу необхідно, щоб частота власних коливань конструкції відрізнялася від частоти зміни електродинамічної сили. Краще, коли частота власних коливань лежить нижче частоти зміни сили. Вибір необхідної частоти власних коливань можна робити різними способами. Для шин, наприклад, цього можна домогтися шляхом зміни довжини вільного прогону.

Для підрахунку власної частоти коливань шин рекомендується формула

$$f = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{g}}, \quad (2.64)$$

де l – прогін між ізоляторами, $см$; E – модуль пружності, $Па$; J – момент інерції відносно осі, перпендикулярної напрямку вигину, $см^4$; g – вага одиниці довжини шини, $Н/см$; k – коефіцієнт, що залежить від характеру кріплення шин: $k = 112$ при жорсткому кріпленні шин і ізоляторів; $k = 78$ при вільному кріпленні на одній опорі і жорсткому – на іншій; $k = 49$ при шинах, що вільно лежать на опорах.

Контрольні запитання

1. Які сили називаються електродинамічними ?
2. Назвати методи розрахунку електродинамічних сил та їх відмінності між собою.
3. Особливості розрахунку електродинамічних сил за законом взаємодії провідника зі струмом і магнітним полем.
4. Особливості розрахунку електродинамічних сил за зміною запасу електромагнітної енергії контурів.
5. Визначити величину електродинамічних сил між паралельними провідниками.
6. Яким чином визначається сила взаємодії між паралельними провідниками різної довжини ?
7. Визначити величину електродинамічних сил між взаємоперпендикулярними провідниками.
8. Визначити величину електродинамічних сил в кільцевому витку.
9. Навести залежності коефіцієнта форми від розмірів провідника та відстані між ними.
10. У чому полягає відмінність при визначенні електродинамічних сил змінного та постійного струму ?
11. Особливості визначення електродинамічних сил трифазного змінного струму для провідників розташованих в одній площині.
12. Визначити величину сили, що діє на середній провідник та на крайні провідники, при розташуванні провідників в одній площині.
13. Особливості визначення електродинамічних сил трифазного змінного струму для провідників розташованих по периметру правильного багатокутника.
14. Означення терміну "механічний резонанс". Заходи щодо запобігання механічного резонансу в струмоведучих частинах електричних апаратів.

3 ОСНОВИ ТЕПЛОВИХ РОЗРАХУНКІВ СТРУМОВЕДУЧИХ ЧАСТИН ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

3.1 Втрати в деталях електричних апаратів

Втрати в провідниках. Потужність P , яка втрачається в провіднику при проходженні по ньому електричного струму, визначається [2]

$$P = I^2 R, \quad (3.1)$$

де I – діюче значення струму; R – опір провідника.

При постійному струмі R відповідає електричному опору провідника:

$$R = \frac{\rho l}{s}, \quad (3.2)$$

де ρ – питомий опір, l і s – відповідно довжина і поперечний переріз провідника.

При змінному струмі втрати є більшими, ніж при постійному струмі. Це зростання втрат відбувається за рахунок *поверхневого ефекту і ефекту близькості* і враховується коефіцієнтом додаткових втрат k_d , що дорівнює сумі коефіцієнтів поверхневого ефекту k_n і ефекту близькості k_b .

Коефіцієнт додаткових втрат k_d завжди більше одиниці, тобто

$$k_d = k_n + k_b > 1. \quad (3.3)$$

Опір провідника при змінному струмі визначається за виразом

$$R = k_d R = R_{\text{акт}} \quad (3.4)$$

та називається *активним опором* провідника.

Активний опір – це деякий фіктивний опір провідника, який, будучи помноженим на квадрат діючого струму, дає втрати потужності, які дійсно мають місце при змінному струмі.

Головними чинниками, що призводять до збільшення втрат потужності в струмоведучих елементах електричних апаратів та провідниках при змінному струмі, є явища поверхневого ефекту та ефекту близькості.

Поверхневий ефект. Змінне магнітне поле, що охоплює провідник (рис. 3.1,а), який обтікається змінним струмом, індукуює у цьому провіднику електрорушійну силу (ЕРС), спрямовану назустріч прикладеній напрузі. Центральні прошарки провідника перетинаються значно більшим магнітним потоком, ніж зовнішні. Проти-ЕРС, яка наводиться в центральних прошарках, буде більша, ніж у зовнішніх прошарках

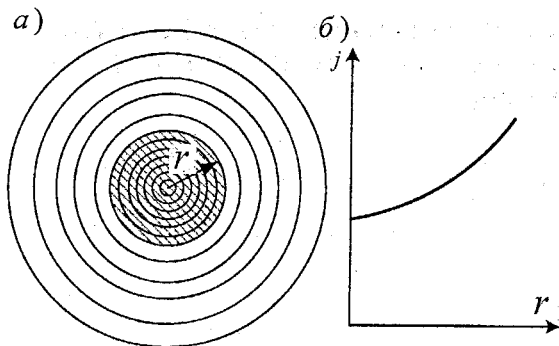


Рисунок 3.1 – До пояснення явища поверхневого ефекту

провідника. Це призведе до зменшення густини струму j у центральних прошарках у порівнянні з густиною струму в зовнішніх (рис. 3.1, б). Зазначене фізичне явище носить назву **поверхневого ефекту**. Вплив цього явища сприймається нами як збільшення опору провідника, оскільки при тому самому значенні прикладеної напруги змінний струм, що протікає по провіднику, буде менший, ніж постійний струм.

Коефіцієнт поверхневого ефекту k_n збільшується із зростанням частоти струму і питомої провідності матеріалу провідника, а також залежить від відношення периметра провідника до його перерізу.

При нагріванні питома провідність падає, отже, знижується і вплив поверхневого ефекту. При більшому діаметрі провідника магнітний потік, що перетинає центральні прошарки, буде більшим, отже, більшими будуть нерівномірність розподілу струму і коефіцієнт поверхневого ефекту. Оскільки при змінному струмі, а особливо при підвищеній частоті, середня частина перерізу провідника погано використовується, то в цих випадках вигідно брати не суцільний, круглий провідник, а порожнисту трубу і застосовувати в електроустановках провідники, по змозі, з більшим відношенням периметра до перерізу.

Ефект близькості. Для вивчення фізичної суті цього явища розглянемо два паралельних провідники, які обтікаються змінним струмом. У тому випадку, коли провідники обтікаються струмами різних напрямків (рис. 3.2, а), ближні прошарки (a, a_1) провідників охоплюються меншим магнітним потоком ($\Phi_1 < \Phi_2$), ніж віддалені прошарки (b, b_1). Індуктивність прошарків, охоплених меншим потоком, менша: їх опір менший опору паралельних, більш віддалених прошарків. Густина струму (крива 2) в ближніх прошарках буде більшою (рис. 3.2, в).

При струмах одного напрямку в двох паралельних провідниках (рис. 3.2, б) меншим магнітним потоком охоплюються більш віддалені прошарки провідників ($\Phi_2 < \Phi_1$). Густина струму (крива 2) буде більшою у

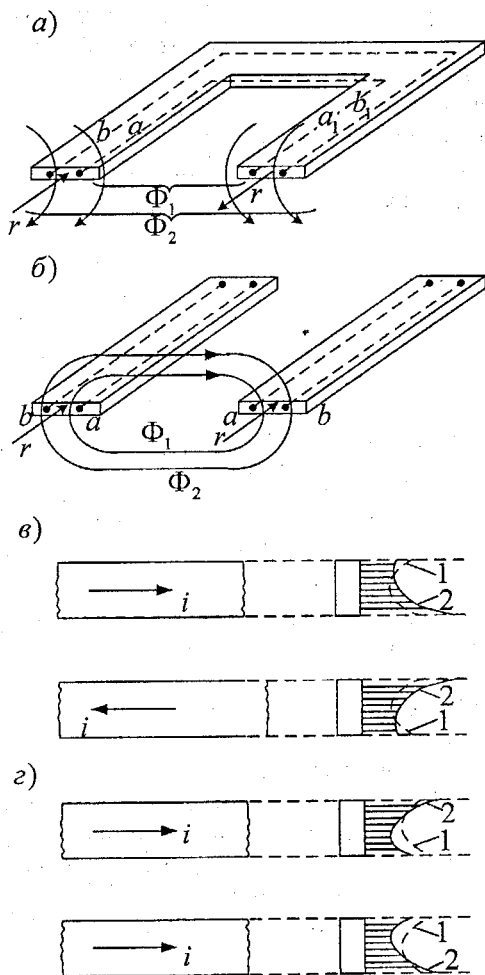


Рисунок 3.2 – До пояснення явища ефекту близькості

віддалених прошарках провідників (рис. 3.2, з).

Таким чином, ефект нерівномірного розподілу струму по перерізу провідника обумовлений близькістю іншого провідника зі струмом, називається *ефектом близькості*. Як і поверхневий ефект, він веде до

збільшення втрат потужності в провіднику, що враховуються при розрахунках коефіцієнтом близькості κ_6 [5].

Втрати в деталях з магнітних матеріалів. В магнітних матеріалах та магнітопроводах, що знаходяться в змінному магнітному полі, виникають втрати потужності $P_{ст} = P_v + P_r$, обумовлені появою вихрових струмів (P_v) і явищем гістерезису (P_r), відповідно. Ці втрати призводять до нагрівання магнітопроводів електричних апаратів.

Схему збудження вихрових струмів показано на рис. 3.3, а. Вони збуджуються основним змінним магнітним потоком Φ , охоплюючи його. У свою чергу, вихрові струми створюють свої магнітні потоки, що у кожний даний момент спрямовані назустріч основному потокові, послаблюючи його.

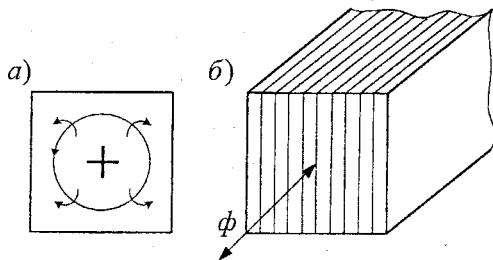


Рисунок 3.3 – Схема виникнення вихрових струмів (а) і напрямок шихтування магнітопроводів (б)

Для зниження втрат від вихрових струмів магнітопроводи виконують шихтованими (рис. 3.3, б), тобто складеними з електрично ізольованих пластин товщиною 0,2-0,5 мм. Пластини розташовуються уздовж магнітних ліній, розрізаючи контур вихрового струму і збільшуючи йому тим самим опір, що призводить до зниження значення вихрового струму. Чим тонші пластини, тим менше значення вихрового струму.

Для зменшення втрат від гістерезису доцільним є застосування магнітом'яких сталей, тобто таких сталей, які мають більш вузьку петлю гістерезису.

Втрати в магнітопроводах апаратів при змінному потокові можуть бути підраховані за формулою:

$$P_{cm} = P_v + P_r = \left[\sigma_v \left(\frac{f}{100} \right)^2 + \sigma_r \frac{f}{100} \right] B^2 \cdot 10^{-8}, \quad (3.5)$$

де σ_v і σ_r – коефіцієнти для втрат на вихрові струми і гістерезис; f - частота; B - індукція.

3.2 Віддача теплоти нагрітим тілом

Передача теплоти завжди йде від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і відбувається до тих пір, поки температури тіл не зрівняються. Чим вища температура нагрітого тіла, тим інтенсивніше буде відбуватися передавання теплоти. Розрізняють три види передавання теплоти – *теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням* [2].

Теплопровідність. Це – властивість матеріалу передавати теплоту від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих. Передавання теплоти може відбуватися усередині одного тіла, між двома зтисненими тілами і між двома тілами, розділеними третім.

Кількість теплоти Q , що проходить за одиницю часу t від більш нагрітої ділянки до менш нагрітої, пропорційна площі (перерізу) S , через який передається тепло, різниці температур ($\Theta_1 - \Theta_2$) в напрямку, перпендикулярному площі тепловіддачі, і залежить від теплопровідних властивостей середовища λ :

$$Q = \lambda \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta} st, \quad (3.6)$$

де δ – товщина стінки (рис. 3.4).

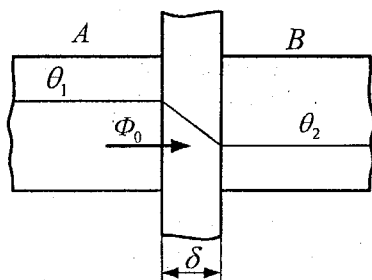


Рисунок 3.4 – Передавання теплоти через плоску стінку (в одному напрямку)

Теплопровідні властивості середовища характеризуються коефіцієнтом *теплопровідності*, який чисельно дорівнює кількості теплоти, що проходить через площадку 1 м^2 протягом 1 с при перепаді температури 1 К/м . Цей коефіцієнт позначається λ і вимірюється в ватах на метр-кельвін.

Якщо два тіла з температурами Θ_1 і Θ_2 розділені третім тілом (наприклад, плоскою стінкою) з теплопровідністю λ і якщо вважати, що теп-

лота поширюється тільки в одному напрямку, то зміна температури у стінці відбувається по прямій (рис. 3.4).

Конвекція. Газ чи рідина, що стикаються з поверхнею нагрітого тіла, нагріваються біля цієї поверхні. Нагрівання стичних прошарків відбувається за рахунок теплопровідності. Нагріті прошарки стають легші сусідніх, більш холодних прошарків навколишнього середовища, піднімаються вгору, забирають відібрану від нагрітого тіла теплоту. Вказаний фізичний процес і носить назву *тепловіддачі через конвекцію*.

Якщо швидкість руху частинок охолоджувального середовища визначається лише ступенем їхнього нагрівання біля поверхні нагрітого тіла, то конвекція називається *природною*.

Якщо швидкість руху потоку охолоджувального середовища задається примусово (за допомогою вентиляторів, насосів), то конвекція називається *штучною (примусовою)*.

Як при природній, так і при штучній конвекції рух газу (рідини) може бути ламінарним або турбулентним.

Ламінарним називається такий рух, при якому частинки газу (рідини) рухаються паралельно. Ламінарний рух має, зазвичай, малу швидкість. З ростом швидкості характер руху рідини змінюється, елементарні цівки перестають рухатися по рівнобіжних траєкторіях і починають завихрятися. Їх рух стає *турбулентним (вихровим)*. Перехід із ламінарного руху в турбулентний відбувається для даного газу (рідини) при певній швидкості, яку називають *критичною*.

В зоні ламінарного руху теплота, знята з нагрітого тіла граничним прошарком охолоджувача, частково забирається цим прошарком, а частково теплопровідністю передається сусіднім прошаркам. Чим далі прошарок від поверхні нагрітого тіла, тим менше він бере участь у теплозніманні.

При турбулентному русі за рахунок перемішування з нагрітою поверхнею стикається набагато більше рідини (газу), знята теплота інтенсивніше передається всьому потокові охолоджувального середовища. Як підсумок, віддача теплоти із нагрітої поверхні йде набагато інтенсивніше, ніж при ламінарному русі.

Кількість теплоти, що віддається конвекцією за час t , визначається

$$Q = k_k(\Theta_1 - \Theta_2)Ft, \quad (3.7)$$

де k_k – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²К); Θ_1 – температура нагрітого тіла, °С; Θ_2 – температура охолоджувального середовища, °С; F – поверхня тепловіддачі, м².

Коефіцієнт віддачі через конвекцію k_k визначає кількість теплоти, яка віддається за одну секунду з 1 м² нагрітої поверхні при різниці температур поверхні та охолоджувача 1°С. Коефіцієнт k_k залежить від багатьох

факторів, головним чином, це – швидкість руху і теплоємність охолоджувача, температура поверхні та охолоджувального середовища, геометричні розміри нагрітої поверхні.

Теплове випромінювання. Випромінювання – це фізичний процес переносу теплової енергії від нагрітого тіла до тіл, які розташовані в навколишньому просторі. Процес здійснюється електромагнітними коливаннями з різною довжиною хвилі. Найбільше переносять теплову енергію інфрачервоні промені (довжина хвилі 0,8-40 мкм), менше – світлові промені (довжина хвилі 0,4-0,8 мкм).

Фізичні властивості теплових і світлових променів подібні. І ті й інші поширюються зі швидкістю світла, спроможні витримувати заломлення і відбиття при зустрічі з поверхнями, які трапляються на їх шляху.

Для аналізу характеристик теплового випромінювання користуються термінами абсолютної поверхні. Поверхня, що відбиває від себе всі падаючі на неї промені, називається *абсолютно білою поверхнею*. Поверхня, що цілком поглинає всі падаючі на неї промені, називається *абсолютно чорною*. До таких поверхонь (тіл) близька лампова сажа, азбошифер, чорна матова фарба. Будучи нагрітим, абсолютно чорне тіло випромінює таку ж кількість енергії, яку воно поглинає.

Абсолютно чорне тіло має максимальну випромінювальну спроможність і основні закони випромінювання виведені для нього. Випромінювальна спроможність інших тіл прирівнюється до випромінювальної спроможності абсолютно чорного тіла як еталона.

Кількість теплоти, яка випромінюється з поверхні нагрітого тіла за t с, визначається за формулою:

$$Q = k_n \left[\left(\frac{\Theta_1}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{1000} \right)^4 \right] F t, \quad (3.8)$$

де k_n – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м² · К⁴); $k_n = 5.7\sigma$, тут σ – постійна випромінювання (див. таблиці в довідниках); Θ_1 – температура нагрітого тіла, К; Θ_2 – температура тіл, на які падають промені, К.

Тепловіддача в усталеному режимі. Тепловіддача з поверхні нагрітого тіла, звичайно, відбувається одночасно конвекцією і тепловим випромінюванням. При цьому важко визначити, яка частина теплоти передається в навколишнє середовище тим або іншим видом тепловіддачі. Тому для практичного аналізу тепловіддачі нагрітих поверхонь електричних апаратів та провідників в усталеному режимі їх роботи вводять фізичний термін – *коефіцієнт тепловіддачі* k_T (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Поверхня і її характеристика	Коефіцієнт тепловіддачі κ_t , Вт/(м ² ·К)	
	в повітрі при природній циркуляції	в маслі при природній циркуляції
Горизонтальні круглі стержні міді діаметром 1-6 см	13-3,5	-
Плоскі шини червоної міді, поставлені на ребро	6-9	-
Чавунна, сталева чи залізна поверхня, тонко прошпакльована і покрита лаковою фарбою	10-14	-
Будь-яка поверхня, покрита лаком	12-16	-
Фарфорові циліндри, занурені в бак з маслом	-	50-150
Обмотка з паперовою ізоляцією	10-12,5	25-36
Пакет листового заліза	10-12,5	70-90

Коефіцієнт тепловіддачі κ_t (див. табл. 3.1) визначає кількість теплоти, яка віддається в навколишнє середовище за $1c$ усіма видами тепловіддачі з $1m^2$ тепловіддавальної поверхні при різниці температур нагрітого тіла і навколишнього середовища $1K$.

Коефіцієнт тепловіддачі вимірюється у ватах на квадратний метр-кельвін. У виразах (3.6) – (3.8) кількість теплоти, що віддається за одиницю часу, $Q/t = \Phi$ визначає *тепловий потік* через площадку s (поверхня F). Відношення $\Phi/s = \Phi_0$ ($\Phi/F = \Phi_0$) – визначає *густину* теплового потоку.

3.5 Нагрівання і охолодження однорідного провідника у часі при тривалому режимі роботи

Якщо потужність втрат в провіднику при проходженні по ньому електричного струму дорівнює P , то за час dt у ньому виділиться енергія [4]

$$Pdt = I^2 k_n Rdt. \quad (3.9)$$

Частина цієї енергії піде на нагрівання провідника:

$$G_c d\tau, \quad (3.10)$$

а частина буде відведена в навколишній простір:

$$Fk_{\tau} \tau d\tau, \quad (3.11)$$

де G – маса провідника, кг; c – питома теплоємність, Дж/(кг·К); F – поверхня тепловіддачі провідника, м²; τ – перевищення температури провідника відносно навколишнього середовища, °С або К; k_{τ} – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К).

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

$$Pdt = Gcd\tau + Fk_{\tau} \tau d\tau. \quad (3.12)$$

Нагрівання електричних апаратів або окремих їх елементів може проходити при таких основних режимах:

- при сталості потужності втрат:

$$I = I_0 = \text{const}; \quad R = R_0 = \text{const}; \quad P = I_0^2 R_0 = \text{const}; \quad (3.13 \text{ а})$$

(в основному, це електричні пристрої, в яких опір, практично, мало змінюється від температури);

- при сталості струму:

$$I = I_0 = \text{const}; \quad R = R_0(1 + \alpha\tau); \quad P = I_0^2 R_0(1 + \alpha\tau), \quad (3.13 \text{ б})$$

де α – температурний коефіцієнт опору;

(в основному, це силові кола майже всіх електричних апаратів, тому що струм у такому електричному колі визначається навантаженням; $R_{\text{апарата}} \ll R_{\text{навант.}}$);

- при сталості напруги:

$$U = \text{const}; \quad R = R_0(1 + \alpha\tau); \quad I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_0(1 + \alpha\tau)}; \quad (3.14)$$

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R_0(1 + \alpha\tau)} = \frac{I_0^2 R_0^2}{R_0(1 + \alpha\tau)} = \frac{I_0^2 R_0}{1 + \alpha\tau}$$

(в основному, це котушки електричних апаратів).

Виходячи з того, що коефіцієнти c і k_{τ} є величинами постійними, то при сталості потужностей рівняння (3.14) відносно τ буде мати вигляд:

$$\tau = \frac{P}{Fk_{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{Fk_{\tau} \tau}{Gc}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{Fk_{\tau} \tau}{Gc}}, \quad (3.15)$$

де τ_0 – перевищення температури провідника над температурою середовища в момент початку процесу.

В дійсності коефіцієнти R , c і k_{τ} залежать від температури і, отже, будуть змінюватися у часі. Похибку, обумовлену зробленим припущенням

можна знизити, якщо вищезазначені величини приймати не для початкової нульової температури, а для температури, близької до тієї, що утвориться при усталеному режимі роботи струмоведучої частини електричного апарата.

Величина $Gc/Fk_T = T$ має розмірність часу і називається *тепловою сталою часу нагрівання*. Фізично — це той час, за який провідник нагріється до сталої температури при відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище.

При $t = \infty$ рівняння (3.15) приймає вигляд:

$$\tau_{t=\infty} = P / (Fk_T) = \tau_{ст} = C, \quad (3.16)$$

тобто, має місце сталий процес нагрівання. Потужність втрат, що виділяється в провіднику, дорівнює потужності, що віддається в навколишнє середовище з поверхні нагрітого тіла. Рівняння (3.16) носить назву *формули Ньютона*.

Рівняння

$$P = \frac{\tau_{ст}}{1/(k_T F)} \quad (3.16,а)$$

формально має такий же вигляд, як і закон Ома для електричного струму $I = U/R$. Тому величину $1/(k_T F)$ часто називають *опором теплового потоку* при переході від поверхні F до навколишнього середовища.

Рівняння (3.15) може бути переписано у вигляді

$$\tau = \tau_{ст} (1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T}. \quad (3.17)$$

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

$$\tau = \tau_{ст} (1 - e^{-t/T}). \quad (3.18)$$

Згідно з (3.17) і (3.18) перевищення температури провідника змінюється у часі за законом показової функції (експоненти). Стале перевищення температури (при $t = \infty$) в обох випадках має однакові значення і не залежить від величини τ_0 .

На рис. 3.5 наведені криві 1 і 2, побудовані відповідно до формул (3.18, 3.17). Час t подано в долях T . Температура $T_{уст.}$, як правило, досягається через час $t = (3 \div 5) T$. На рисунку показане графічне визначення величини T . Це буде відрізок AB на прямій сталого перевищення температури $\tau_{ст.}$, що відтинається дотичною, проведеною на початку координат до кривої нагрівання. Величина T може бути також визначена по кривій нагрівання на тій підставі, що за час T перевищення температури досягає $0,632 \tau_{ст.}$

Розглянемо тепер процес охолодження провідника. Припустимо, що в якийсь момент часу протікання струму по провіднику припинилося: $P dt = 0$. Провідник почне охолоджуватися. Рівняння (3.14) прийме вигляд

$$0 = Gc d\tau + Fk_{\tau} \tau d\tau, \quad (3.19)$$

звідки

$$\tau = \tau_0 e^{-1/T}. \quad (3.20)$$

Крива 3 (рис. 3.5) побудована за цим рівнянням з припущенням, що $\tau_0 = \tau_{уст}$. Крива охолодження є зеркальним відображенням кривої нагрівання 2 відносно прямої (проведена штриховою лінією), проведеної посередині між віссю абсцис і прямою сталого перевищення температури. Аналогічно попередньому, тільки з відліком від прямої $\tau_{уст}$, визначиться графічно величина T .

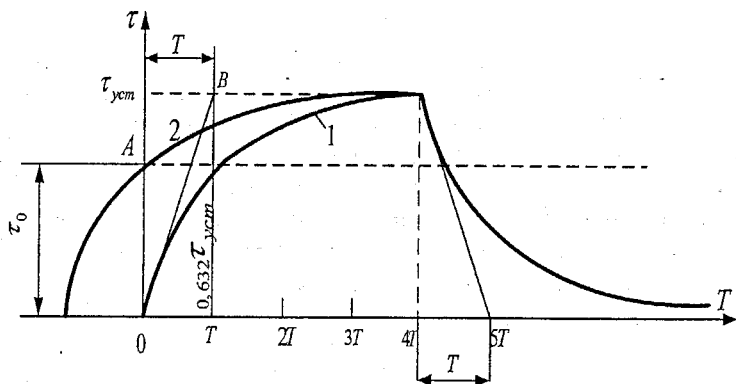


Рисунок 3.5 – Криві процесу нагрівання і охолодження однорідного провідника при тривалому режимі роботи

Для режиму незмінного струму рівняння (3.12) прийме вигляд

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{T}(1 - \alpha C) = A, \quad (3.21)$$

де $A = I_0^2 R_{\phi} / (Gc)$ – це початкова швидкість підвищення температури; $C = I_0^2 R_{\phi} / (Fk_{\tau})$ – усталена температура для режиму нагрівання при постійній потужності, яка є тепловою інтенсивністю електротермічного процесу; $T = Gc / (Fk_{\tau})$ – теплова стала часу нагрівання.

Рівняння (3.21) при $\tau_0 = 0$ буде

$$\tau = \frac{C}{1-\alpha C} \left(1 - e^{-\frac{1-\alpha C}{C} t} \right) = \tau_{cr} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_l}} \right), \quad (3.22)$$

де $\tau_{cr} = \frac{C}{1-\alpha C}$ – стали перевищення температури; $T_l = \frac{C}{A(1-\alpha C)} = \frac{T_1}{1-\alpha C}$, – постійна часу нагрівання.

Очевидним є те, що у цьому режимі на відміну від режиму нагрівання при постійній потужності, τ_{cr} і T_l значною мірою залежать від теплової інтенсивності електротермічного процесу.

При $\alpha C = 1$ другий член рівняння (3.21) стає рівним нулю, а

$$\frac{d\tau}{dt} = A \quad (3.23)$$

звідси

$$\tau = At \quad (3.24)$$

тобто, температура збільшується за лінійним законом теоретично до нескінченності, а практично до температури плавлення провідника. Сталість температури і постійна часу стають нескінченно великими ($\tau_{cr} = \infty$, $T_l = \infty$). При $\alpha C > 1$ показник степеня в рівнянні (3.22) має позитивне значення і температура зростає ще швидше.

На рис. 3.6 наведено криві зміни температури у часі, побудовані за рівнянням (3.22). Перевищення температури для різних значень αC дано в залежності від At . Коефіцієнт α для міді прийнятий рівним 1/235.

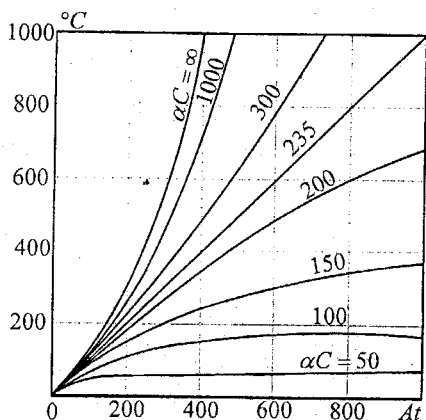


Рисунок 3.6 – Криві зміни температури $\Theta = f(A-L)$

Таблиця 3.2

Режим роботи ланки	Початкові величини	$\tau_{ст}$	T_1
$P = \text{const}$	$I = I_0$ $R = R_0$ $P = I_0^2 R_0$	$\tau_{ст} = C$	$T_1 = T$
$I = \text{const}$	$I = I_0$ $R = R_0(1 + \alpha\tau)$ $P = I_0^2 R_0(1 + \alpha\tau)$	$\tau_{ст} = \frac{C}{1 - \alpha C}$	$T_1 = \frac{T}{1 - \alpha C}$
$U = \text{const}$	$I = U/R$ $R = R_0(1 + \alpha\tau)$ $P = \frac{I_0^2 R_0}{1 + \alpha\tau}$	$\tau_{ст} = \frac{1}{2\alpha}(\sqrt{1 + 4\alpha C} - 1)$ $\tau_{ст} \approx \frac{C}{1 + \alpha C}$ $T = \frac{Gc}{Fk_\tau}; C = \frac{I_0^2 R_0}{Fk_\tau}$ $A = \frac{I_0^2 R_0}{Gc}; R = \frac{\rho l}{s} k_a$	—

При сталості напруги рівняння (3.12) набуде такого вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau}{dt} + \frac{Fk_\tau}{Gc} &= \frac{I_0^2 R_0}{Gc(1 + \alpha\tau)} \\ \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{T} &= \frac{A}{1 + \alpha\tau} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Розв'язування цього рівняння є складним і громіздким. Обмежимося визначенням сталої температури і струму, що найбільше цікавлять нас. При сталій температурі $d\tau/dt = 0$, тоді з (3.25)

$$\tau(1 + \alpha\tau) = AT = C \quad (3.26)$$

$$\tau_{ст} = \frac{1}{2\alpha}(\sqrt{1 + 4\alpha C} - 1) \quad (3.27)$$

При малих τ рівняння (3.26) доцільно розв'язати наближено, нехтуючи спочатку квадратичним членом і використовуючи надалі отриманий результат для введення поправки. Тоді

$$\tau_{ст} \approx \frac{C}{1 + \alpha C} \quad (3.27a)$$

У міру підвищення температури струм зменшується внаслідок

збільшення опору і змінюється майже обернено пропорційно опором:

$$I_0 / I_{ct} = R / R_0 = 1 + \alpha \tau_{ct}. \quad (3.28)$$

Отримані вище результати для різних режимів роботи електричного кола зведено в табл.3.2.

3.4 Нагрівання і охолодження однорідного провідника при короткочасному навантаженні

При тривалому режимі припустиме навантаження P_{np} вибирається таким чином, щоб усталене перевищення температури τ_{ct} дорівнювало припустимому $\tau_{пр}$. Перевищення температури у цьому випадку відбувається за кривою 1 (рис. 3.7).

При тому ж навантаженні в короткочасному режимі роботи за час t_n , перевищення температури досягло б значення τ_1 тобто, провідник не вичерпав би повністю своїх можливостей відносно до нагрівостійкості. При

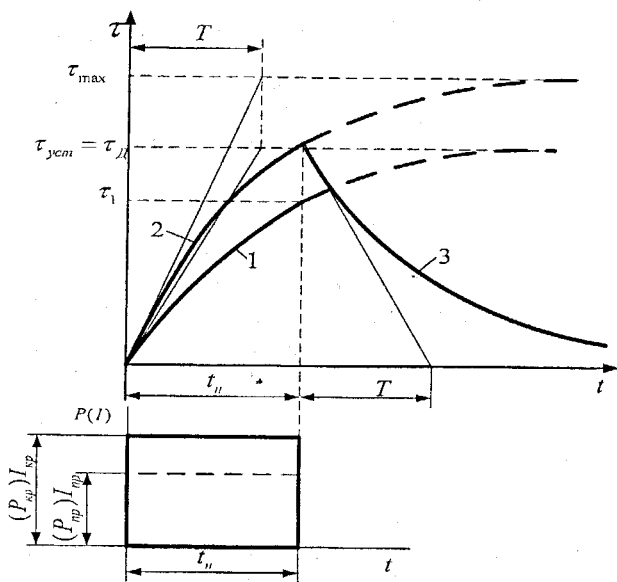


Рисунок 3.7 – Криві процесу нагрівання і охолодження однорідного провідника при короткочасному режимі роботи

При цьому ні за час навантаження, ні за час паузи перевищення температури не досягає усталеного значення. Повний період ($t_n + t_{\text{п}}$) називається *циклом* $t_{\text{ц}}$. Режим характеризується *відносною тривалістю вмикань* (ТВ) у відсотках і *частотою вмикань* – числом циклів за годину. ТВ є відношенням тривалості навантаження до тривалості всього циклу:

$$ПВ = \frac{t_n}{t_{\text{ц}}} \cdot 100. \quad (3.31)$$

За час навантажень провідник нагрівається (ділянки OA, BC, \dots), за час паузи він охолоджується (ділянки AB, CD, \dots). До кінця кожного з періодів температура не досягає сталого значення. Проте з деякого моменту часу настає стан, при якому підвищення температури за період навантаження стає рівним її зниженню за період паузи. Перевищення температури коливається між деяким максимумом τ_1 і мінімумом τ_2 .

Як і при короткочасному режимі, перевищення температури, що встановилося (крива 2), буде нижче допустимого (крива 1), якщо провідник навантажений номінальним струмом тривалого режиму $I_{\text{пр}}$, і буде дорівнювати допустимому (крива 3), якщо струм підвищити до $I = I_{\text{пк}}$. При навантаженні $I = I_{\text{пк}}$ перевищення температури при тривалому режимі досягло б $\tau_{\text{max}} > \tau_{\text{д}}$ (крива 4). Коефіцієнти перевантаження за потужністю втрат і струмові визначаються із співвідношень:

$$k_p = \frac{P_{\text{пк}}}{P_{\text{пр}}} = \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{ст}}} = \frac{1 - e^{-(t_n + t_{\text{п}})T}}{1 - e^{-t_n T}}; \quad (3.32)$$

$$k_I = \frac{I_{\text{пк}}}{I_{\text{пр}}} = \sqrt{k_p}, \quad (3.33)$$

де $P_{\text{пк}}$ – потужність втрат при повторно-короткочасному режимі.

3.6 Нагрівання однорідного провідника при короткому замиканні

Коротке замикання характеризується великим значенням струму і малою тривалістю, від декількох тисячних секунди до декількох секунд (рис.3.9). При коротких замиканнях допускається у 2-3 рази більш висока температура нагрівання провідника, ніж при номінальному струмі; відповідно і тепловіддача зросте максимум у три рази, втрати ж у провіднику зростають у сотні раз. Таким чином, тепловіддача складе тільки 1-3 % від усієї енергії, яка виділяється у провіднику. Можна вважати, що вся енергія йде на нагрівання провідника.

Рівняння теплового балансу (3.14) в такому випадку має вигляд:

$$Pdt = Gc d\tau, \quad (3.34)$$

звідки

$$d\tau = \frac{P}{Gc} dt = \frac{\rho}{\gamma c} k_d \left(\frac{i}{s}\right)^2 dt, \quad (3.35)$$

де i – миттєвий струм; ρ – питомий опір; γ – густина матеріалу провідника; c – питома теплоємність; s – переріз провідника; k_d – коефіцієнт додаткових втрат.

Принципово ρ і c є змінними величинами, що залежать від температури. Змінною величиною у часі є і струм короткого замикання. Проте для спрощення розрахунку можна прийняти ці величини сталими. При цьому значення ρ і c варто брати для температури нагрітого провідника. Тоді

$$\tau_{к.з.} = \frac{\rho_r}{\gamma c_r} k_d J^2 t + \tau_d, \quad (3.36)$$

де τ_d – перевищення температури провідника над температурою навколишнього середовища в момент початку короткого замикання, J – густина струму.

Нагрівання провідника при короткому замиканні відбувається практично за законом, показаним прямою BC на рис. 3.9. Охолодження провідника після відключення короткого замикання відбувається за тим же законом, що і при нормальних режимах.

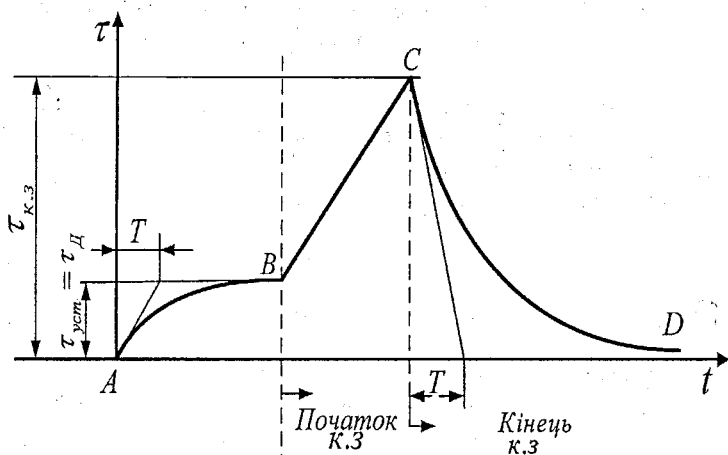


Рисунок 3.9 – Нагрівання однорідного провідника при короткому замиканні: АВ – процес нагрівання при номінальному струмі; ВС – те ж, при короткому замиканні; CD – при охолодженні

3.7 Нагрівання провідника змінного перерізу

Візьмемо провідник перерізу s , що має на ділянці l_1 звуження $s_1 < s$ (рис. 3.10). При протіканні струму по такому провіднику втрати потужності в одиниці довжини на ділянці з перерізом s_1 будуть більшими, ніж втрати в одиниці довжини на ділянці з перерізом s . До того ж поверхня тепловіддачі з одиниці довжини на ділянці з перерізом s_1 менша, ніж на ділянці з перерізом s . Це призведе до того, що ділянка з перерізом $s_1 < s$ буде мати більш високу температуру, ніж інші частини провідника. Від цієї ділянки теплота буде віддаватися менш нагрітим частинам провідника в напрямку x .

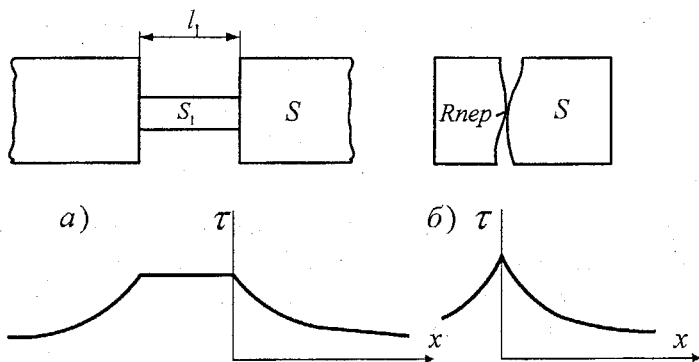


Рисунок 3.10 – Розподіл температури по провіднику змінного перерізу (а) і в контактному з'єднанні (б)

Якщо вважати, що ділянка має однакову температуру вздовж усієї своєї довжини, то температура вздовж провідника визначиться згідно з кривою показаною на рис.3.10, а.

Певвищення температури на ділянці l_1

$$\tau_1 = \frac{J_1^2 \rho l_1 s_1 + 2\lambda a \frac{J^2 \rho}{F k_T} s^2}{2\lambda s a + k_T F l_1}, \quad (3.37)$$

де J і J_1 — густина струмів на ділянках з перерізами s і s_1 , відповідно; F і F_1 — охолоджувані поверхні провідника на одиницю довжини, на ділянках з перерізами s і s_1 , відповідно; λ — коефіцієнт теплопровідності; k_T — коефіцієнт тепловіддачі; ρ — питомий опір;

$$a = \sqrt{\frac{k_T F}{\lambda s}}$$

Перевищення температури вздовж довжини провідника з перерізом s визначається рівнянням

$$\tau_x = \frac{J_1^2 \rho s_1}{F k_T} + \left(\tau_l - \frac{J_1^2 \rho s_1}{-k_T F} \right) e^{-ax} \quad (3.37, a)$$

Рівняння (3.37) і (3.38) можуть бути також використані для визначення перевищення температури в контактах (рис. 3.11, б). У цьому випадку необхідно в (3.37) добуток $J_1^2 \rho l_1 s_1$ замінити добутком $I^2 R_{пер}$, де $R_{пер}$ — перехідний опір контакту, і прийняти $F_l = 0$.

Згідно з цим рівняння (3.37) буде мати вигляд:

$$\tau_k = \frac{I^2 R_{пер} + 2 \lambda a \frac{J^2 \rho}{F k_T}}{2 \lambda s a} \quad (3.38)$$

Розподіл температури вздовж контакту визначиться згідно з кривою на рис. 3.10, б.

3.8 Нагрівання котушок

Котушка електричних апаратів — це неоднорідне тіло, що складається з провідника, ізоляції і прошарків повітря або матеріалу, що їх просочує (лак, компаунд). Теплота, що виділяється у всьому об'ємі котушки, повинна проходити до поверхні через матеріали з різною теплопровідністю. Зрозуміло, що в різних прошарках котушки будуть і різні температури. Всередині котушки температура буде вища, ніж на поверхні. Чим монолітніша котушка, тим краще теплопровідність між прошарками і тим менша буде різниця температур між зовнішньою поверхнею і внутрішніми прошарками. Просочування та компаундування підвищують загальну теплопровідність котушки, а тепловіддача відповідно збільшується на 5÷10%.

Різні ділянки поверхні котушки в різній мірі беруть участь у тепловіддачі. Зовнішня бічна поверхня, як правило, буває відкритою і є основною тепловіддавальною поверхнею. Тепловіддача зсередини відбувається, головним чином, за рахунок природної конвекції. Усередині котушки проходить осердя. Через малі зазори між осердям і котушкою конвекція тут дуже ускладнена, але коли осердя щільно прилягає до котушки, тепловіддача з внутрішньої поверхні котушки йде за рахунок теплопровідності. Тепловіддача залежить від щільності прилягання котушки до осердя, від розміру тепловіддавальної поверхні магнітопровода.

Торцеві поверхні котушки, зазвичай, закриті ізоляційними монтажними деталями з низькою теплопровідністю. У довгих котушках тепловіддачею з торців можна знехтувати, у коротких котушках її варто враховувати.

Таким чином, процес нагрівання котушок є складним явищем. Розподіл температури по котушці нерівномірний як у радіальному напрямку, так і по висоті. Точний розрахунок розподілу температури пов'язаний із великими труднощами.

У першому наближенні можна визначити середнє перевищення температури котушки за потужністю, що виділяється в ній, і за середнім коефіцієнтом тепловіддачі, користуючись рівняннями (3.27) або (3.27 а):

$$\tau_{\text{ср.}} = \frac{I_0^2 R_0}{k_{\text{т.ср.}} F_{\text{екв}} \left(1 + \alpha \frac{I_0^2 R_0}{k_{\text{т.ср.}} F_{\text{екв}}} \right)}, \quad (3.39)$$

де I_0 та R_0 – струм і опір холодної котушки, а $F_{\text{екв}} = F_{\text{зовн}} + \beta_1 F_{\text{вн}} + \beta_2 F_{\text{торц}}$ – це еквівалентна поверхня, яка враховує ступінь участі зовнішньої $F_{\text{зовн}}$, внутрішньої $F_{\text{вн}}$ і торцевої $F_{\text{торц}}$ ділянок поверхні в тепловіддачі (тут β_1 і β_2 – експериментальні коефіцієнти).

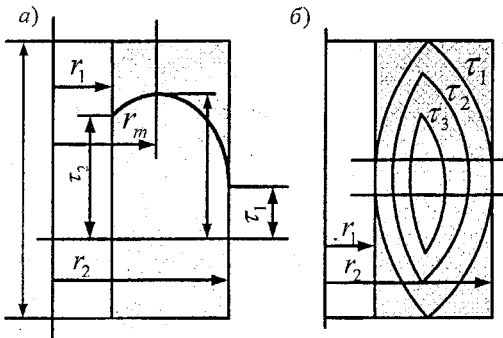


Рисунок 3.11 – Розподіл температур по котушці

Для котушок контакторів і реле постійного струму рекомендується:

$\beta_2 = 0$; $\beta_1 = 0,9$ – для безкаркасних бандажованих котушок;

$\beta_1 = 1,7$ – для котушок, намотаних на трубу;

$\beta_1 = 2,4$ – для котушок, намотаних на осердя.

В дійсності розподіл температури вздовж радіуса котушки буде мати характер, обумовлений кривою поданою на рис. 3.11,а. Десь всередині котушки на відстані r_m перевищення температури буде максимальним τ_{max} , на зовнішній і внутрішній поверхнях – відповідно τ_1 і τ_2 . Максимальна

температура значно перевищує температуру на зовнішній поверхні котушки та не значною мірою відрізняється від середньої температури котушки.

Якщо знехтувати тепловіддачею з торців, то ізотерми будуть прямими лініями, рівнобіжними осі котушки. Якщо відбувається тепловіддача з торців, то ізотерми будуть мати вигляд, зображений на рис. 3.11, б.

Якщо прийняти, що тепловіддача здійснюється головним чином з зовнішньої поверхні, то без великих похибок можна вважати, що

$$\tau_1 = \frac{P}{F_{\text{екв}} \cdot k_i}, \quad (3.40)$$

$$\tau_2 \approx \tau_{\text{max}}, \quad (3.41)$$

$$\tau_{\text{max}} = \tau_1 + \frac{q}{4\lambda_{\text{екв}}} (r_1^2 + r_2^2) = \frac{q}{2\lambda_{\text{екв}}} r_2^2 \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (3.42)$$

де $q = \frac{P}{h\pi(r_1^2 - r_2^2)}$ – втрати, що припадають на одиницю об'єму котушки;

P – потужність, що виділяється у котушці; $\lambda_{\text{екв}}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності; h, r_1, r_2 – геометричні розміри котушки.

Для котушок з круглого ізолюваного провідника

$$\lambda_{\text{екв}} = 0.6\lambda_i \frac{d}{2\delta}, \quad (3.43 \text{ а})$$

Для котушок з прямокутного провідника

$$\lambda_{\text{екв}} = \lambda_i \frac{a}{a+2\delta} \frac{b+2\delta}{2\delta}, \quad (3.43 \text{ б})$$

У цих формулах: λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу ізоляції провідника; d – діаметр провідника без ізоляції; a і b – розміри провідника без ізоляції відповідно в напрямку осі котушки і у напрямку радіуса котушки; δ – товщина ізоляції.

3.9 Допустима температура нагріву частин апаратів. Термічна стійкість

Для забезпечення надійної роботи апарата в межах усього терміну служби температура його частин не повинна перевищувати деякого визначеного значення, яке називають *допустимою температурою*. Ця температура встановлюється стандартами. При цьому розрізняють допустимі температури при номінальних режимах і при коротких замиканнях.

Оскільки тривалість короткого замикання мала (не більше 5 с), а самі замикання відносно рідкісні, то допустимі температури в цих випадках в 2 - 4 рази вищі, ніж при тривалому режимі.

Допустимі температури ізолюваних провідників і деталей визначаються нагрівостійкістю (класом) ізоляції, а також механічною міцністю матеріалу деталей. При температурах, що перевищують 200°C, механічна міцність провідникових матеріалів різко знижується. Для неізолюваних деталей допустима температура визначається механічними властивостями матеріалів, із яких вони виготовлені, або ізоляційними деталями, до яких вони дотикаються.

Допустима температура контактів і контактних з'єднань визначається температурою, що виключає їхнє інтенсивне окислювання.

Для неструмоведучих деталей – несучих, кріпильних, захисних і ін. – допустимі температури визначаються механічною міцністю й умовами безпечної експлуатації (охорона від опіку при зіткненні з оболонкою електричного апарата).

Спроможність апарата при проходженні струму по колу витримувати без ушкоджень і без перевищення допустимої при коротких замиканнях температури певної величини і тривалості називається *термічною стійкістю* електричного апарата. Струм термічної стійкості відносять до часу 1, 3, 5 і 10 с. Оскільки теплота, що виділяється в провіднику (апараті) пропорційна квадрату струму, то термічна стійкість визначається величиною I^2t , де I не може перевищувати деякого граничного значення для даного апарата.

3.10 Рідинне (водяне) охолодження в електричних апаратах

Зростання одиничних потужностей ряду промислових електроенергетичних установок вимагає створення компактних малогабаритних вимикачів (як неавтоматичних, автоматичних, так і швидкодіючих) на струми до 25 кА. В хімічній і алюмінієво-магнієвій промисловості для електролізу потрібні апарати на струми до 50 кА, а в перспективі – до 100 кА. Вимикачі турбо- і гідрогенераторів на 500 і 1000 МВт повинні виконуватися на струми 25-50 кА. Для поверхневого загартування при частоті до 10000 Гц потрібні апарати на 2 - 3 кА. Зазначені та багато інших електричних апаратів, виконаних без штучного охолодження, мали б практично неприйнятні габарити. Найбільш доцільним тут є рідинне, зокрема, водяне охолодження струмоведучих частин [23].

Застосування безпосереднього водяного охолодження (вода пропускається через порожнисті провідники) дозволяє в багато разів підвищити струмову навантаженість провідників. Повітря при швидкості 50 м/с може забрати з поверхні 1 м^2 при різниці температур $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ кількість теплоти, яка дорівнює 0,16 Дж/с. Вода при швидкості 2 м/с і інших рівних умовах – 3,2 Дж/с, тобто у 20 разів більше.

Тепловідвідні властивості води також вищі, ніж у трансформаторного масла, яке набуло широкого застосування в енергобудуванні.

Водяне охолодження в електричних апаратах здійснюється або за допомогою трубок, які розміщені всередині струмоведучих частин (залиті, впаяні, заварені і т.ін.), або струмоведучих деталей, які конструктивно виконуються порожнистими. Охолоджувальна рідина протікає через ці порожнини або трубки. Розглянемо загальні закономірності тепловідведення від струмоведучих частин при рідинному охолодженні.

У випадку коли температура θ_2 порожнистого провідника (рис. 3.12) вища температури навколишнього середовища θ_1 , теплові втрати в провіднику будуть відводитися від внутрішньої поверхні рідиною, яка протікає всередині, і від зовнішньої його поверхні – навколишнім повітрям.

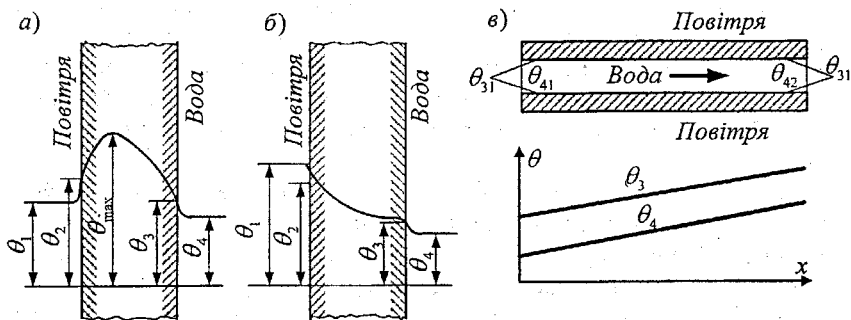


Рисунок 3.12 – Розподіл температур по провіднику при рідинному охолодженні

З огляду на те, що теплоємність і теплопровідність охолоджувальної рідини набагато вища, ніж у повітря, загальна картина розподілу температур у перерізі перпендикулярному осі провідника може бути подана схемою, зображеною на рис. 3.12, а.

При рідинному охолодженні може іноді виявитися, що температура провідника буде нижче температури навколишнього повітря. У такому випадку зовнішнє повітря буде не охолоджувати, а підігрівати провідник.

Картина розподілу температур у цьому випадку може бути подана схемою рис. 3.12, б.

Температура провідника і рідини змінюється не тільки за перерізом, але і за довжиною провідника (рис. 3.12 в). Рідина, що надходить у канал, нагрівається по шляху свого проходження. І якщо на вході температура її була Θ_{41} , то на виході вона стає Θ_{42} . Відповідно температура провідника, що охолоджується, не залишиться постійною, і якщо при вході вона була рівною Θ_{31} , то на виході буде Θ_{32} . Таким чином, у провіднику буде існувати поздовжній тепловий потік від більш нагрітого кінця до менше нагрітого. Питомі втрати, що виділяються в провіднику, будуть зростати уздовж течії рідини. У результаті всього цього криві розподілу температур у провіднику і у рідині по довжині провідника мають у загальному випадку складний характер.

У тих випадках (а їх більшість), коли різниця температур між кінцями провідника невелика і коли його тепловий опір в напрямку осі значний (малий переріз, велика довжина), поздовжні теплові потоки стають настільки малими, що ними можна знехтувати. У цьому випадку можна вважати, що температура вздовж довжини провідника зростає за лінійним законом як показано на рис. 3.12, в.

Для забезпечення оптимального тепловідведення шляхом конвекції, рух охолоджувального потоку в каналі повинен мати турбулентний характер. При ламінарному потоці тепловіддача від провідника буде відбуватися тільки за рахунок теплопровідності і різко знизиться в порівнянні з конвективною тепловіддачею при турбулентному потоці.

При водяному охолодженні електричних апаратів варто мати на увазі:

– *по-перше*, при температурі охолоджуваної поверхні, що перевищує температуру пароутворення води, біля стінок каналу починають утворюватися дрібні бульбашки пари, які захоплюються турбулентним потоком води і у ньому конденсуються. Даний процес одержав назву *бульбашкового* або *локального кипіння*. Він призводить до надзвичайно інтенсивного теплообміну, тому що прихована теплота пароутворення води дуже велика;

– *по-друге*, при подальшому збільшенні струмового навантаження, а отже і температури провідника, бульбашки починають утворюватися так часто, що біля поверхні металу виникає тонкий паровий прошарок (парова сорочка). При цьому теплопередача від металу до води різко зменшується, температура провідника швидко росте і провідник руйнується.

В електричних апаратах особливу увагу приділяють процесам плівкового кипіння і утворення парових сорочок при режимах короткого замикання.

Для забезпечення надійної роботи системи рідинного охолодження повинні бути забезпечені такі основні умови.

1. При заданій на вході температурі рідини її витрата повинна бути достатня для відведення всієї теплоти, що виділяється в охолоджуваній системі, тобто P_1 – теплова потужність, що забирається водою, повинна дорівнювати P – потужності теплових втрат в провідниках (апараті):

$$P_1 = P. \quad (3.44)$$

2. Зазначена рівновага повинна бути стійкою. При випадкових підвищеннях температури потужність, яка відводиться, повинна зростати швидше ніж потужність теплових втрат:

$$\frac{dP_1}{d\theta} > \frac{dP}{d\theta}. \quad (3.45)$$

3. Потужність, що знімається з одиниці поверхні зіткнення рідини з металом, не повинна перевищувати деякого граничного значення. Для води можна рекомендувати це значення в межах до 200 Вт/см^2 . При тривалій експлуатації апаратів рекомендується приймати значно менше значення.

Розрахунок струмопроводів або деталей апаратів, що не містять електричних контактів та охолоджуються рідиною, може бути виконаний у такий спосіб.

Якщо P – потужність теплових втрат, призначених для відведення, Θ_{41} і Θ_{42} – задані температури рідини на вході і виході, то згідно з (3.44) витрата охолоджувальної рідини складає

$$Q = \frac{P}{\Delta\Theta c\gamma}, \quad (3.46)$$

а швидкість її руху

$$V = \frac{Q}{s}, \quad (3.47)$$

де $\Delta\Theta = \Theta_{42} - \Theta_{41}$ – перепад температури охолоджувальної рідини; c – питома теплоємність; γ – густина рідини; s – площа перерізу каналу, заповненого рідиною.

Для одержання турбулентного потоку необхідно, щоб критерій Рейнольдса (Re) для потоку був більший 10000. Критерій Рейнольдса (критерій подібності) є безрозмірною величиною, що характеризує рух потоку:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{Q}{\pi d\nu}, \quad (3.48)$$

де V – швидкість руху потоку, м/с; d – діаметр каналу, м; Q – витрата охолоджувальної рідини, м³/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості (залежить від температури), м²/с.

При $Re < 2200$ рух потоку буде ламінарним. При $Re > 10\,000$ потік буде турбулентним на всьому перерізі каналу, тобто у всьому перерізі

потік має безладний вихровий характер. При $2200 < Re < 10\ 000$ має місце перехідний режим. Тобто, потік буде турбулентним всередині каналу і ламінарним біля стінок.

Якщо $Re < 10\ 000$ з метою, щоб електричний апарат не перегрівався, необхідно або збільшити витрату води, підвищивши тиск в каналі, або зменшити діаметр каналу.

Перепад температури між деталлю, яка охолоджується, і охолоджувальною рідиною визначається

$$\tau_{cp} = \frac{H}{k_{т.ж} \cdot F}, \quad (3.49)$$

де F – поверхня дотику металу з рідиною, m^2 ; $k_{т.р}$ – коефіцієнт тепловіддачі від металу до рідини, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Коефіцієнт тепловіддачі $k_{т.р}$ залежить від фізичних властивостей рідини, швидкості її руху і температури.

Для спрощеного розрахунку параметрів водоохолоджуваних провідників пропонуються такі вирази:

$$Re = 3.24 \cdot 10^4 \frac{Q}{d} (22 + \Theta_{cp})^{0.4}; \quad (3.50)$$

$$k_p = 430 v^{0.8} d^{-0.2} (22 + \Theta_{cp})^{0.4}; \quad (3.51)$$

$$f_p = \frac{P}{k_p \cdot \pi d l} = \frac{P}{1350 l v^{0.8} \cdot d^{0.8} (22 + \theta_{-p})^{0.4}}, \quad (3.52)$$

де P - потужність втрат, $Вт$; Q - витрата води, m^3/c ; v - швидкість руху води, m/c ; l - довжина каналу, m ; d - діаметр каналу, m ; $\Theta_{cp} = (\Theta_{42} - \Theta_{41})/2$ - середня температура води, $^{\circ}C$.

Застосування рідинного охолодження ускладнює конструкцію і експлуатацію електричних апаратів у порівнянні з природним повітряним охолодженням. Ускладнюються самі апарати. Система підведення рідини має забезпечити необхідну ізоляцію відносно землі і між полюсами апарата. Потрібно спеціальне устаткування (насоси, теплообмінники, фільтри механічного і хімічного очищення, контрольні прилади і т.ін.), щоб забезпечити циркуляцію, охолодження і підтримку ізоляційних властивостей охолоджувальної рідини. При водяному охолодженні потрібна спеціально приготовлена вода. Звичайна вода має високу електричну провідність і застосовуватися не може. Теоретично, абсолютно чиста вода повинна мати питомий опір $26 \cdot 10^6$ Ом-см, але одержати таку воду практично неможливо. Успіхи з хімічного очищення води (іонітові фільтри, декілька випарювань) дозволяють одержати воду з питомим опором до 10^6 Ом-см. У системах

охладження опір води знижується і підтримується, зазвичай, на рівні 50-150 кОм·см. При водяному охолодженні варто вживати заходів проти електролізу, а також струминної ерозії (вимивання частинок металу з каналів при великих швидкостях руху потоку). З огляду на сказане, рідинне охолодження апаратів доцільно застосовувати там, де з технологічної точки зору інші апарати не зможуть забезпечити певні технічні та економічні вимоги.

Контрольні запитання

1. Яким чином визначається активний опір провідника ?
2. Що таке поверхневий ефект ?
3. Поясніть явище ефекту близькості ?
4. Що таке вихрові струми, які способи боротьби з ними ?
5. Назвіть основні види передавання теплоти та дайте їм характеристику.
6. Дайте означення теплопровідності та назвіть основні її характеристики.
7. Дайте означення конвекції та назвіть основні її характеристики.
8. Дайте означення теплового випромінювання та назвіть основні його характеристики.
9. Що таке коефіцієнт тепловіддачі, які його основні характеристики ?
10. Поясніть процес нагрівання провідника при усталеному режимі роботи електричного апарата.
11. Як відбувається процес охолодження провідника ?
12. Поясніть особливості процесу нагрівання провідника при короткому замиканні.
13. Поясніть особливості процесу охолодження провідника при короткому замиканні.
14. Поясніть особливості процесу нагрівання котушок електричних апаратів.
15. Що таке термічна стійкість ?
16. Поясніть особливості процесу рідинного охолодження струмоведучих частин електричних апаратів.

4 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ГОРІННЯ ТА ЗГАСАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

4.1 Процеси у дуговому проміжку

Розмикання або замикання електричного кола при значних струмах і напругах, як правило, супроводжується електричним розрядом між контактами, що розходяться. Проміжок між контактами іонізується і стає на якийсь час провідним, у ньому виникає дуга. Тим або іншим способом дуга гаситься, тобто струм у колі падає від початкового значення до нуля. Фізичний процес вимикання електричного кола полягає у деіонізації повітряного проміжку між контактами, тобто в перетворенні його в діелектрик, і припиненні, внаслідок цього, електричного розряду [9-11,17].

Процес гасіння дуги досить важкий, оскільки будь-яке електричне коло має певну індуктивність L і ємність C (ємність проводів, струмоведучих частин тощо). Коли по такому колу протікає струм I , то в його індуктивності накопичується електромагнітна енергія $W_{em}=0.5I^2L$. Якщо при розмиканні кола змінного струму струм переривається раніше переходу його через природний нуль, наприклад, при значенні $i_{нов}$, то в ньому вивільняється електромагнітна енергія, що була згенерована в колі. Ця енергія не може швидко зникнути, а буде плавно, без стрибків зменшуватися, перетворюючись в інший вид енергії, наприклад, в енергію електростатичного поля $W_{em}=0.5CU^2$, і витрачається на заряд ємності C і нагрівання провідників. При цій напрузі на ємності, що дорівнює $U=I\sqrt{L/C}$, ємність може стати дуже великою.

Наприклад, якщо в колі 110 кВ здійснюється переривання струму при його значенні $i_{нов}=1000A$ і при $L=0.022Гн$ і $C=4\cdot 10^{-9}Ф$, то напруга на ємності буде $U=1000\sqrt{0.022/(4\cdot 10^{-9})}=2,3\cdot 10^3кВ$. Ця напруга викличе повторний пробій ізоляції і порушення роботи кола. В дійсності не вся електромагнітна енергія, що генерується в індуктивності, переходить в електростатичну. Частина електромагнітної енергії переходить в теплову енергію, і результуюча напруга на індуктивності буде менша тої, що наведена у попередньому прикладі.

Для успішного вимкнення електричного кола постійного струму без відчутного підвищення напруги електромагнітна енергія, що в ній генерується, повинна бути розсіяна в дугогасильному (комутаційному) пристрої апарата. В комутаційних апаратах таким елементом є електрична дуга, що виникає при комутації електричних кіл. Електромагнітна енергія кола перетворюється в дузі в теплову енергію, яка в процесі вимкнення розсіюється в навколишнє середовище.

Кількість електромагнітної енергії, що генерується в колі змінного струму, окрім струму I та індуктивності L , залежить ще і від моменту переривання струму (на початку півперіоду, в середині його або близько до кінця) і може складати декілька сот або тисяч джоулів. В кінці кожного півперіоду струм дорівнює нулю. Якщо контакти апарата миттєво розвести на необхідну відстань при проходженні струму через нульове значення, то дуга на контактах не виникне. Але миттєве вимкнення електричного кола практично неможливо здійснити.

При особливих умовах (дуже малих струмах і напругах, розриві кола змінного струму в момент переходу його через нуль і деяких інших) роз'єднання контактів може відбутися без електричного розряду. Таке вимкнення називається *безіскровим розривом*.

Електрична дуга є одним із видів розряду в газах або парах, який характеризується великою густиною струму, катодним спадом напруги порядку мінімального потенціалу збудження газу, невеликим спадом напруги в стовбурі дуги і високою його температурою. В дузі одночасно проходять як електричні, так і теплові процеси. Теплові процеси в дузі і теплообмін між дугою і оточуючим середовищем відіграють дуже велику роль і накладають свій відбиток на електричні процеси в дузі. Електрична дуга візуально являє собою канал, що світиться, заповнений плазмою. Плазмою називається газ, в якому значна кількість атомів і молекул іонізована і густина електронів n_e і додатних іонів n_+ , тобто кількість їх в одиниці об'єму настільки велика, що навіть невелика зміна n_e відносно n_+ виявляється неможливою через сильні електричні поля, що виникають між електронами і іонами при порушенні рівності між n_e і n_+ .

При значному відхиленні густини електронів n_e від густини додатних іонів n_+ в плазмі виникає електричне поле, яке здатне виштовхувати надлишкові заряджені частинки в ту область, де їх менше. Таким чином, в плазмі не відчувається різниці між густиною додатних і від'ємних заряджених частинок в умовах їх безперервного виникнення і зникання. Плазма складається із електронів, додатних іонів і нейтральних молекул і атомів, рівномірно перемішаних між собою, але неоднаково нагрітих.

Властивості плазми в електричній дузі залежать від тиску. При низьких тисках довжина вільного пробігу електронів відносно велика і вони набувають в електричному колі значну кінетичну енергію, яка значно перевищує кінетичну енергію додатних іонів і нейтральних частин газу. Кінетична енергія, яку має електрон, характеризується температурою електронів в плазмі. Ця температура відрізняється від температури плазми.

При низькому тиску температура електронів в плазмі досягає тисяч і десятків тисяч градусів, в той час як температура плазми може складати всьо-

го лиш декілька сотень градусів. Із збільшенням тиску температура електронів зменшується, а температура плазми збільшується. При атмосферному тиску ці температури стають майже однаковими. У відповідності з цим розрізняють:

- *дугу високого тиску*, що горить в газі при тиску атмосферному та вище;
- *дугу низького тиску*, що горить в газі при тиску, меншому від атмосферного;
- *вакуумну дугу*, що горить в газі при тиску, менше 0,01 Па.

В плазмі безперервно здійснюються процеси збудження, іонізації і деіонізації іонів, атомів і молекул.

Розглянемо фізичні процеси, що супроводжують виникнення електричної дуги, на прикладі електричного розряду в газах. Залежність спаду напруги на розрядному проміжку від струму електричного розряду в газах є *вольт-амперною характеристикою розряду* (рис. 4.1). Умовно він розбивається на три ланки.

Перша ланка (область *I*) кривої, що являє собою область *тліючого розряду*, характеризується високим спадом напруги біля катода (200-250 В) і малими струмами (до 0,1А). При тліючому розряді густина струму в розрядному проміжку вимірюється декількома мікроамперами на 1 см^2 . З ростом струму росте спад напруги на розрядному проміжку (до 300-400 В).

Друга ланка кривої (область *II*) являє собою перехід із *тліючого розряду в дуговий*.

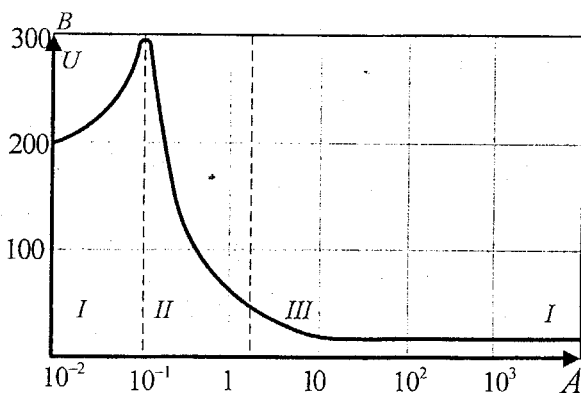


Рисунок 4.1 – Вольт-амперна характеристика електричного розряду в газах

Третя ланка кривої – *дуговий розряд* (область III), який характеризується малим спадом напруги біля електродів (10-20 В) і великою густиною струму (до 100 кА/см²). З ростом струму напруга на дуговому проміжку спочатку спадає, а потім практично мало змінюється.

Електрична дуга супроводжується високою температурою і пов'язана з цією температурою. Тому дуга – явище не тільки електричне, але і теплове.

У звичайних умовах повітря є гарним ізолятором. Наприклад, для пробою повітряного проміжку в 1 см потрібно прикласти напругу не менше 30 кВ. Для того, щоб повітряний проміжок став провідником, необхідно створити в ньому певну концентрацію заряджених частинок – негативних, в основному вільних електронів і позитивних іонів. Процес відділення від нейтральної частинки одного або декількох електронів і утворення вільних електронів і позитивно заряджених частинок іонів, називається *іонізацією*.

Іонізація газу може відбуватися під дією світла, рентгенівських променів, високої температури, під впливом електричного поля і ряду інших факторів.

Для дугових процесів в електричних апаратах найбільше значення має:

- з процесів, які відбуваються біля електродів:

- *термоелектронна емісія,*
- *автоелектронна емісія;*

- з процесів в дуговому проміжку:

- *термічна іонізація,*
- *іонізація поштовхом.*

У дузі, що виникає між розбіжними контактами, розрізняють навколочатодний простір, стовбур дуги і навколочатодний простір. Вся напруга розподіляється між цими областями. Біля катода спостерігається висока напруженість електричного поля (105-106 В/см). При таких високих напруженостях відбувається ударна іонізація. Електрони, вирвані з катода силами електричного поля (автоелектронна емісія) або за рахунок нагріву катода (термоелектронна емісія), розганяються в електричному полі і при ударі в нейтральний атом віддають йому свою кінетичну енергію. Вільні електрони, що утворилися в результаті іонізації, і іони складають плазму стовбура дуги. У стовбурі дуги проходить великий струм і створюється висока температура.

Високі температури в стовбурі дуги приводять до інтенсивної термічної іонізації, яка підтримує велику провідність плазми. Чим більший струм в дузі, тим менший її опір, тому потрібна менша напруга для горіння дуги, тобто дугу з великим струмом погасити важче.

Розглянемо більш детально фізичні явища, що супроводжують електричну дугу при розмиканні контактів в комутаційних електричних апаратах. При запалюванні та горінні електричної дуги основними фізичними явищами

є термоелектронна та автоелектронна емісії, іонізація поштовхом та термічна іонізація. При гасінні електричної дуги переважають рекомбінація та дифузія.

Термоелектронна емісія. Термоелектронною емісією називається явище випускання електронів із розжареної поверхні.

При розходженні контактів різко зростають перехідний опір контакту і густина струму в останній площадці контактування. Ця площадка розігрівається до розплавлення й утворення контактного перешийка з розплавленого металу, який при подальшому розходженні контактів розривається. Тут відбувається випарювання металу контактів. На негативному електроді утвориться так звана катодна пляма (розпечена площадка), що служить основою дуги й осередком випромінювання електронів у перший момент розходження контактів. Густина струму термоелектронної емісії залежить від температури і матеріалу електродів. Вона невелика і може бути достатньою тільки для виникнення електричної дуги, але недостатньою для її горіння.

Автоелектронна емісія. Це - явище випускання електронів із катода під впливом сильного електричного поля.

Місце розриву електричного кола може бути подано як конденсатор змінної ємності [4]. Ємність у початковий момент дорівнює нескінченності, потім зменшується в міру роз'єднання контактів. Через опір кола цей конденсатор заряджається і напруга на ньому зростає поступово від нуля до напруги мережі. Одночасно збільшується відстань між контактами. Напруженість поля між контактами під час зростання напруги проходить через значення, що перевищують 100 мВ/см. Такі значення напруженості електричного поля достатні для виривання електронів із холодного катода.

Струм автоелектронної емісії також дуже малий і може служити тільки початком розвитку дугового розряду.

Таким чином, виникнення дугового розряду на контактах, що розмикаються, пояснюється наявністю термоелектронної й автоелектронної емісії. Переважання того або іншого чинника залежить від величини струму, який вимикається, матеріалу і чистоти поверхні контактів, швидкості їх роз'єднання і від низки інших чинників.

Іонізація поштовхом. Якщо вільний електрон буде мати достатню швидкість, то при зіткненні з нейтральною частинкою (атомом, а іноді і молекулою) він може вибити з неї електрон. В результаті утворяться новий вільний електрон і позитивний іон. Отриманий електрон може в свою чергу іонізувати наступну частинку. Така іонізація носить назву *іонізації поштовхом*.

Для того щоб електрон міг іонізувати частинку газу, він повинен рухатися з певною швидкістю. Швидкість електрона залежить від різниці потен-

ціалів на шляху його вільного пробігу. Тому, зазвичай, вказується не швидкість руху електрона, а те мінімальне значення різниці потенціалів, яке необхідно мати на довжині вільного шляху для того, щоб електрон до кінця шляху набув необхідної швидкості. Ця різниця потенціалів носить назву *потенціалу іонізації*.

Потенціал іонізації для газів складає від 13-16 В (азот, кисень, водень) до 24,5 В (гелій). Для парів металу він приблизно в два рази нижчий (7,7 В для парів міді).

Потенціал іонізації газової суміші визначається найнижчим із потенціалів іонізації компонентів, які входять в газову суміш, і мало залежить від концентрації цих компонент. В короткій дузі завжди є пари металу електродів і потенціал іонізації дугового проміжку визначається потенціалом іонізації цих парів.

Слід зазначити, що не всякий електрон, що має швидкість вище швидкості, що відповідає напрузі іонізації U_i , іонізує нейтральну частинку. Це відбувається тому, що тільки частина таких електронів приходить у належне зіткнення з нейтральними частинками. При швидкостях, які є меншими швидкості, що відповідає U_i , можливість іонізації поштовхом дорівнює нулю. При великих швидкостях ця можливість зростає.

Термічна іонізація. Це - процес іонізації під впливом високої температури. Підтримка дуги після її виникнення, тобто забезпечення дугового розряду достатнім числом вільних зарядів, пояснюється основним і практично єдиним видом іонізації - *термічною іонізацією*.

Температура стовбура дуги сягає 4000-7000 К, а в деяких випадках - 15000 К. При такій температурі сильно зростає як кількість частинок газу, що рухаються швидко, так і швидкість їх руху. При зіткненні атомів або молекул, які швидко рухаються, велика частина їх руйнується, створюючи як нейтральні, так і заряджені частинки. Тобто, відбувається процес іонізації газу. Основною характеристикою термічної іонізації є *ступінь іонізації*, яка є відношенням кількості іонізованих атомів у дуговому проміжку до загальної кількості атомів у цьому проміжку. Одночасно з процесами іонізації в дузі відбуваються зворотні процеси, тобто з'єднання заряджених частинок і утворення нейтральних частинок. Ці процеси називають процесами *деіонізації*. При виникненні дуги - переважають процеси іонізації, у дузі, що стійко горить, процеси іонізації і деіонізації однаково інтенсивні. При переважанні процесів деіонізації у дуговому проміжку дуга гасне.

Деіонізація відбувається головним чином за рахунок рекомбінації і дифузії.

Рекомбінація. Процес, при якому різнозаряджені частинки, при взаємному зіткненні утворюють нейтральні частинки, називається *рекомбінацією*.

В електричній дузі негативними частинками є в основному електрони. Безпосереднє з'єднання електронів з позитивним іоном через велику різницю швидкостей малоймовірно. Зазвичай, рекомбінація відбувається за допомогою нейтральної частинки, яку електрон заряджає. При одночасному ударі негативно зарядженої частинки з позитивним іоном утвориться одна або дві нейтральні частинки.

Розрізняють рекомбінацію в об'ємі, коли третім тілом служить нейтральна частинка газу, і рекомбінацію на поверхні, коли третім тілом служить поверхня поблизу дуги (стінка камери).

В останньому випадку електрони заряджають поверхню стінки до потенціалів, при яких позитивні іони притягуються до цієї поверхні і, приєднавши електрон, утворюють нейтральні частинки.

Швидкість рекомбінації в об'ємі прямо пропорційна об'ємній густині іонів і обернено пропорційна кубу абсолютної температури. При відносно невеликих концентраціях іонів і невисоких температурах, рекомбінація на поверхні перевищує рекомбінацію в об'ємі в 10^2 - 10^4 раз.

Дифузія. Дифузія заряджених частинок – це процес винесення заряджених частинок із дугового проміжку в навколишній простір, що призводить до зменшення провідності дуги.

Дифузія обумовлена як електричними, так і тепловими чинниками. Густина зарядів у стовбурі дуги зростає від периферії до центру. Через це створюється електричне поле, яке змушує іони рухатися від центру до периферії і залишати область дуги. У цьому ж напрямку діє і різниця температур стовбура дуги і навколишнього середовища. Заряджені частинки, які покинули область дуги, в остаточному підсумку рекомбінуються поза цією областю. У стабілізованій дузі, що вільно горить, дифузія відіграє незначну роль.

В дузі, яка обдувається стисненим повітрям, а також у відкритій дузі, що швидко рухається, деіонізація за рахунок дифузії може за величиною бути близькою до деіонізації внаслідок рекомбінації. В дузі, що горить у вузькій щілині або закритій камері, деіонізація відбувається, головним чином, за рахунок рекомбінації.

З розгляду процесів іонізації і деіонізації випливає, що в залежності від своїх фізичних сталих, різноманітні гази можуть мати різні дугогасильні властивості. Гази з більшою теплопровідністю і теплоємністю мають кращу охолоджувальну спроможність, а отже, і кращі дугогасильні властивості. Так, наприклад, кисень, вуглекислота, водяний пар і водень мають стосовно повітря теплопровідність (середню, в межах 0 - 6000 K), відповідно, 1,8; 2,5; 5,0 і 17,0 та дугогасильні властивості, відповідно, 1,8; 2,6; 3,8 та 7,0.

4.2 Умови гасіння та вольт-амперні характеристики дуги

Вимкнення електричного кола комутаційним контактним апаратом являє собою процес зміни опору між двома контактами від декількох мікроом до десятків і сотень мегаом. Схематично процес розмикання контактів і утворення між ними ізоляційного проміжку можна уявити таким чином. При роз'єднанні контактів контактне натискання між ними поступово знижується і зменшується фактична площа їх стискання. В результаті збільшується густина струму на площадці контактування і її температура. При подальшому русі електронів температура в точці їх стискання зростає і до моменту їх фактичного роз'єднання досягає температури плавлення металу контактів. Коли контакти розійдуться на відстань, що вимірюється мікрометрами, між ними утворюється місток із рідкого металу, форма якого буде змінюватися від бочкоподібної до форми гіперboloїда. При розмиканні контактів гіперboloїд витягується і переріз його сідловини зменшується. Переріз сідловини, яка є найменшим перерізом містка, інтенсивно розігрівається, і температура в ньому досягає температури кипіння металу. Місток розривається, і між контактами виникає електрична дуга, що горить в парах металу. При розходженні контактів дуга стає довшою.

В комутаційних високовольтних апаратах дуга повинна бути погашена якомога швидше. Але умови гасіння і зовнішні дії на дугу можуть бути досить різними. У відповідності з цим прийнята така класифікація дуг.

За умовами гасіння розрізняють дуги:

- *короткі*, гасіння яких обумовлюється в основному процесами, що виникають на електродах;

- *довгі (плазмові)*, гасіння яких обумовлюється в основному процесами, що виникають в стовбурі дуги.

За характером зовнішніх дій на дугу розрізняють:

- *стабілізовані дуги*, що горять в обмеженому об'ємі (трубі);

- *відкриті дуги*, що вільно горять у повітрі;

- *дуги, що обдуваються* повздовжнім або поперечним потоком газу;

- *діркові*, що горять в дірці, утвореній стінками із теплостійкого ізоляційного матеріалу (дугогасильних решітках).

Залежність спаду напруги на стовбурі дуги від струму - це *вольт-амперна характеристика дуги* (рис. 4.2). Вона являє собою частину кривої (область III) на рис. 4.1. Напруга U_d , яка відповідає початку дугового розряду, називається *напругою запалювання дуги*. З підвищенням струму напруга на дузі зменшується. Це означає, що опір дугового проміжку зменшується швидше, ніж збільшується струм. Для кожного значення струму в певний момент часу має місце рівновага, коли іонізація дорівнює деіонізації. Електричний

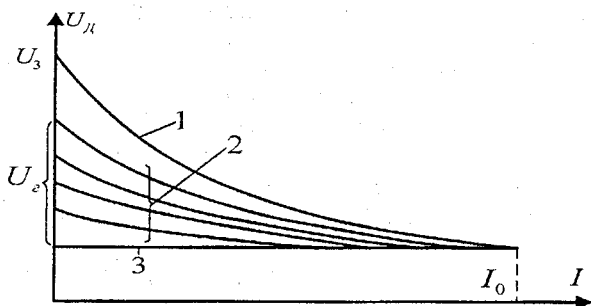


Рисунок 4.2 – Вольт-амперні характеристики дуги.

опір дугового проміжку і спад напруги на дузі стануть за певних умов величинами сталими, які не залежать від часу. Такий режим носить назву *статичного*, а крива 1, що характеризує цей режим, – *статичної характеристики дуги*.

Якщо з певною швидкістю зменшити струм у дузі відзначення I_0 до нуля і при цьому фіксувати спад напруги на дузі в залежності від струму, то одержимо ряд кривих 2, які лежать нижче кривої 1. Чим швидше буде відбуватися зменшення струму, тим нижче буде лежати вольт-амперна характеристика дуги.

При миттєвій зміні струму до нуля, отримаємо пряму 3. Тільки при повільній зміні струму процес у дуговому проміжку буде відбуватись за статичною характеристикою. Такий характер вольт-амперних характеристик пояснюється тим, що при швидкій зміні струму іонізаційний стан дугового проміжку не встигає за зміною струму. Для деіонізації проміжку потрібно певний час. Незважаючи на те, що струм у дузі зменшується, провідність проміжку певний час ще залишається на попередньому рівні, який відповідає більшому струму. Тобто, процес йде з певним запізненням.

Вольт-амперні характеристики дуги, які отримані при швидкій зміні струму до нуля, носять назву *динамічних*. Відповідна цим характеристикам напруга, при якій дуга гасне, називається *напругою гасіння* U_g .

Для даного дугового проміжку, матеріалу електродів і середовища, в якому горить дуга, є одна цілком певна статична характеристика дуги і множина динамічних, які розташовані між кривими 1 і 3 (рис. 4.2).

Якщо спад напруги на дузі U_d характеризує дуговий проміжок як провідник, то напруга запалювання U_3 і напруга гасіння U_g характеризують ізо-

ляційні властивості проміжку. Вони визначають напруги, які необхідно прикласти при даному стані проміжку, щоб збудити в ньому електричну дугу.

Спад напруги на стаціонарній дузі розподіляється нерівномірно вздовж дуги. Картину зміни спаду напруги U_d і поздовжнього градієнта напруги E_d вздовж дуги наведено на рис. 4.3.

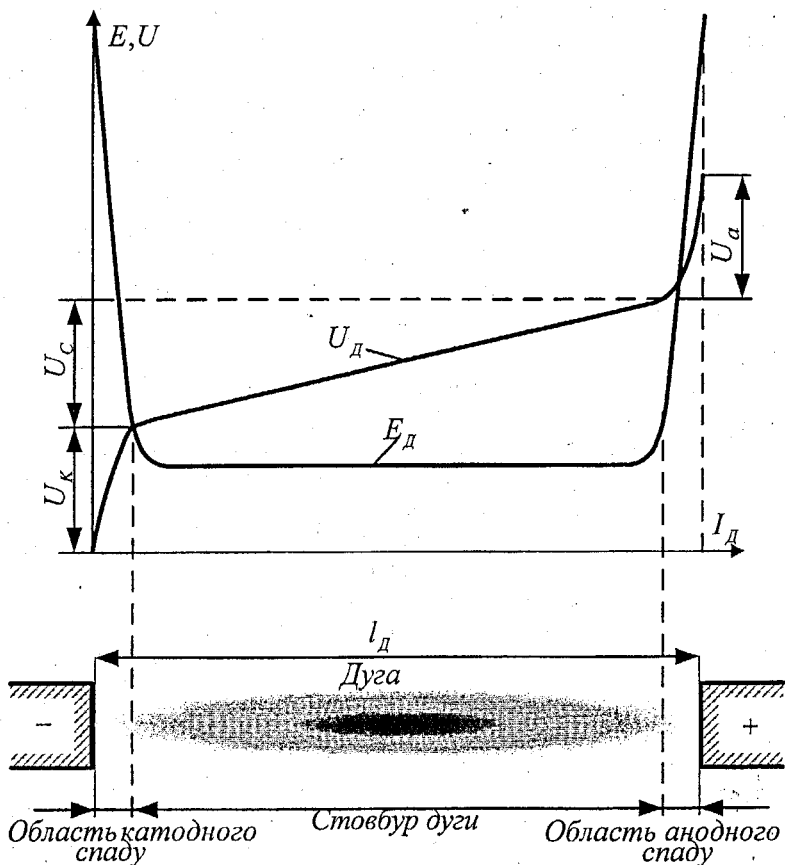


Рисунок 4.3 – Розподіл напруги і поздовжнього градієнта напруги в дузі постійного струму

Під *градієнтом напруги* розуміють спад напруги на одиницю довжини дуги. Як видно з рис. 4.3, хід характеристик U_d і E_d в навколоелектродних областях різко відрізняється від ходу характеристик на іншій частині дуги - стовбурі. Біля електродів, у навколочатодній і навколоанодній областях, на проміжку довжиною порядку 10^{-4} см має місце різкий спад напруги. Воно має назву *катодного* U_k і *анодного* U_a спадів напруги. Величина цього спаду напруги залежить від матеріалу електродів і навколишнього газу.

В іншій частині дуги - стовбурі дуги, спад напруги U_d практично прямо пропорційний довжині дуги. Сумарне значення навколоанодного і навколочатодного спаду напруг складає 15-30 В, градієнт напруги досягає значень 10^5 - 10^6 В/см. Градієнт напруги є майже сталою величиною вздовж усього стовбура дуги. Він залежить від багатьох чинників і може змінюватися в широкіх межах, досягаючи 100-200 В/см.

Навколочатодний спад напруги U_e не залежить від довжини дуги, від спаду напруги в стовбурі та прямо пропорційний довжині дуги.

Спад напруги на дуговому проміжку визначається таким чином

$$U_d = U_e + E_d l_d, \quad (4.1)$$

де E_d - поздовжній градієнт напруги на стовбурі дуги; l_d - довжина дуги; $U_e = U_k + U_a$ - навколочатодний спад напруги.

При зменшенні температури стовбура дуги зменшуються струм і переріз дуги. Для підтримання стійкого потоку заряджених частинок повинна збільшитися напруженість електричного поля, при цьому зростає величина поздовжнього градієнта напруги E_d і напруга на дузі U_d .

Іншими словами, охолодження стовбура дуги викликає підвищення напруги на дуговому стовбурі. Охолодження електродів теж приводить до збільшення величини навколочатодного спаду напруги U_e .

Підвищення тиску в стовбурі дуги теж приводить до підвищення напруги на дузі, оскільки кількість молекул газу в одиниці об'єму збільшується, посилюється конвекція і поліпшуються умови охолодження стовбура дуги. Градієнт напруги в стовбурі дуги росте при цьому пропорційно тиску плазми дуги.

Середовище, в якому горить електрична дуга, теж суттєво впливає на напругу дугового проміжку, оскільки поздовжній градієнт напруги на стовбурі дуги залежить від теплопровідності цього середовища. Ця різниця є суттєвою, наприклад, для елегазового та вакуумного середовища в порівнянні з маслом, повітрям або електромагнітним способом гасіння дуги.

Наприклад, у масляних вимикачах дуга горить в масляних парах і водні, в повітряних - в середовищі стисненого повітря, у елегазових

вимикачах – в середовищі шестифтористої сірки.

В табл. 4.1 наведено відносні коефіцієнти теплопровідності, що показують, як змінюється градієнт напруги на дузі залежно від середовища, в якому горить дуга.

Таблиця 4.1

Параметр дуги	Повітря	Азот	Кисень	Вуглекислий газ	Водяна пара	Водень
Коефіцієнт теплопровідності	1,0	0,8	1,8	2,5	5,0	17,0
Відносний градієнт напруги	1,0	1,0	2,3	1,7	4,4	13,5

Для порівняння параметри повітря прийняті за одиницю. Вплив парів металів, за винятком вакуумного дугогасильного середовища, на поздовжній градієнт напруги є неістотним і ним можна знехтувати.

4.3 Умови гасіння дуги постійного струму

Процес вимкнення електричного кола вимикачем високої напруги можна умовно розбити на три фази, що дуже швидко і без пауз протікають одна за одною: розмикання контактів і виникнення дуги; гасіння дуги; відновлення електричної міцності дугового проміжку, що перешкоджає повторному запалюванню дуги.

При цьому у вимикачах змінного струму гасіння дуги полегшується переходом струму через нуль. Дуга при змінному струмі є своєрідним природним елементом процесу вимкнення, що точно вказує на оптимальний момент вимкнення і істотно сприяє самому процесу вимикання. Слід лише забезпечити якнайшвидше відновлення електричної міцності дугового проміжку шляхом його деіонізації і видалення з нього заряджених частинок.

У вимикачах постійного струму основним засобом гасіння дуги є розтягування її до так званої критичної довжини і одночасне збільшення поздовжнього градієнта напруги E_d і величини навколоелектродного спаду напруги U_e (див. (4.1)). Критичною називають таку довжину дуги постійного струму, при якій вона (при заданих постійних E_d і U_e) існувати не може.

Щоб погасити дугу постійного струму, необхідно створити такі умови, при яких у дуговому проміжку, при всіх значеннях струму від початкового до

кінцевого (нульового) значення процеси деіонізації переважали б над процесами іонізації.

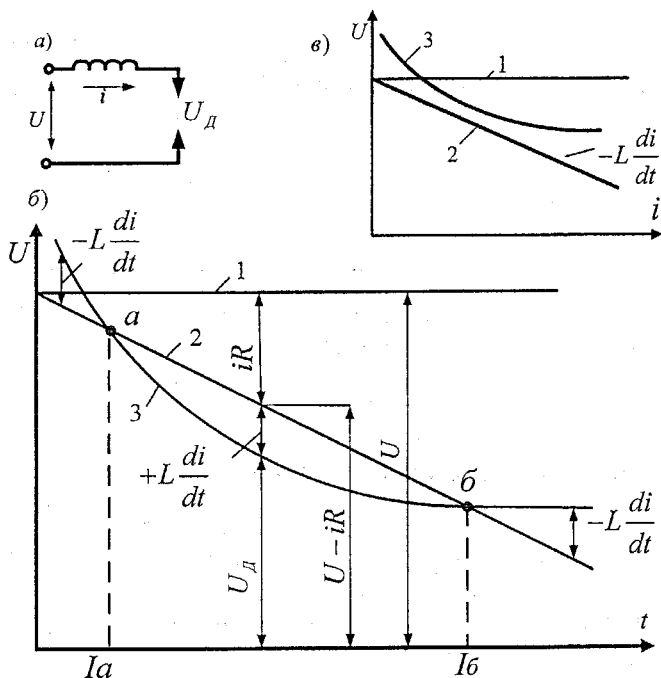


Рисунок 4.4 – Умови гасіння дуги постійного струму

Для електричного кола з опором R , індуктивністю L і дуговим проміжком зі спадом напруги U_d (рис. 4.4, а), до якої прикладена напруга джерела струму U , для будь-якого моменту часу справедливим буде рівняння:

$$U = U_d + iR + L \frac{di}{dt}, \quad (4.2)$$

тут $L \frac{di}{dt}$ – спад напруги на індуктивності при зміні струму.

При дузі, що горить стало, $di/dt = 0$ і відповідно

$$U = U_d + iR, \quad (4.3)$$

В точках a і b виконується умова $U = U_d - iR$; $L \frac{di}{dt} = 0$. В цих точках має місце стан рівноваги. Але у точці a ми маємо нестійку рівновагу, а у точці b - стійку.

При струмах $i < I_a$ напруга

$$U_d > U - iR, \quad (4.4)$$

а $L \frac{di}{dt}$ - має від'ємне значення, і якщо з якоїсь причини струм стане меншим за величиною ніж I_a , то він зменшиться до нуля і дуга погасне.

Якщо ж з певних причин струм стане більшим I_a , то буде виконуватись умова $U_d = U - iR$. Тобто в колі ніби-то з'явиться "надлишкова" напруга, що призведе до зростання струму до значення I_b .

При будь-якому значенні $I_a < i < I$ струм у дузі буде зростати до значення I_b .

Між точками a і b величина $L \frac{di}{dt}$ - є додатною - зростання струму в колі супроводжується накопиченням електромагнітної енергії.

При струмах $i > I_b$ напруга

$$U_d > U - iR,$$

а $L \frac{di}{dt}$ - стане знову величиною негативною. Тобто для підтримки такого значення струму напруги U недостатньо. Струм у колі буде зменшуватись до значення I_b . Дуга в цій точці буде горіти стало.

Для згасання дуги необхідно, щоб при будь-якому значенні струму виконувалась умова (4.4). Це значить, що вольт-амперна характеристика дуги повинна по всій своїй довжині лежати вище характеристики $U - iR$ (як це показано на рис. 4.4, ϵ) і не мати з цією характеристикою жодної точки дотику. Варто мати на увазі, що під вольт-амперними характеристиками дуги треба розуміти динамічні характеристики дуги.

4.4 Опір та потужність дуги. Енергія, що виділяється у дузі

Наступними важливими характеристиками дуги є її опір, потужність і енергія, що безпосередньо показує, яку роботу виконує вимикач в процесі вимкнення електричного кола.

Опір дуги R_d незалежно від роду струму можна вважати чисто активним. Він є величиною змінною, яка зменшується з ростом струму, і може бути визначений з вольт-амперної характеристики дуги.

Опір дуги

$$R_d = U_d / i. \quad (4.5)$$

Потужність електричної дуги

$$P_d = U_d i. \quad (4.6)$$

Енергія W_d , що виділяється в дузі за час t_f її горіння,

$$W_d = \int_0^{t_f} U_d i dt. \quad (4.7)$$

Для комутаційних електричних апаратів суттєве значення має визначення значення цієї енергії за один цикл вимикання. Підставивши в (4.7) значення U_d відповідно до (4.2), одержимо для дуги постійного струму

$$W_d = \int_0^{t_f} R(I_0 - i) dt + \int_0^{t_f} L i dt = L \frac{I_0^2}{2} + \int_0^{t_f} R(I_0 - i) dt = W_m + W_r, \quad (4.8)$$

де $W_m = L \frac{I_0^2}{2}$ - згенерована енергія магнітного поля кола, що вимикається;

$W_r = \int_0^{t_f} R(I_0 - i) dt$ - енергія, що надходить від генератора в дугу за час її горіння;

$I_0 = \frac{U}{R}$ - початкове значення струму.

Ця енергія повинна бути відведена від стовбура дуги шляхом його охолодження. Задовільно організоване відведення теплоти дуги, як правило, означає успішне вимкнення електричного кола. Незадовільне відведення теплоти дуги майже завжди приводить до неприємних наслідків: викиду масла в масляних вимикачах, пошкодження дугогасильних камер повітряних, елегазових та вакуумних вимикачів і навіть вибуху вимикачів.

Процес вимкнення проходить тим успішніше, чим менше енергії W_d виділяється у дузі. Для вимикачів змінного струму це означає, що напруга запалювання дуги повинна бути максимально високою, а час дії вимикача - мінімальним, що забезпечить мінімальну тривалість горіння дуги. Найменшій енергії дуги відповідає абсолютно мінімальна швидкість її вимкнення, коли контакти миттєво розведено на відстань, що забезпечує гарантоване гасіння дуги. А це досягається у момент переходу струму через нуль (синхронне вимкнення). Сприятливою тривалістю горіння дуги у вимикачах змінного струму є тривалість півхвилі, оскільки ще швидше вимкнення може призвести до "зрізу струму", тобто переривання його раніше природнього переходу через нуль. Наслідком цього є виникнення великих перенапруг в

електричних колах, що вимикаються.

Скорочення часу горіння дуги істотно впливає також на контактну систему вимикача. Вони не повинні перегріватися, щоб по можливості ослабити термоелектронну емісію, а також повинні бути виготовлені з матеріалів з високою питомою теплоємністю і теплопровідністю.

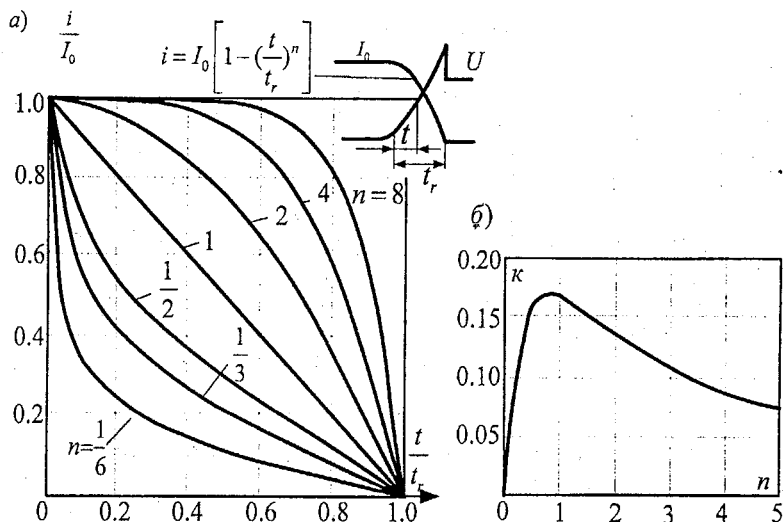


Рисунок 4.5 – Зміна струму у дузі:

а – залежності $i = I_0 \left[1 - \left(\frac{t}{t_r} \right)^n \right]$; б – залежності $k = f(n)$.

Незалежно від способу гасіння дуги постійного струму в ній виділяється енергія, яка була згенерована в магнітному полі кола, що вимикається, плюс ще якась частинка енергії, що надійде від генератора за час горіння дуги (у дузі, що горить стало, вся енергія, яка виділяється в ній, надходить від генератора).

Зміна струму в дузі при вимиканні кола може бути охарактеризована таким емпіричним виразом:

$$i = I_0 \left[1 - \left(\frac{t}{t_r} \right)^n \right]. \quad (4.9)$$

де t_r – час гасіння; t – поточна координата; n – деяка стала для даних умов ве-

личина.

Графічно рівняння (4.9) подано множиною кривих на рис. 4.5, а.

Для дугогасильних пристроїв із вузькими щілинами і для закритих дугогасильних пристроїв, а також при значних індуктивностях $n > 1$ (порядку 2–4). Для відкритих дугогасильних пристроїв і при активному навантаженні $n \leq 1$.

Підставивши (4.9) у вираз для W_r , отримаємо

$$W_r = kRI_0^2 t_r = LI_0^2 k \frac{t_r}{T}, \quad (4.10)$$

де $k = n/(2n^2 + 3n + 1)$, $T = L/R$ – стала часу кола, яке вимикається.

Криву, яка характеризує залежність $k = f(n)$, наведено на рис. 4.5, б. Енергія, що надходить у дугу від генератора, пропорційна часу горіння і залежить від коефіцієнта k , який характеризує певною мірою дугогасильний пристрій.

Максимальна кількість енергії виділиться в дузі при зміні струму за законом, який близький до лінійного.

При цьому $k_{n=1} = 0,167$, а струм у колі за час вимикання змінюється за лінійним законом:

$$i = I_0 (1 - t/t_r).$$

Таким чином, енергія, яка виділяється в дузі при вимиканні електричного кола постійного струму

$$W_a = W_m + W_r = L \frac{I_0^2}{2} \left(1 + 2k \frac{t_r}{T} \right). \quad (4.11)$$

У дузі змінного струму, якщо гасіння відбувається в момент переходу струму через нуль, виділиться енергія

$$W_r = \left(\frac{1}{\pi f} I_m U_d \right) m, \quad (4.12)$$

де f – частота; I_m – струм; U_d – спад напруги на дузі; m – кількість напівперіодів горіння дуги.

Енергія $W_m = L \frac{I_0^2}{2}$ магнітного поля електричного кола, яке вимикається, повертається в генератор. Мінімальна кількість енергії у дузі виділиться, якщо дуга погасне при першому проходженні струму через нуль ($m = 1$). Якщо дуга почне гаснути раніше природного переходу струму через нуль, то частина енергії не встигне повернутися в генератор і виділиться в дузі, що може призвести до повторного запалювання дуги або викинення значних перенапруг в колах, що вимикаються.

4.5 Особливості горіння та згасання дуги змінного струму

Якщо для гасіння дуги постійного струму необхідно створити такі умови, при яких струм впаде до нуля, то при змінному струмові незалежно від ступеня іонізації дугового проміжку струм у дузі переходить через нуль кожний півперіод (рис.4.6). Ця обставина сприятливо впливає на гасіння дуги, якщо електричне коло розмикається або в самий момент переходу струму через нуль, або в безпосередній близькості від нього. Одночасно вдається уникнути і комутаційних перенапружень, оскільки під час переходу струму через нуль накопичена в індуктивності контура електромагнітна енергія ($Li^2/2$) практично дорівнює нулю.

Тобто, при змінному струмі кожний півперіод дуга гасне і запалюється знову. Тому для ефективного гасіння дуги необхідно створити умови, при яких струм не відновився б після проходження через природний нуль.

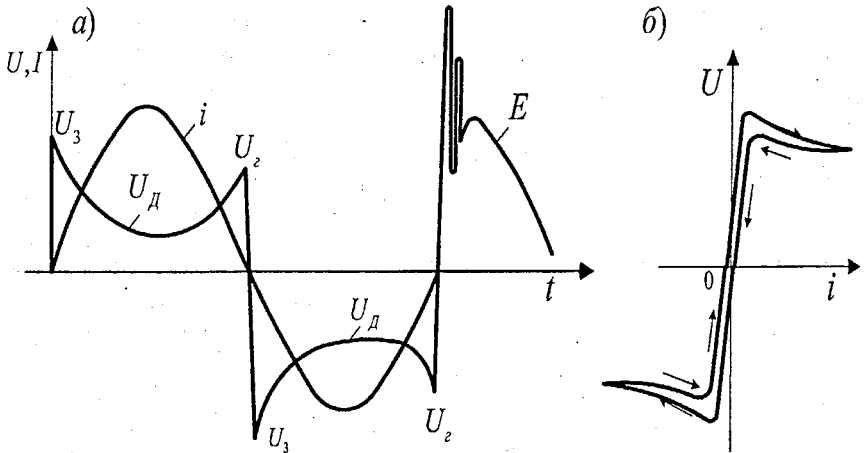


Рисунок 4.6 – Характеристики дуги змінного струму

На рис. 4.6, а наведено криві зміни струму і напруги на дуговому проміжку при змінному струмі. В момент появи струму в електричному колі має місце різке наростання напруги U_3 , (напруга запалювання). Із збільшенням струму спад напруги на дузі зменшується і досягає мінімуму при максимальному струмі (при амплітудному значенні). Згодом напруга на дузі знову

зростає і досягає значення напруги згасання U_r в момент, коли струм в колі досягає свого нульового значення. Вольт-амперну характеристику дуги змінного струму за період наведено на рис. 4.6, б. Напруга запалювання дуги залежить від амплітуди струму і при великих струмах вона є величиною незначною.

При змінному струмі температура дуги є величиною змінною. Але теплова інерція газу є досить значною і в момент переходу струму через нуль температура дуги не зменшується до нуля і залишається достатньо високою. Зниження температури дуги, яке все таки має місце при переході струму через нуль, сприяє деіонізації проміжку і полегшує умови гасіння дуги.

В дійсності при переході через нуль струм у дузі змінюється за законом, який відрізняється від синусоїдального $[i \neq I_m \sin(\omega t - \varphi)]$. Трохи раніше моменту природного переходу струму через нуль, струм у дузі спадає майже до нуля, а згодом, після переходу через нуль стрибком знову досягає відповідного значення. Схематично процес переходу струму через нуль показано на рис. 4.7 (суцільною лінією).

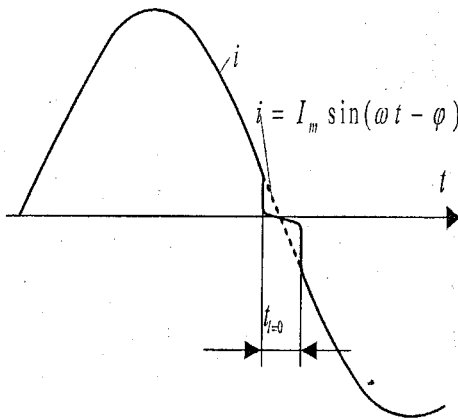


Рисунок 4.7 – Процес переходу струму через нуль

Таким чином, при переході струму через нуль має місце *безструмова пауза* $t_{I=0}$, під час якої відбувається інтенсивна деіонізація дугового проміжку. При малоіндуктивному навантаженні ця пауза більша, при більшій індуктивності ця пауза менша або дуже мала (порядку 0,1 мкс).

Інтенсивна деіонізація дугового проміжку при переході струму через нуль призводить до зменшення його провідності. Чим більше часу проміжок буде деіонізований, тим більша напруга буде потрібна для його пробію і повторного запалювання дуги.

Умова гасіння дуги змінного струму може бути сформульована таким чином: якщо наростання опору проміжку, поданого його пробивною напругою $U_{пр}$ (крива 1 на рис. 4.8), буде випереджати наростання напруги U на проміжку (крива 2), то дуга погасне при переході струму через нуль. Якщо ж

наростання опору проміжку піде повільніше (крива 3), то в момент часу, що відповідає точці O , відбудеться повторне запалювання дуги, у колі з'явиться струм і відповідний йому спад напруги на дузі (крива 4).

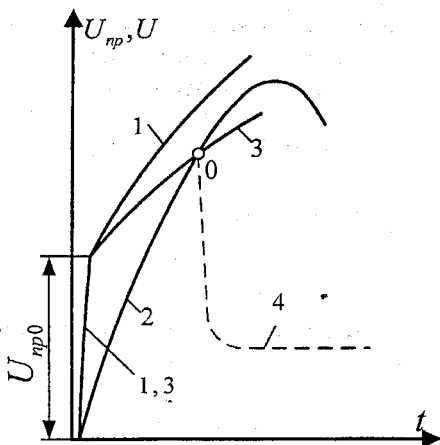


Рисунок 4.8 – Умови гасіння дуги змінного струму

Дуже важливе значення для гасіння дуги змінного струму при напругах до 1000 В мають явища, що відбуваються біля катода при переході струму через нуль. Існувало уявлення, що в момент переходу струму через нуль в навколкатодній області практично миттєво (за час $t < 1$ мкс) ізоляційна стійкість проміжку відновлюється до значення пробивної напруги $U_{пр0} = 150 \div 250$ В (початкова ділянка кривої 1 на рис. 4.8). Більшу величину напруги відносили до менших струмів і холодного катода, меншу – до великих струмів і гарячого катода.

На принципі використання зазначеного явища біля катода виконана велика частина дугогасильних пристроїв низковольтних вимикальних апаратів. Практика, проте, не завжди підтверджувала значення миттєвого відновлення міцності дугового проміжку 150-250 В, особливо при значних струмах та частих циклах вимкнення-вмикання.

Дослідження, проведені в останні роки, показують, що таке значення міцності має місце при холодних або дуже швидко охолоджуваних електродах ($\Theta < 800$ К), біля основи дуги при переході струму через нуль. Якщо ж дуга швидко пробігає по електродах і зупиняється на їх краях протягом відносно великого часу (соті частинки секунди), то електроди в основі дуги си-

льно розігріваються і за переходом струму через нульове значення емітують електрони в міжконтактний проміжок. Останнє істотно знижує значення відновлювальної міцності дугового проміжку біля катода, яке досягає величини всього декількох десятків вольт.

Таким чином, в залежності від теплового режиму в дуговому проміжку комутаційних електричних апаратів можуть спостерігатися практично будь-які значення відновлювальної міцності, в тому випадку і білякатодній області порядку 150-250 В. Останнє значення відповідає умовам, коли в міжконтактному проміжку створюється режим, близький до стадії нормального тліючого розряду.

Ці умови можуть зустрічатися в раціонально сконструйованих дугогасильних пристроях.

4.6 Відновлення електричної міцності дугового проміжку. Відновлювальна напруга

Для того, щоб дуговий проміжок не був повторно пробитий відновлювальною напругою, необхідно якнайшвидше усунути з нього заряджені частинки, тобто деіонізувати його. У стаціонарній дузі безперервно протікають спонтанні процеси деіонізації, що врівноважують іонізаційні процеси. Після першого обриву дуги природна деіонізація в її стовбурі посилюється внаслідок припинення підведення енергії і спаду температури. Проте іонізація, що існувала в стовбурі дуги до переходу струму через нуль, зникає не відразу і затримує процес відновлення електричної міцності дугового проміжку. Температура залишкового стовбура дуги спадає за експоненціальною залежністю:

$$t = t_{наск.} - (t_{д.} - t_{наск.}) \exp(-\tau/\nu), \quad (4.13)$$

де $t_{наск.}$ - температура навколишнього середовища; $t_{д.}$ - температура в центрі стовбура дуги перед обривом; ν - теплова постійна часу дуги.

Оскільки теплова постійна часу дуги дуже мала (10^{-3} - 10^{-4} с), температура залишкового стовбура дуги спадає надзвичайно швидко і вже через декілька мілісекунд або навіть через доли мілісекунди досягає температури навколишнього середовища.

Електрична міцність повітря обернено пропорційна температурі повітря t_e

$$U_{пр} = \frac{t_{наск.}}{t_e} u_0, \quad (4.14)$$

де U_0 – електрична міцність повітря при температурі Q і, отже, вона також підвищується за експоненціальною залежністю з постійною часу ν .

Вище було показано, що тепла постійна часу дуги залежить від процесу охолодження. Чим інтенсивніше відбувається відведення теплоти від стовбура дуги, тим швидше підвищується її опір і електрична міцність, тим менша постійна часу дуги. Крім того, на неї впливають також фізичні властивості середовища, в якому горить дуга, і величина струму. Наприклад, при струмах до 5 А постійна часу дуги в елегазі дорівнює 1-2 мкс, а в повітрі вже дорівнює 100-200 мкс. При збільшенні струму до декількох сотень ампер значення постійної часу дуги в повітрі і в інших газах зближуються і складають сотні мікросекунд.

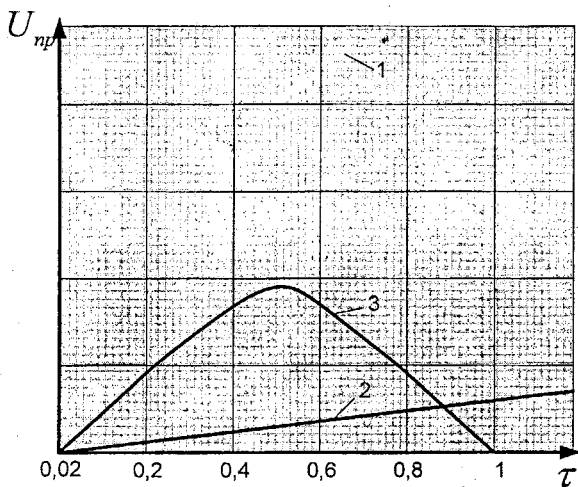


Рисунок 4.9 – Залежності процесу відновлення електричної міцності дугового проміжку від часу:

- 1 – постійна часу дуги $\nu = 10^{-4}$ с; 2 – постійна часу дуги $\nu = 10^{-3}$ с;
3 – півперіод відновлювальної напруги при частоті 1 кГц

На рис. 4.9 показані залежності електричної міцності дугового проміжку від часу при природній деіонізації (крива 2, для $\nu = 10^{-3}$ с) і при форсованому охолодженні стовбура дуги (крива 1, для $\nu = 10^{-4}$ с). Як бачимо, крива 3 відновлювальної напруги, що має частоту 1 кГц, не перетинається з кривою 1 і гасіння дуги відбудеться після першого ж

переходу струму через нуль.

Крива 2 перетинає криву 3 вже при $0,02$ мс ($2 \cdot 10^{-5}$ с). У цей момент дуговий проміжок буде пробитий і відбудеться повторне запалювання дуги. Отже, щоб не допустити повторного запалювання, треба застосувати спеціальні засоби для інтенсивного охолодження стовбура дуги, прискорення деіонізації і відновлення електричної міцності дугового проміжку.

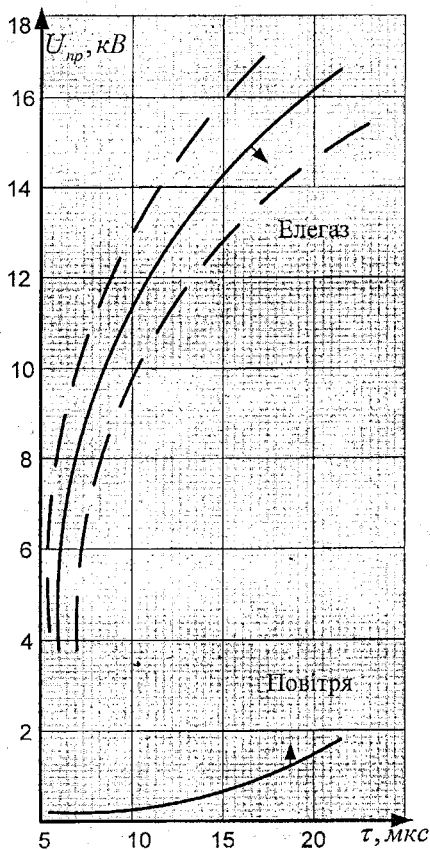


Рисунок 4.10 – Електрична відновлювальна міцність повітря і елегазу (штрихові лінії – розкид значень при випробуваннях)

До них можна віднести різного роду дуття, що здійснюється в конструкціях дугогасильних пристроїв різними способами: масляне, газове, стисненим повітрям, магнітне тощо. При цьому слід підкреслити значний вплив на процес деіонізації фізичних властивостей дугогасильного середовища. На рис. 4.10 наведені відносні швидкості відновлення електричної міцності для повітря і елегазу при радіальному магнітному дутті. Як бачимо, деіонізувальні властивості елегазу в 8 -10 разів вищі, ніж повітря. В масляних вимикачах організованому дуттю допомагає сильний турбулентний рух масла, що виникає біля газового пузиря, в якому горить дуга. Цей процес супроводжується перемішуванням масла і інтенсивним відведенням теплоти від стовбура дуги. Дуття в різного роду камерах сприяє інтенсивній дифузії заряджених частинок, виносячи їх за межі стовбура дуги.

У цьому сенсі особливо ефективними є дугогасильні камери повітряних вимикачів, в яких плазма повністю видувається з міжконтактного проміжку потоком стисненого повітря.

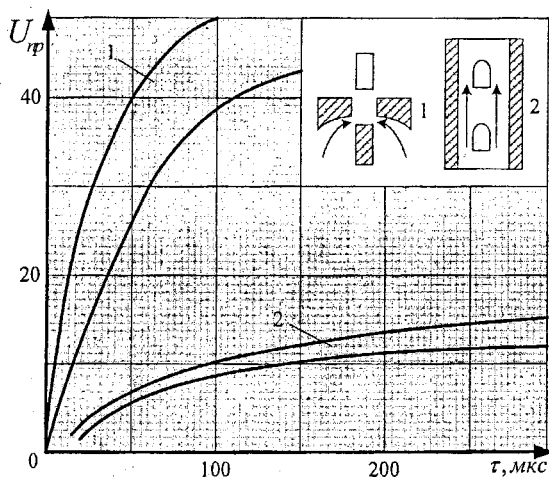


Рисунок 4.11 - Зони відновлення електричної міцності дугового проміжку для двох типів дугогасильних камер: 1 - дуття через сопло; 2 - дуття в циліндрі

На швидкість підвищення електричної міцності впливають також параметри дуття. Підвищення тиску гасильного середовища може помітно прискорити відновлення електричної міцності. Суттєвим також є вплив

конструктивного виконання дугогасильної камери на міцність дугового проміжку, що відновлюється. На рис. 4.11 наведено порівняльний аналіз швидкостей збільшення відновлення електричної міцності в повітряних вимикачах з різними типами дугогасильних камер.

Для апаратів низької напруги істотне значення має швидкість відновлення електричної міцності в біляелектродних зонах. Ця швидкість значно вища в навколокатодній зоні. Це пояснюється великою різницею в масі електронів, що намагаються досягти анода, і іонів, що рухаються до катода. Відразу ж після обриву дуги в білякатодному просторі утворюється зона, позбавлена заряджених частинок, і електрична міцність в цій зоні стрибком підвищується до 150-250 В. Тому суттєвим також є вплив матеріалу електродів на відновлювальну міцність проміжку, а також її залежність від струму (рис. 4.12) [9]. У вимикачах високої напруги також існує стрибок відновлювальної міцності, проте тут це не відіграє великої ролі, оскільки напруга, що відновлюється на контактах вимикача після обриву дуги, набагато вища початкового стрибка міцності в білякатодному просторі.

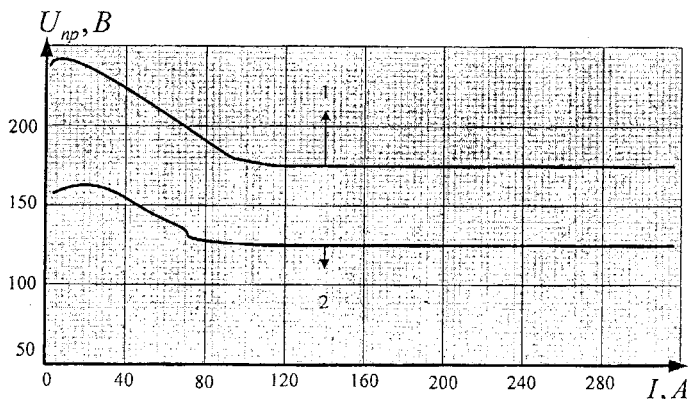


Рисунок 4.12 – Початковий стрибок відновлювальної міцності дугового проміжку в залежності від струму для: 1 – латунних електродів; 2 – мідних електродів

Окрім електричного пробою, розглянутого вище, існує ще небезпека теплового пробою дугового проміжку через наявність залишкового струму в міжконтактному проміжку після згасання дуги.

В зв'язку з тим, що під впливом відновлювальної напруги відбувається неповна деіонізація дугового проміжку (не всі заряджені частинки встигли

покинути зону гасіння дуги) в дуговому проміжку виникає залишковий струм навіть після роз'єднання контактів і згасання дуги.

Залишковий струм замикається через ємність мережі, що увімкнена паралельно контактам вимикача, і, як видно з діаграми на рис. 4.13, він виникає дещо раніше природного переходу струму, що вимикається, через нуль. А це призводить до певної компенсації струму дуги, який через різке зростання опору стовбура дуги зникає дещо раніше природного його переходу через нуль (так зване явище "зрізу струму").

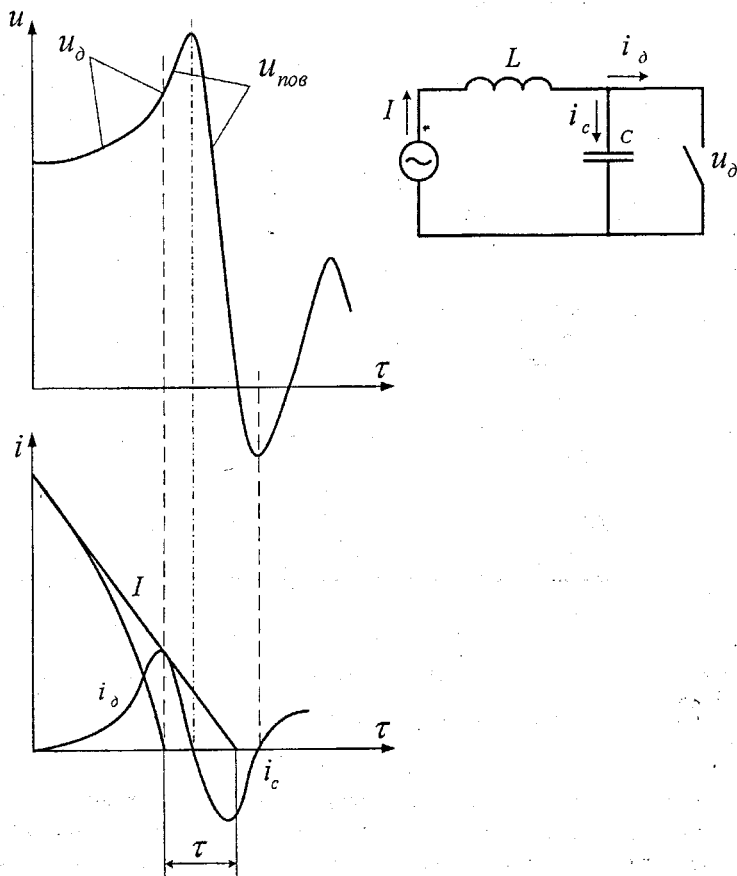


Рисунок 4.13 - Процес відновлення напруги при вимкненні електричного кола з ємністю

Залишковий струм звичайно має невелике значення, швидко досягає свого максимуму і потім спадає до нуля, в більшості випадків не ускладнюючи процесу вимкнення і навіть певною мірою допомагаючи йому, демпфуючи відновлювальну напругу. Проте в несприятливих умовах, коли енергія, що виділяється залишковим струмом, перевищує енергію, що відводиться від дуги, виникають кумулятивні зростання залишкового струму і висока температура стовбура дуги, що приводить до теплового пробою дугового проміжку і повторного запалювання дуги. Сучасні вимикачі мають, як правило, вельми ефективну систему дугогасіння, і тому тепловий пробій в них практично виключений.

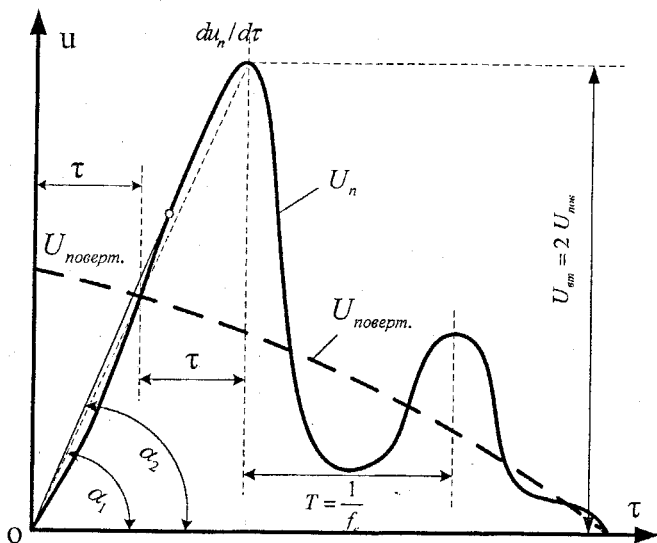


Рисунок 4.14 – Одночастотна крива процесу відновлення напруги на контактах вимикача після вимкнення електричного кола

Відновлювальна напруга, що виникає на контактах вимикача відразу після згасання в ньому електричної дуги, може бути одночастотною або багаточастотною. Взагалі, так звана одночастотна крива також є багаточастотною, принаймні двочастотною, оскільки окрім власної частоти мережі в ній присутня частота 50 Гц. Проте частота напруги відновлювальної

мережі принаймні на порядок вища за робочу частоту, тому в дуже короткі проміжки часу процеси, що відбуваються з частотою 50 Гц, відносно високочастотних коливальних процесів, можуть розглядатися як незмінні.

Процес відновлення напруги при одночастотній кривій характеризується такими показниками:

- частотою відновлювальної напруги $f_{\text{в}}$;
- швидкістю зростання відновлювальної напруги $d_{\text{в}}/d_{\text{т}}$;
- коефіцієнтом перевищення амплітуди $U_{\text{вmax}}/U_{\text{поверт.т}} = K_{\text{пов.д}}$, тобто відношенням найбільшої амплітуди відновлювальної напруги до найбільшої амплітуди напруги промислової частоти, що повертається.

Частота відновлювальної напруги та швидкість зростання відновлювальної напруги служать в стандартах всіх країн для характеристики успішності процесу вимкнення коротких замикань. Характеристики перехідної відновлювальної напруги (ПВН) нормуються для вимикачів напругою до 35 кВ та напругою 110 кВ і вище. На рис. 4.14 показано спосіб приведення величин до одночастотного контура при вимкненні невіддаленого короткого замикання (не більше 5-6 км від вимикача), де $U_{\text{поверт.}}$ – напруга, що повертається, тобто напруга робочої частоти, що з'являється на контактах вимикача після вимкнення електричного кола.

Процес відновлення напруги на дуговому проміжку вимикача залежить також від параметрів електричного кола, що вимикається (співвідношення активного опору, ємності та індуктивності). Цей процес схематично показано на рис. 4.15.

На рис. 4.15, *a* і *б* взято струм, який відстає від е.р.с. на 90° , що звичайно має місце при коротких замиканнях в промислових мережах змінного струму. Процес відновлення напруги відбувається за короткий проміжок часу – порядку десятків або сотень мікросекунд. Е.р.с. джерела струму, що змінюється з частотою 50 Гц, можна вважати за цей час сталою.

Миттєва е.р.с. джерела $U_{\text{вmax}}$, яка відповідає перехідному процесу напруги на дуговому проміжку, носить назву *відновлювальної напруги промислової частоти*.

Відновлення напруги на дуговому проміжку може відбуватися аперіодично (рис. 4.15, *a*) або через коливальний процес (рис. 4.15, *б*). В першому випадку напруга на проміжку $U_{\text{вmax}}$ не може бути вища е.р.с. джерела струму $E_{\text{м}}$. В іншому випадку напруга теоретично може бути як завгодно великою, практично вона не перевищує $2E_{\text{м}}$. Частота і амплітуда коливань перехідного процесу визначаються індуктивністю, ємністю і опором джерела струму (генератора) та кола. Частота коливального процесу лежить у межах від декількох тисяч до одного-двох десятків тисяч герц.

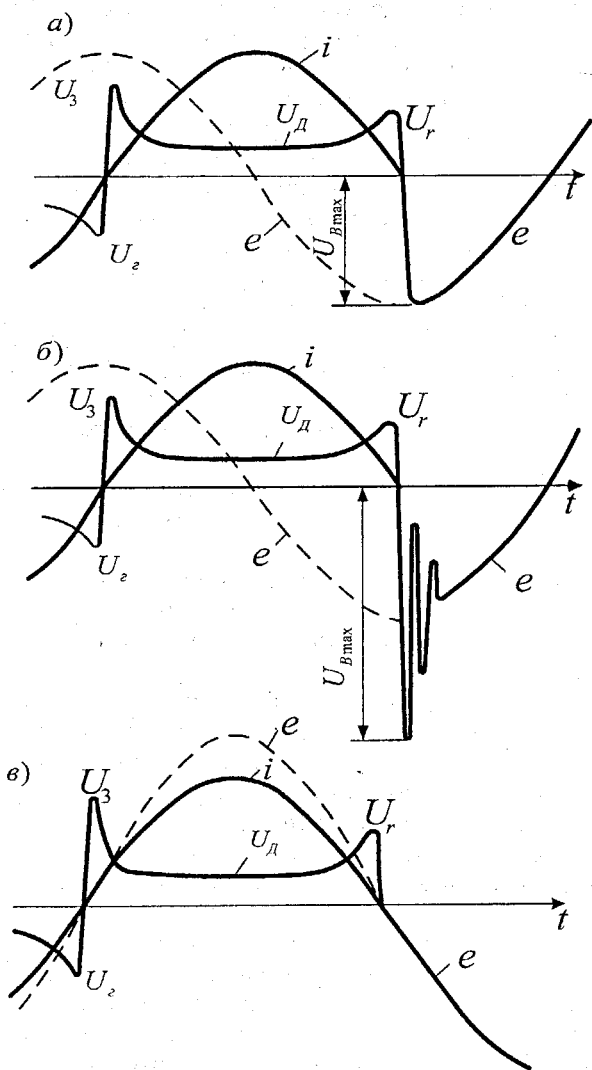


Рисунок 4.15 – Процеси при відновлюванні напруги на дуговому проміжку: а– аперіодичний процес; б– коливальний процес; в– при активному навантаженні

Розглядався випадок вимикання індуктивного кола, коли струм зсунутий на 90° відносно е.р.с.

Візьмемо інший крайній випадок – вимкнення активного кола. Тут струм збігається за фазою з е.р.с. Струм і е.р.с. переходять через нуль одночасно (рис. 4.15, е) – відновлювальна напруга проміжку буде дорівнювати нулю. Тобто, процес вимикання активного навантаження відбувається набагато легше, ніж індуктивного.

4.7 Особливості гасіння дуги змінного струму підвищеної частоти

Електричні апарати низької напруги виготовляються для змінного струму підвищеної частоти 400-500 Гц, а також 2,5-10 кГц (гартівні установки). У останньому випадку частота коливального процесу при відновленні напруги на дуговому проміжку має такий же порядок, як і частота струму. Тут уже не можна вважати е.р.с. джерела живлення незмінною за час перехідного процесу. Близький збіг частот джерела живлення і власних коливань істотно змінює характер перехідних процесів при гасінні електричної дуги. Якщо при промисловій частоті вимикання індуктивного контура ($\varphi \rightarrow 90^\circ$) було важчим, ніж вимикання активного контура ($\varphi \rightarrow 0$), то вже при підвищеній частоті вимикання активного контура здійснюється важче, ніж індуктивного.

При гасінні дуги в індуктивному контурі промислової частоти напруга на дуговому проміжку може досягти значень $2E_m$. При гасінні дуги в активному контурі підвищеної частоти напруга не може перевищувати величини E_m . Цим, за інших рівних умов, полегшується гасіння високочастотної дуги в порівнянні з дугою промислової частоти.

Існують, проте, і чинники, що погіршують умови гасіння дуги підвищеної частоти. При промисловій частоті температура дугового проміжку при переході струму через нуль встигає впасти на 30-50%, що сприяє інтенсифікації процесів деіонізації.

При дузі підвищеної частоти істотного зниження температури дугового проміжку при переході струму через нуль не відбувається. Якщо не враховувати явищ біля катода при переході струму через нуль, то умови гасіння дуги підвищеної частоти ($f \rightarrow 10$ кГц) наближаються до умов гасіння дуги постійного струму.

Контрольні запитання

1. Чому виникає електрична дуга при роз'єднанні контактів ?
2. Вольт-амперна характеристика дугового розряду в газах та її основні характеристики.
3. Дати означення терміна " іонізація ".
4. Дати означення терміна " деіонізація ".
5. Пояснити фізичні особливості процесу термічної іонізації.
6. Пояснити фізичні особливості процесу іонізації поштовхом.
7. Пояснити фізичні особливості процесу термоелектронної емісії.
8. Пояснити фізичні особливості процесу автоелектронної емісії.
9. Пояснити явище рекомбінації та дифузії.
10. Навести приклади статичної та динамічної характеристик дуги.
11. Дати означення термінів – "напруга запалювання" та "напруга згасання" електричної дуги.
12. Дати характеристику позовжнього градієнта напруги та навести його графічну інтерпретацію.
13. Записати рівняння спаду напруги на дуговому проміжку та дати характеристику його складовим.
14. Навести основні характеристики процесу відновлення електричної міцності дугового проміжку.
15. Дати означення терміна " відновлювальна напруга промислової частоти".
16. Сформулювати умови гасіння дуги постійного струму та навести їх геометричну інтерпретацію.
17. Основні особливості горіння та згасання дуги змінного струму.
18. Сформулювати умови гасіння дуги змінного струму та навести їх геометричну інтерпретацію.
19. Сформулювати умови гасіння дуги змінного струму підвищеної частоти.

5 СПОСОБИ ГАСІННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ В КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТАХ

5.1 Характеристика способів гасіння електричної дуги

5.1.1 Загальні положення

Для гасіння електричної дуги в електричних апаратах необхідно створити певні умови, при яких спад напруги на дузі перевищував би напругу мережі. Відповідно до рівняння

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

де E_d – поздовжній градієнт напруги;

l_d – довжина дуги;

$U_s = U_k + U_a$ – навколоелектродний спад напруги

Гасити дугу доцільно такими основними способами :

– збільшуючи її довжину l_d (розтягуючи);

– впливаючи на її стовбур добиватись підвищення поздовжнього градієнта напруги E_d ;

– використовуючи особливості навколоелектродних спадів напруги U_k та U_a біля катода та анода.

Електричні апарати комутування мають звичайно два електроди, тому для використання навколоелектродного спаду напруги необхідно створити дугогасильні пристрої з багатьма електродами. Такі пристрої одержали назву *дугогасильних решіток*.

Найпростіший спосіб гасіння – розтягування дуги. Сам по собі він малоефективний. Спад напруги на дузі пропорційний довжині дуги, і якщо поздовжній градієнт малий, то для одержання якогось значного спаду напруги потрібна велика довжина дуги, що в апаратах зробити практично неможливо. Так, при постійному струмі понад 100 А поздовжній градієнт напруги у відкритій дузі складає 6-8 В/см (крива $v = 0$ на рис. 5.1), а для довгих дуг, де вплив парів металу електродів є меншим, градієнт напруги при тих самих струмах досягає 12 В/см. При змінному струмі середнє значення градієнта дорівнює 15 В/см. Вимкнення струму понад 100 А при напрузі 220 В потребує розтягування дуги на 25-30 см. Треба враховувати, що при відносно малих швидкостях розходження контактів дуга до моменту повного згасання призводить до їх сильного пошкодження.

Головним іонізуючим чинником, який підтримує горіння електричної дуги, є *термічна іонізація*. Звідси випливає, що гасіння дуги повинно в головному здійснюватися за рахунок її охолодження. Дугу можна обдувати газом (повітрям, елєгазом) або рідиною (маслом). Такі способи застосовуються у високовольтних вимикачах, але вони потребують відносно складних і дорогих дугогасильних пристроїв. Дугу можна переміщувати через нерухомі газ або рідину, ефект охолодження буде таким же, як при обду-

ванні. Цей спосіб здійснюється відносно просто за допомогою магнітного поля і має широке застосування, особливо в низьковольтних комутаційних апаратах.

Уявлення про залежність поздовжнього градієнта напруги від швидкості переміщення дуги в повітрі дають вольт-амперні характеристики на рис. 5.1. Вже при швидкості руху дуги 100 м/с для гасіння відкритої дуги з струмом понад 100 А при напрузі 220 В достатньо розтягнути її на 5 см.

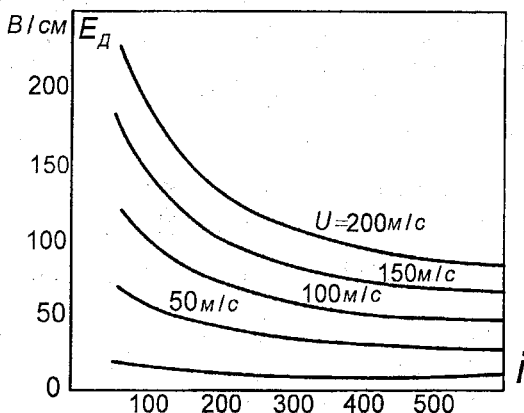


Рисунок 5.1 – Поздовжній градієнт напруги в стовбурі відкритої дуги постійного струму при різних швидкостях пересування дуги

Слід зазначити ще одну обставину. У відкритій нерухомій і штучно не охолоджуваній дузі густина струму мала. Діаметр такої дуги великий. Як тільки дуга починає рухатися або починає штучно охолоджуватися, її діаметр зменшується, густина струму і температура в ній зростають, збільшується і тиск усередині дуги. В результаті посилюється деіонізація і зростає поздовжній градієнт напруги. Таким чином, зростання поздовжнього градієнта напруги в дузі, що рухається, відбувається не тільки за рахунок її кращого охолодження і дифузії, але і за рахунок підвищення тиску в її стовбурі.

Якщо в нерухомій дузі густина струму складає 18-20 А/см², то в дузі, що рухається, густина струму досягає десятків тисяч ампер на квадратний сантиметр. Наприклад, при струмі 40 кА і швидкості руху дуги, що дорівнює 250 м/с, максимальний тиск у стовбурі дуги досягає 2,5 МПа.

У колах змінного струму струм в дузі кожен півперіод проходить через нуль, в ці моменти дуга гасне мимоволі, але в наступний півперіод вона може виникнути знову. Як показують осцилограми, струм в дузі стає близьким нулю декілька раніше природного переходу його через нуль. Це по-

яснюється тим, що при зниженні струму енергія, що підводиться до дуги, зменшується, отже зменшується температура дуги і припиняється термічна іонізація. Тривалість безструмової паузи невелика (від десятків до декількох сотень мікросекунд), але відіграє важливу роль в процесі гасіння дуги. Якщо розімкнути контакти в безструмову паузу і розвести їх з достатньою швидкістю на велику відстань, щоб не відбувся електричний пробій, то коло буде вимкнено дуже швидко.

Під час безструмової паузи інтенсивність іонізації дуже зменшується, оскільки не відбувається термічної іонізації дугогасильного середовища. У комутаційних апаратах, крім того, використовують штучні заходи охолодження дугового простору і зменшення числа заряджених частинок.

Різке збільшення електричної міцності проміжку після переходу струму через нуль відбувається, головним чином, за рахунок збільшення міцності навколокатодного простору.

Завдання гасіння дуги зводиться до створення таких умов, щоб електрична міцність дугового проміжку між контактами була більша напруги між ними.

5.1.2 Основні способи гасіння дуги в комутаційних апаратах напругою до 1 кВ

В комутаційних електричних апаратах до 1 кВ широко використовуються такі способи гасіння дуги.

1. Подовження дуги при швидкому розмиканні контактів: чим довша дуга, тим більша напруга необхідна для підтримання процесу її горіння. Якщо напруга джерела стане достатньо малою, то дуга погасне.

2. Ділення довгої дуги на ряд коротких дуг.

3. Гасіння дуги у вузьких щілинах. Якщо дуга горить у вузькій щілині, утвореній дугостійким матеріалом, то завдяки зіткненню з холодними поверхнями відбувається інтенсивне охолодження і дифузія заряджених частинок в навколишнє середовище. Це приводить до швидкої деіонізації дугового проміжку і гасіння дуги.

4. Рух дуги в магнітному полі. Електрична дуга може розглядатися як провідник із струмом. Якщо дуга знаходиться в магнітному полі, то на неї діє сила, яка визначається за правилом лівої руки. Якщо створити магнітне поле, направлене перпендикулярно осі дуги, то вона одержить поступальну ходу і буде затягнута всередину щілини дугогасильної камери.

У радіальному магнітному полі дуга одержить обертальний рух. Магнітне поле може бути створено постійними магнітами, спеціальними котушками або самим контуром струмоведучих частин електричних апаратів. Швидке обертання і переміщення дуги сприяє її охолодженню і деіонізації. Останні два способи гасіння дуги (у вузьких щілинах і в магнітному полі) застосовуються також в комутаційних апаратах напругою вище 1 кВ.

5.1.3 Основні способи гасіння дуги в електричних апаратах напругою вище 1 кВ

До основних способів гасіння електричної дуги в комутаційних високовольтних електричних апаратах можна віднести такі:

1. Гасіння дуги в маслі. Якщо контакти комутаційного апарата помістити в масло, то дуга, що виникає при розмиканні, приводить до інтенсивного газоутворення і випаровування масла. Навколо дуги утворюється газовий пузир, що складається в основному з водню; швидке розкладання масла приводить до підвищення тиску в пазирі, що сприяє її кращому охолодженню і деіонізації. Водень має високі дугогасильні властивості; дотикаючись безпосередньо до стовбура дуги, він сприяє її інтенсивній деіонізації. У середині газового пузиря відбувається безперервний рух газу і парів масла. Гасіння дуги в маслі широко застосовується у вимикачах напругою 10 -110 кВ.

2. Газоповітряне дуття. Охолодження дуги поліпшується, якщо створити направлений рух газів – дуття. Дуття уподовж або упоперек дуга сприяє проникненню газових частинок в її стовбур, інтенсивній дифузії і охолодженню дуги. Газ може утворюватись при розкладанні масла дугою (масляні вимикачі) або твердих газогенеруючих матеріалів (автогазове дуття). Ефективніше дуття холодним неіонізованим повітрям, що поступає із спеціальних балонів із стисненим повітрям (автопневматичний піддув).

3. Багатократний розрив кола струму. Вимкнення великих струмів при високій напрузі дуже ускладнює процес гасіння електричної дуги. Це пояснюється тим, що при великих значеннях енергії, що підводиться, і відновлювальної напруги на контактах вимикача, деіонізація дугового проміжку значно ускладнюється. Тому у вимикачах високої напруги (110 – 750 кВ) застосовують багатократний розрив дуги в кожній фазі. Такі вимикачі мають декілька дугогасильних пристроїв, розрахованих на частину номінальної напруги. Число розривів на фазу залежить від типу вимикача і його напруги. У вимикачах напругою 750 кВ може бути 12 розривів і більше. Щоб полегшити гасіння дуги, напруга, що відновлюється, повинна рівномірно розподілятися між розривами. Для вирівнювання напруги паралельно головним контактам вимикача вмикають смісні або активні опори.

4. Гасіння дуги у вакуумі. Високорозріджений газ має електричну міцність, в десятки разів більшу, ніж газ при атмосферному тиску. Якщо контакти розмикаються у вакуумі, то відразу ж після першого проходження струму через нуль міцність дугового проміжку відновлюється і дуга не спалахує знову. Ці властивості вакууму використовуються в деяких типах вимикачів, переважно напругою 6-35 кВ.

5. Гасіння дуги в газах високого тиску. Повітря при тиску 2 МПа і більше також має високу електричну міцність. Це дозволяє створювати до-

статньо компактні пристрої для гасіння дуги в атмосфері стислого повітря. Ще ефективніше застосування високоміцних газів, наприклад, шестифтористої сірки SF₆ (елегазу). Елегаз має не тільки більшу електричну міцність, ніж повітря і водень, але і кращі дугогасильні властивостями навіть при атмосферному тиску. Елегаз застосовується у вимикачах напругою як 10 кВ для розподільних установок, так і в високовольтних вимикачах напругою 35, 100-750 кВ, а також у віддільниках, короткозамикачах і іншій апаратурі високої напруги, наприклад, вимірювальних трансформаторах струму та напруги.

Задача конструювання дугогасильних пристроїв електричних апаратів полягає у забезпеченні певних умов, які дозволили б ефективно погасити дугу [8-10]. Основні з цих умов такі:

- дугу потрібно гасити в малому об'ємі;
- при малому звуковому і світловому ефекті;
- за малий час;
- при малому зношуванні струмоведучих частин;
- при заданих перенапругах.

5.2 Гасіння дуги в поздовжніх щілинах

У сучасних комутаційних електричних апаратах, широке поширення одержали дугогасильні камери з поздовжніми щілинами. Поздовжньою називають щілину, вісь якої збігається за напрямком з віссю стовбура ду-

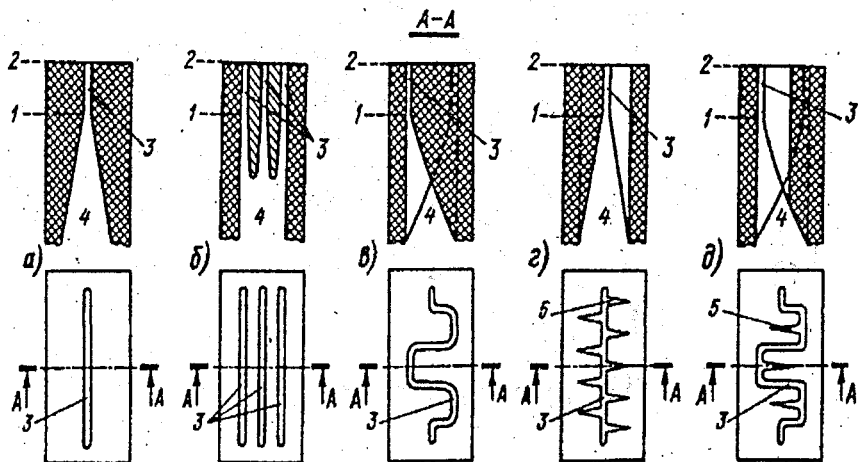


Рисунок 5.2 – Характерні форми поздовжніх щілин дугогасильних камер

ги. Така щільна утворюється між двома ізоляційними пластинами.

На рис. 5.2 схематично зображені характерні форми поздовжніх щілин дугогасильних камер електричних апаратів.

У верхній частині камери (рис. 5.2, а) між точками 1 і 2 є одна пряма поздовжня щілина 3 із плоскопаралельними стінками. У камері (рис. 5.2, б) застосовано декілька прямих паралельних щілин, аналогічних щілині в камері на рис. 5.2, а. Декілька паралельних щілин застосовують при вимиканні великих струмів. Проте паралельні дуги існують недовго. Вони дуже нестійкі і всі, крім однієї – останньої, швидко гаснуть.

На рис. 5.2, в показана камера з однією поздовжньою щілиною 3, якій надана звивиста форма. При такій формі є можливим у камері невеликих розмірів розташувати довгу дугу. Крім того, наявність ребер сприяє підвищенню напруги на дузі. Саме ці особливості обумовлюють ті переваги аналізованої камери, які забезпечують їй широке застосування в комутаційних апаратах.

Поздовжня щілина з рядом ребер і розширень 5, за рахунок яких відбувається зростання поздовжнього градієнта напруги, зображена на рис. 5.2, г.

Камера (рис. 5.2, д) має комбіновану звивисту щілину 3 з місцевими розширеннями 5. У такій щілині поєднуються всі переваги звивистої щілини з перевагами, що дають місцеві розширення.

З погляду особливостей руху електричної дуги в поздовжніх щілинах

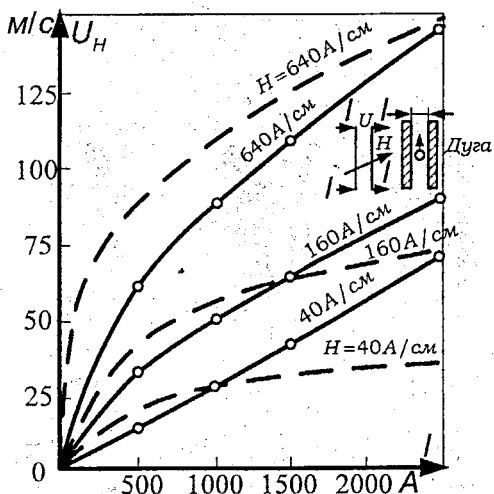


Рисунок 5.3 – Залежність швидкості руху відкритої дуги і дуги в широкій щілині від струму

розрізняють щілини широкі і вузькі. Широкою називають щілину 4, ширина якої значно більша діаметра дуги. Вузькою називають щілину 1, ширина якої менша діаметра дуги або близька до нього.

Оскільки діаметр дуги залежить від струму, швидкості руху дуги і умов охолодження, то для одних умов щілина буде широкою, для інших умов ця ж щілина буде вузькою. У широких щілинах рух дуги обмежено стінками, переріз її стовбура недеформований. Якісно всі явища тут відбуваються так, як і в дузі, що горить відкрито. Наявність стінок вносять тільки деякі кількісні зміни в закономірності, що мають місце у відкритій дузі.

У вузьких щілинах рух дуги дуже обмежений, переріз стовбура дуги деформований, умови охолодження різко змінені. Все це призводить до появи ряду нових явищ, які якісно й кількісно відрізняються від тих, що відбуваються у відкритій дузі.

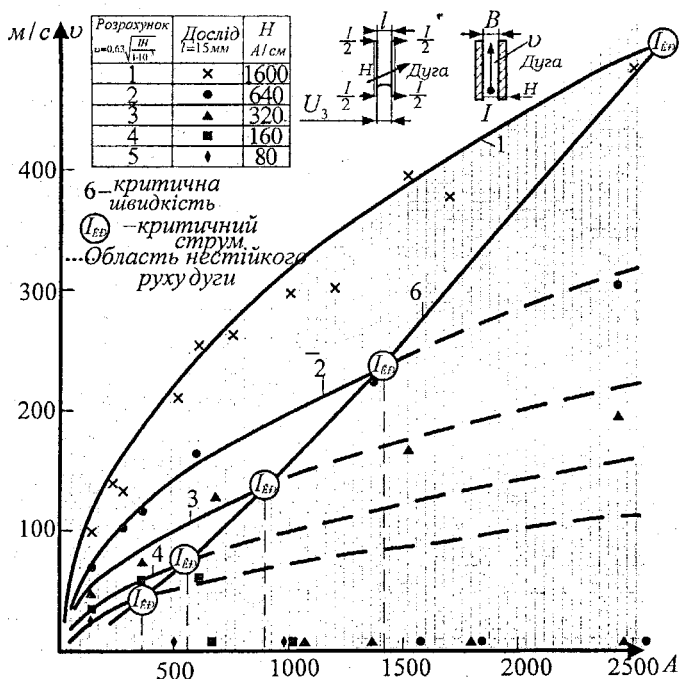


Рисунок 5.4 – Залежність швидкості руху дуги у вузькій щілині ($\delta = 1$ мм) від струму

Швидкість руху дуги. Криві, що характеризують залежність швидкості руху дуги в широкій щілині ($\delta = 16$ мм) від струму при різних напруженостях магнітного поля, наведені на рис. 5.3. Характер кривих якісно ана-

логічний характеру кривих для відкритої дуги (штрихові криві). Кількісного збігу між кривими не спостерігається. У вузькій щілині ці кількісні розбіжності призводять до якісно нових явищ.

На рис. 5.4 наведені криві, що характеризують залежність швидкості руху дуги від струму у вузькій щілині.

Із зростанням струму швидкість руху дуги зростає (ділянки кривих зліва від кривої 6). Далі явище одержує хиткий характер: дуга або рухається з відповідною швидкістю (штрихові лінії); або її швидкість спадає до нуля. У більш вузьких щілинах і при менших напруженостях магнітного поля нестійкий рух дуги спостерігається при малих струмах. Струм, при якому починається нестійкий рух дуги та його припинення, назовемо критичним $I_{кр}$. Крива 6 відокремлює ті області, у яких дуга не зупиняється, від тих областей, де відбувається її зупинення.

Причиною зупинення дуги у вузькій щілині варто вважати теплові

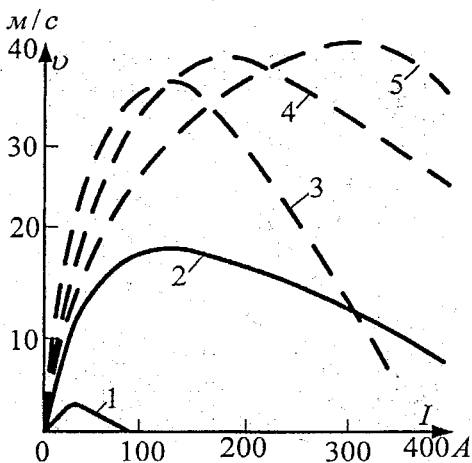


Рисунок 5.5 — Залежність швидкості руху дуги від струму в камерах із різних матеріалів при 1) $\delta=1$ мм $H=40$ А/см : 1 — азбоцемент; 2 — кераміка; 2) $H = 160$ А/см: 3 — азбоцемент; 4 — кераміка; 5 — скло

явища в стінках камери. У вузькій щілині дуга деформована і щільно притиснута до стінок. Вся енергія дуги сприймається стінками. Із зростанням струму енергія, що виділяється в дузі, приблизно пропорційна квадрату струму, а швидкість руху дуги пропорційна IH .

Отже, при незмінному H із зростанням струму відбувається зростаюче розігрівання стінок. При деякому струмі і відповідній йому швидкості руху дуги стінки настільки розігріваються, що на них з'являються провідні контактні перешийки. Дуга зупиняється. Крива 6 характеризує ту мінімальну швидкість (назовемо цю швидкість критичною $v_{кр}$), яку необхідно надати дузі за даними умовами (струм, ширина щілини, матеріал камери), щоб запобігти її зупиненню.

Відзначимо, що зупиненню дуги сприяє газогенерація зі стінок камери. Виділення газу, випаровування вологи зі стінок камери відбуваються під дією високої температури дуги. При бурхливій газогенерації створюється місцеве підвищення тиску в щілині, зростає опір руху дуги, а отже, і

знижується її швидкість. Останнє призводить до ще більшого розігріву стінок і лавиноподібному гальмуванню дуги аж до її зупинення. Гігроскопічність матеріалу, наявність в ній випарних компонентів, а також шорсткість поверхні сприяють газогенерації і за інших рівних умов призводять до зупинення дуги при менших струмах.

Наочно проілюстровано цей процес на рис. 5.5. Матеріали, що сильно газогенерують під впливом високої температури, а також дуже гігроскопічні матеріали не можуть застосовуватися для камер із вузькими щілинами.

Залежність швидкості руху дуги в поздовжніх щілинах від напруженості магнітного поля може бути охарактеризована кривими на рис. 5.6.

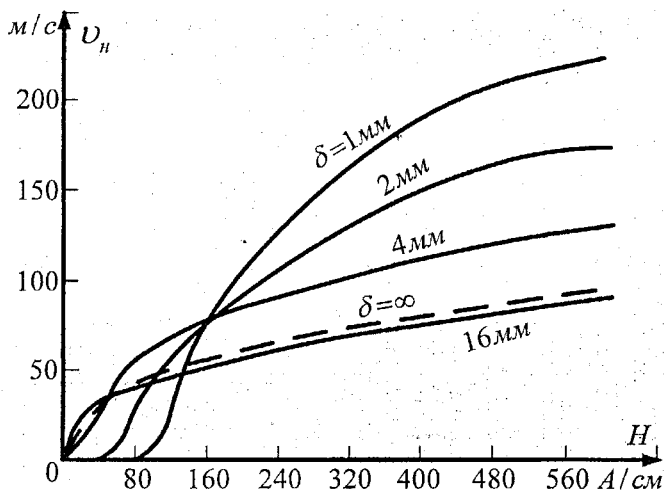


Рисунок 5.6 – Залежність швидкості руху дуги від напруженості магнітного поля

У широких щілинах ($\delta=16$ мм) швидкість дуги зростає із зростанням напруженості магнітного поля подібно тому, як це має місце у відкритій дузі (штрихова крива). У вузьких щілинах ($\delta = 4$ мм) дуга при малих напруженостях магнітного поля горить нерухомо. При підвищенні напруженості магнітного поля швидкість дуги різко, майже стрибком зростає і значно перевищує швидкість відкритої дуги і дуги в широких щілинах. Мінімальне значення напруженості магнітного поля, необхідне для забезпечення руху дуги при даному струмі і ширині щілини, називається критичною напруженістю $H_{кр}$. Критична напруженість магнітного поля зростає при збільшенні струму і зменшенні ширини щілини.

Залежність швидкості руху дуги від ширини щілини характеризується кривими на рис. 5.7. У дуже широких щілинах (область L) швидкість дуги

практично не залежить від ширини щілини. В міру звуження щілини швидкість дуги (при незмінних I та H) дещо зростає. Залишаючись широкою, щілина усе ж обмежує можливості згортання дуги в спіраль і її розщеплення на паралельні волокна. Це і призводить до деякого зростання швидкості дуги.

У вузьких щілинах (область II) дуга, подібно поршню, виштовхує стовп повітря, що знаходиться перед нею, і засмоктує стовп повітря, що знаходиться за нею. У більш вузькій щілині об'єм (відповідно і маса) цього повітря менший, відповідно менший і опір руху дуги. Швидкість дуги при інших рівних умовах зростає зі зменшенням ширини вузької щілини:

$$v_H = k \sqrt{\frac{IH}{\delta}}, \quad (5.2)$$

де $k = 0,63 - 0,90$ для $\delta = 1 - 4$ мм відповідно (тут v_H в метрах за секунду); I – в амперах; H – в амперах на метр; δ – в метрах.

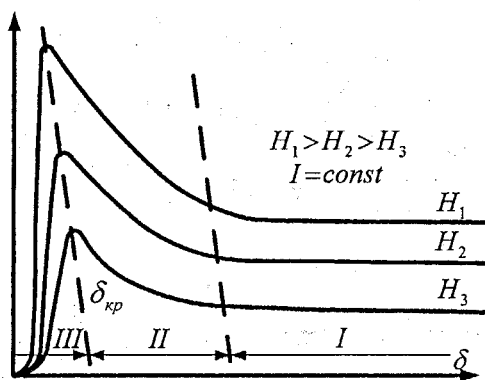


Рисунок 5.7 - Залежність швидкості руху дуги від ширини поздовжньої щілини

Одночасно при зменшенні ширини щілини зростають сили тертя дуги з стінками камери і зростають теплові явища біля стінок. До визначених умов ($v > v_{кр}$) дія цих сил впливає мало. Вони дещо уповільнюють ступінь зростання швидкості зі зменшенням ширини щілини. Проте при деякій ширині щілини, назовемо її критичною ($\delta_{кр}$), теплові явища біля стінок і їх гальмівна

дія починають сильно впливати на швидкість руху дуги. Швидкість дуги спадає аж до її зупинення (область III). При більшому струмі і менших напруженостях магнітного поля критична ширина щілини зростає.

Початкова частина кривих на рис. 5.7 характеризує рух вже не дуги, а провідного перешийка, що утворився на поверхні стінок. Швидкість руху такого перешийка надзвичайно мала.

Поздовжній градієнт напруги. Найменший градієнт напруги утворюється у відкритій нерухомій дузі (крива 1 на рис. 5.8). Градієнт напруги зростає зі зменшенням ширини щілини (криві 2 - 6). У широкій щілині вольт-амперні характеристики нерухомої дуги мають такий же спадний характер, як і у відкритій дузі. У вузьких щілинах вольт-амперна характеристика нерухомої дуги зберігає такий же характер при малих струмах

(принципово щілина при цих струмах є широкою). Із значенням струму, при якому починає впливати охолоджувальна дія стінок, градієнт напруги зростає і, досягнувши деякого максимуму (більш високого в більш вузькій щілині), надалі практично мало змінюється з ростом струму.

Аналогічний характер мають вольт-амперні характеристики дуги, що рухається в поздовжніх щілинах. Уявлення про хід цих характеристик дає рис. 5.9. На рисунку наведені вольт-амперні характеристики, отримані при постійній для кожної кривої швидкості руху дуги. Штриховими лініями на цьому рисунку нанесені вольт-амперні характеристики відкритої дуги.

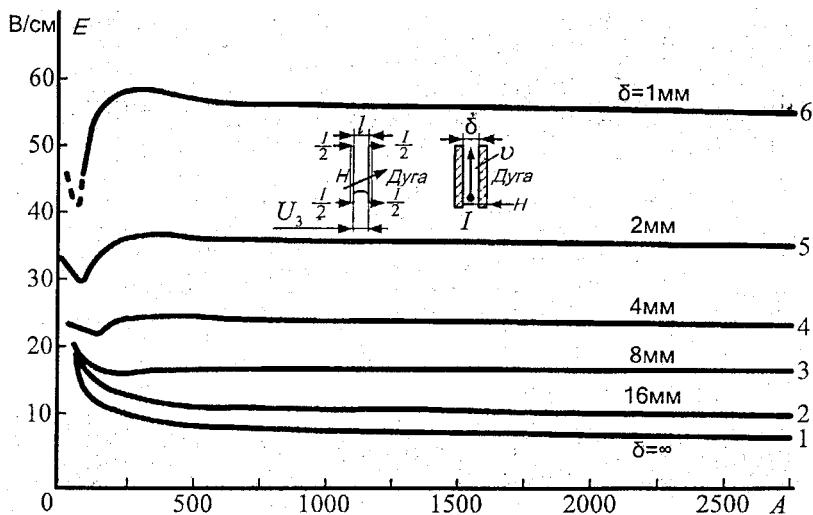


Рисунок 5.8 – Поздовжній градієнт напруги нерухомої дуги – відкритої ($\delta = \infty$) і у поздовжніх щілинах ($\delta=1-16$ мм)

Градієнт напруги дуги в поздовжніх щілинах мало залежить від швидкості. У відкритій дузі ця залежність (штрихові лінії) виражена більш різко, і при деяких умовах градієнт напруги відкритої дуги може перевищувати значення градієнта у вузьких щілинах. У більшості сучасних дугогасильних приладах із поздовжніми щілинами швидкість руху дуги нижче 100 м/с. При цих умовах поздовжній градієнт напруги дуги у вузьких щілинах істотно вище, ніж у відкритої дуги.

Залежність градієнта напруги від ширини щілини може бути охарактеризована кривими, які подані на рис. 5.10. Поки щілина залишається широкою ($\delta = 6$ мм), помітного впливу ширини щілини на значення поздовж-

нього градієнта напруги не спостерігається. Помітне підвищення градієнта починається у вузьких щілинах ($\delta < 4$ мм), і досягає значних величин при переході до зовсім вузьких щілин ($\delta < 1$ мм).

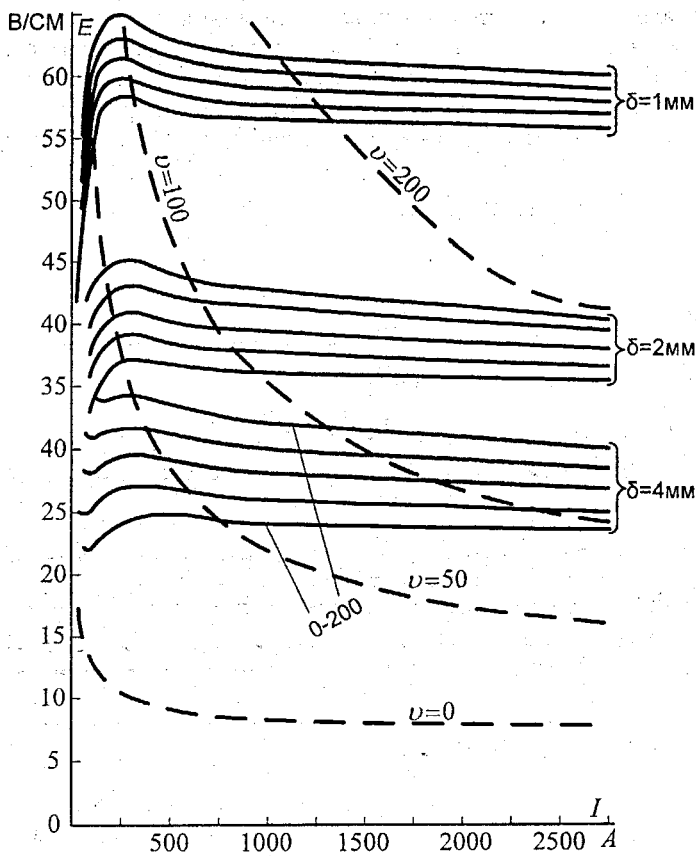


Рисунок 5.9 – Градієнт напруги відкритої дуги і дуги в поздовжніх щілинах (відрізками $A B$ позначені критичні струми)

Таким чином, для одержання інтенсивного гасіння дуги в малому об'ємі варто застосовувати якщо можна більш вузькі щілини.

Обмеження при виборі ширини щілини визначається тією напруженістю магнітного поля, яка необхідна для руху дуги у вузьких щілинах. Ця напруженість повинна бути вище критичної. Вона швидко зростає зі зменшенням ширини щілини і для дуже вузьких щілин стає практично важко здійсненою.

Враховуючи, що градієнт напруги у вузьких щілинах не залежить від швидкості руху дуги, напруженість магнітного поля треба вибирати такою, щоб при всіх умовах дуга не зупинялась. На відміну від відкритої дуги збільшення швидкості руху дуги у вузьких щілинах варто розглядати не як метод підвищення градієнта напруги, а як спосіб зменшення зносу стінок камери.

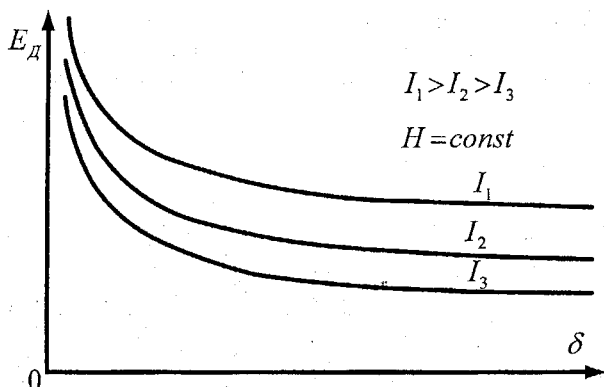


Рисунок 5.10 – Залежність поздовжнього градієнта напруги від ширини щілини

Дуга в ребристій щілині. У дугогасильних пристроях, крім щілин із плоскопаралельними стінками, застосовують щілини з ребрами, виступами та розширеннями (див. рис. 5.2, в, з, д).

Наявність ребер і розширень мало впливає на швидкість руху дуги. Значення ж поздовжнього градієнта напруги залежить від числа ребер і форми розширень. Наявність прорізів (ребер) підвищує напругу на дузі в порівнянні з тим, що має місце в щілині з плоскопаралельними стінками. Затиснута і деформована у вузькій щілині дуга буде тиснути на стінки і, при наявності прорізу в стінці (розширення, щілини), вдавлуватися в проміжок, утворений прорізом. Деформація стовбура дуги, викликана наявністю прорізу, призводить, по-перше, до збільшення площі зіткнення дуги з холодними стінками камери; по-друге (і це, певно, головне), ребра, які утворюють прорізи у стінках, повністю охоплюються дугою що і сприяє її інтенсивному охолодженню. Наведені обставини призводять до місцевого підвищення градієнта напруги.

Підвищення напруги на дузі в ребристій щілині пропорційне числу прорізів (ребер) на одиницю довжини щілини, не залежить від ширини прорізів (у межах $\gamma = 1 - 2$ мм) і зростає зі зменшенням ширини щілини.

5.3 Гасіння відкритої дуги в магнітному полі

Для забезпечення переміщення дуги магнітне поле повинно бути перпендикулярно осі дуги. Електричну дугу можемо розглядати як провідник із струмом (рис. 5.11, а), розташований у магнітному полі. Напрямок руху цього провідника визначиться правилом "лівої руки". У перпендикулярно-му щодо осі дуги магнітному полі (рис. 5.11, а), а також у власному магнітному полі контура струму (рис. 5.11, б) дуга одержить поступальний рух. У радіальному магнітному полі (рис. 5.11, в) дуга буде рухатися по колу або спіралі.

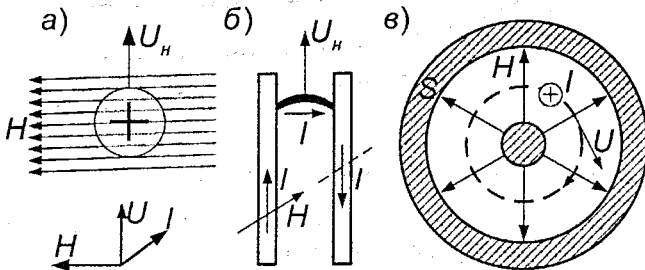


Рисунок 5.11 – Рух електричної дуги в магнітному полі

У однорідному магнітному полі сила, що діє на одиницю довжини дуги, дорівнює

$$F_1 = IH, \quad (5.3)$$

де I - струм у дузі; H - сумарна напруженість магнітного поля (зовнішнього магнітного поля і власного магнітного поля контура струму).

При своєму русі дуга зустрічає опір повітря. У першому наближенні можемо прийняти його рівним аеродинамічному опорі руху твердого циліндричного стрижня. При сталому рівномірному русі сила аеродинамічного опору пропорційна квадрату швидкості v :

$$F_2 = kv^2. \quad (5.4)$$

При постійній швидкості руху дуги

$$F_1 = F_2; \quad IH = kv^2; \quad v = k\sqrt{IH}. \quad (5.5)$$

Досліди показують, що дуга, яка рухається, поводить не зовсім так, як твердий стрижень. Завдяки своїй рухливості, наявності магнітного поля і зустрічного потоку газів дуга намагається згорнутися в спіраль і розще-

питися на паралельні волокна, що уповільнює швидкість її руху. Діаметр дуги також є величиною, яка залежить від швидкості, і тому рівняння (5.4) дає якісне оцінювання залежності швидкості руху дуги від струму і напруженості магнітного поля. У більшості електричних апаратів немає незмінного магнітного поля гасіння. Поле гасіння залежить від величини струму, що вимикається. Тобто

$$H = kI.$$

У такому випадку

$$v = kI, \quad (5.5)$$

де k звичайно визначається експериментально.

В електричних апаратах дуга переміщується по розмикаючих контактах і так званих "рогах", її довжина змінюється від нуля до деякого кінцевого значення, при якому вона згасає.

Схематично це подано на рис. 5.12, б.

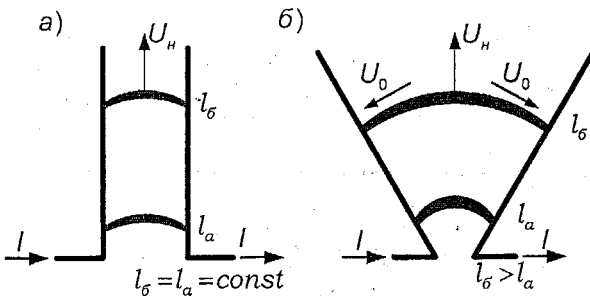


Рисунок 5.12 – Електрична дуга на паралельних (а) та рогоподібних (б) електроддах

Для з'ясування закономірностей руху дуги в магнітному полі в залежності від її довжини розглянемо криву на рис. 5.13, яка показує залежність швидкості руху дуги від відстані між паралельними електродами.

Ділянка I ($0 < l < l_1$) – тут має місце не дуга, а перешийок із розплавленого металу, що виникає при розмиканні контактів. Цей перешийок існує, поки електроди (контакти) не розійдуться на визначену відстань $l > l_1$, яка залежить від значення струму, що вимикається, та матеріалу електродів. Наприклад, у деяких дослідах гранична відстань між електродами, при якій ще виникав перешийок із розплавленого металу ($I = 7000$ А), дорівнювала 1 мм для мідних електродів та 2 мм для сталевих електродів. Швидкість руху перешийка надзвичайно мала, а при відстані між електродами менше 0,5 мм він може і зовсім не рухатися навіть при наявності значного магнітного поля. Тому в комутаційних апаратах дуга не може вийти з проміжку між контактами до тих пір, поки вони не розійдуться на відстань більше 0,5-1 мм.

Ділянка II ($l_1 < l < l_2$) – тут спостерігається різке зростання швидкості дуги із збільшенням її довжини. При деякій довжині перешийка розплавленого металу він розривається, виникає дуга, яка починає швидко рухатись. На більш вузьких електродах швидкість дуги зростає швидше.

Ділянка II є перехідним етапом від краплиннорідкого стану до газового. Із збільшенням довжини дуги вплив крапельок і парів металу зменшується, що призводить до зростання швидкості дуги і поздовжнього градієнта в ній. Велика швидкість розбіжності контактів на ділянках I і II сприятливо позначається як на зношуванні контактів, так і на умовах гасіння дуги.

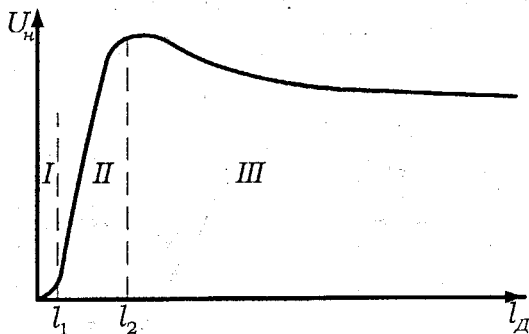


Рисунок 5.13 – Залежність швидкості руху дуги на паралельних електродах від відстані між ними

Ділянка III ($l < l_2$) – тут ми маємо власне дугу. Із збільшенням її довжини спостерігається деяке зниження швидкості її руху. Під дією власного поля дуга намагається згорнутися в спіраль. Зустрічний потік повітря, проникаючи в дугу, намагається розщепити її на окремі волокна. Із збільшенням довжини дуги гальмівна дія цих чинників позначається сильніше. Аналізовані у цьому розділі закономірності руху дуги відносяться до цієї ділянки.

5.4 Способи збудження магнітного поля дугогасіння

Зовнішнє магнітне поле для переміщення електричної дуги в дугогасильну камеру вимикача (наприклад, електромагнітного) може бути отримане [14]:

– за допомогою котушки, що вмикається послідовно з контактами, між якими виникає електрична дуга (рис. 5.14)

– за допомогою котушки, що вмикається паралельно на напругу мережі;

– за допомогою постійних магнітів.

Котушки або постійні магніти мають магнітопровід, що охоплює контакти і "роги", між якими виникає електрична дуга. Поле котушки (зовнішнє поле), взаємодіючи з полем дуги, змушує дугу швидко переміщуватися в дугогасильній камері.

Широке застосування одержала послідовна дугогасильна котушка. Головними перевагами цього способу збудження магнітного поля гасіння є надійність і незалежність напрямку сили, що діє на дугу, від напрямку струму. Апарати з послідовною котушкою є неполяризованими. Зміна напрямку струму в колі викликає і зміну напрямку поля, утворюваного котушкою. Напрямок сили, що діє на дугу, у такому випадку залишається незмінним.

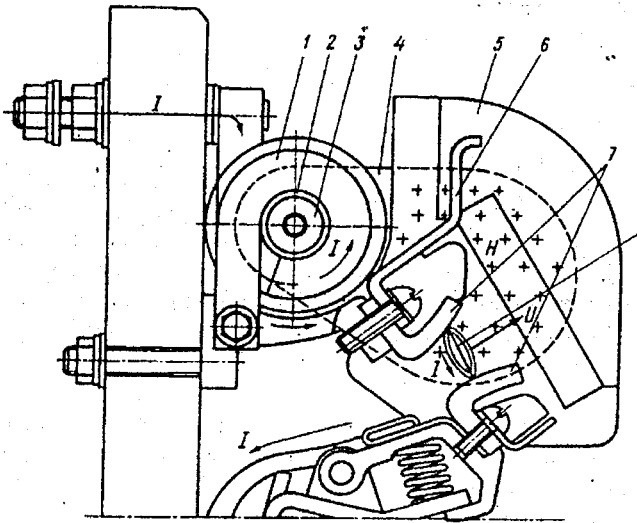


Рисунок 5.14 – Дугогасильний пристрій із послідовною дугогасильною котушкою: 1 – дугогасна котушка; 2 – ізоляційна гільза; 3 – осердя; 4 – полюс; 5 – дугогасна камера; 6 – ріг; 7 – контакти; 8 – дуга; +++ – напрямок магнітного потоку дугогасіння

Послідовне магнітне дугтя має і певні недоліки. Сила, що діє на одиницю довжини дуги в магнітному полі дорівнює $F = IH$.

При послідовній котушці і струмах, коли ще не виникає насичення магнітопровода дугогасіння, напруженість магнітного поля пропорційна струму: $H \sim I$.

Таким чином, сила, що діє на дугу, пропорційна квадрату струму:

$$F \sim I^2$$

При малих струмах ця сила незначна. Тому час гасіння малих струмів стає значно більшим (крива 3, рис.5.15). Це є головним недоліком послідовної котушки. Для одержання сили, достатньої для гасіння малих струмів, доцільно вибрати котушку з великою кількістю витків і збільшувати зазор між контактами. Котушка обтікається номінальним струмом апарата. Переріз її витків повинен відповідати величині цього струму, що призводить до великої витрати міді. Наприклад, у контакторах постійного струму до однієї третини міді припадає на дугогасильну котушку. Збільшення числа витків призводить до істотних перенапруг при вимкненні номінального струму.

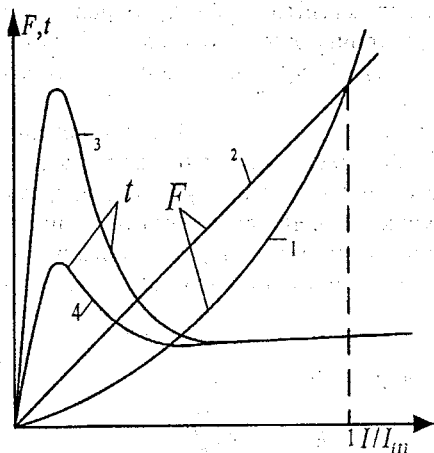


Рисунок 5.15 – Характеристики послідовного і паралельного процесів гасіння дуги

Паралельна котушка, струм у якій не залежить від струму у колі, що вимикається, створює незмінне магнітне поле. Сила, що діє на дугу, пропорційна струму, що вимикається (крива 2):

$$F \sim I$$

При малих струмах сили, які діють у паралельній котушці, є більшими, ніж при послідовній котушці. Час гасіння малих струмів тут зменшується (крива 4). Зазор контактів може бути зменшений. Може бути дещо знижена і витрата міді.

Разом з тим, дугогасіння за допомогою паралельної котушки, має такі істотні недоліки, які обмежують її застосування:

- 1) напруга мережі може знизитись або взагалі зникнути; при цьому різко знизиться або зникне магнітне поле гасіння, апарат виявиться без надійного дугогасіння;
- 2) апарат набуває цілком визначеної полярності; при зміні напрямку струму або в головному колі, або в колі котушки змінюється напрямок сили, що діє на дугу, в результаті чого дуга може опинитись всередині апарата;
- 3) котушку необхідно ізолювати від головного кола комутування електричного апарата на повну напругу.

Застосування постійних магнітів для збудження магнітного поля дугогасіння дозволяє зберегти позитивні характеристики паралельного збудження. Усуваються ряд вищенаведених недоліків, а саме – перший і третій. Відпадає необхідність витрати міді на котушки та їх додаткову ізоляцію. Знижуються втрати енергії в апаратах за рахунок вимкнення котушок. Можливість зменшення зазору контактів дозволяє зменшити магнітні системи, тобто зменшити масу і габарити електричного апарата в цілому.

Недоліком, який обмежує застосування постійних магнітів для створення магнітного поля дугогасіння, є те, що апарат стає поляризованим і неправильне його вмикання, як і зміна напрямку струму, може призвести до аварії.

Проте існує можливість будувати такі дугогасильні системи [3], які не будуть поляризованими незважаючи на застосування постійних магнітів для збудження магнітного поля дугогасіння.

5.5 Полум'я дуги та боротьба з ним

Відкрита електрична дуга супроводжується виділенням великої кількості світлових газів, які є полум'ям дуги. Ці гази займають великий об'єм. У їх існуванні можна переконатися, розглядаючи кадри прискореної кінозйомки (рис. 5.16) вимкання струму контактором. За певний момент часу струм у колі досягає свого нульового значення, дуга загасає, а полум'я дуги, що залишилося, продовжує існувати (світнитися) ще значний час. Причина виникнення полум'я полягає у високій температурі газів, що оточують дугу. Ця температура викликає теплову іонізацію і світіння всього об'єму, який заповнено іонізованим газом. У цьому об'ємі має місце однакова концентрація позитивних і негативних частинок, і тому просторовий заряд полум'я практично дорівнює нулю. Велика концентрація заряджених частинок призводить до великої провідності полум'я, що наближає його за властивостями до провідника. Присутність парів міді в полум'ї сильно сприяє його підтримці протягом сотих і навіть десятих долей секунди після загасання дуги. Боротьба з полум'ям – це важлива задача при побудові дугогасильних пристроїв електричних апаратів.

Висока провідність полум'я дуги призводить до того, що воно може викликати при напрузі в кілька десятків вольт перекриття проміжків, які у нормальних умовах не пробиваються при десятках тисяч вольт. У цьому полягає головна небезпека полум'я. Інша небезпека пов'язана з високою температурою. Хоча температура тут і нижча, ніж у самій дузі, але вона все-таки достатня для запалювання легкозаймистих матеріалів та газів.

В полум'ї дуги відбуваються небезпечні для апаратів хімічні процеси. Пари міді контактів, потрапляючи в полум'я дуги, окисляються там при високій температурі і поглинають кисень повітря. Азот, який утворився в

результаті цього, з'єднується з парами води і киснем, утворюючи азотну кислоту. Краплі цієї кислоти можуть утворити провідні контактні перешийки і призвести до небезпечних перекриттів між струмоведучими частинами в таких місцях, куди ні дуга, ні її полум'я не можуть потрапити.

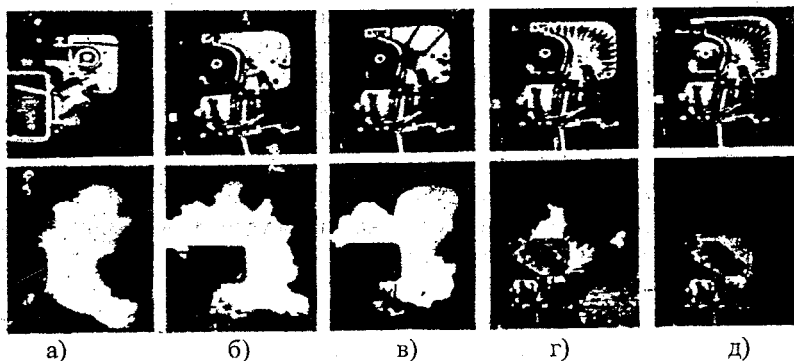


Рисунок 5.16 – Дуга на контакторах з різними дугогасильними пристроями при вимиканні струму $I = 1500 \text{ A}$ ($10 I_{\text{ном}}$), $U = 480 \text{ В}$, $L = 4,2 \text{ мГн}$:

- а* – камера з повітряним мішком і широкою щілиною;
- б* – камера із широкою щілиною;
- в* – камера із широкою щілиною з поперечними перегородками;
- г* – камера з вузькою звивистою щілиною;
- д* – камера з вузькою звивистою щілиною і полум'ягасною решіткою

В дугогасильних пристроях із широкими поздовжніми щілинами дуга і її полум'я можуть займати надзвичайно великі розміри за межами камер (рис. 5.16, *а, б, в*). В об'ємі, зайнятому полум'ям, не можуть знаходитися інші електричні апарати або струмоведучі частини. Це призводить до збільшення розмірів комплектних струмоведучих пристроїв (головним чином, закритих) у 2-2,5 рази відносно того, що вимагають геометричні розміри апаратів і монтажні схеми їх з'єднань.

Одним з найбільш ефективних способів гасіння електричної дуги є застосування вузьких поздовжніх щілин. У цих щілинах досягається і деяке обмеження розмірів полум'я дуги, як це підтверджується фотографіями на рис. 5.16, *д*. Розміри полум'я дуги істотно менші в камері з вузькою звивистою щілиною. Але повністю погасити полум'я в об'ємі камери вузькі щілини не спроможні. Висота полум'я практично не залежить від шляху, який проходить дуга по щілині, а залежить, головним чином, від ширини щілини. Дуже вузькі щілини робити недоцільно тому, що це може призвести до зупинення руху дуги у камері та її вигорання.

Ефективним способом боротьби з полум'ям електричної дуги є встановлення ґраток з теплопровідних металевих пластин над вузькою щільною камери (рис.5.16, д). Створена таким чином комбінована система дугогасіння, що складається з камери з вузькою щільною і полум'ягасної решітки невеликих розмірів ($h = 5 - 20$ мм), дозволяє досягти повної деіонізації дуги і її полум'я в об'ємі дугогасильної камери при вимиканні дуже великих струмів як на контакторах (рис. 5.16, д), так і в автоматичних вимикачах.

Рекомбінація іонів полум'я дуги відбувається під час їх зіткнення з металевими пластинами ґраток. Висока теплоємність і теплопровідність цих пластин, сильно розвинута поверхня зіткнення їх з полум'ям, нарешті, досить значний шлях, який полум'я проходить вздовж пластин, сприяють повній його деіонізації. Рекомбінація іонів біля поверхні холодних металевих пластин відбувається набагато інтенсивніше, ніж біля поверхні діелектрика. Крім рекомбінації біля поверхонь ґраток, відбувається також посилена рекомбінація іонів в об'ємі дугогасильної камери за рахунок сильного зниження температури полум'я під час його руху вздовж пластин ґраток. Важливо відзначити, що більш істотною є довжина пластин (шляху газів вздовж пластин), ніж їх ширина.

В розглянутій дугогасильній системі гасіння дуги здійснюється у вузькій щільній, а деіонізація полум'я дуги — на металевих решітках. Ні дуга, ні її полум'я не вириваються за межі камери. Розмір камер електричних апаратів практично не збільшується. Розміри ж закритих комплектних струмоведучих пристроїв істотно зменшуються.

Слід зазначити, що камери з вузькими щільностями і закриті дугогасильні пристрої вимагають застосування більш якісних дугостійких матеріалів (азбоцемент, кераміка). Зношування камер в даному випадку буде більшим, ніж камер з широкими щільностями. Більш ефективно гасіння дуги супроводжується також великими перенапругами в момент згасання дуги.

5.6 Допустима частота вимикань апаратів з закритими камерами

В зв'язку з застосуванням закритих дугогасильних пристроїв виникає питання про допустиму частоту роботи апаратів, зокрема контакторів, з цими пристроями. Закритий дугогасильний пристрій повинен розсіювати з зовнішньої поверхні всю енергію, яка виділяється в дузі, а також енергію втрат в контактах. Потужність втрат в камері визначається співвідношенням

$$P = U_d I + W_d N / 3600, \quad (5.7)$$

де U_k – спад напруги в контактах, B ; I – струм в електричному колі, A ; W_d – енергія, яка виділяється в дузі при одному вимкненні, Bt ; N – кількість вмикань на годину.

Якщо зовнішня поверхня камери F , а коефіцієнт тепловіддачі з цієї поверхні k , то перевищення температури τ визначиться співвідношенням

$$\tau = \frac{P}{Fk_T} = \frac{U_k I}{Fk_T} + \frac{W_d N}{3600 Fk_T} = \tau_0 + \frac{W_d N}{3600 Fk_T}, \quad (5.8)$$

де $\tau_0 = U_k I / (k_T F)$ – перевищення температури камери при тривалому режимі роботи (без вмикань).

Вибравши з умов експлуатації максимально допустиму температуру камери τ_{max} , одержимо для максимальної частоти циклів роботи електричного апарата вираз для визначення кількості вмикань

$$N = 3600 k_T F (\tau_{max} - \tau_0) / W_d. \quad (5.9)$$

Енергія, яка виділяється у дузі, що горить, при одному вимкненні визначається за виразом

$$W_d = \frac{LI^2}{2} \left(1 + 2k \frac{t_r}{T} \right) \quad (5.10)$$

і залежить, в основному, від індуктивності кола, що вмикається. Індуктивність силових кіл електроприводів визначається індуктивністю якірних кіл електродвигунів, значення якої може бути з достатньою для практики точністю знайдено за виразом

$$L_r \approx 8 U_{ном} / 2\pi n I_{ном}, \quad (5.11)$$

де $U_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$ – номінальна напруга (B), струм (A) та частота обертання (об/хв), 2π – кількість полюсів електродвигуна.

Вираз (5.11) враховує індуктивність власного якоря, обмотки додаткових полюсів, послідовної обмотки і відноситься до електродвигунів без компенсаційної обмотки. Індуктивність якірних кіл електродвигунів з компенсаційною обмоткою є меншою.

Розрахунки показують, що контактори постійного струму з закритими камерами тих же розмірів, що і відкриті камери, допускають частоту роботи біля тисячі вмикань на годину.

На рис. 5.17, як приклад, наведено криві, що характеризують допустиму частоту вмикань при різних режимах роботи контактора на $150 A$ з закритою камерою тих же розмірів, що у контактора *КП203* з відкритими камерами.

Розрахунок проводився для найгіршого випадку – вимкнення електродвигуна типу ПН - 400 з параметрами $I_{ном} = 154 A$, $U_{ном} = 220 B$, $n_{ном} = 750$ об/хв, $L = 3,9$ мГн. Допустима температура камери приймалася

рівною 250 °С. Крива 1 являє собою допустиму частоту роботи при вимкненні електродвигуна, який обертається. Крива 2 відноситься до випадку вимкнення електродвигуна, який обертається з половиною номінальної частоти обертання і створює проти-ЕРС рівну $0,5 U_{\text{ном}}$. Крива 3 відноситься до випадку вимкнення загальмованого електродвигуна.

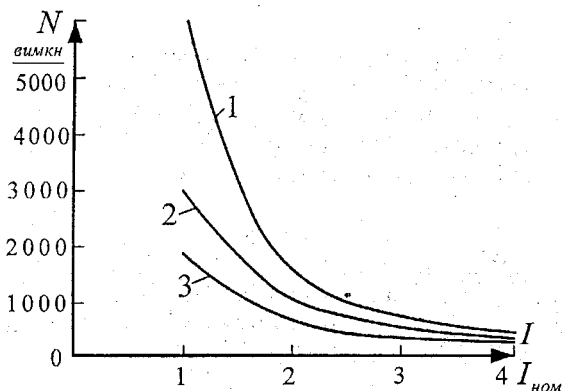


Рисунок 5.17 – Допустима частота вимкань контактором на 150 А в різних режимах

В умовах експлуатації в одній і тій же електроустановці можуть мати місце різні з зазначених випадків. Припустимо, що еквівалентний режим відповідає процесу вимкнення електродвигуна, який не досягнув номінальної частоти обертання при подвійному номінальному струмові (крива 2). У такому випадку для нашого контактора допустимою виявиться частота роботи, яка дорівнює 1000 вимкань за годину. Тобто, закриті дугогасильні пристрої допускають значно вищу частоту циклів вимкань.

5.7 Гасіння дуги високим тиском

Провідність дугового проміжку залежить від ступеня іонізації газу. При незмінній температурі ступінь іонізації $\alpha = 1/\sqrt{p}$, тобто ступінь іонізації зменшується з ростом тиску. Це значить, що для проведення того ж струму при більш високому тиску до дугового проміжку необхідно прикласти більш високу напругу. Інакше кажучи, *поздовжній градієнт напруги в дузі зростає з ростом тиску*.

З ростом тиску зростає теплопровідність газу. За інших рівних умов це призводить до посиленого охолодження дуги і до збільшення градієнта напруги в ній.

Таким чином, підвищення тиску газу, у якому горить дуга, призводить до зростання поздовжнього градієнта напруги в дузі. Експериментально встановлена така залежність градієнта напруги в дузі, що стійко горить, від тиску:

$$E_p = E_0 p^k \cdot 10^k, \quad (5.12)$$

де E_0 – градієнт напруги при нормальному атмосферному тиску, а $k = 1/3$.

Співвідношення (5.12) перевірено в широкому діапазоні тисків (до 1,2 МПа), але для невеличких струмів (до 10 А). У дослідах, де дослідження велися при дузі вимкнення, яка горить нестійко, мали місце більш швидкі зростання градієнта з ростом тиску. Показник степеня k одержував значення від 0,5 до 1.

Гасіння дуги за допомогою високого тиску, утвореного самою ж дугою в щільно закритих камерах, широко використовується в плавких запобіжниках і ряді інших апаратів. У цих апаратах вся енергія, що виділяється в дузі вимкнення, віддається газу, що знаходиться в обмеженому об'ємі. За умови, коли стінки камери не виділяють газу, справедливо (у першому наближенні) таке співвідношення:

$$pv = 10^5 \frac{2}{3} W_d, \quad (5.13)$$

де W_d – енергія дуги, Дж; v – об'єм, см³; p – тиск, що виникає в камері, Па.

Завдяки високому тиску дугу в електричних апаратах вдається погасити в невеличких, щільно закритих камерах і зробити апарати цілком безпечними в пожежному відношенні.

У закритих (обмеженого об'єму) дугогасильних камерах рух дуги по контактах супроводжується рядом газодинамічних явищ, які можуть сповільнити її рух і сприяти повторним запалюванням дуги.

Газодинамічні хвилі. З появою дуги виникає хвиля надлишкового тиску, яка зі швидкістю, що перевищує швидкість звуку, поширюється перед дугою, що рухається в дугогасильній камері. Досягнувши перешкоди, хвиля надлишкового тиску відбивається. Відбита хвиля рухається назустріч дузі і, складаючись з первинною хвилею, впливає на фронт дуги, сповільнює рух останньої, що і певною мірою погіршує умови гасіння дуги. Після декількох таких коливань та відбиття від перешкоди і дуги хвильові процеси поступово загасають.

Якщо в перешкоді мають місце щілини або отвори, то поряд з процесом відбиття хвилі тиску відбувається проникнення частини хвилі у ці щілини. Таким чином, знизити тиск відбитих хвиль можна зменшити шляхом зменшення акустичного опору перешкод, виконавши додаткові вихлопні канали або перфоровані перегородки.

Газодинамічні потоки. В закритих камерах значна частина енергії дуги витрачається на нагрівання замкненого об'єму повітря і на газовиді-

лення зі стінок камери. В камері при вимиканні струму виникає надлишковий тиск. Через наявність наскрізних щілин, зазорів в стінках камери, виникають потоки газу, які можуть сприяти або перешкоджати руху дуги. Наприклад, зустрічні потоки направляються до отворів, призначених для проходу контактотримачів рухомих контактів. Ці потоки гальмують рух дуги і, заганяючи іонізовані гази в міжконтактний проміжок, сприяють повторному запалюванню дуги.

Вихлопні щілини і канали потрібно виконувати таким чином, щоб потоки газу в камері сприяли руху дуги. Отвори для проходу рухомих частин контактів варто виконувати з ущільненнями лабіринтового типу.

5.8 Гасіння електричної дуги в маслі

Цей спосіб гасіння електричної дуги знайшов широке застосування у вимикачах змінного струму на напругу 6-10 кВ та 35-220 кВ.

Контакти вимикача занурюються в масло. Дуга, яка виникає при розмиканні контактів, має високу температуру

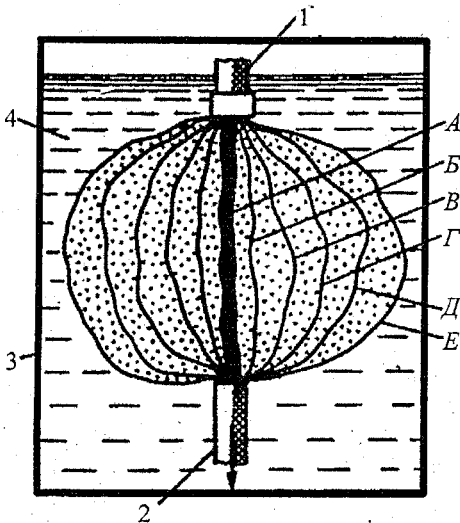


Рисунок 5.18 – Електрична дуга в сфері газового пузиря в маслі: 1 – нерухомий контакт; 2 – рухомий контакт; 3 – стінка бака; 4 – масло; А – стовбур дуги; Б – воднева оболонка; В – зона розпаду; Г – зона газу; Д – зона пару; Е – зона випару

має високу температуру (5000-6000°C), що призводить до дуже інтенсивного випару навколишнього масла з дисоціацією його парів. Навколо дуги утвориться газова оболонка (рис. 5.18) – газовий пузир, що складається в головному з водою (70-80% газів пузиря) і парів масла. При цьому водень, що має найвищі серед усіх газів дугогасні властивості, найбільше тісно стикається зі стовбуром дуги. Гази, що виділяються з величезною швидкістю проникають безпосередньо в зону стовбура дуги, викликають перемішування холодного і гарячого газу в пузирі, створюють інтенсивне охолодження і деіонізацію дугового про-

міжку, особливо в момент проходження струму через свій природний нуль.

Швидке (вибухове) розкладання масла призводить до підвищення тиску усередині пузиря, що також сприяє гасінню дуги. У звичайних конструкціях масляних вимикачів тиск у газовому пузирі підвищується до 0,5-1 МПа, а у вимикачах із дугогасильними камерами – ще більше.

Слід зазначити, що сам процес розкладання масла з утворенням газопарової суміші пов'язаний із відбором від дуги великої кількості енергії (30-35 %), що також сприятливо впливає на гасіння дуги.

У випадку коли дуга горить у газовому пузирі, об'єм якого не обмежується стінками камери, середня температура газопарової суміші знаходиться в межах 800-1000 К, а у випадку горіння дуги у вузькому, обмеженому об'ємі при великих струмах середня температура газопарової суміші досягає 2000-2500 К. Тобто, відведення енергії від дуги в даному випадку буде значно більшим.

Деякі середні значення поздовжнього градієнта напруги у дузі, що охолоджується в маслі, наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Умови охолодження стовбура дуги в маслі	Поздовжній градієнт напруги, В/см
Дуга в газопаровому пузирі при великих значеннях струму	70-100
Дуга в інтенсивному поздовжньому потоковій газопарової суміші	200
Дуга в атмосфері водню при малих струмах (не більше 2 А)	400
Дуга в каналах камери з поперечним дуттям при великих струмах, при тиску p , Па	$5,5 \cdot 10^4 p$

Процес гасіння в маслі відбувається тим інтенсивніше, чим ближче стикається дуга з маслом і чим швидше рухається масло відносно дуги. При простому розриванні дуги в маслі дуга оточена пузирем, заповненим парами масла і газу, що знаходяться в відносно спокійному стані. Вплив самого масла на дугу відносно малий. Вплив масла на дугу істотно збільшується, якщо дуговий розрив обмежити яким-небудь замкненим ізоляційним пристроєм, так званим дугогасильним пристроєм (камерою). У дугогасильних камерах створюється більш тісне зіткнення масла з дугою, а також інтенсивне обдування дуги потоками газів, парами масла і самим маслом, в результаті чого значно зростає поздовжній градієнт напруги, пришвидшується процес деіонізації, скорочується час горіння дуги, зменшується хід контактів у порівнянні з простим розриванням дуги в маслі.

В міру руху рухомого контакту довжина дуг і розміри газового пузиря збільшуються. При деякій довжині дуги в один з моментів переходу

струму через нуль дуга гасне. Значна кількість водню в газовому пузирі, власне кажучи, і визначає високу дугогасильну здатність трансформаторного масла. Розглянутий спосіб гасіння дуги в маслі одержав назву простого розриву в маслі. У бакових масляних вимикачах (з великим об'ємом масла) масло служить не тільки дугогасильним середовищем, але й ізоляцією між розімкнутими контактами одного полюса (і контактами сусідніх полюсів, якщо всі полюси знаходяться в одному баці). Бак може бути заземлений або ізольований від землі, наприклад, встановленням його на ізолятори.

Якщо бак масляного вимикача ізольований, то масло може бути як дугогасильним середовищем, так і ізоляцією між розімкнутими контактами одного полюса. Такі вимикачі одержали назву вимикачів з малим об'ємом масла (малооб'ємних або маломасляних).

В конструкціях масляних вимикачів застосовують різного роду дугогасильні системи (рис. 5.19).

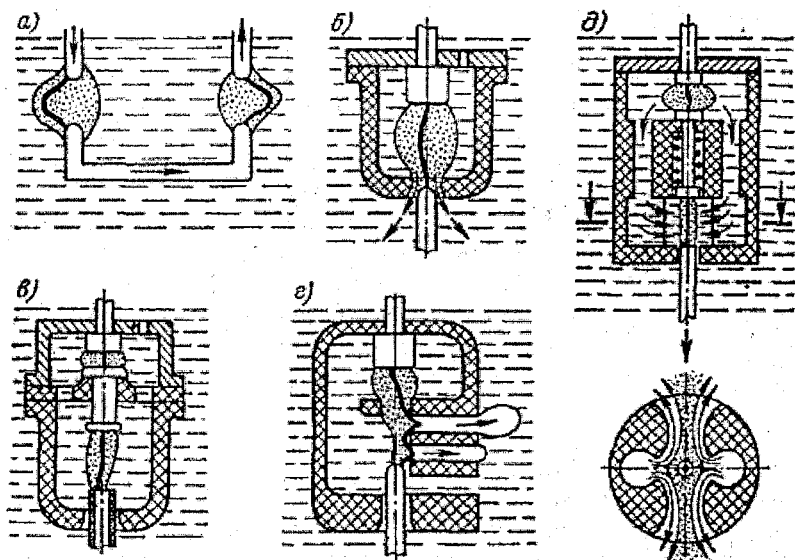


Рисунок 5.19 – Схеми дугогасильних систем масляних вимикачів

Простий розрив в маслі (рис. 5.19,а) застосовують в вимикачах без дугогасильних камер. Проста дугогасильна камера (рис. 5.19, б) – це корпус з металу (з ізольованими стінками) або зі спеціальної пластмаси, що має досить велику механічну міцність. У верхньому дні цього корпусу закріплюється нерухомий контакт, а в нижньому є отвір для рухомого контакту циліндричної форми.

При розмиканні нерухомого і рухомого контактів між ними виникає дуга й утвориться газовий пузир. Унаслідок невеликого об'єму камери тиск у газовому пузирі істотно більший, ніж при простому розриві під маслом. При виході рухомого контакту з отвору слідом за ним з камери виривається потік газу і пари масла, що знаходяться під великим тиском (газomasляне дуття). Цей момент найбільш сприятливий для гасіння дуги. Але він може і не збігатися з моментом проходження струму через нуль, і тоді ефективність гасіння дуги істотно зменшується. При вимиканні малих струмів тиск у камері незначно підвищується і гасіння дуги, власне кажучи, відбувається так само, як і при простому розриві в маслі.

У дугогасильних камерах (ДК) з поздовжнім масляним дуттям (рис. 5.19, в) корпус розділений ізоляційною перегородкою з отворами на двох частинах. У центрі перегородки розташований проміжний контакт, що може пересуватися на невелику відстань. У верхній частині корпусу закріплений нерухомий контакт, а в нижній є отвір для трубчатого рухомого контакту. При вимиканні електричного кола починається одночасне переміщення рухомого і проміжного контактів, утворюється проміжок між проміжним і нерухомим контактами і між ними виникає початкова дуга. Вона створює тиск усередині корпусу. Проміжний контакт проходить відстань 15–20 мм і зупиняється. Тоді між ним і рухомим контактом, що продовжує свій рух, виникає друга дуга, яка називається гасильною. Під дією тиску, створеного початковою дугою масло спрямовується до гасильної дуги, входить у тісне зіткнення з нею і через порожнину трубчатого рухомого контакту виходить у бак вимикача, де масло знаходиться під атмосферним тиском. Таким чином, ефективний вплив газomasляної суміші на дугу відбувається усередині ДК ще до виходу з нього рухомого контакту, що сприяє швидкому гасінню дуги при переході струму через нуль.

У ДК з поперечним масляним дуттям (рис. 5.19, г) до корпусу приєднано набір ізоляційних пластин з центральними отворами. Частина пластин (через одну) має прорізи (щілини), що виходять назовні. При розмиканні нерухомого і рухомого контактів між ними виникає дуга, що створює підвищений тиск у ДК. Але вихід масла з камери через прорізи в пластинах закритий рухомим контактом. Після проходження рухомого контакту першої щілини відкривається вихід масла з камери. Поперечний струмінь масла входить у тісне зіткнення з дугою, сприяючи її гасінню. Якщо після відкриття рухомим контактом першої щілини не відбулося згасання дуги, то незабаром відкривається друга щілина і на дугу впливають уже два струмені масла і т.д.

Дугогасильні камери з масляним дуттям дозволили істотно підвищити надійність роботи масляних вимикачів, збільшити їх струми вимкнення та номінальні напруги. Але ефективність роботи вимикача з масляним дуттям дуже залежить від струму вимкнення. При великих струмах тиск у ДК значний і гасіння дуги відбувається успішно. При малих струмах тиск у ДК невеликий і ефективність гасіння дуги знижується. Крім того, тиск зміню-

ється і за півперіод струму: він більший при максимумі струму і менший при переході струму через нуль. А для успішного гасіння дуги саме при переході струму через нуль необхідно можливо більш ефективний вплив масла на дугу.

Тому дугогасильні системи (камери) сучасних масляних вимикачів за принципом дії можуть бути розподілені на три основні групи.

1. *Дугогасильні пристрої з автодутьям*, у яких дугтя газопарової суміші і масла в зону гасіння дуги створюється за рахунок енергії, що виділяється в самій дузі.

2. *Дугогасильні пристрої з примусовим масляним дутьям*, у яких масло в зону гасіння дуги (до місця розривання) подається за допомогою спеціальних гідравлічних механізмів, що подають масло, за рахунок стороннього джерела енергії.

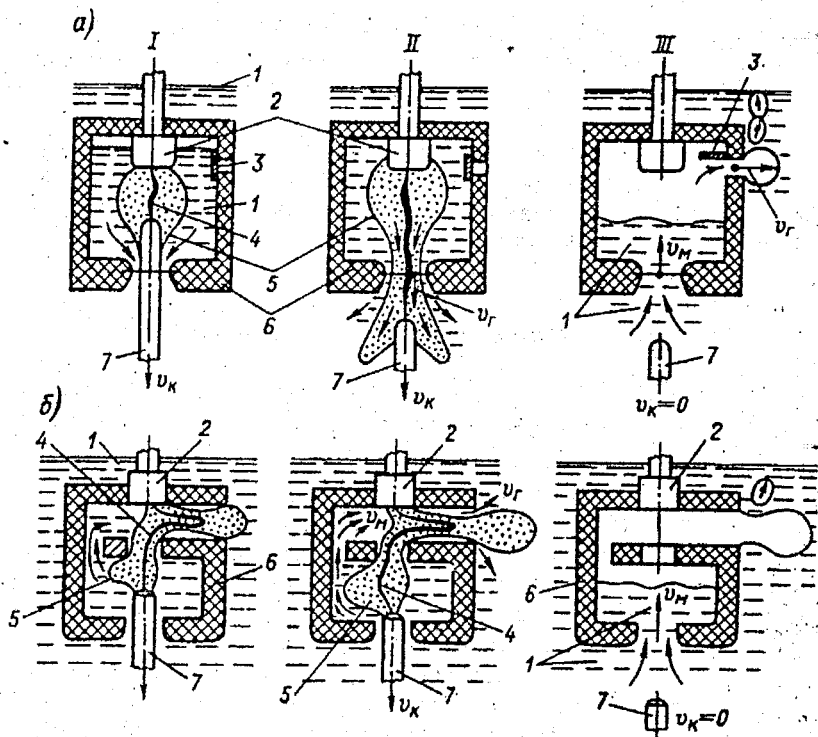


Рисунок 5.20 - Процес гасіння електричної дуги в камерах з автодутьям: а - камера поздовжнього дуття; б - камера поперечного дуття. 1 - масло; 2 - нерухомий контакт; 3 - клапан; 4 - дуга; 5 - газовий пузир; 6 - камера; 7 - рухомий контакт

3. *Дугогасильні пристрої з магнітним гасінням дуги в маслі, у яких стовп дуги під впливом поперечного магнітного поля переміщується у вузькі, заповнені маслом канали і щілини, утворені стінками з ізоляційного матеріалу.*

Найбільше поширення в конструкціях як бакових, так і маломасляних вимикачів знаходять дугогасильні пристрої першої групи, тому що вони забезпечують велику ефективність гасіння при порівняно нескладних конструкціях ДК. Принципові схеми роботи найпростіших дугогасильних камер з автодугтям наведені на рис. 5.20.

Газовий пузир, що утвориться навколо дуги при розмиканні контактів, призводить до істотного підвищення тиску в обмеженому об'ємі камери (стан I). Масло і продукти його розкладання, намагаючись вийти через отвори в камері, створюють інтенсивне обдування дуги потоками газопарової суміші і масла вздовж дуги (повздовжнє дугтя – рис. 5.20, а) при виході рухомого контакту з камери (стан II) або поперек дуги (поперечне дугтя рис. 5.20, б) при наявності вихлопного отвору, розташованого проти місця розриву (стан II). Після гасіння дуги камера наповнюється маслом (стан III).

Сучасні масляні вимикачі обладнуються також більш складними камерами, у яких використовуються показані принципи в різних комбінаціях з одним, двома і більшою кількістю розривів на фазу або мають камери з поздовжньо-поперечним дугтям.

5.9 Гасіння електричної дуги повітряним дугтям

Цей спосіб гасіння також знайшов широке застосування в вимикачах змінного струму на високу напругу 110 – 750 кВ.

Дуга, що утвориться між контактами, обдувається уздовж або поперек потоком повітря під визначеним тиском. Потік повітря, який рухається з великою швидкістю (близькою до звукової), видаляє з зони дуги нагріті іонізовані частинки, заміщаючи їх іншими, охолодженими. Температура стовбура дуги різко знижується, особливо в момент проходження струму через нуль. Одночасно відбувається і механічна руйнація стовбура дуги.

Головний вплив на процес гасіння мають тиск і швидкість витікання повітря, власна частота кола, що вимикається, відстань між контактами, площа вихідного отвору і спрямованість струменів.

Як вже вказувалося вище, з підвищенням тиску зменшується ступінь іонізації, а із збільшенням швидкості збільшується інтенсивність охолодження стовбура дуги. Тому із збільшенням тиску та швидкості витікання потоку повітря підвищуються інтенсивність гасіння і спроможність вимикання дугогасильного пристрою.

Відстань між контактами істотно впливає на процес гасіння. Здавалося б, що збільшення відстані між контактами повинно покращувати умови

гасіння. У дійсності для кожного значення тиску існує оптимальна відстань між контактами, при якій забезпечується найкраще гасіння і максимальна спроможність вимикання. Зменшення, як і збільшення, цієї відстані погіршує гасіння. При цьому дуже часто оптимальна з умов гасіння відстань між контактами може бути менше необхідної з умов електричної стійкості. Тому, після гасіння дуги, щоб уникнути пробою проміжку, необхідно вжити заходів щодо доведення відстані між контактами до значення, обумовленого вимогами електричної стійкості. Це досягається застосуванням додаткових, послідовно ввімкнених контактів, застосуванням багатократного розриву, де кожний розрив має оптимальну з точки зору умов гасіння відстань між контактами, а сумарна відстань усіх розривів забезпечує електричну стійкість усього дугового проміжку, а також застосуванням віддільників і ряду інших способів [9,14].

Із збільшенням вихідного отвору росте швидкість витікання потоку повітря, відповідно поліпшуються умови гасіння електричної дуги. Стосовно стовбура дуги потік повітря може бути поперечним – *поперечне повітряне дуття* (рис. 5.21, а), поздовжнім – *поздовжнє повітряне дуття* (рис. 5.21, б - е) і поздовжньо-поперечним – *поздовжньо-поперечне дуття*. Поздовжнє і поздовжньо-поперечне дуття може бути одностороннім і двостороннім.

Найкращі умови гасіння дуги в поздовжньому потоці повітря мають місце, коли відстань між контактами набагато більша половини внутрішнього діаметра порожнього контакту при двосторонньому симетричному дутті і чверті внутрішнього діаметра порожнього контакту при однібічному дутті. Практично ця відстань складає 25–50 мм у залежності від номінальної напруги повітряного вимикача. При такій невеликій відстані між контактами напруга, що може бути прикладене між ними в момент гасіння дуги, не перевищує 35–60 кВ при тиску 2 МПа і 80–125 кВ при тиску 4 МПа. Тому дугогасильні камери вимикачів на номінальну напругу 110 кВ і вище мають кілька контактних проміжків (розривів), з'єднаних послідовно. Вимикачів з поздовжнім повітряним дуттям випускаються на всі номінальні напруги аж до 1150 кВ.

При порожнистих контактах дуга здувається потоком стиснутого повітря з торцевих робочих поверхонь контактів на їх внутрішню поверхню, чим досягається незначний знос робочих контактних поверхонь. Крім того, потоки плазми, що виходять з поверхні електродів, не попадають у простір між контактами і не мають впливу на відновлення його електричної міцності. При поздовжньому повітряному дутті деталі з ізоляційних матеріалів не стикаються ні із самою дугою, ні з розжареними нею газами.

Закупорка сопла в торцях порожнього контакту зменшує інтенсивність повітряного дуття. Дуга за дуже короткий час сильно нагріває повітря, що дотикається до неї. Відбувається розширення повітря і значне підвищення тиску в соплі, що протидіє основному потокові. Воно зменшує швидкість витікання повітря із сопла, унаслідок чого сильно зменшується

й ефективність охолодження дуги. При великому струмі вимкнення (або малому діаметрі сопла) протитиск може виявитися більше тиску повітря, що надходить, тобто відбудеться повна закупорка сопла і повітряне дуття припиниться. Тому діаметр сопла вибирається таким, щоб при номінальному струмі вимкнення, коли протитиск найбільший, швидкість повітря не була менше 10–12 м/с.

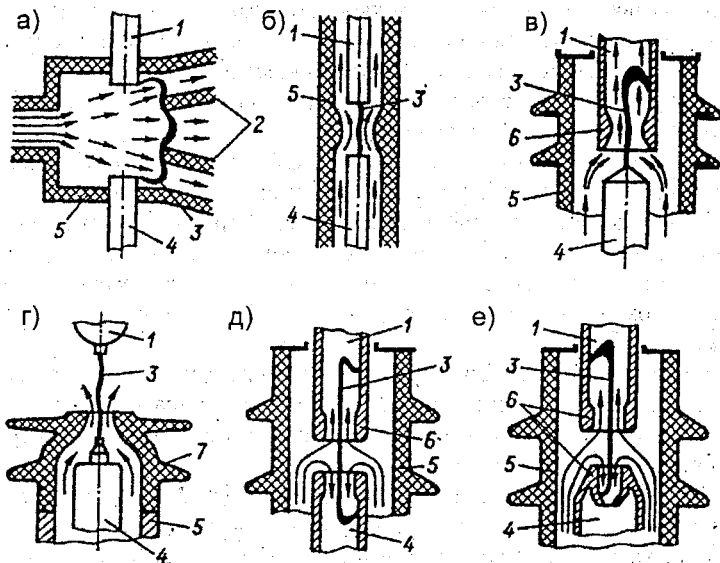


Рисунок 5.21 – Схеми камер повітряного дуття:

а – поперечне дуття; б – поздовжнє одностороннє в гирлі камери; в – поздовжнє одностороннє через металеве сопло; г – поздовжнє одностороннє через ізоляційне сопло; д, е – поздовжнє двостороннє через соплоподібні контакти. 1 – нерухомий контакт; 2 – ізоляційні ґратки; 3 – дуга; 4 – рухомий контакт; 5 – корпус камери; 6 – металеве сопло; 7 – ізоляційне сопло

При поперечному повітряному дутті (рис. 5.21, а) напрямок руху стиснутого повітря перпендикулярний дузі. При розмиканні нерухомого та рухомого контактів між ними виникає дуга, яка потоком стиснутого повітря здувається з робочих поверхонь контактів на їх дугогасильні поверхні і одночасно вдувається в першу щілину, утворену ізоляційними перегородками 2. При подальшому опусканні рухомого контакту відкривається друга щілина, у яку вдувається дуга, і т.д. У результаті дуга подовжується, приймаючи форму зигзага, і ефективно охолоджується стисненим повіт-

рям. Для захисту перегородок від обвуглювання дугою вони цілком або частково (на ділянці, що може дотикатися до дуги) виконуються з газогенеруючого матеріалу, наприклад з фібри. При зіткненні дуги з поверхнею фібри з останньої бурхливо виділяються гази, сприяючи додатковому охолодженню дуги. Цей вид дуття знайшов обмежене застосування через наявність органічної ізоляції, що дотикається до дуги, великих габаритних розмірів і складності конструкції камери. Він використовувався лише у вимикачах навантажень напругою до 15 кВ.

За ефективністю впливу на дугу кращі характеристики дають камери поперечного дуття, але їхня робота пов'язана з великою витратою повітря. Тому вони знаходять переважне застосування у вимикачах на великі номінальні струми та струми вимкнення при напрузі до 20 кВ.

Перевагами камер поздовжнього і поздовжньо-поперечного дуття є можливість створення простих пристроїв із багатократними розривами дуги, просте регулювання дуття формою контактів і вихлопних отворів і порівняно невелика витрата повітря.

5.10 Гасіння електричної дуги в елегазовому середовищі

В останні роки для гасіння дуги широкого застосування в апаратобудуванні набуває елегаз (шестифториста сірка SF_6).

Елегаз є «електронегативним» газом. Його молекули мають здатність захоплювати електрони. При цьому утворюються малорухливі, важкі негативні іони, які поволі розганяються електричним полем. Завдяки цьому елегаз має високу електричну міцність. При тиску 0,23 МПа розрядна напруга в елегазі дорівнює розрядній напрузі трансформаторного масла (рисунк 5.22).

Висока електрична міцність елегазу дозволяє скоротити ізоляційні відстані, зменшити тиск, що дає значний вигоду в габаритних розмірах і масі апаратів і розподільних пристроїв.

У рівномірному електричному полі розрядна напруга визначається рівнянням:

$$U_p = 8,9 \cdot 10^{-4} pl$$

де p – тиск, Па; l – відстань між електродами.

Слід зазначити, що для максимального використання високої міцності елегазу, електричне поле в апаратах повинне бути однорідним. Річ у тому, що в неоднорідному полі виникає корона. За наявності корони відбувається розкладання елегазу на нижчі фториди, діючі несприятливо на багато конструкційних матеріалів, які використовуються в дугогасильних пристроях. У зв'язку з цим поверхня металевих екранів, що вирівнюють електричне поле, повинна бути гладкою. Бруд, пил, особливо металеві частинки на поверхні екранів, створюють локальну неоднорідність поля, погі-

ршуючи роботу елегазової ізоляції. Деякі властивості елегазу і інших газів дані в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Порівняльна характеристика дугогасильних середовищ

Параметр	Елегаз SF ₆	Повітря	Водень H ₂	Азот N ₂
Густина, г/см ³	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$0,089 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
Відносна густина	5,19	1,0	0,069	0,96
Молекулярна маса	146	28,9	2,0	28
Температура кипіння, °С	-63,8	-194,0	-252,8	-195,8
Електрична міцність щодо повітря	2,3	—	—	1,0
Питома теплоємність при $\vartheta = 70^\circ\text{C}$, Дж/(г·°С)	0,73	1,0	1,42	1,03
Питома об'ємна теплоємність, Дж/(см ³ ·°С)	$4,89 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$0,026 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$
Швидкість звуку при $\vartheta = 30^\circ\text{C}$, м/с	138,5	330,0	1200	330,0

Хоча питома теплоємність елегазу небагато нижча, ніж повітря, питома об'ємна теплоємність (енергія, необхідна для підняття температури 1см³ елегазу на 1°С) майже в 4 рази більша, ніж повітря. Завдяки цьому охолоджуюча здатність елегазу вища, ніж повітря. При природній конвек-

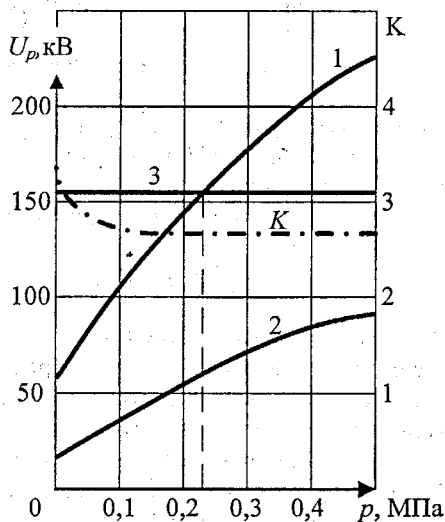


Рисунок 5.22 – Розрядні напруги в елегазі (1), в повітрі (2) і в трансформаторному маслі (3)

ції теплопередача в 1,9 рази вища, ніж в повітрі. Це дозволяє підвищити струмове навантаження на 15–25% і відповідно зменшити переріз струмоведучих кіл апарата.

Завдяки хімічній інертності елегазу (у діапазоні до 800 °С) допустима температура мідних контактів може бути збільшена з 75 (для повітря) до 90 °С. Це дозволяє додатково збільшити струмове навантаження апарата. Елегаз негорючий, пожегобезпечний. Описані вище позитивні властивості дозволили широко використовувати елегаз в силових трансформаторах, кабелях високої напруги і комплектних розподільних пристроях, що герметизуються. Недоліком елегазу є перехід з газоподібного стану в рідкий при відносно високих температурах.

У елегазових вимикачах застосовуються в основному два принципи гасіння дуги.

Перший – електрична дуга охолоджується елегазом при перетіканні газу з резервуара високого тиску (близько 2 МПа) в резервуар низького тиску (0,3 МПа), тобто використовується той же принцип, що і в повітряному вимикачі. Для того, щоб уникнути переходу елегазу в рідину при негативній температурі (– 40°С), бак високого тиску необхідно підігрівати до температури 12°С. Потрібно сказати, що під час переходу елегазу в рідкий стан зменшується густина газової фази і погіршується його дугогасильна здатність. Для підігріву газу служить автоматична система, яка сильно ускладнює конструкцію вимикача.

Другий – вимикач заповнений елегазом при тиску 0,3–0,4 МПа. При цьому забезпечується висока електрична міцність газу і можливість роботи без підігріву при температурі до – 40 °С. У цьому вимикачі перепад тиску, необхідний для гасіння дуги, створюється спеціальним компресійним пристроєм, механічно пов'язаним з рухомим контактом апарату. В процесі гасіння виходить перепад $\Delta p = 0,6 - 0,8$ МПа. При цьому забезпечуються умови для отримання критичної швидкості закінчення і ефективного гасіння дуги. Ці вимикачі одержали назву автоінвентивних, або автокомпресійних.

В елегазових вимикачах гасіння дуги відбувається так само, як і в повітряних вимикачах, за рахунок інтенсивного охолодження дуги потоком газу. Дугогасильна здатність елегазу в 4,5–5 раз більша, ніж при повітряному дутті за однакових умов. Вказана перевага пояснюється, головним чином, складом плазми і температурною залежністю теплоємності, теплопровідності і електропровідності від температури. При розкладанні (дисоціації) багатокомпонентної молекули створюються нижчі фториди сірки SF_2 , SF_4 , атоми фтору і сірки.

На рис. 5.23 та рис. 5.24 подані залежності питомої теплоємності і коефіцієнта теплопровідності плазми від температури для повітря і елегазу.

Особливістю елегазу є різке збільшення теплоємності при температурі 2000К в результаті дисоціації молекул. Процес дисоціації закінчується

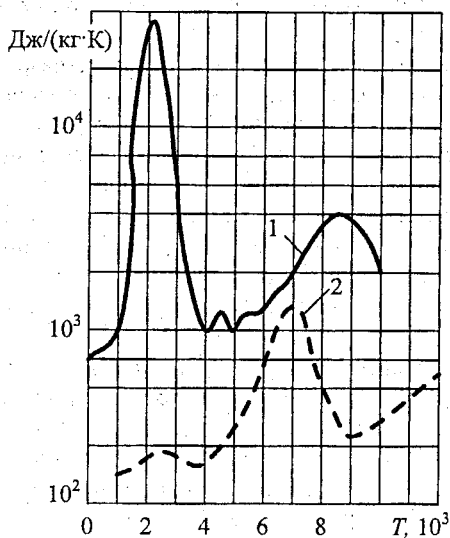


Рисунок 5.23 – Залежності питомої теплоємності від температури (1 – елегаз; 2 – повітря)

при температурі 4000К. В результаті у області температур 2000–3000К теплопровідність плазми майже на два порядки вища, ніж повітря. Поява в плазмі в результаті дисоціації атомарної сірки з низьким потенціалом іонізації (10,4 еВ) призводить до того, що навіть при температурі плазми 3000 К концентрація електронів достатня для підтримки дугового розряду.

Зниження температури стовпа дуги з 12 000 до 8000К мало позначається на опорі дуги і зростанні електричної міцності проміжку. Коли температура стовпа стає нижче 7000 К, різко знижується концентрація електронів (менше 10^{15} см^{-3}), значно зменшується питома електрична провідність. При температурі 6000 К концентрація електронів стає рівною 10^{13} см^{-3} , різко зменшується ступінь іонізації сірки і посилюється механізм захоплення електронів вільним фтором, а також молекулами елегазу і нижчими фторидами.

Стабільність горіння дуги в елегазі зберігається до досить малих значень струму і відповідно щодо низьких температур. В результаті в елегазовому вимикачі відсутні зрізи струму, які можуть приводити до виникнення великих перенапруг при роботі повітряних вимикачів.

Коли температура дуги стає нижча за температуру повної дисоціації елегазу (4000 К), починається процес рекомбінації, атомарна сірка хімічно зв'язується з фтором, кількість сірки і густина електронів різко зменшується.

ся. Приблизно у цій області температура є висока теплопровідність плазми, яка сприяє охолодженню стовпа дуги, відновленню електричної міцності проміжку. Велику роль відіграє видалення електронів за рахунок захоплення їх молекулами елегазу і атомарним фтором.

Висока дугогасна здатність елегазу пояснюється також його поведінкою у області нуля струму.

Завдяки фізико-хімічним властивостям елегазу тонкий стержень дуги зберігається впродовж усього півперіоду, у тому числі і при підході струму до нуля. Дуга гасне в останній момент проходження струму через нуль.

Електрична дуга в повітрі, що мала такий же радіус дуги протягом всього півперіоду, до кінця півперіоду під дією потоку повітря починає збільшуватися в діаметрі через турбулентність потоку газу. Струм дуги може обриватися навіть не доходячи до нуля струму. Постійна часу дуги, пропорційна квадрату радіусу дуги, в повітряному ДП збільшується, а в елегазовому залишається малою. Після проходження струму через нуль залишковий стержень дуги в елегазі продовжує інтенсивно охолоджуватися і електрична міцність проміжку швидко зростає. Досягши температури 2000 К відбувається інтенсивне охолодження дуги через зростання теплоємності плазми.

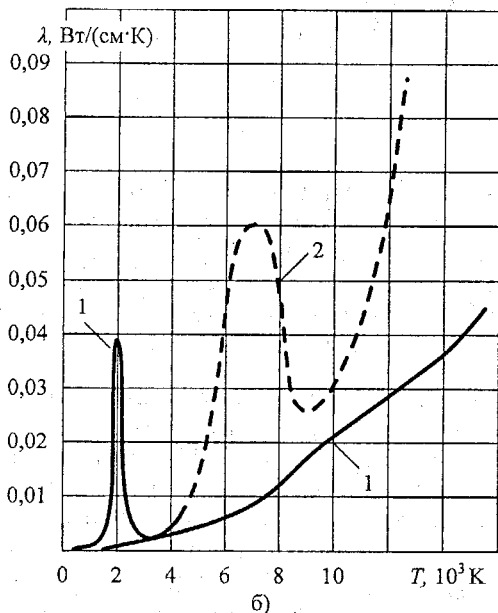


Рисунок 5.24 – Залежності теплопровідності від температури (1 – елегаз; 2 – повітря)

У повітряному дугогасильному пристрої (ДП) міцність проміжку у момент нуля струму вища, але швидкість наростання електричної міцності після нуля нижча через велику постійну часу дугу (рис. 5.25).

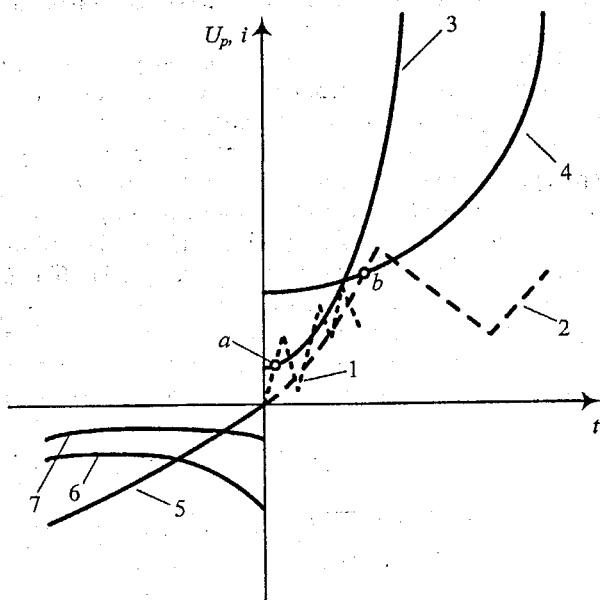


Рисунок 5.25 – Порівняльна характеристика процесу зростання електричної міцності в дугогасильному пристрої з елегазом і повітрям: 1, 2 – відновлювальна напруга при близькому і віддаленому КЗ; 3, 4 – криві відновлювальної міцності в елегазовому і повітряному ДП; 5 – крива струму дуги; 6, 7 – напруга на дузі в повітряному та елегазовому дугогасильному пристрої

На рисунку 5.25 показано характер відновлення електричної міцності для ДП з повітрям (крива 4) і елегазом (крива 3). Початкова електрична міцність у ДП з повітрям вища, ніж у ДП з елегазом, але швидкість наростання міцності в ДП з елегазом значно вища. Експериментально встановлено, що вимикачі з елегазом дуже чутливі до невіддаленого КЗ при струмі $0,9 I_{ном}$. Це пояснюється тим, що відновлювальна напруга має дуже високу частоту (крива 1). Пробій виникає в точці *a*.

Повітряні вимикачі особливо чутливі до невіддаленого КЗ при струмі $0,75 I_{ном}$. В цьому випадку амплітуда високочастотної складової більша, а частота нижча (крива 2). Пробій виникає в точці *b*.

Вимикаюча здатність ДП з елегазом може бути збільшена шляхом додання в елегаз гелію. При однаковому парціальному тиску вдається зна-

чно підняти струми вимкнення. Так, при швидкості відновлення напруги – 2000 В/мкс струм вимкнення у ДП з елегазом рівний 14,5 кА, а в ДП з елегазом і гелієм 22 кА.

Елегазові силові вимикачі виготовляються як однокамерними, так і багатокамерними. У однокамерних вимикачів камера закріплюється вертикально на опорному ізоляторі. Полюси однокамерних і двокамерних вимикачів закріплюються на загальну раму або окремо. Полюси вимикачів з чотирма камерами кріпляться на свої власні рами. Переважне застосування мають дугогасильні автокомпресійні дугогасильні камери, необхідний для гасіння електричної дуги газовий тиск в яких створюється в соплі під час вимкнення (рис 5.26).

Нерухома контактна труба (6) і контакт номінального струму (4) зв'язані з'єднувальним фланцем (7) вибухової камери. Рухомий контакт потужності (3) разом з компресорним циліндром (2) при вимкненні рухається проти нерухомого поршня (1), причому на початку розмикає без струму контакт номінального струму (4) і після цього контакт потужності (3). При вимкненні газ, що є в цьому циліндрі (2), стискається і пресується через з'єднане з циліндром ізоляційне сопло (5).

Значним чинником для функції вибухової камери є розмір сопла, тому що при сильнострумових дугах сопло закупорюється. При великих струмах в дугогасильному циліндрі утворюється вищий тиск, в порівнянні з процесом гасіння малих струмів. Але такий принцип в певному діапазоні струмів незалежно від миттєвого значення струму забезпечує ефективне гасіння дуги при маленьких різницях перепадів тиску. Малі індуктивні струми обдуваються дуже „м'яко" і розмикаються практично без перенапруг, а емнісні струми розмикаються без зворотного запалювання дуги завдяки високій електричній міцності елегазу. Тобто, вимикач має комутаційну характеристику, пристосовану до струму вимкнення.

Продукти розпаду, що виникають при вимкненні і не повністю рекомбінуються, зв'язуються статичним фільтром (9), який і приймає залишкову вологість.

У нормальному положенні контакти вимикача замкнуті і струм проходить від верхнього струмопроводу до нижнього через головні контакти і компресійний циліндр.

При операції вимкнення, рухомі частини головного і дугогасильного контактів, а також компресійний циліндр і сопло зсовуються в розімкнене положення. Важливо враховувати, що рухомі контакти, сопло і компресійний циліндр складають один рухомий вузол. Іншими словами, процес компресорного дугогасіння має конструкцію з одноходовим рухом для розмикання контактів.

Коли рухомий вузол рухається у напрямі розімкненого положення контактів, клапан заповнення закривається і елегаз починає стискатися між рухомим компресійним циліндром і нерухомим поршнем. Першими розмикаються головні контакти. Завдяки тому, що розмикання головних кон-

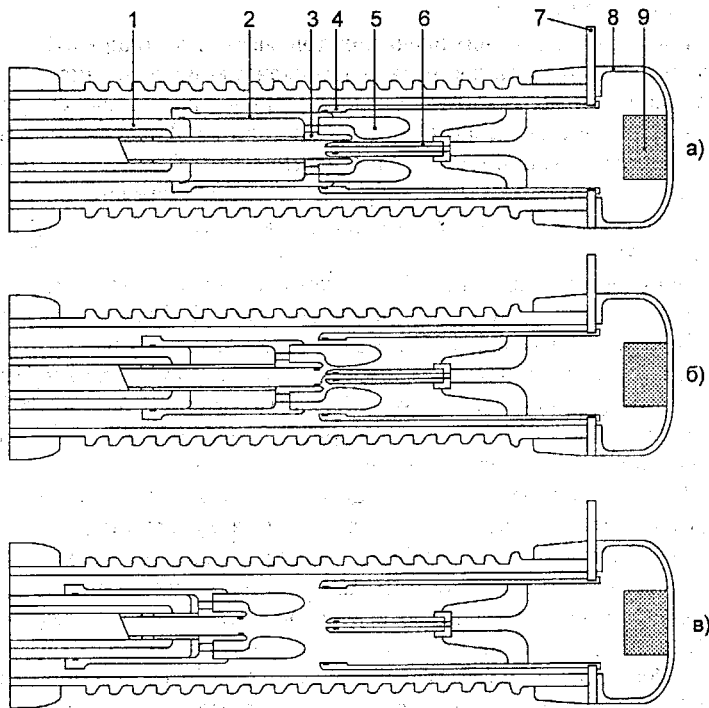


Рисунок 5.26 – Принцип дії та процес гасіння дуги в автокомпресійній камері елегазового вимикача: а – положення увімкнення; б – положення гасіння; в – положення вимкнення; 1 – нерухомий поршень; 2 – компресорний циліндр; 3 – силовий контакт; 4 – контакт номінального струму; 5 – ізоляційне сопло; 6 – контактна труба; 7 – з'єднувальний фланець; 8 – ковпак; 9 – фільтр

тактів відбувається за час менший ніж час розмикання дугогасних контактів, будь-яка дуга запалюватиметься тільки між дугогасними контактами в об'ємі, обмеженому геометрією сопла.

Під час горіння дуги тіло плазми деякою мірою блокує рух елегазу через сопло, внаслідок чого в компресорному об'ємі продовжує збільшуватися тиск газу до того моменту, коли крива струму проходить через нульове значення, і дуга стає порівняно слабкою. У цей момент потік стислого під великим тиском елегазу виривається з компресійного об'єму через сопло і гасить дугу. У розімкненому положенні відстань між нерухомим і

рухомим контактами вибрана достатньою для того, щоб витримувати нормовані рівні діелектричної міцності проміжку.

При операції ввімкнення клапан наповнення відкривається і елегаз може вільно проходити в компресійний об'єм.

На початку процесу вимкнення автокомпресійний дугогасильний пристрій починає працювати таким же чином, як і компресійний. Відмінність же у принципі їх дії при вимкненні великих і малих струмів виявляється тільки після появи дуги.

Коли дугогасильні контакти відокремлюються, запалюється дуга між рухомим і нерухомим дугогасильними контактами. Під час горіння дуги, вона деякою мірою блокує потік елегазу через сопло. Дуга, що горить, характеризується дуже високою температурою і могутнім випромінюванням тепла і починає нагрівати елегаз в обмеженому газовому об'ємі. Таким чином, тиск всередині як автокомпресійного, так і компресійного об'єму зростає як через підвищення температури від дуги, так і внаслідок стиснення газу в загальному просторі між компресійним циліндром і нерухомим поршнем.

При операції ввімкнення відкривається клапан наповнення і елегаз надходить як в нижній (компресійний), так і у верхній (автокомпресійний) об'єми пристрою дугогасіння. Оскільки для вимкнення слабких струмів досить середнього рівня тиску елегазу, створюваного механічним способом, а для переривання великих струмів вимкнення використовується тепла енергія дуги, що створює додатковий тиск елегазу в обмеженому об'ємі, то для роботи автокомпресійного дугогасильного пристрою потрібна менша (приблизно на 50%) робоча енергія привода, ніж для роботи компресійного пристрою гасіння дуги. Автокомпресійні пристрої також конструктивно виконані з одноходовим рухом контактів.

5.11 Гасіння електричної дуги в вакуумі

Протягом багатьох років перспектива створення вакуумного вимикача приваблювала розробників високовольтної апаратури, головним чином, за безсумнівні переваги вакуумного дугогасильного середовища над іншими принципами гасіння електричної дуги в вимикачах. А переваги ці такі:

а) автономність роботи, незалежність від сторонніх джерел енергії; немає необхідності застосовувати для дугогасіння які-небудь гази або рідини; відсутній вихлоп назовні полум'я або розпечених газів;

б) у процесі експлуатації вакуумні дугогасильні камери не вимагають нагляду або обслуговування; у більшості випадків термін їхньої служби не менший, ніж у вимикача, на якому вони встановлені;

в) можливість орієнтувати камери в просторі в будь-якому довільному положенні;

г) повна пожежобезпечність;

д) винятково висока комутаційна здатність; для успішного вимкнення струмів невіддаленого короткого замикання не потрібно шунтуючих резисторів або конденсаторів;

е) відносно малопотужний привод;

ж) безшумність оперування.

Ці переваги вакуумних комутуючих пристроїв, безсумнівно, послужили тією рушійною силою, що стимулювала їхній розвиток. Основним недоліком вакуумних вимикачів вважалася їх більш висока вартість у порівнянні із серійними апаратами традиційного виконання. Але останні досягнення свідчать, що може бути знижена не тільки вартість самих вакуумних камер, але завдяки їм — і результуючі витрати на створення високовольтних комутуючих установок.

Протягом останніх років були проведені дослідження, виявлені і пояснені основні фізичні процеси, що відбуваються при горінні дуги у вакуумі, причому проведені досліди цілком підтвердили висунуту раніше гіпотезу про принципову можливість створення силового вакуумного вимикача. У результаті цих досліджень була виявлена причина, за якою вимикаюча здатність вакуумної дугогасильної камери з простими торцевими контактами обмежувалась струмом 10 кА (амплітудне значення). Одночасно було вивчено і вплив теплофізичних властивостей матеріалу контактів на стабільність горіння дуги у вакуумі, завдяки чому з'явилася можливість штучними засобами впливати на негативне явище в вакуумній камері при комутації електричного кола — зріз струму вимкнення. Це явище — різкого спаду струму до нульового значення раніше його природного переходу через нуль, стало в пору розвитку вакуумної комутаційної апаратури однією з головних проблем, що заважали її прогресові.

В наш час вимикачі з вакуумними дугогасильними пристроями починають все більше витіснити масляні, електромагнітні і повітряні вимикачі. Річ у тому, що вакуумні вимикачі не потребують ремонту принаймні протягом 20 років, тоді як в масляних вимикачах масло при комутації електричної дуги забруднюється частинками вільного вуглецю і, крім того, ізоляційні властивості масла знижуються через попадання в нього вологи і повітря. Це приводить до необхідності зміни масла не рідше ніж 1 раз на 4 роки. Дугогасильні пристрої електромагнітних вимикачів приблизно в ці ж терміни потребують очищення від кіптяви, пилу і вологи. Камери вакуумних вимикачів поміщені в герметичні оболонки і їх внутрішня ізоляція не піддається дії зовнішнього середовища. Електрична дуга при вимкненні у вакуумі практично не знижує властивостей дугогасильного і ізолюючого середовища. Сучасні вакуумні вимикачі мають комутаційний і механічний ресурс, що забезпечує міжремонтний період в експлуатації 15-20 років. Ці умови важкоздійснимі при традиційних методах гасіння дуги в маслі або повітрі.

Гасіння дуги змінного струму здійснюється при розмиканні контактів у глибокому вакуумі (залишковий тиск порядку 10^{-6} мм.рт.ст.). У момент часу t_1 (рис. 5.27) починається розмикання контактів вакуумної дугогасильної камери й у міжконтактному проміжку загоряється електрична дуга. Спад напруги на дузі надзвичайно малий і, звичайно, не перевищує 30 В. У момент t_2 переходу струму через природний нуль міжконтактний проміжок заповнений іонізованими парами металу, що утворилися протягом горіння дуги $t_1 - t_2$. Але, в силу відсутності середовища, що перешкоджає розльоту цих парів, їх вихід із проміжку здійснюється за надзвичайно малий час $\sim 10^{-5}$ с, після чого вакуумний вимикач готовий витримати відновлювальну напругу.

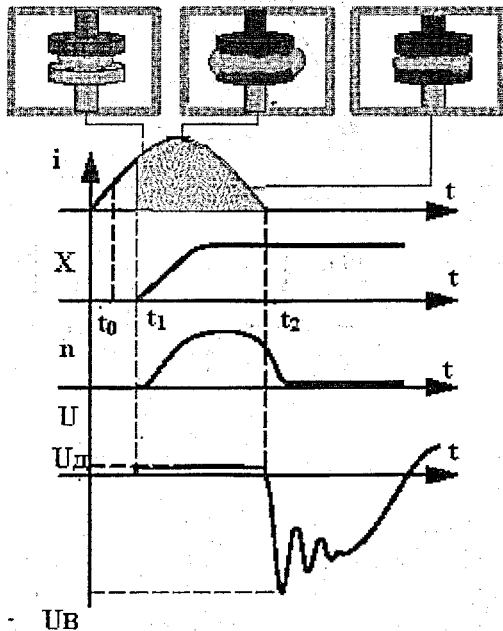


Рисунок 5.27 – Типові осцилограми вимикання змінного струму у вакуумі: i – струм, що вимикається, X – хід контактів, n – концентрація іонізованих парів металу у міжконтактному проміжку, U – напруга на проміжку, U_d – напруга на дузі, $U_{\text{в}}$ – відновлювальна напруга, t_0 – момент подачі команди на вимкнення

Оскільки електрична міцність вакуумного проміжку надзвичайно висока (~ 30 кВ / мм), вимкнення електричного кола гарантовано відбувається при зазорах більше 1мм. Конструктивні особливості вакуумної дугогасильної камери (ВДК) зображено на рис. 5.28. Вона складається з ізоляцій-

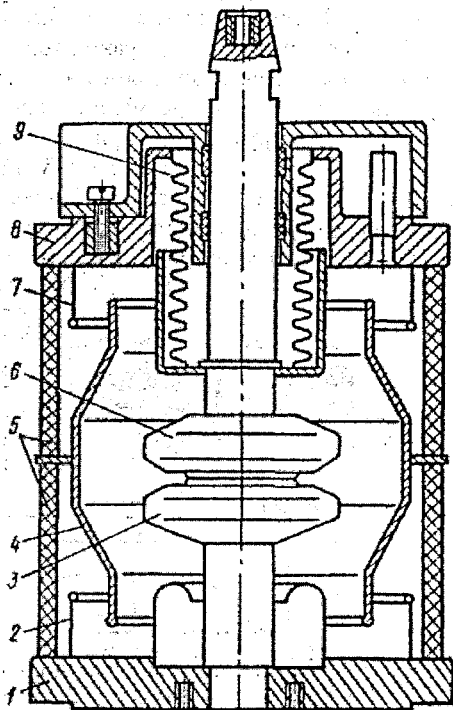


Рисунок 5.28 – Конструкція вакуумної дугогасильної камери

ної циліндричної оболонки 5, оснащеної по кінцях металевими фланцями 1 і 8, усередині якої містяться нерухомий контакт 3 і рухомий 6, а також електростатичні екрани 2, 4 і 7. Рухомий контакт 6 з'єднується з фланцем 8 за допомогою сильфона з нержавіючої сталі, що забезпечує переміщення контакту 6 при збереженні герметичності камери.

Екрани кріпляться до оболонки або до фланців і служать для захисту внутрішньої ізоляційної поверхні оболонки від розбризкування і конденсації на ній парів металу, що утворюються при горінні дуги, а також для вирівнювання розподілу напруги по камері. Оболонка 5 виготовляється з газонепроникної і механічно щільної кераміки.

Усередині ВДК підтримується вакуум $(10-15) \cdot 10^{-6}$ Па (близько 10^{-6} мм рт. ст.), що забезпечує великі розрядні напруги. Наведемо для порівняння зразкові розрядні напруги в різних газах і у вакуумі в залежності від довжини проміжку між контактами l :

Таблиця 3

Довжина проміжку l , мм	1	2	3	4	5	6	7
Розрядна напруга: кВ							
при високому вакуумі	67	100	127	150	175	185	203
в елегазі ($p=10^5$ Па)	9	19	28	38	47	57	66
в повітрі ($p=10^5$ Па)	3	6	10	13	17	20	23

Роботоздатність вакуумної дугогасильної камери значною мірою обумовлюється матеріалом і конфігурацією контактів. У вакуумі практично відсутнє окислювання контактних поверхонь, але значно зростає схильність металів до зварювання. У ВДК застосовуються торцеві контакти, оскільки при інших конструкціях (наприклад, пальцевих контактах) при терті контактів в процесі розмикання-замикання можливе утворення мікрочастинок металу. Крім того, при торцевих контактах проміжок між контактами у вимкненому положенні дорівнює їх лінійному переміщенню. Контактне натискання створюється пружинами, розташованими в механізмі привода вимикача (тобто поза межами камери), а також за рахунок різниці тисків, що діють на сильфон по обидва боки (власне контактне натискання). Матеріал контактів ВДК повинен мати малий питомий опір для зменшення тепловиділення при номінальному струмі, незначне зношування при вимкненні струмів навантаження і струмів к. з., необхідну вимикальну здатність, погану зварюваність, малі струми зрізу і забезпечувати високу електричну міцність контактного проміжку після багаторазової комутації струму. Багато із цих вимог є суперечливими. Тому для контактів вакуумних камер застосовуються багатокомпонентні або композиційні матеріали.

При вимкненні струмів до 10 кА використовуються прості дискові контакти. При струмах більше 10 кА з метою зменшення оплавлення контактних поверхонь дуга приводиться у швидке обертання по поверхні контактів під дією магнітного поля.

5.12 Гасіння електричної дуги в дугогасильній гратці

Розглянуті вище способи гасіння дуги зводилися до впливу на її стовбур. Дугу можна також гасити, використовуючи електродний спад напруги. Вперше цей принципово новий спосіб гасіння запропонував М. О. Додіво-Добровольський [3]. Над контактами 1 і 2 апарата (рис. 5.29) встановлюються нерухомі ізольовані один від одного металеві пластини 5, що утворюють дугогасильну гратку. Дуга 3, яка виникає при розмиканні контактів, направляється в цю гратку де і розбивається на ряд послідовних коротких дуг 4. У кожній пластині гратки виникає навколоелектродний

спад напруги. Гасіння дуги відбувається за рахунок суми навколоелектродних спадів напруги.

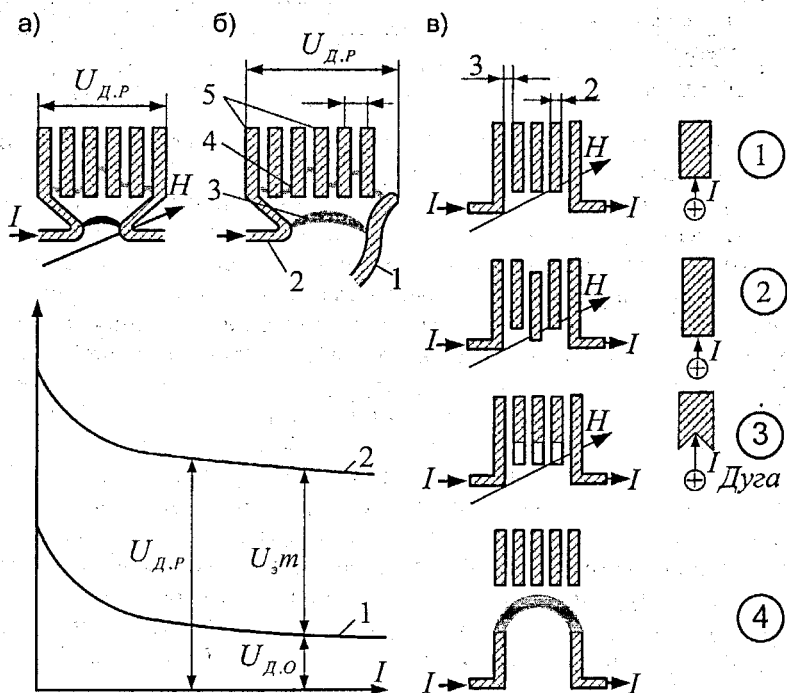


Рисунок 5.29 – Статичні вольт-амперні характеристики електричної дуги в ґратці і схеми дугогасильних ґраток

Гасіння дуги постійного струму. При кількості пластин m коротких дуг, які утворюються у ґратці, буде $m + 1$, стільки ж буде анодних U_a , і катодних U_k спадів напруги.

Напруга на дузі в ґратці

$$U_{д.г} = U_e(m+1) + E_D l_D, \quad (5.14)$$

де $U_e = U_a + U_k$ – сума навколоелектродних спадів напруги, В; E_D – градієнт напруги в дузі, В/см; $l_D = l_D(m+1)$ – довжина дуги, см.

Для відкритої дуги тієї ж довжини

$$U_{д.с} = U_e + E_D l_D.$$

Таким чином, напруга на дузі в ґратці дорівнює

$$U_{d,r} = U_{d,e} + U_e m. \quad (5.15)$$

Тобто, при незмінній довжині дуги її статична характеристика в дугогасильній гратці (крива 2 на рис. 5.29) подана тією ж за формою кривою, що і характеристика відкритої дуги (крива 1), але скоригованою на суму навколоелектродних спадів напруги в зону більш високих напруг.

Якщо число пластин велике, то величиною $U_{d,e}$ у порівнянні з $U_e m$ можна знехтувати, і рівняння (5.15) набуде вигляду

$$U_{d,r} \approx U_e m. \quad (5.16)$$

Для того, щоб дуга в гратці згасла, кількість пластин, між якими вона повинна знаходитися, повинно бути $m > U/U_e$, де U – напруга мережі, В.

Можливі дві типові схеми гратки. У схемі на рис. 5.29, а дуга, яка виникає на контактах, переходить на "роги" і, рухаючись вгору, під дією магнітного поля усіма своїми точками одночасно проникає в область, зайняту граткою. Напруга на дузі досягає значення $U_e m$, струм у колі знижується до нуля по кривій, яка є експонентою.

У схемі на рис. 5.29, б дуга, що виникла на контактах, послідовно входить у проміжки між пластинами гратки в міру віддалення рухомого контакту від нерухомого. Напруга на дузі зростає поступово за законом, близьким до лінійного. Тривалість горіння дуги буде зменшуватися із зростанням швидкості розмикання контактів і кількості пластин на одиницю довжини. За інших рівних умов схема на рис. 5.29, а дозволяє одержати меншу тривалість горіння дуги, ніж схема на рис. 5.29, б. Проте для забезпечення одночасного входу дуги у всі проміжки між пластинами потрібно зовнішнє магнітне поле.

Гасіння дуги змінного струму. При гасінні дуги змінного струму в дугогасильній гратці головну роль відіграють процеси біля катода. Суть їх полягає у тому, що в раціонально спроектованій дугогасильній гратці в момент проходження струму через нуль навколокатодний простір миттєво набуває електричної стійкості 150-250 В.

Якщо напруга $U_{np,0}$ є тією мінімальною напругою, яка необхідна для пробою навколокатодного прошарку після проходження струму через нуль, а дугогасильна гратка має m катодів ($m - 1$ пластин), то при

$$U_{np,0} m > U_{e, max} \quad (5.17)$$

дуга на проміжку не відновиться. У гратці (рис. 5.29, а) дуга погасне у той півперіод, за який вона ввійде в гратку. При схемі рис. 5.29, б дуга за один півперіод може не встигнути ввійти в необхідне число проміжків, тому що довжина дуги залежить від швидкості розмикання контактів.

Як зазначено вище, напруга $U_{e, max}$ практично не перевищує значення $2E_r$. Умова (5.17) визначає кількість пластин гратки, між якими дуга змінного струму повинна повністю погаснути при проходженні струму через нуль. Необхідна для згасання дуги змінного струму кількість пластин істо-

тно менша, ніж для постійного струму, де напруга U_c складає всього 20-25 В. Дугогасильна ґратка в електричних апаратах змінного струму діє в 7-8 разів ефективніше, ніж при постійному струмі. Цим і пояснюється широке її застосування на змінному струмі й обмежене застосування на постійному.

Дугогасильна ґратка дозволяє значно скоротити розміри дуги і погасити її в обмеженому об'ємі при малому світловому і звуковому ефектах. Це забезпечило їй широке застосування в дугогасильних пристроях контакторів і автоматичних вимикачів.

Вище розглянуті головні фізичні процеси, які відбуваються в дугогасильній ґратці. Ці процеси, як правило, ускладнюються додатковими явищами. Зокрема, істотне значення мають процеси, що відбуваються при входженні дуги в ґратку, форма і матеріал пластин та ряд інших.

Входження дуги в ґратку. Дуга, що швидко рухається, зустрічає істотний аеродинамічний опір при входженні в ґратку. Дійшовши до нижнього краю пластин, дуга уповільнює свою швидкість або зовсім зупиняється. Аеродинамічний опір (у першому наближенні пропорційний квадрату швидкості) зменшується, і дуга починає проникати в ґратку. Ступінь зниження швидкості дуги або час її зупинки біля нижнього краю пластин залежать від форми пластин, відстані між ними, сил, що рухають дугу, і загальної конструкції ґратки. Так, ґратка схеми 3 (рис. 5.29, в) має переваги перед іншими схемами: умови входження дуги в ґратку тут більш сприятливі.

У ґратку, виконану за схемою 1, 2, 3, дуга завжди входить. Зовнішні сили можуть тільки скоротити час зупинки дуги біля нижнього краю пластин. У ґратці за схемою 4 опорні точки дуги не можуть проникати в область, зайняту ґраткою, дуга тут не завжди входить у ґратку. Тривале зупинення дуги біля нижньому краю пластин призводять до їх значного вигорання.

Відстані між пластинами ґратки бажано робити дуже малими. Чим більше число пластин вдається помістити на одиницю довжини, тим компактнішим утворюється дугогасильний пристрій. Відстань між пластинами обмежується можливістю появи між ними металевого перешийка, який призводить до сплавлення контактів. Сталеві пластини ближче ніж на 2 мм розташовувати недоцільно. Друге обмеження для зближення пластин ставлять умови входження дуги в ґратку. Чим густіша ґратка, тим важче дузі проникати в ґратку.

Електрична дуга в ґратці з немагнітного матеріалу. Рух електричної дуги в ґратці з немагнітного матеріалу і сили, що діють на дугу, схематично зображені на рис. 5.30, а.

На електричну дугу, яка виникла між контактами, діють електродинамічні сили F_0 контура струму. Ці сили, а при наявності зовнішнього магнітного поля і сила взаємодії струму в дузі з цим полем, заганняють дугу в ґратку. Сили F_0 продовжують існувати протягом усього часу перебування

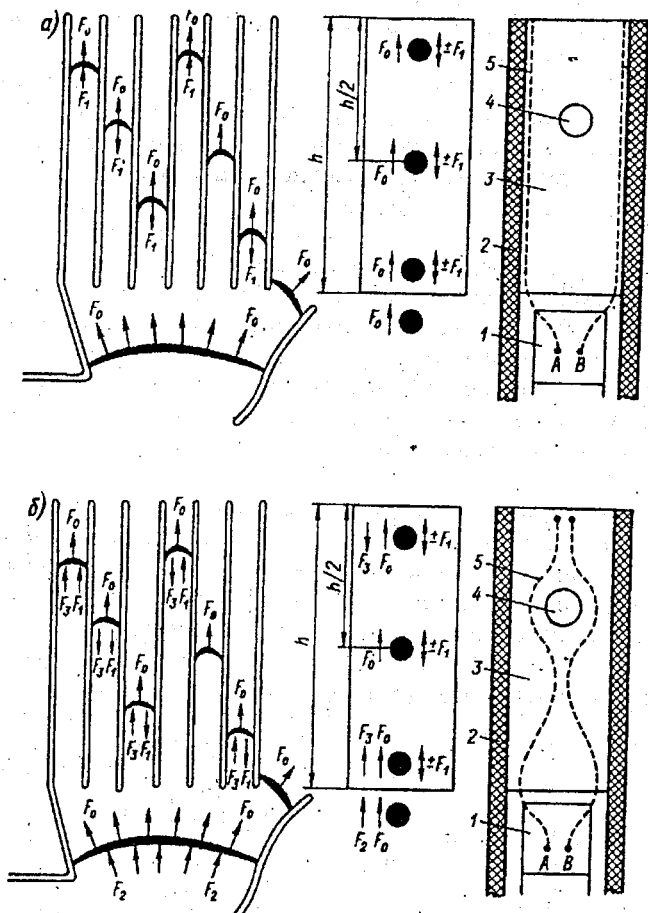


Рисунок 5.30 – Сили, що діють на дугу в ґратці з немагнітного (а) і магнітного (б) матеріалів: 1 – контакт мідний; 2 – стінка камери; 3 – пластина ґратки; 4 – отвір у пластині; 5 – траєкторії опорних точок дуги при її виникненні в точках А і В

дуги в ґратці. Проникаючи в ґратку, дуга розбивається на ряд коротких дуг. Вона перестає рухатися як щось ціле. Кожна з коротких дуг одержує можливість рухатися самостійно. Деякі з них можуть просунутися вперед, деякі можуть відставати. Як тільки це відбудеться (а відбудеться це обов'язково) у контурах струму по ґратці виникнуть місцеві сили F_1 , що намагаються затримати рух відсталих дуг і прискорити рух дуг, які висунулись

вперед. На одних ділянках дуги діють сили $F_0 - F_1$, на інших $F_0 + F_1$. В результаті одні дуги в ґратці сильно просунуться вперед, інші відстануть або навіть одержать зворотний рух.

При малих струмах сили F_0 малі, а у ґратці з немагнітного матеріалу дуга не завжди проникає в ґратку і буде горіти під ґраткою. При великих струмах дуга швидко пройде через ґратку і буде горіти над ґраткою.

Електрична дуга в ґратці з магнітного матеріалу. Рух дуги в ґратці з магнітного матеріалу і сили, що діють при цьому на дугу, схематично зображені на рис. 5.30, б. Сили F_0 і F_1 діють так само, як у ґратці з немагнітного матеріалу, до них додаються сили взаємодії струму в дузі з магнітними масами ґратки. Ці сили (F_2) намагаються втягти дугу в ґратку, коли дуга знаходиться під ґраткою, і відштовхують її (F_3) від країв пластин (до середини) після входження дуги в ґратку.

Таким чином, електромагнітні сили, що виникають у ґратці з магнітного матеріалу (сталевій), намагаються вирівняти швидкості руху окремих дуг. Ці сили сприяють входженню дуги в ґратку і перешкоджають виходу її з ґратки.

При малих струмах дуга не зупиняється під ґраткою, як це відбувалося при ґратці з немагнітного матеріалу. Вказані властивості сталевих пластин сприяють широкому розповсюдженню пристроїв із дугогасильними ґратками. Застосування сталевих пластин замість мідних або латунних, крім того, робить значно дешевшою конструкцію електричних апаратів.

5.13 Бездугова комутація кіл змінного струму

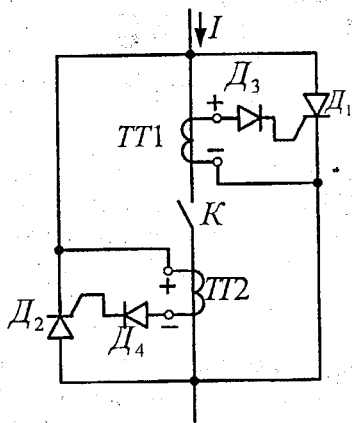


Рисунок 5.31 – Схема бездугового вимикання електричних кіл

Бездугова комутація кіл змінного струму може бути принципово здійснена за допомогою тиристорів. Для апаратів із дуже високою частотою вимикань застосування тиристорних вимикачів є доцільним. Проте тиристорні вимикачі мають великі габарити у порівнянні з контактними, допускають менші перевантаження, тому вони повинні вибиратися за пусковим струмом, а не за номінальним струмом електроспоживача.

Для апаратів з високою частотою оперативних вимикань і вимикань заслуговує на увагу контактна система з

тиристорним блоком бездугового вимкнення (рис. 5.31). Тиристори $D1$ і $D2$ ввімкнені паралельно контактам. При розімкнутих контактах K вони заблоковані – струм у колі відсутній. При замиканні контактів і виникненні струму в колі трансформатори струму $TT1$ і $TT2$ (або інший пристрій) через діоди $D3$ і $D4$ подають відповідно полярності півхвилі, які розблоковують сигнали на керувальні електроди тиристорів. Проте струм через тиристори не протікає, тому що вони шунтовані контактами. У момент розмикання контактів струм переходить у коло того з тиристорів, напрямок провідності якого відповідає полярності струму. Прямий спад напруги на відкритому тиристорі малий (1,5-2 В на одному тиристорі), і дуга на контактах не виникне. При переході струму через нуль провідний тиристор закриється, а другий не відкриється через відсутність сигналу. Струм у колі припиниться. Електрична зносостійкість контактів при цьому способі гасіння сильно зростає (наприклад, у контакторів серій КТ-64 і КТ-65 – майже у 10 разів).

Оскільки тиристори обтікаються струмом тільки протягом півперіоду, то вони можуть вибиратися на малі номінальні струми з більшими перевантаженнями. Габарити тиристорного блока є малими.

5.14 Потоки плазми та гасіння електричної дуги

Електрична дуга була відкрита В. В. Петровим майже 180 років тому і нині широко використовується в різних галузях техніки і фізичного експерименту. Але до цих пір багато чого ще залишається в ній нез'ясованим і спірним. Відкриваються все нові особливості цього складного явища. Однією з таких особливостей, до якої останнім часом прикута увага вчених та інженерів, є наявність в дузі поздовжніх потоків плазми.

Давно було виявлено, що в ряді випадків електрична дуга відхиляється від найкоротшої відстані між електродами і приймає дуже вигадливу форму без впливу дії зовнішніх сил. При цьому з опорних точок дуги виринають язички полум'я, які швидко переміщуються по стовбуру дуги [13].

Електрична дуга, подібно циліндричному провідникові, стискається власним магнітним полем. Якщо вздовж осі провідника змінюється площа його перерізу, то неоднаковим виявляється й електромагнітний тиск всередині провідника. Він є більшим в місцях звуження і меншим там, де провідник розширюється. В провіднику змінного перерізу виникає поздовжня різниця тисків. В твердому провіднику це явище, як правило, не приводить до яких-небудь змін форми провідника. Але в газоподібному середовищі, яким є електрична дуга, ця різниця тисків породжує потоки плазми, що виходять з місць зменшених перерізів. Такими місцями в електричній дузі служать, зокрема, навколоелектродні області (рис. 5.32). З них і вихо-

дять потоки плазми (вказані стрілками), які ми сприймаємо як світлові промені.

Електромагнітний тиск є дуже важливою, але не єдиною причиною виникнення поздовжніх потоків плазми. За певних умов істотну роль починають відігравати і теплові процеси. Потоки плазми виникають тільки в тому випадку, коли струм у дузі досягає певного рівня, і спостерігаються при відстанях між електродами понад 1 мм. Вони з'являються не відразу після виникнення дуги, а з деяким відставанням у часі (1 - 2 мкс).

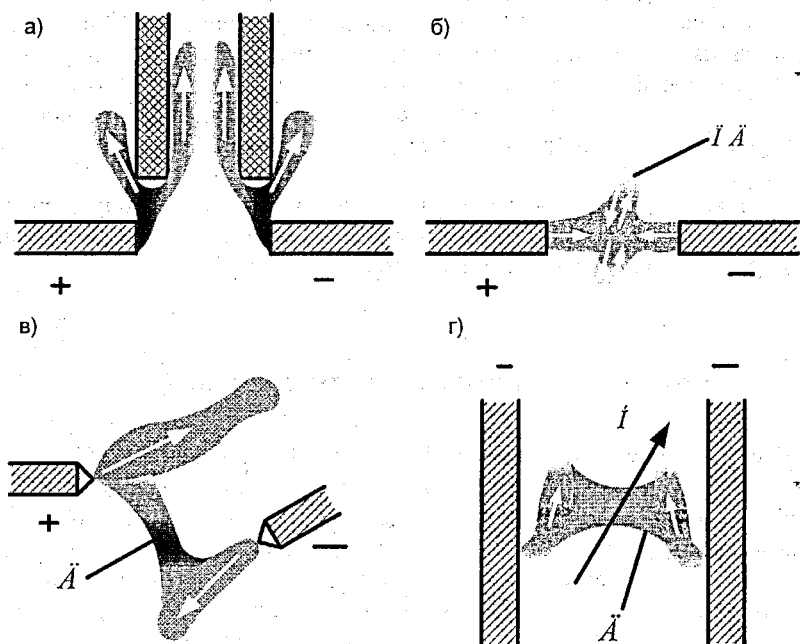


Рисунок 5.32 – Схеми виникнення потоків плазми в дугогасильних камерах

Потоки плазми виникають як на аноді, так і на катоді, на електродах з різних (будь-яких) матеріалів (особливо великими вони є на рідких електродах), у різних газових середовищах, у дугах високого і низького тиску. Вони з'являються не тільки біля електродів, а також біля будь-яких штучних перешкод, які розрізають дугу (при зіткненні з ізоляційною чи металевою перегородкою, при входженні у вузьку щілину тощо) (рис. 5.32, а).

Потоки плазми мають вигляд різко обкреслених пучків (смолоскипів) і за своєю яскравістю значно перевищують інші частини дуги. Вони дуже

рухливі і часто змінюють свою форму і місце розташування, зберігаючи загальні обриси протягом 20—30 мс. Вони неоднорідні за структурою. У їх центральній частині знаходиться область найбільш яскравого світіння — ядро, яке оточене плазмою, що має більш низьку температуру і більш слабе світіння.

Потоки плазми спрямовані перпендикулярно до поверхні тих електродів, з яких вони виходять, і поширюються прямолінійно, якщо на них не діють зовнішні фактори. Вони мають більш високу температуру і провідність, ніж інші частини стовбура дуги. Тому в багатьох випадках стовбур дуги розділяється на яскраві потоки плазми і менш яскраву частину стовбура (Д), що опирається на ці потоки (рис. 5.32).

Маючи більш високу температуру і провідність, потоки плазми є концентрованими носіями енергії. Умови горіння і гасіння електричної дуги значною мірою залежать від напрямку плазмових потоків. Якщо вони спрямовані назустріч один одному, наприклад так, як на рис. 5.32,б, то вся їх енергія виділяється в дуговому проміжку (плазменний диск ПД) і умови гасіння ускладнюються. Навпаки, якщо потоки плазми виносять енергію з дугового проміжку (див. рис. 5.32, в), то умови гасіння дуги покращуються.

Вище розглянуто рух дуги в поперечному, поздовжньому та радіальному магнітному полі. В наш час до зазначених трьох основних форм руху дуги додається ще четверта. Вона обумовлена впливом на дугу її власного вихрового магнітного поля, яке стискає дугу і викликає появу в ній поздовжніх потоків плазми. Якщо рух дуги в поперечному, поздовжньому та радіальному магнітному полі зв'язаний з переміщенням її в просторі, то вплив власного вихрового поля викликає рух плазми в самій дузі.

Раніше ми розглядали дугу як деяке цільне утворення — шнур. Її рух під дією зовнішніх магнітних полів подібний переміщенню провідника, який легко деформується під дією струму. Потоки плазми вносять певні зміни й уточнення до цих уявлень. Необхідно брати до уваги рух плазми всередині дугового шнура. Цей рух має загальний характер і існує як у нерухомо палаючій дузі, так і у всіх формах її руху в магнітному полі.

Поперечне магнітне поле відхиляє потоки плазми, як це показано на рис. 5.32, г. Переривчастий характер руху дуги тут пов'язаний з потоками плазми, зміна форми якої сприяє утворенню нових опорних плям дуги. Рух дуги в поздовжньому магнітному полі призводить до появи двох потоків плазми — анодного і катодного, які обертаються навколо осі системи і завиваються в спіраль. В радіальному магнітному полі обертання дуги навколо її власної осі пов'язано з появою потоків, всередині яких частинки плазми рухаються по спіралях. Осі цих спіралей збігаються з віссю стовбура дуги. З потоками плазми необхідно рахуватися при розробці дугогасильних пристроїв електричних апаратів.

Контрольні запитання

1. Назвати основні чинники, які підтримують процес горіння дуги.
2. Які основні вимоги ставляться до дугогасильних пристроїв?
3. Які особливості процесу горіння дуги в поздовжніх щілинах?
4. Навести найбільш характерні форми ґраток дугогасильних камер.
5. Як впливає ширина щілини дугогасильної камери на швидкість руху дуги та умови її гасіння?
6. Як впливає напруженість магнітного поля на швидкість руху дуги та умови її гасіння?
7. Яким чином створюється зовнішнє магнітне поле для руху електричної дуги в дугогасильній камері?
8. Навести переваги та недоліки дугогасильних камер магнітного дуття.
9. Сформулювати причини виникнення полум'я дуги та способи боротьби з ним.
10. Дати характеристику основним фізико-хімічним властивостям елегазу.
11. Особливості процесу горіння та згасання дуги в маслі.
12. Особливості процесу гасіння дуги високим тиском.
13. Особливості процесу гасіння дуги в елегазовому середовищі та вакуумі.
14. Назвати основні принципи, за якими виконуються дугогасильні камери сучасних масляних вимикачів.
15. Назвати основні принципи, за якими виконуються дугогасильні камери сучасних повітряних вимикачів.
16. Назвати основні принципи роботи дугогасильних камер елегазових вимикачів.
17. Назвати причини утворення плазми в комутаційних електричних апаратах та способи боротьби з нею.
18. Навести основні принципи бездугової комутації електричних кіл змінного струму.

6 Електричні контакти

6.1 Основні означення

Електричні апарати складаються з окремих деталей і провідників, електрично з'єднаних між собою. Місце переходу струму з однієї струмоведучої деталі в іншу називають *електричним контактом*. Наявність електричного контакту (саме явище) називають *контактуванням*.

З самого означення "*електричний контакт*" випливає, що контакт, принаймні, складається з двох частин. За можливістю переміщення цих частин одна відносно одної при заданій дії пристрою контакти електричних апаратів можуть бути розділені на три групи: *розбірні, комутувальні і ковзаючі*.

Розбірні контакти – це контакти, у яких в процесі роботи деталі не переміщуються одна відносно одної, а залишаються надійно скріпленими. Наприклад: болтове з'єднання шин, приєднання провідників до затискачів і т.ін.

Комутувальні контакти – це контакти, які в процесі роботи замикають, розмикають або перемикають електричне коло, у якому протікає або може протікати струм.

Ковзні контакти – різновид комутувальних контактів, у яких одна з деталей переміщується (ковзає) відносно іншої, але електричний контакт при цьому не порушується. Наприклад: контакти реостатів, щітковий контакт електричних колекторних машин, шарнірний контакт.

Якщо мова йде про електричний контакт, то доцільно розрізнити умовну й ефективну площину контактування (рис.6.1).

Як би старанно не були відшліфовані контактні поверхні, вони усе ж будуть мати мікроскопічні пагорби і шорсткості. Тому, фізично дві поверхні будуть контактувати не всією умовною площею робочої поверхні контакту–деталі (рис. 6.1, в), а лише окремими мікроскопічними площинами (рис. 6.1, д). Число площин контактування і їхнє розташування залежать від геометричних форм деталей, що контактують.

За формою контактування розрізняють три типи контактів: *точковий, лінійний, поверхневий*.

Точковий – контактування забезпечене тільки в одній площині – точці (рис. 6.1, а і г). Наприклад, сфера – сфера, сфера – площина, конус – площина і т.д. Тут умовна і фізична картини контактування збігаються.

Лінійний – умовне контактування деталей відбувається по лінії (рис. 6.1, б і д). Наприклад, циліндр – циліндр (по твірній), циліндр–площина, виток – виток і т.д. Фізична картина контактування буде подана рядом площин (мінімум дві), розташованих на лінії.

Поверхневий – умовне контактування відбувається по поверхні (рис. 6.1, в), фізичне – в ряді площин (мінімум три), розташованих на цій поверхні.

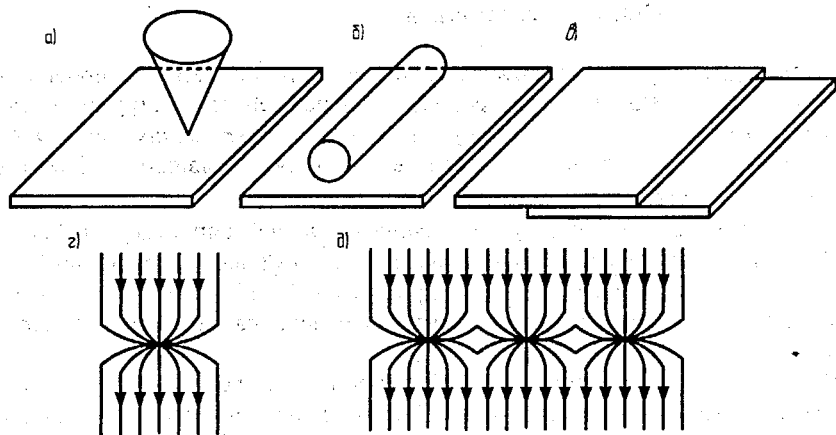


Рисунок 6.1 – Типи контактів, умовна і фізична картини контактування

Розміри площин контактування пропорційні силі, що стискає деталі, і залежать від опору стискання матеріалу деталей. Якщо дві деталі контактують в одній площині, то її розмір у першому наближенні

$$Q = P/\sigma, \quad (6.1)$$

де P – сила, що стискає деталі; σ – тимчасовий опір матеріалу стискання.

Якщо деталі контактують у m площинах, то розмір кожної визначиться тим же рівнянням, а розмір загальної площі буде дорівнювати сумі розмірів окремих площин. У першому наближенні силу стиску для кожної площини можна вважати рівною

$$P' = P/m. \quad (6.2)$$

Співвідношення (6.1) із достатнім наближенням справедливе до деякого значення сили P . З ростом сили стискання ріст розмірів площини зіткнення сповільнюється, починається вирівнювання усєї площі контактування. Звідси випливає, що збільшення сили натиску контактів вище визначеної межі немає сенсу.

Тип контакту визначається його призначенням, значеннями струму і контактного натиску, конструкцією контактної вузла і всього апарата. При цьому варто завжди мати на увазі, що багатоточкове контактування забезпечує більш надійний контакт.

6.2 Перехідний опір контакту

В зоні переходу струму з одного тіла в інше має місце відносно великий електричний опір, який носить назву *перехідного опору контакту*.

За своєю природою перехідний опір контакту є звичайний опір металевого провідника. Тільки цей провідник – мікроскопічний пагорб, у якому і відбувається фізичне контактування двох провідників між собою. Перехідний опір контакту можна уявити собі як результат звуження перерізу матеріалу в елементарних пагорбах і значному підвищенні густини струму в площинах контактування (рис. 6.1, *z* і *d*) у порівнянні з густиною струму в тілі контакту.

З уточненнями на підставі експериментальних даних значення перехідного опору визначається за виразом

$$R_{пер} = \varepsilon / P^n, \quad (6.3)$$

де ε – деяка величина, яка залежить від матеріалу і форми контактів, способу його обробки і стану контактної поверхні; P – сила, що стискає контакти; n – показник степеня, що характеризує кількість точок дотику.

Із збільшенням кількості точок дотику перехідний опір контакту зменшується. У виразі (6.3) показник степеня приймають:

- для одноточкового контакту $n = 0,5$;
- для багатоточкових $n = 0,7 - 1$ (для лінійного контакту $n = 0,7 - 0,8$, для поверхневого $n = 1$).

Значення величини ε залежать від стану поверхні контактів, характеру їх обробки й особливо від ступеня окислення. Для свіжих, неокислених і нормально оброблених одноточкових контактів (обробка на верстаті, кінцева обробка шліфованим напилком і змащених вазеліном) можна приймати такі середні значення ε (Ом/Н^{0,5}):

Мідь	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Алюміній	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Срібло	$0,5 \cdot 10^{-3}$	Латунь	$6,7 \cdot 10^{-3}$
Олово	$5 \cdot 10^{-3}$	Сталь	$76 \cdot 10^{-3}$

Залежність перехідного опору від контактного натиску. У відповідності до рівняння (6.3) ця залежність характеризується кривими, які подано на рис. 6.2. Крива 1 відповідає процесу зростання контактного натиску, крива 2 – зниженню натиску. Різний хід кривих пояснюється наявністю залишкових деформацій окремих пагорбів, по яких відбувалося зіткнення.

Слід зазначити, що при однаковому натисканні перехідний опір одного й того ж самого контакту при кожному замиканні може бути різним і відрізнятися в достатньо широких межах. Пояснюється це тим, що кількість і розмір площин контактування при кожному замиканні можуть бути різними. Значення перехідного опору в залежності від натиску практично подається не якоюсь однією кривою, а областю, обмеженою двома кривими.

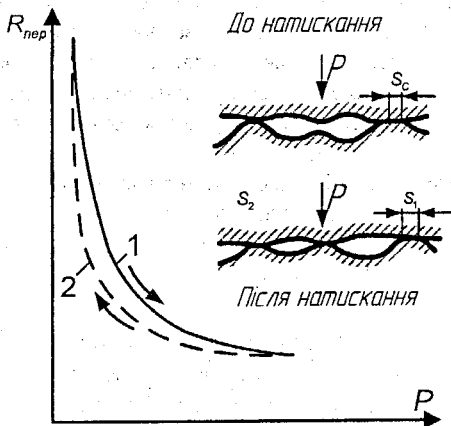


Рисунок 6.2 – Залежність перехідного опору від сили натиску

Залежність перехідного опору від температури. Як показано вище, перехідний опір контакту – це опір металу провідника, тому він певною мірою повинен залежати від температури. Із збільшенням температури змінюється структура пагорбів і площин зіткнення за рахунок зміни питомого опору стиску α . Температурний коефіцієнт буде зменшуватись. Для міді він дорівнює $\alpha_1 = 2/3 \alpha$ і відповідно [9]

$$R_{пер.г} = R_{пер.хол} (1 + 2/3 \alpha \Theta). \quad (6.4)$$

Із збільшенням температури перехідний опір (рис. 6.3) спочатку росте (ділянка I). При 200-300°C відбувається різкий спад механічних властивостей матеріалу. При тому ж натисканні збільшується площа контактування, перехідний опір (ділянка II) різко спадає. Надалі (ділянка III) він знову зростає лінійно з підвищенням температури, і при температурі плавлення матеріалу контакти зварюються. Перехідний опір різко спадає (ділянка IV).

Слід зазначити, що при тривалому перебуванні срібних контактів під струмом їхній перехідний опір не зростає з температурою, а навпаки спадає, і спадає за лінійним законом. Відхилення у співвідношенні (6.4)

пояснюються пластичною деформацією матеріалу, що повільно виникає в результаті тривалого нагрівання в площинах контактування, яка призводить до росту цих площин і зменшення перехідного опору. Коефіцієнт α в даному випадку буде мати від'ємне значення.

Залежність перехідного опору від стану контактної поверхні. Шліфування поверхонь не зменшує, а навпаки, збільшує перехідний опір у порівнянні з обробкою напилком. При шліфуванні пагорби на поверхні стають більш пологими і зім'яти їх надалі стає дуже важко.

Залежність перехідного опору від властивостей матеріалу контактів. Перехідний опір надзвичайно чутливий до окислювання поверхні контактів через те, що окисли деяких металів (зокрема, міді) є поганими провідниками. В мідних відкритих контактах внаслідок їхнього окислювання з часом перехідний опір може зрости в тисячі разів.

В процесі тривалого перебування під струмом на поверхні замкнених контактів також виникають окисні плівки, що погано проводять струм. Вони проникають до площин контактування і, збільшуючи тим самим перехідний опір, можуть вивести контакти з ладу. Підвищення температури прискорює ріст поверхневих плівок і скорочує проміжок часу, що призводить до виходу контактів з ладу. Підвищення контактного натиску, навпаки, затрудняє проникнення окисних плівок до площин контактування, підвищуючи тим самим термін служби контактів [1,9].

Окисли срібла мають електричну провідність, близьку до провідності чистого срібла. При підвищених температурах окисли срібла руйнуються. Тому перехідний опір контактів з срібла, а також з металокераміки, які мають у своєму складі срібло, практично не змінюється з часом. Він навіть може знизитися внаслідок повільної пластичної деформації матеріалу в площинах контактування.

Для мідних контактів необхідно застосовувати заходи боротьби з окислюванням їх робочих поверхонь.

В розбірних з'єднаннях виконують антикорозійне покриття робочих поверхонь контактів - сріблять, лудять, кадмують, іноді нікелюють і цинкують. Застосовують метод покриття робочих поверхонь нейтральним мастилом (наприклад, вазеліном) після зачищення їх напилком. Після складання контактного з'єднання дотичні поверхні (шви) повинні бути оброблені (герметизовані) асфальтовим або емалевим лаком.

Контакти комутування, які довгостроково працюють під струмом

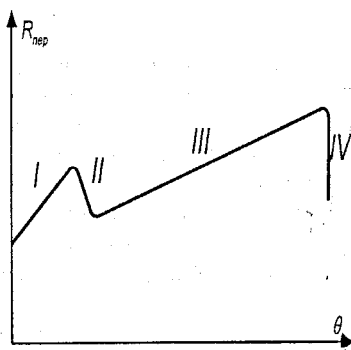


Рисунок 6.3 – Залежність перехідного опору від температури

не вимикаючись, виконуються, як правило, із срібла або металокераміки на основі срібла. Для мідних контактів знижується значення струму навантаження в порівнянні з допустимим для 8-годинного режиму. Тим самим знижується нагрівання контактів і інтенсивність їх окислювання. Якщо це припустимо за технологічними умовами, рекомендуються електричні апарати з мідними контактами періодично, після 8-12 годин роботи, вимикати 2-3 рази під струмом і знову вмикати. Дуга, яка при цьому виникає, спалює окисли і перехідний опір знижується. В багатьох апаратах (контактори, автоматичні вимикачі) кінематична схема передбачає при замиканні деяке просковзування одного контакту по іншому. Окисна плівка, яка утворилася, при цьому стирається.

Матеріали більшої твердості мають більший перехідний опір і потребують більшого контактного натиску. Чим вища електрична провідність і теплопровідність матеріалу, тим нижчий перехідний опір.

Вплив умовної площини контактування. Із збільшенням площі робочої поверхні контакту росте кількість точок дотику, а від цього збільшується значення показника степеня n у рівнянні (6.3). Проте безмежне збільшення умовної площини контактування недоцільно, тому що n швидко досягає значення, близького до одиниці, а більше одиниці n не буває. Перехідний опір контакту мало залежить від розміру умовної площини контактування. Однак із збільшенням номінального струму треба збільшувати і зовнішню поверхню контакту, тому що зі збільшенням струму ростуть втрати і для їхнього розсіювання потрібна велика поверхня.

6.3 Температура площини контактування

При проходженні струму в площині контактування через наявність перехідного опору буде виділятися енергія $I^2 R_{пер} dt$. Оскільки ця енергія значно більша за величиною, ніж енергія $I^2 R dt$, яка виділяється в матеріалі контакту, а тепловіддача в навколишнє середовище здійснюється з поверхні контакту (рис. 6.4), то температура площини контактування буде вища середньої температури контакту.

Перевищення температури площини контактування над температурою тепловіддавальної поверхні контакту визначається

$$\Theta_k - \Theta_n = \tau_k = I^2 \rho_{лс} / 32 \lambda P, \quad (6.5)$$

де ρ – питомий опір матеріалу контакту; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу контакту; σ – тимчасовий опір змінанню; P – сила контактного натискання.

Якщо прийняти, що перехідний опір контакту

$$R_{\text{пер}} = p/(2a), \quad (6.6)$$

де a – радіус площини контактування (вважаємо, що $q = P/\sigma = \pi a^2$), то рівняння (6.5) можна привести до вигляду

$$\tau_k = \frac{1}{8} \frac{U_{\text{пер}}^2}{\lambda \rho}, \quad (6.7)$$

де $U_{\text{пер}}$ – спад напруги в перехідному опорі контакту.

На рис. 6.5 наведено криві, які згідно з (6.7) є залежністю перевищення температури площини контактування срібних і мідних контактів від спаду напруги $U_{\text{пер}}$ в них. При природному охолодженні спад напруги в перехідному опорі контакту при номінальному струмі, звичайно, складає 10-20 мВ. Перевищення температури площини контактування над середньою температурою контакту складає при цьому кілька градусів (не більше 10 °С) і при нормуванні температури контакту до уваги не береться.

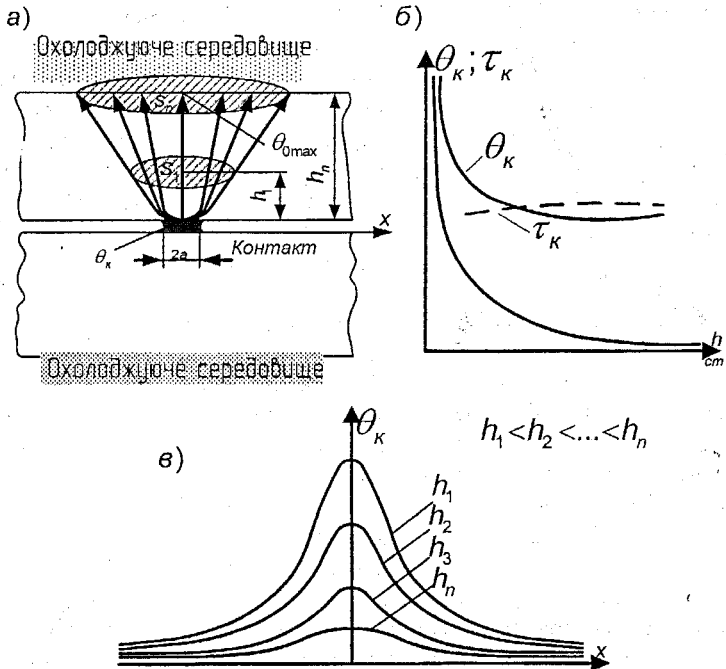


Рисунок 6.4 – Схема тепловідведення і розподілу температур в районі площини контактування

6.4 Рідинне охолодження контактних систем

При рідинному (водяному) охолодженні підвищення струмового навантаження на контакти призводить до відповідного зростання спаду напруги в перехідному опорі контакту і різкого зростання перевищення температури площини контактування. При збільшенні навантаження в 5-6 разів (а для водоохолоджуваних провідників припустимими є ще більші збільшення навантаження) спад напруги в тому ж контакті може скласти 80-100 мВ і перевищення температури площини контактування над середньою температурою контакту вже складе біля 140-180 °С (див. рис. 6.5). При цьому середня температура контакту буде невисокою.

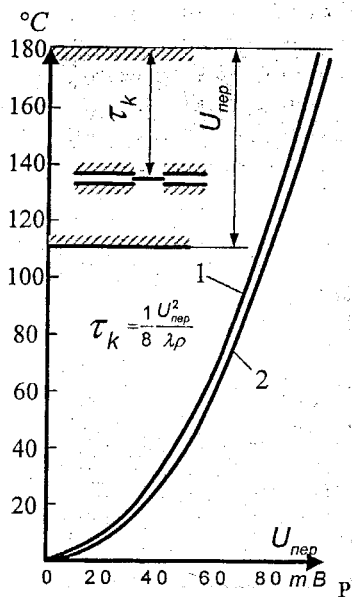


Рисунок 6.5 – Залежність перевищення температури площини контактування від спаду напруги в контактному з'єднанні:

1 – срібло; 2 – мідь

температуру контактного з'єднання.

Таким чином, при підвищенні навантаження і інтенсивному охолодженні контактів водою можна створити такі умови, при яких контакти будуть посилено окислятися поблизу контактних точок або навіть зварюватися. Тому допустиме навантаження на контакти водоохолоджу-

Здавалося б, що для покращення охолодження площину контактування варто розташовувати можливо ближче до поверхні, що охолоджується водою. І дійсно, з наближенням площини контактування до поверхні, що охолоджується водою, перевищення температури площини над максимальною температурою Θ_{max} охолоджуваної поверхні в місці контакту дещо зменшується. Проте при цьому скорочується поверхня найбільш інтенсивної тепловіддачі (якщо $h_n > h_1$, то і $s_n > s_1$, рис. 6.4, а).

Останнє призводить до дуже інтенсивного підвищення температури найбільш нагрітої точки Θ_{max} охолоджуваної поверхні (рис. 6.4, б і в). В результаті температура площини контактування зростає (рис. 6.4, в). Наближення площини контактування до поверхні, що охолоджується водою, за деякою межею не покращує, а навпаки, погіршує умови охолодження. Збільшення витрати охолоджувача (води) в такому випадку не може помітно знизити

ваних електричних апаратів доцільно визначати не з умови нагрівання контактів, а з умови дотримання допустимої температури фізичної площини контактування.

Середня температура контакту не може служити критерієм для визначення допустимого навантаження на контакти.

В наш час поки ще не розроблені допустимі норми нагрівання водоохолоджуваних контактів і навантажень на них. Проте дослідні дані дозволяють стверджувати, що для срібних контактів можна припуститись навантажень, при яких температура площини контактування Θ_k не повинна перевищувати 200°C . Перевищення температури водоохолоджуваних контактів варто визначати не стосовно повітря, а стосовно середньої температури охолоджувача (води). Що стосується мідних контактів, то їх недоцільно застосовувати при водяному охолодженні в міру їх значного окислення.

6.5 Конструкції контактів

Розбірні контакти. Такі контакти застосовуються для жорсткого з'єднання між собою окремих струмоведучих частин. Конструкція повинна забезпечувати надійний дотик контактних поверхонь і мінімальний перехідний опір.

Характерні види з'єднання плоских провідників (шин) наведено на рис. 6.6. Шини вигідніше скріплювати декількома меншими болтами (рис. 6.6, б) ніж одним великим (рис. 6.6, а). В першому випадку забезпечується більша кількість точок дотику, ніж в другому.

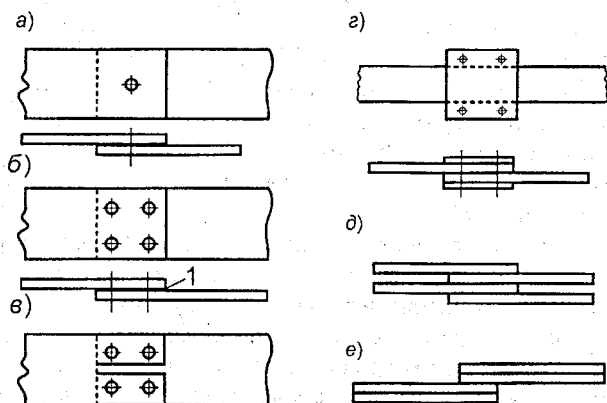


Рисунок 6.6 – Болтові з'єднання шин

З'єднання за рис. 6.6, в забезпечує більшу кількість точок дотику, ніж з'єднання за рис. 6.6, б. При стягуванні накладками (рис. 6.6, з) перехідний опір нижче, ніж при стягуванні наскрізними болтами. З'єднання пакетів шин рекомендується виконувати за рис. 6.6, д, де кількість точок дотику приблизно у три рази більша і умови охолодження кращі, ніж при з'єднанні за рис. 6.6, е.

В останні роки знайшли поширення розбірні з'єднання з перехідними пластинами. Перехідна пластина (прокладка) 1 (рис. 6.6, б), що розташовується між елементами, які контактують, — це металева (мідна) фольга, що легко деформується, покрита з кожної сторони легкоплавким складом (температура плавлення 50-75°C). При складанні контактного з'єднання фольга за рахунок стиснення деформується. При проходженні струму покриття пластин внаслідок нагрівання плавиться. В результаті деформації і розплавлення покриття прокладки відбувається повне або часткове заповнення шпаринок макро- та мікронерівностями поверхонь, які контактують. Фізична площа контактування істотно збільшується (майже до 100 % робочої поверхні контакту). Тим самим зменшується перехідний опір і значно підвищується стабільність контактного з'єднання.

Круглі провідники можуть з'єднуватися між собою і з плоскими провідниками. Кінці провідників розплющуються або забезпечуються наконечниками, які можуть напаюватися, приварюватися або щільно обтискуватися. При струмах до декількох десятків ампер кінець провідника може бути згорнутий у вигляді каблучки (петлі) і затиснутий болтом. З'єднання може бути здійснене за допомогою концентричного затискача. Але останнє з'єднання достатньо складне, дороге і застосовується рідко.

Комутувальні контакти. Такі контакти є головним елементом комутаційних апаратів. У контактах на малі струми (до декількох ампер) намагаються незалежно від конструктивного виконання досягти одноточкового контактування, щоб при малих натисканнях одержати відносно високий питомий тиск у контактній точці. Основні конструкції точкових контактів апаратів керування та захисту наведено на рис. 6.7. При більших струмах, що протікають через електричний апарат конструкція контактного з'єднання повинна забезпечувати багатоточкове контактування (рис. 6.8).

Контактні вузли на середні і великі струми можуть бути розділені на *важільні, місткові, врубні, роликові, торцеві, розеткові* і можуть виконуватись одноступеневими та багатоступеневими. В одноступеневому контакті контактна пара служить як для тривалого проведення струму в увімкненому положенні, так і для розриву дуги при розмиканні.

В багатьох електричних апаратах до контактів ставляться суперечливі вимоги. Так, в автоматичних вимикачах контакти головного кола (головні) повинні забезпечувати тривале протікання номінальних струмів в

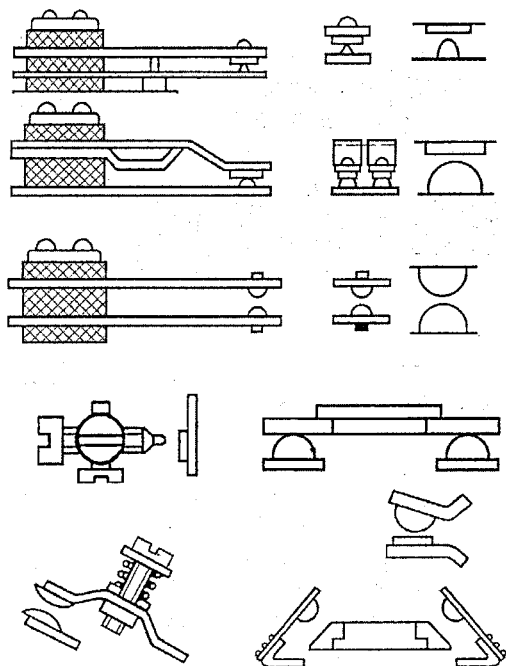


Рисунок 6.7 – Конструкції точкових контактів

увімкненому стані, з одного боку, і вимикання без ушкодження великих струмів короткого замикання, з іншого боку.

Для задоволення першої вимоги контакти повинні мати можливо менший перехідний опір, який не повинен змінюватися при окислюванні поверхні. Для задоволення другої вимоги варто застосовувати дугостійкі контактні матеріали, які мають, як правило, високі перехідні опори і не придатні через окислювання для тривалого проведення струму. Тому доцільним є застосування *багатоступеневих контактних систем* з паралельно-увімкненими головними та дугогасильними контактами (рис. 6.9).

Головні контакти виконуються із срібла і служать для тривалого проведення струму, дугогасильні виконуються з дугостійких матеріалів і відіграють головну роль при вмиканні та вимиканні електричних кіл. Процес замикання контактів відбувається в такій послідовності: спочатку замикаються дугогасильні, а потім головні контакти. При розмиканні порядок зворотний: спочатку розмикаються головні контакти, розриву електричного кола струму не відбувається, тому що весь струм проходить через дугогасильні контакти. А тільки після цього розмикаються дугогасильні, на яких виникає, горить та гаситься електрична дуга.

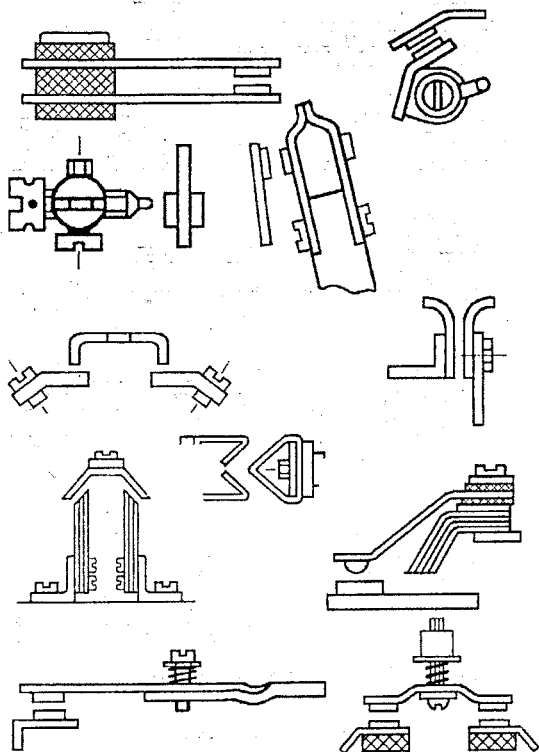


Рисунок 6.8 – Конструкції поверхневих контактів

Іноді застосовують систему з трьох паралельних контактів: головних, проміжних і дугогасильних. Проміжні контакти служать для полегшення переходу струму з дугогасильних на головні (при замиканні) і навпаки – при розмиканні.

Важільні контакти (рис. 6.10) використовують в апаратах з рухомо-поворотною контактною системою. Як правило, вісь контакту O_1 і рухомої системи O_2 не збігаються. Крім того, контакти дотикаються раніше, ніж рухома система досягає свого кінцевого стану. Внаслідок цього при замиканні і розмиканні відбувається перекочування і просковзування рухомого контакту по нерухомому. В результаті цього початкова точка дотику 1 при замиканні, вона ж остання точка дотику і точка виникнення дуги при розмиканні, є зміщеною стосовно точки 2 кінцевого дотику контактів.

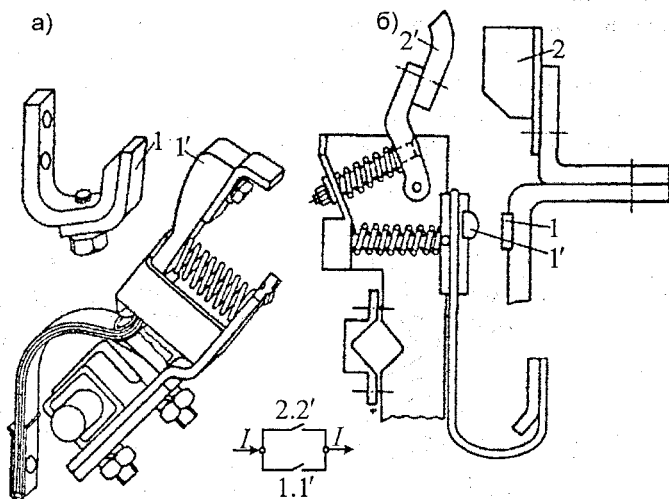


Рисунок 6.9 – Одно- (а) і двоступеневі (б) головні контакти комутування, 1, 1' – головні контакти; 2, 2' – дугогасильні контакти

Таким чином, поверхні, що забезпечують тривале проведення струму і визначають перехідний опір контакту, віддалені від місця виникнення дуги. Просковзування контактів при достатньому контактному натисканні призводить до стирання окисної плівки і бруду з поверхні контакту, тобто до самоочищення контактів. Це дозволяє застосовувати мідь як контактний матеріал.

Просковзування при тій шорсткості, що звичайно мають поверхні контактів (особливо, які уже працювали), викликає додаткове дрижання контактів при їх замиканні, а отже, і їх підвищений знос. Через це з'явилася тенденція виключати або звести до мінімуму просковзування, зберігаючи при цьому перекатування контактів один по одному. Для того щоб рухомий контакт міг перекочуватися по нерухомому, центр обертання першого при переміщенні по контактній поверхні другого повинен описати розгортку кола. Радіус кривизни нерухомого контакту (рис. 6.10, з) може бути обчислений із такого наближеного рівняння:

$$r=c(2a-c)\sqrt{2b}, \quad (6.8)$$

де c – довжина дуги AB від початкової точки контакту A до кінцевої B ; a – відстань від центру обертання рухомого контакту до точки A ; b – відстань

переміщення точки обертання рухомого контакту; a , b , c задаються конструктивно.

Відмова від просковзування потребує підвищення контактної натиску для забезпечення роботи апарата в тривалому і переривчасто-тривалому режимах. При повній відсутності просковзування і недостатньо сильному натисканні варто очікувати високого перегріву мідних контактів за рахунок поступового окислювання кінцевої контактної точки.

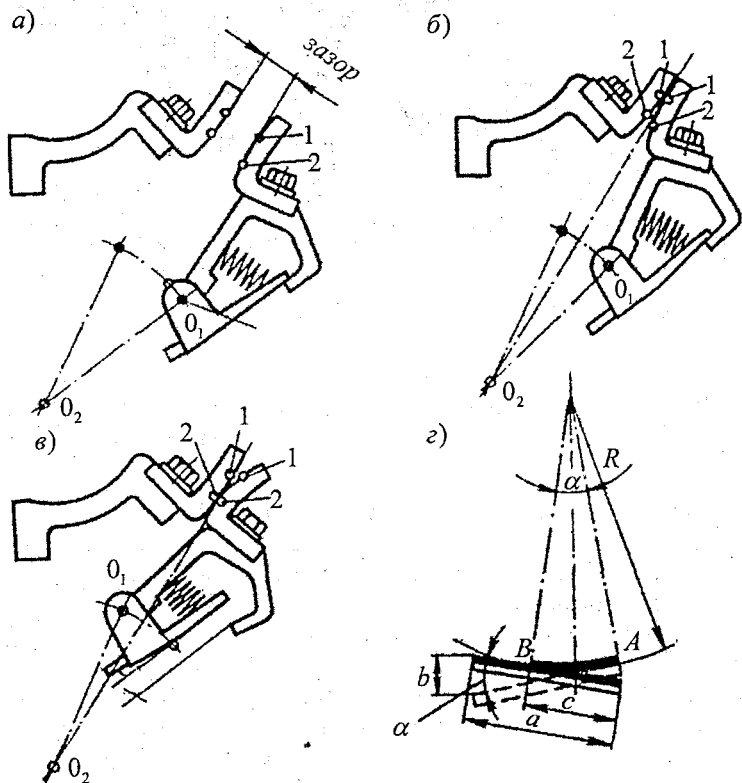


Рисунок 6.10 – Важільні контакти: а, б, в – кінематика руху; г – до визначення радіуса кривизни

Робочі поверхні важільних (підйомних) контактів виконуються головним чином за схемою площина – циліндр, циліндр – циліндр (див. рис.6.1).

Важільні контакти потребують гнучкого з'єднання для приєднання до струмопроводу, але гнучке з'єднання у ряді випадків є слабким місцем

контактної системи. Це з'єднання важко здійснити на великі струми, механічна стійкість його є нижчою, ніж інших деталей апарата.

Місткові контакти (рис. 6.11, а) застосовуються, головним чином, в апаратах із прямоходовою рухомою системою. Гнучке з'єднання у них відсутнє, що є певною перевагою цієї конструкції, але тут необхідно подвійне контактне натискання у порівнянні з важільним, тому що кількість перехідних контактів подвоюється. У місткових контактах теоретично перекочування та проковзування відсутні. Тому мідні контакти тут, як правило, не застосовуються.

Використовуються контакти із срібла або металокераміки (сплав на основі срібла). Робочі поверхні виконуються за схемою площина – площина, площина – циліндр, циліндр – циліндр, площина – сфера, сфера – сфера (при малих струмах).

Торцеві контакти (рис. 6.11, б) виконуються у вигляді суцільних металевих стержнів або порожнистих труб. Контактні поверхні можуть бути плоскими, сферичними або одна – плоскою, а інша – сферичною. Контакти мають великий перехідний опір і потребують великої сили натискання, тому застосування їх на великі номінальні струми недоцільно. Вони користуються переважно як дугогасильні. Торцеві контакти потребують для забезпечення надійного протікання струму гнучкого з'єднання, роликів або іншого струмопроводу.

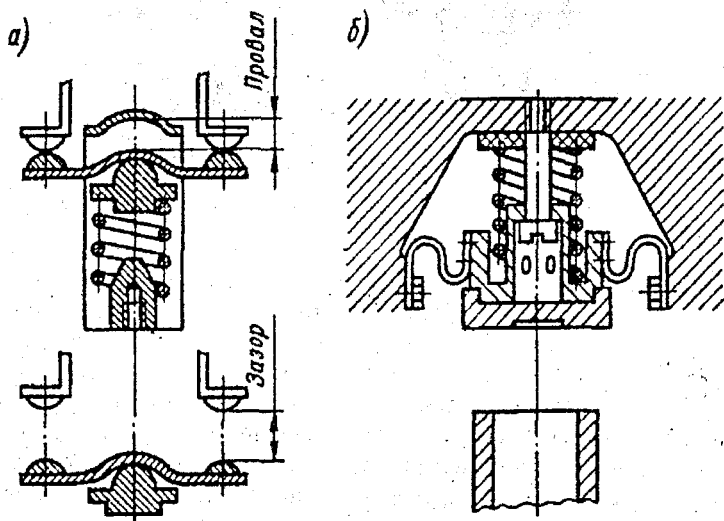


Рисунок 6.11 – Містковий (а) і торцевий (б) контакти

Врубні контакти (рис. 6.12). Найпростіші з них на невеликі струми складаються з нерухомого контактної стояка 1, в який входить рухомий контактний ніж 2. Натиск здійснюється за рахунок пружних властивостей матеріалу стояка (твердотягнена мідь, спеціальна бронза), якому надається відповідна форма. При перегріванні, а також при частих вмиканнях, пружні властивості губок послаблюються і контакт порушується. Для усунення вказаного недоліку у врубних контактах на високі струми для одержання більш стійких натиснень, як правило, застосовують сталеві пружини 3.

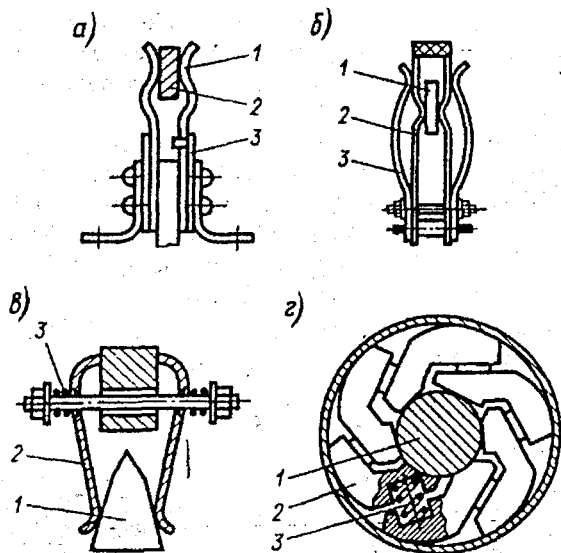


Рисунок 6.12 – Врубні (а, б, в) та розеткові (з) контакти

В контактах (рис. 6.12, а) дотик відбувається по лінії. При тій же силі натискання тут досягається більший питомий тиск, ніж при поверхневому контакті, і забезпечується менший перехідний опір. Недоліком цієї конструкції є те, що вона чутлива до перекосів контактної ножа. Більш досконалою є контактна система, зображена на рис. 6.12, б. Тут нерухомий контакт 1 охоплюється рухомими контактними ножами 2, які мають циліндричні виступи. Натискання здійснюється сталевими пружинами 3. При практично можливих перекосах лінійний контакт у цій конструкції не порушується.

Розглянуті конструкції контактів знаходять своє широке застосування в рубильниках, перемикачах, плавких запобіжниках.

В високовольтних вимикачах застосовуються ламельні врубні контакти (рис. 6.12, в). Рухомий контакт тут виконується з окремих

ламель, яких може бути декілька пар, нерухомий – виконується клиноподібним. Рухома система прямоходова. Ламелі можуть бути несамовстановлювальними або самовстановлювальними (рис. 6.12, в). В конструкції контактів з самовстановлювальними ламелями забезпечується щонайменше дві контактних точки дотику. Така конструкція більш досконала і дає при рівних силах натиску менший перехідний опір. Розглянуті контакти можуть виконуватися на дуже великі струми шляхом паралельного приєднання будь-якої кількості пар ламелей.

Розеткові контакти (рис. 6.12, з). Вони складаються з контактної стержня 1 (рухомий контакт) і ряду сегментів 2 (ламель) з пружинами 3, що утворюють нерухомий контакт.

Розеткові контакти застосовуються переважно в якості головних.

Врубні і розеткові контакти не можуть вимикати значні струми. Дуга, яка виникає, призводить до значного пошкодження контактних поверхонь. На них з'являються оплавлення. Крім того, різко зростає зусилля, необхідне для вмикання і вимикання контактів. Для вимикання значних струмів застосовують паралельне вмикання декількох пар дугогасильних контактів.

Роликові контакти (рис. 6.13) служать для зняття струму з нерухомих деталей (стержнів) 1, які перемикаються роликами 2 та проводять струм на рухомий контакт 3. Ролики замінюють гнучке з'єднання і широко застосовуються при великих розбіжностях рухомих контактних систем та застосовуються на великі номінальні струми.

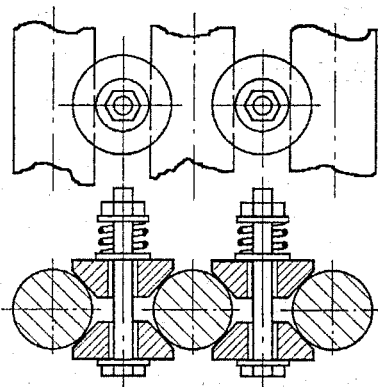


Рисунок 6.13 – Роликові контакти

Ковзні контакти. Ці конструкції контактних систем здійснюють передачу струму без обриву електричного кола з нерухомої контактної деталі на рухому. Вони можуть виконуватися з важільними, містковими, роликowymi та іншими типами контактів.

Різновидом ковзного контакту є шарнірний контакт. Він одночасно забезпечує і механічний зв'язок між деталями. В апаратах низької напруги ковзні з'єднання широко застосовуються в реостатах і контролерах.

Герметичні контакти. Контакти звичайних реле працюють у середовищі атмосферного повітря. Вони забруднюються пилом, парами металів, покриваються окисами, що виникають при хімічних реакціях під впливом електричної дуги, підпадають під вплив різноманітних атмосферних агресивних газів, водяних парів. Всі ці фактори знижують надійність їх роботи і підвищують зносостійкість, особливо при малих струмах і напругах, коли окислення контактних поверхонь може призвести до припинення провідності контактів. Вказані явища можна послабити або практично виключити, якщо помістити контакти в інертний газ або вакуум.

Одним із найбільш перспективних напрямків вдосконалення контактних пристроїв (особливо на малі струми і напруги) є розробка герметичних магнітокерованих контактів (МК) – герконів.

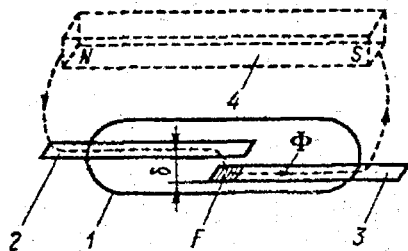


Рисунок 6.14 - Герметичний контакт – геркон МК

Найпростіша конструкція МК (рис. 6.14) - це скляний балон з розташованими в ньому двома електродами 2 і 3. Балон заповнений інертним газом (азот, аргон, водень і т.ін.) або вакуумований до залишкового тиску 0,13-0,0013 Па. Електроди виконані з магнітного матеріалу (пермалю) і є одночасно і магнітопроводом. Кінці електродів F в місці контактування покриваються прошарком якогось благородного металу (золотом, паладієм, радієм або їх сплавами).

Керування МК здійснюється магнітним полем, що може створюватися або котушкою, або постійним магнітом 4. Магнітний потік Φ замикається через електроди і повітряний проміжок δ (проміжок контактів), замикаючи при цьому контакти. Розмикання контактів здійснюється за рахунок пружних властивостей електродів. Таким чином, електроди виконують функції контакту, магнітопроводу та пружини.

Геркон може виконуватися також із контактами розмикання та перемикання. Існують геркони із контактами, які змочуються ртуттю. Це забезпечує їх краще контактування і велику потужність комутування.

За своїми технічними характеристиками геркон наближається до безконтактних пристроїв, але разом з тим має і всі переваги контактних. Вони мають високу швидкодію (частота вмикань до 100 Гц), великий ресурс (10^7 - 10^9 спрацювань), високу надійність, забезпечують комутацію дуже малих струмів при малих напругах (одиниці мікроампер при напрузі декілька мілівольт), можуть застосовуватися в електричних апаратах вибухонебезпечного виконання, допускають експлуатацію в будь-якому стані в просторі і при великому діапазоні зміни температури (від -60 до +125 °C).

Головними недоліками герконів МК є їх порівняно невелика комутаційна потужність (до 15-60 Вт) та низька електрична міцність міжконтактного проміжку.

В розвиток вищезазначеного принципу роботи герконів і з метою підвищення їх комутаційної спроможності розроблені магнітокеруючі герметичні силові контакти (МСК) – *герсикони*. На відміну від герконів тут застосовані різні деталі для контактів і магнітопроводу (рис. 6.15). Всередині герметичної оболонки (плата 1, корпус 14 і кришка 9) розташовані полюси 2 і 4 електромагніту. Один полюс забезпечує жорстке кріплення кінця феромагнітної пружини якоря 12, що тримає рухомий контакт 10, а другий – утворює з цією пружиною робочий проміжок в колі магнітопроводу. Феромагнітна пружина з зовнішньої сторони шунтована більш тонкими феромагнітними пружними пластинами 13, що значно збільшують загальний переріз якоря електромагніту, але практично не перевищує протидіючого зусилля. Це дозволяє при дещо невеликій магніторушійній силі одержати необхідне електромагнітне зусилля. Магніторушійна сила створюється котушкою 3, яка розміщена за герсиконом. Контакти герсикона виконані масивними з напайками з

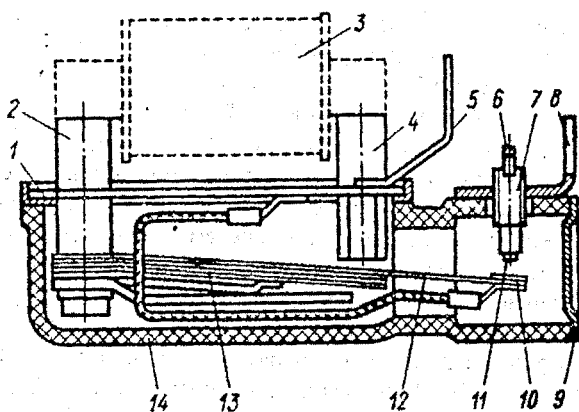


Рисунок 6.15 – Герметичний силовий контакт – герсикон МСК

твердосплавного матеріалу.

Підведення струму до рухомого контакту здійснюється за допомогою гнучкого з'єднання високої провідності. Нерухомий контакт 11 закріплений на кінці спеціального регульовального гвинта 7, введеного всередину герметичної оболонки. Таке кріплення дозволяє регулювати зазор, провал контакту та контактний натиск. Зовнішні затискачі 5 і 8 розташовані поза герметичним корпусом.

Ніпель 6 служить для відкачування повітря з герметичного корпусу і заповнення його захисним газом (суміш азоту з воднем), що забезпечує високу електричну міцність (до 3000 В).

Герсикон типу КМГ-12 на номінальний струм 6,3 А призначений для роботи в колах із напругою 380-440 В при частоті 50-60 Гц. Він спроможний вмикати струми до 180 А та вимикати – до 60 А. Зносостійкість контактів такого герсикона при напрузі 380 В і частоті комутацій 1200 вмикань та вимикань на годину двигуна потужністю 1,1 кВт складає більше 10 млн. циклів спрацювань. Герсикони мають велику швидкодію (біля 10 мс). Потужність, що споживає котушка контактора з герсиконом типу КМГ-12, не перевищує 2 Вт, що дозволяє застосовувати контактор як вихідний елемент логічних пристроїв та замінити більш складний тиристорний підсилювач.

6.6 Параметри контактних конструкцій

Проміжок контактів – це найкоротша відстань між розімкненими контактними поверхнями рухомого та нерухомого контактів (див. рис. 6.10 і 6.11). Ізоляційний проміжок між контактами, як правило, вибирається з умови ефективного гасіння малих струмів.

При роботі контакти зношуються. Щоб забезпечити надійну роботу контактного з'єднання на тривалий час, кінематична схема електричного апарата виконується таким чином, щоб дотик контактів відбувався раніше, ніж рухома система (кінематична система, яка переміщує рухомий контакт) дійде до свого кінцевого стану. Контакт кріпиться до рухомої системи через пружину. Завдяки цьому, після зіткнення з нерухомим контактом він зупиняється, а рухома система просувається ще вперед до упору, стискаючи при цьому додатково контактну пружину. Таким чином, якщо у замкненому стані рухомої системи демонтувати нерухомо закріплений контакт, то рухомий контакт просунеться вперед ще на деяку відстань, яка називається *провалом*.

В прямохідних контактних конструкціях (див. рис. 6.11) провал вимірюється безпосередньо, а в апаратах із поворотною контактною системою (див. рис. 6.10) його визначають розміром проміжку 5, який і контролює провал. Провал визначає запас міцності на зношування контактів при заданому числі спрацювань. За інших рівних умов більший

провал забезпечує більш високу зносостійкість, тобто більший термін служби. Але більший провал, як правило, потребує і більш потужної магнітної системи.

Контактний натиск – сила, що стискає контакти в місці їхнього зіткнення. Розрізняють *початковий натиск* P_0 в момент початкового зіткнення контактів, коли провал дорівнює нулю, і *кінцевий натиск* P_k при повністю вибраному провалі:

$$P_0 = c\Delta l_1; \quad P_k = P_0 + c\Delta l_2, \quad (6.9)$$

де c – жорсткість контактної пружини, тобто значення сили в ньютонах, необхідної для стискання пружини на 1 см; Δl_1 – величина початкового стиску пружини; Δl_2 – величина додаткового стиску пружини при повному виборі провалу.

В міру зносу контактів зменшується провал, а отже, і додатковий стиск пружини. Кінцевий натиск наближається до початкового. Таким чином, початковий натиск є одним із головних параметрів, при якому контакт повинен зберігати роботоздатність.

6.7 Зношування контактів

Під терміном *зношування контактів* розуміють руйнування робочої поверхні контактів комутування, що призводить до зміни їхньої форми, розміру, маси і до зменшення провалу.

Зношування, яке відбувається під дією електричних факторів, називається *електричним зносом* або *електричною ерозією*. Зношування під дією механічних факторів ми розглядати не будемо, оскільки воно, звичайно, набагато менше електричного. Залежність дугової ерозії мідних контактів від їх діаметра та величини струму, що протікає через них, для дугогасильних середовищ масла та повітря наведено на рис.6.16

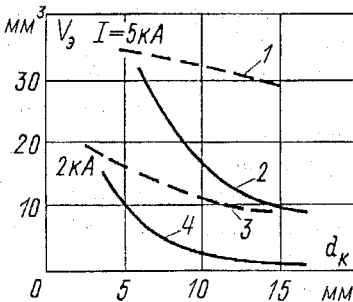


Рисунок 6.16 – Залежність дугової ерозії мідних контактів від їх діаметрів в маслі (1,3) та повітрі (2,4)

При розмиканні сила, що стискає контакти, знижується до нуля, різко зростають перехідний опір контакту і густина струму в останній площині контактування. Площина сильно розігрівається і між розбіжними контактами утворюється контактний перешийок із розплавленого металу, який надалі рветься. При цьому в проміжку між контактами мо-

жуть виникати різні форми елек-тричного розряду. При струмі і напрузі, величини яких є більше мінімального необхідного значення для запалювання дуги (наприклад, для міді це $I = 0,5 \text{ A}$, $U = 15 \text{ B}$), виникне дуговий розряд. Якщо струм менший мінімально необхідного, а напруга вища напруги запалювання дуги, то виникне іскровий розряд.

Під дією високої температури дуги або іскри, а також ряду інших факторів частина металу контактного перешийка випаровується, частина розбризкується і викидається з проміжку між контактами в навколишнє середовище, а частина переноситься з одного контакту на інший.

Поряд з абсолютною величиною зносу в колах пос-тійного струму важливою характеристикою є також знак зносу або знак переносу. Якщо більше зношується позитивний електрод (анод), то переносу приписується знак плюс, і навпаки.

З огляду на те, що наявність дуги істотно змінює характер і величину зносу, розглянемо окремо процес зношування (ерозію) при малих струмах (коли дуга відсутня) і зношування при великих струмах (при наявності дуги).

Зношування контактів при малих струмах

Ерозія контактів обумовлена тим, що руйнування рідкого контактного перешийка відбувається внаслідок розпилювання і розривання його, але не в середині, а ближче до одного з електродів. Частіше усього контактний перешийок розривається біля анода, внаслідок чого більш інтенсивному зносу піддається тільки анод (можна вважати, що сам перешийок складається з парів металів анода і катода порівну). При іскровому розряді знак переносу, звичайно, теж позитивний. Розмір ерозії пропорційний величині потужності, яка пройшла через контакти за час горіння дуги, і залежить від властивостей матеріалу контактів.

Зниження ерозії може бути досягнуто за рахунок застосування ерозійно тривких матеріалів, а також за рахунок шунтування контактів іскрогасними (активно ємнісними) електричними колами. В цьому випадку при розмиканні частина енергії кола іде на заряд конденсатора. Тривалість іскрового розряду істотно скорочується. Слід мати на увазі, що при значних ємностях, при замиканні може відбутися розряд конденсатора на контактах, які ще не замкнені, і як наслідок цього – зварювання контактів.

Зношування контактів при великих струмах

Зношування відбувається як при розмиканні контактів, так і при їх замиканні і залежить від багатьох змінних факторів. До цього часу немає аналітичного виразу для розрахунку величини зносу. Тому наведемо деякі залежності, отримані дослідним шляхом [13,18].

Зношування контактів при розмиканні

Залежність зносу від кількості розмикань. Величина зносу контактів при даній напруженості магнітного поля прямо пропорційна кількості розмикань. Якщо знос при одному розмиканні дорівнює s , то за n розмикань він буде дорівнювати

$$\sigma = c\pi.$$

(6.10)

Залежність зносу від напруженості магнітного поля. Ця залежність характеризується кривою на рис. 6.17. При малих напруженостях дуга тривалий час знаходиться на тих самих опорних точках, що і призводить до збільшення зносу контактів. З ростом напруженості росте швидкість руху опорних точок дуги, контакти менше нагріваються і оплавляються, зношування знижується.

Проте при деякій напруженості магнітного поля починає проявлятися нове явище, яке різко змінює картину процесу горіння дуги.

Як відзначалося, появи дуги на розбіжних контактах передує перехід із розплавленого металу. З ростом напруженості зростають електродинамічні сили взаємодії струму з зовнішнім магнітним полем. Ці сили починають викидати з щілин між контактами розплавлений метал перехідника. Знос зростає. Коли електродинамічні сили досягають такого значення, що викидають весь розплавлений метал із проміжку між контактами, зношування практично вже не залежить від подальшого зростання напруженості магнітного поля.

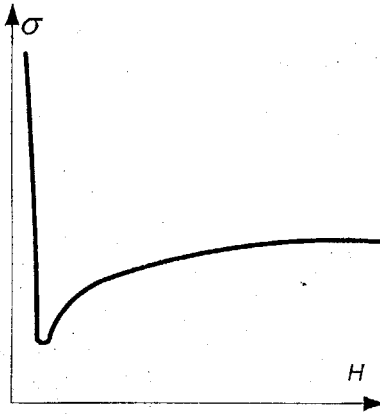


Рисунок 6.17 – Залежність зносу контактів від напруженості магнітного поля

Залежність зносу від напруги. При наявності зовнішнього магнітного поля дугогасіння дуга покидає щілину між контактами тоді, коли останні встигнуть розійтися лише на 1-2 мм, знос контактів практично не залежить від напруги мережі.

Залежність зносу від струму. Зношування контактів росте із збільшенням величини струму. При незмінних інших умовах ця залежність близька до лінійної. В електричних апаратах, проте, зміна струму викликає зміну зовнішнього магнітного поля (зокрема, в послідовній дугогасній котушці), і тоді процес зношування контактів йде інтенсивніше, ніж росте струм.

Залежність зносу від ширини контакту. При кожному вимиканні контактів розплавляється, випаровується та вигорає певна кількість металу. Це, головним чином, метал із площин контактування. За рахунок зміни ширини контактів ми можемо впливати на кількість металу, який втрачається в зоні горіння дуги. Досвід показує, що величина зносу контактів, яка вимірюється зміною провалу, обернено пропорційна ширині контактів.

Залежність зносу від швидкості розходження контактів. В електричних апаратах на великі струми, де є магнітне дугтя і в яких контур струму сам створює достатні електродинамічні сили, швидкість розмикання контактів практично не впливає на величину зносу контактів. Збільшення швидкості розмикання контактів не може служити способом боротьби із зношуванням. Тільки при дуже малих швидкостях розмикання контактів зношування збільшується із зменшенням швидкості їх розмикання.

Зношування контактів при замиканні

При замиканні має місце також електричне зношування, яке у ряді випадків перевищує величину зносу при розмиканні. Це викликано дрижанням контактів, яке виникає при замиканні (рис. 6.18).

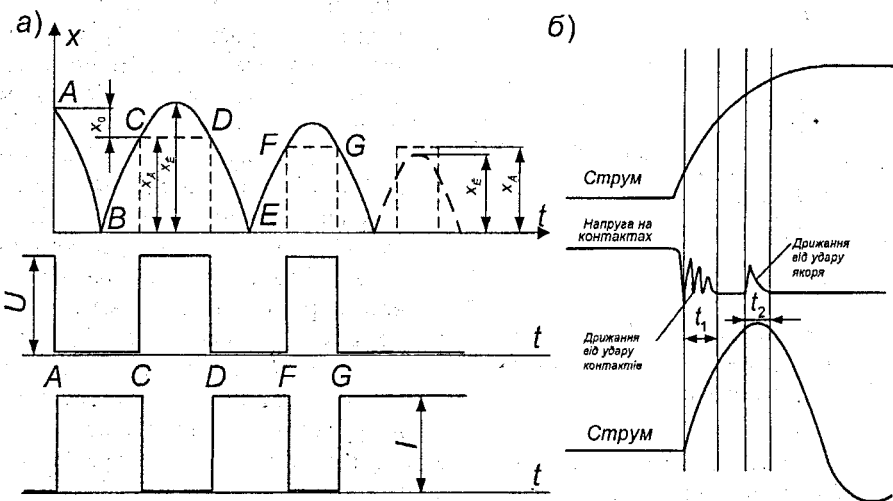


Рисунок 6.18 – Процес дрижання контактів при замиканні

Рухомий контакт підходить до нерухомого з певною швидкістю. При співударі відбувається пружна деформація матеріалу обох контактів. Пружна деформація призводить до відкидання рухомого контакту, він відскакує від нерухомого на деяку відстань, що вимірюється сотими і десятими долями міліметра (іноді до 1 мм). Під дією контактної пружини відбувається повторне замикання контактів. Цей процес може повторюватися декілька разів певною амплітудою згасання як показано на рис. 6.18, б.

При кожному відкиданні між контактами виникає електрична дуга, яка призводить до підвищеного зносу контактів. Дрижання при замиканні можливе внаслідок удару при притягуванні якоря. При цьому величина

зносу може бути більшою, ніж від удару самих контактів. Це пов'язано з тим, що дрижання контактів відбувається при значних за величиною миттєвих струмах (рис. 6.18,б). Наведемо ряд факторів, які мають суттєвий вплив на процес зносу при замиканні контактів.

Залежність зносу від співвідношення механічної і тягової характеристик апарата.

Швидкість руху контактів визначається співвідношенням між механічною (крива 1) і тяговою (криві 2, 3 і 4) характеристиками (рис. 6.19). Чим більший запас тягового зусилля (крива 4), тим більшою буде швидкість, а отже, будуть більшими удар і дрижання контактів. При недостатньому тяговому зусиллі (крива 2) буде відбуватися зупинка рухомої системи в момент зіткнення контактів (двотактне вмикання), що також призведе до підвищення зносу. Для забезпечення мінімального зносу тягова характеристика повинна забезпечувати чітке вмикання апарата і не мати надмірних запасів (крива 3).

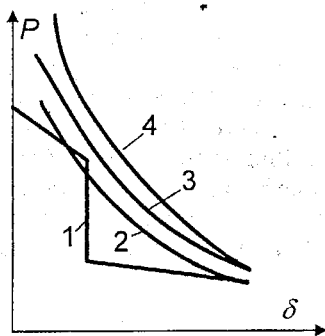


Рисунок 6.19 — Тягові і механічна характеристики контактно-ї системи

Залежність зносу від початкового натиску P_n і жорсткості контактно-ї пружини. Початковий натиск на контакти в момент їх зіткнення це та сила, яка протидіє відкиданню контактів при їх співударі. Природно, що чим більша ця сила, тим менше буде відкидань контактів, їх дрижання а отже і зношування буде меншим (рис. 6.20).

На рисунку 6.19 проілюстровано процес та характер дрижання контактів при зниженому та підвищеному натисканні. Крива U_k визначає напругу на контактах, крива I_k — струм, який протікає через контакти. Як видно з графіків, при зниженому натисканні контакти розмикалися декілька разів. При підвищеному натисканні повторних розмикань не було. Підвищення початкового натиску обмежено тяговою характеристикою. Якщо початковий натиск перевищує певні значення, при яких МДС котушки, що втягується, стає недостатнім для деформації жорсткої

пружини і має місце відкидання усієї рухомої системи, зношування контактів починає зростати (штрихова частина кривої на рис. 6.20).

При більшій жорсткості пружини відкидання контактів буде дещо меншим, а отже процес зношування знизиться.

6.8 Дрижання контактів та способи боротьби з ним

Процес дрижання контактів при співударі, який проілюстровано на рис. 6.18, може бути описано таким чином. В момент часу $t=0$ відбулося зіткнення контактів (точка A), в електричному колі з'явився струм, напруга на контактах впала до нуля і почалося стискання матеріалу контактів і гальмування їх руху. В точці B рухомий контакт зупинився. Почалося відновлення пружних властивостей матеріалу контактів і зворотний рух рухомого контакту. Якби матеріал був абсолютно пружним, то форма контакту відновилася б до початкового свого значення, практично ж буде спостерігатися деяка залишкова деформація. В точці C пружне відновлення матеріалу контактів зупинилося, але рухомий контакт за інерцією продовжує відходити. Відбувається розрив контактів. Струм у колі стає рівним нулю, напруга на контактах відновлюється. Контакт відходить на відстань x_k і під дією контактної пружини знову замикається (точка D). Відбувається повторне стискання матеріалу і його відновлення, і так декілька разів із амплітудою згасання. На рис. 6.18 позначено: x_k – амплітуда коливань контакту; x_d – величина пружної деформації; x_0 – залишкова деформація.

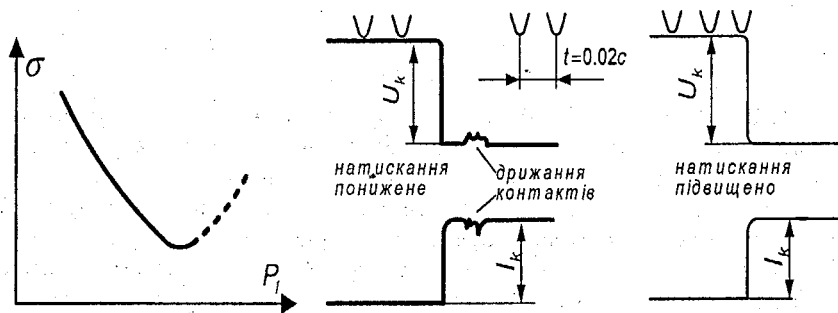


Рисунок 6.20 – Залежність зносу контактів при замиканні від початкового натиску

Якщо $x_k > x_d$, то відбудеться розрив електричного кола з усіма наслідками, що можуть виникнути внаслідок цього процесу. Таке дрижання є небезпечним.

Якщо $x_k < x_d$, то, незважаючи на наявність процесу дрижання контактів, розриву електричного кола не відбудеться, зношування контактів не буде. Таке дрижання є безпечним.

Контактні матеріали, які застосовують в апаратобудуванні, мають достатню пружність, тому навіть теоретично уникнути дрижання контактів при їх замиканні неможливо. У такому випадку необхідно конструювати електричні апарати та їх контакти комутування таким чином, щоб процес дрижання контактів був безпечним. Амплітуду x_k необхідно знижувати. Час дрижання не повинен перевищувати 0,5 - 1 мс.

Максимальне значення амплітуди коливань контакту для поворотної системи з ричажними контактами визначається за формулою [13]

$$x_k = \frac{\sqrt{l^2 \alpha_0^2 + (1-k) \frac{J\omega^2}{c}} - l\alpha_0}{1 + 2/\sqrt{1-k}}, \quad (6.11)$$

де l – вмонтована довжина контактної пружини; α_0 – початковий кут стискання пружини; k – коефіцієнт відновлення, що характеризує пружні властивості матеріалу; J – момент інерції рухомого контакту; ω – кутова швидкість рухомого контакту в момент удару; c – жорсткість пружини.

Коефіцієнт відновлення для деяких матеріалів має такі значення:

Мідь	0,95
Латунь	0,87
Залізо	0,75
Виробнича сталь	0,5

Збільшення початкового стискання пружини або, те ж саме, збільшення початкового натиску P_n , а також збільшення жорсткості c контактної пружини ведуть до зниження амплітуди дрижання. При цьому більший вплив на амплітуду дрижання має початковий натиск. Збільшення ж тягового моменту M , як і збільшення кутової швидкості ω , ведуть до підвищення амплітуди дрижання.

Таким чином, знизити дрижання контактів при замиканні та ліквідувати його взагалі можна за рахунок збільшення початкового натиску і жорсткості пружини, а також зменшенням маси рухомих контактів і швидкості їх замикання.

Для зниження дрижання при замиканні застосовують також штучні заходи, які ґрунтуються, головним чином, на компенсації відкидних зусиль, що виникають при співударі контактів (рис. 6.21).

Компенсація відкидних зусиль може бути здійснена за рахунок використання частини кінетичної енергії всієї рухомої системи апарата, як це показано на рис. 6.21.

В момент дотику контактів відбувається зупинка місткового контакту. Всі інші деталі рухомої системи намагаються продовжити свій рух і через амортизаційну пружину тимчасово утворюють додатковий натиск на містковий контакт, перешкоджаючи цим його відкиданню.

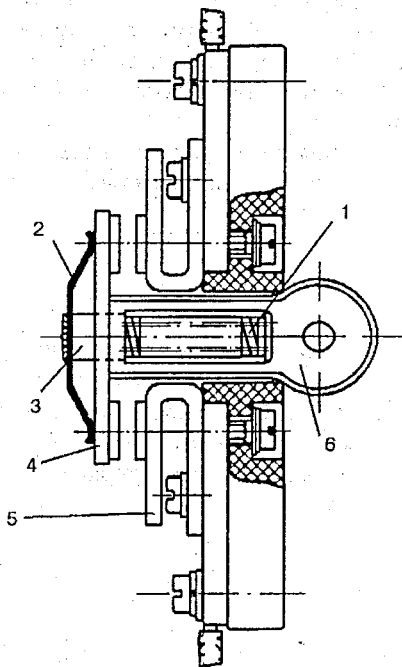


Рисунок 6.21 – Компенсація відкидних зусиль в контактах при замиканні за рахунок кінетичної енергії деталей рухомої системи:
1 – контактна пружина; 2 – обойма; 3 – шток; 4 – містковий контакт;
5 – нерухомий контакт; 6 – тяга

При відповідному підборі параметрів системи (маса, жорсткість пружин, швидкість) можна досягти істотного зниження часу дрижання контактів і замикання їх без дрижання. Приклад іншого способу компенсації відкидних зусиль при співударі контактів приведений на рис. 6.22.

Тут між містковим контактом і головною траверзою розміщується вставка із спеціального пористого матеріалу (пористої або губчатої гуми).

При ударному стисканні в момент дотику контактів протидіючі зусилля вставки дуже великі. Вони перешкоджають відкиданню контактів. Дрижання контактів при цьому знижується.

Зниження зносу при замиканні може бути досягнуто за рахунок застосування рівнобіжних паралельних контактів (рис. 6.23). Тут кожним із паралельних контактів вимикається тільки певна частина струму. Внаслідок різниці у часі при розмиканні контактів дрижання не виникає, оскільки не виникає дуга. Це також призводить до зниження зношування контактів.

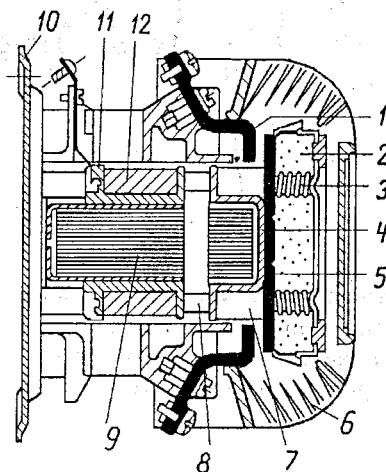


Рисунок 6.22 – Компенсація відкидних зусиль в контактах при їх замиканні за допомогою пористої гуми: 1, 7 – нерухомий контакт; 2 – вкладка – спеціальна пориста гума; 3 – контактна пружина; 4 – містковий контакт; 5 – якір; 6 – дугогасна решітка; 8 – сталеві напрямні; 9 – осердя електромагніта; 10 – сталева основа; 11 – струмопідвід до котушки – рознімний пружинний контакт; 12-котушка

Для зниження й усунення дрижання контактів, які викликані ударами у магнітній системі апаратів, останню амортизують.

Підвищенню комутаційної зносостійкості місткових контактів сприяє також одночасність дотику обох контактів містка. Досягти цього можна за допомогою конструкції місткового самовстановлювального контакта. Приклад виконання такого кріплення наведено на рис. 6.11. Будучи стисненим між двома сферичними поверхнями, містковий контакт після деякої кількості вмикань приймає положення, при якому досягається одночасний дотик всіх контактів.

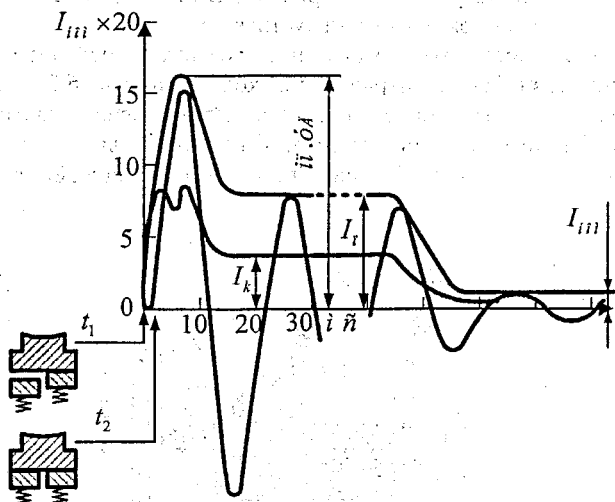


Рисунок 6.23 – Розподіл струму в багатоступеневій контактній системі: t_1 і t_2 – моменти замикання паралельних контактів; $I_{ном}$ – номінальний струм; $i_{н.уд}$ – ударне значення пускового струму; I_n – пусковий струм двигуна; I_k – струм в кожному з контактів

6.9 Робота контактних систем в умовах коротких замикань

При коротких замиканнях виникають дуже важкі умови роботи як для розбірних, так і для контактних систем комутування. В розбірних контактах слабким місцем є болтове з'єднання. Болт, що стягує деталі, практично не проводить струму і внаслідок короткочасності процесу короткого замикання можна вважати, що температура болта не змінюється. Теплове розширення струмоведучих деталей викликає додаткову напругу, яка складаючись із напругою затягування болта, може привести до залишкових деформацій і ослаблення контактного з'єднання після його остигання. Тому болтові контактні з'єднання повинні перевірятись на додаткові механічні напруги, що виникають у болтовому з'єднанні при короткому замиканні.

Для контактів комутування характерними процесами є:

- а) момент замикання;
- б) замкнене положення;

в) момент розмикання.

При коротких замиканнях виникає небезпека зварювання контактів тоді, коли вони перебувають як у замкненому положенні (при наскрізному струмові короткого замикання), так і в момент замикання (вмикання на коротке замикання).

При короткому замиканні відбувається не тільки різке збільшення струму, але й збільшення перехідного опору контакту через ослаблення контактного натиску, що викликається електродинамічними силами.

Теплова енергія, що виділяється в місці контакту і дорівнює $\int_0^{t_k} i^2 R_{пер} dt$,

різко зростає і може викликати розплавлення і зварювання контактів. На практиці внаслідок короткочасності коротких замикань таке явище спостерігається рідко. Зварювання замкнених контактів відбувається, як правило, за рахунок електродинамічного відкидання, коли електродинамічні сили дорівнюють контактному натиску або перевищують його. Дуга, що виникає при відкиданні контактів викликає велике оплавлення робочих поверхонь і може відбутися їх зварювання при замиканні.

Для визначення мінімального струму, при якому відбувається зварювання контактів користуються такою формулою [2]:

$$I \leq K\sqrt{10P}, \quad (6.12)$$

де I – допустима амплітуда ударного струму, А; P – контактний натиск, Н; K – коефіцієнт, що залежить від матеріалу контактів і кількості точок дотику (наведено у таблиці 6.1).

Таблиця 6.1

Тип контакту	Матеріал	$K, A/H^{0.5}$
Пакетно-пластинчатий	Мідь-латунь	300-400
Підйомний (ламельний)	Мідь-мідь	410
Несамоустановлюваний	Латунь-латунь	505
Підйомний (ламельний)	Мідь-латунь	575
Самоустановлюваний	Мідь-латунь	550
Розетковий (на один елемент розетки)	Мідь-мідь	600

При вмиканні на коротке замикання можливість зварювання контактів зростає як за рахунок можливого дрижання, так і за рахунок меншого натиску (в момент дотику контактний натиск дорівнює початковому P_n).

При вимиканні струмів коротких замикань відбувається сильне вигорання й оплавлення контактів. Зниження зношування дугогасних контактів досягається застосуванням дугостійких матеріалів і забезпеченням швидкого переміщення дуги по контактах.

6.10 Способи компенсації електродинамічних сил

Контакт (рис. 6.24, а) може бути поданий як провідник змінного перерізу. Відповідно до (2.49) в місці звуження ліній струму виникають поздовжні електродинамічні сили, що намагаються розімкнути контакти. Для одноточкових контактів значення цих сил визначається [9]

$$F_1 = 10^{-7} i^2 \ln \frac{s}{s_0} \quad (6.13)$$

для багатоточкових

$$F_1 = 10^{-7} \frac{i^2}{n} \ln \frac{s}{s_0}, \quad (6.14)$$

де s – переріз контакту в тому місці, де немає скривлень ліній струму; s_0 – дійсна площа контактування; n – кількість місць контактування.

В електричних апаратах на великі струми, зокрема в автоматичних вимикачах, прагнуть так виконати контактну систему, щоб компенсувати або послабити дію електродинамічних сил.

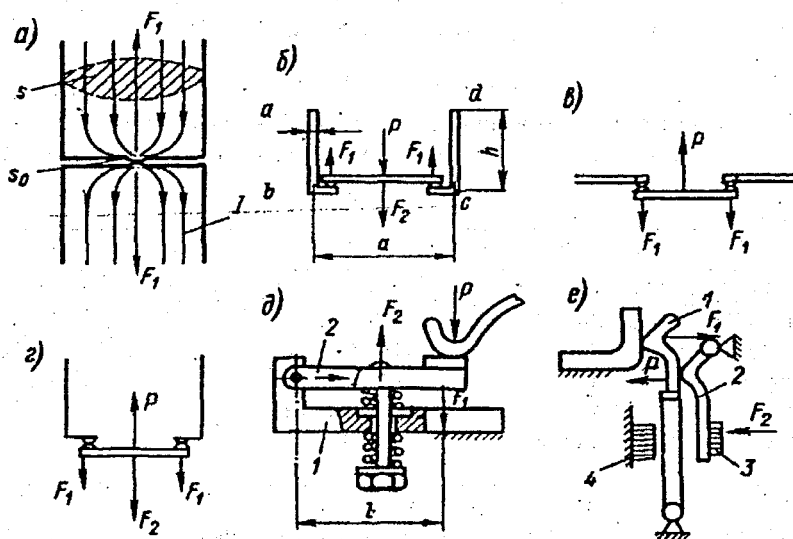


Рисунок 6.24 – Приклади виконання електродинамічної та електромагнітної компенсації електродинамічних сил: P – контактний натиск; F_1 – відкидне зусилля; F_2 – компенсувальне зусилля

Наприклад, в містковій контактній системі (рис. 6.24,б) електродинамічна сила F_2 контура $abcd$, що діє на містковий контакт, дорівнює

$$F_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i^2 \left(\ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1+c^2}} + 0.25 \right), \quad b = \frac{a}{r}, \quad c = \frac{a}{h}.$$

Вона спрямована назустріч електродинамічним силам F_1 в перехідних контактах. Можна підібрати розміри h і a таким чином, щоб забезпечити умову $F_2 > 2 F_1$.

В контактній системі за рис. 6.24, в електродинамічна сила F_2 відсутня, а в системі за рис. 6.24, г сила F_2 складається із сили F_1 . З погляду електродинамічної стійкості остання система є найменш стійкою.

На рис. 6.24, д наведено приклад електродинамічної компенсації для важільних контактів. Нерухомий контакт складається з двох частин (1 і 2), з'єднаних за допомогою шарніра. Рухома частина цього контакту утримується в нейтральному положенні двома пружинами, що діють назустріч одна одній. Електродинамічна сила F_2 намагається розсунути паралельні частини 1 і 2 контакту. Сила F_2 спрямована назустріч силі F_1 . Можна підібрати довжину петлі 1 так, щоб $l_2 F_2 > F_1 l_1$. Тоді при короткому замиканні контакт 2 буде завжди притискатися до рухомого контакту і контактний натиск буде при цьому зростати.

Схему електромагнітного компенсатора наведено на рис. 6.24, е. Магнітне поле навколо струмопроводу рухомого контакту намагається притягти якор 3 магнітопроводу компенсатора до його нерухомої частини 4. Через важіль 2 сила F_2 передається на рухомий контакт 1, перешкоджаючи його відкиданню, яке викликано електродинамічною силою F_1 .

6.11 Матеріали електричних контактів та контактних з'єднань

Від матеріалу контакту значною мірою залежить термін служби і надійність роботи як самого контактного з'єднання, так і електричного апарата в цілому.

Матеріали, що застосовуються в електроапаратобудуванні для виготовлення електричних контактів як високовольтних, так і низьковольтних електричних апаратів, характеризуються такими основними показниками:

- електричні — електропровідністю;
- теплові — теплопровідністю, теплосмістю, теплою випарювання, теплою плавлення, температурою плавлення, кипіння та рекристалізації;

- *хімічні* – спроможністю утворювати сульфідів та окислюватися;
- *механічні* – щільністю, міцністю при розтяганні, міцністю при стисканні, твердістю;
- *молекулярні* – пружністю пари, летучістю оксидів, розчинністю газів;
- *атомні* – потенціалом іонізації;
- *електротехнічні* – стійкістю до механічного зносу, стійкістю до місткової та дугової ерозій, зварюваністю, контактним опором.

Відповідно до свого фізичного стану контакти в електричних апаратах складають такі пари:

- | | | |
|------------------|---|----------------------------------|
| 1. Твердий метал | - | твердий метал; |
| 2. Твердий метал | - | рідина (метал або електроліт); |
| 3. Рідина | - | рідина (зазвичай, рідкі метали); |
| 4. Твердий метал | - | плазма (дуговий розряд); |
| 5. Рідкий метал | - | плазма. |

При виготовленні контактних з'єднань використовують такі метали:

1. *Чисті метали*: мідь, алюміній, срібло, золото, платина, паладій, родій, молибден, олово, вольфрам, кадмій тощо;
2. *Сплави*: латунь, бронза, силумін, берилієва та кадмієва бронза;
3. *Матеріали, що не є металами*: вуглець;
4. *Композиції з матеріалів, що не сплаваються*: вольфрам – срібло, вольфрам – мідь;
5. *Композиції металів з оксидами металів*: срібло – оксид міді; срібло – оксид кадмію;
6. *Металокерамічні матеріали*: срібло – вольфрам, срібло – молибден, срібло – нікель, срібло – оксид кадмію, срібло – графіт, срібло – графіт – нікель, мідь – вольфрам, мідь – молибден та інші.

До контактних матеріалів в електроапаратобудуванні висуваються такі головні вимоги:

- повинні мати високу електричну провідність і теплопровідність;
- бути стійкими до корозії і мати струмопровідну окисну плівку;
- бути дугостійкими, тобто мати високу температуру плавлення і випаровування;
- бути твердими, механічно міцним і легко піддаватися механічній обробці;
- мати невисоку вартість.

Перераховані вимоги суперечливі, і майже неможливо знайти матеріал, що задовольняв би всі ці вимоги. За дугостійкими властивостями контактні матеріали електричних апаратів можна розташувати в певній послідовності за характеристикою $\frac{\Delta V}{\Delta q} \cdot \frac{\text{см}^3}{(\text{с} \cdot \text{кА})}$.

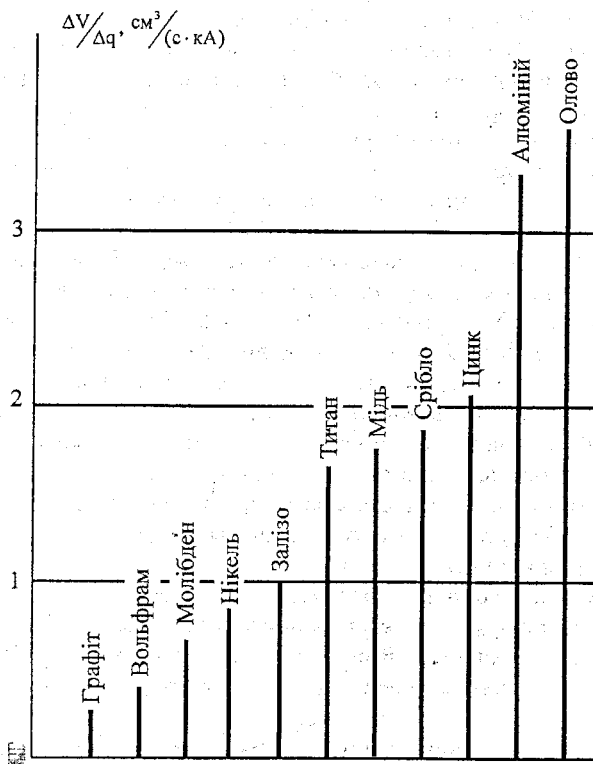


Рисунок 6.25 – Порівняльна характеристика дугостійких властивостей контактних матеріалів

Як видно з рис. 6.25 найбільш дугостійким матеріалом є графіт, найменш стійким – олово.

Основні властивості матеріалів та межі їх використання розглянемо детальніше.

Мідь. Задовольняє майже всі перераховані вище вимоги, за винятком корозійної стійкості. Окиси міді мають низьку провідність. Мідь – найпоширеніший контактний матеріал, використовується як для розбірних, так і для контактів комутування. У розбірних з'єднаннях застосовують антикорозійні покриття робочих поверхонь (див. розд. 6.2).

В контактних системах комутування мідь застосовується при тисках понад 3Н для всіх режимів роботи, крім тривалого. Для тривалого режиму мідь не рекомендується, але якщо вона застосована, то варто вжити заходів, щоб уникнути окислювання робочих поверхонь. Мідь може

використовуватися і для дугогасних контактів. При малих контактних натисках ($P < 3H$) застосування мідних контактів не рекомендується.

Срібло. Дуже гарний контактний матеріал, що задовольняє усі вимоги, за винятком дугостійкості при значних струмах. При малих струмах має добру зносостійкість. Окисли срібла мають майже таку ж провідність, як і чисте срібло. Срібло застосовується для головних контактів в апаратах на великі струми, для всіх контактів тривалого режиму роботи, у контактах на малі струми при малих натисках (контакти реле та контакти допоміжних кіл). Срібло, як правило, застосовується у вигляді накладок – вся деталь виконується з міді або іншого матеріалу, а на робочій поверхні контакту приварюється срібна накладка.

Алюміній. У порівнянні з міддю має значно меншу провідність і механічну стійкість. Утворює провідну тверду окисну плівку з великим опором. Це істотно обмежує застосування цього матеріалу при виготовленні контактів. Може використовуватися в розбірних контактних з'єднаннях (шинопроводи, монтажні проводи). Для цього контактні робочі поверхні сріблять, міднять або армують міддю. Слід мати на увазі невисоку механічну стійкість алюмінію, внаслідок чого з'єднання можуть згодом ослабнути і контакт порушиться. Для контактів комутування алюміній непридатний.

Платина, золото, молібден. Застосовуються для контактів комутування на дуже малі струми при малих натисках. Платина і золото не утворюють окисних плівок. Контакти з цих металів мають малий перехідний опір. Для підвищення зносостійкості застосовують сплави з платини та іридію.

Вольфрам і сплави з вольфраму. При великій твердості і високій температурі плавлення мають високу електричну зносостійкість. Вольфрам та його сплави вольфрам – молібден, вольфрам – платина, вольфрам – платина – іридій і інші застосовуються при малих струмах для контактів із великою частотою розмикання. При середніх і великих струмах вони використовуються як дугогасні контакти на струми до 100 кА і більше.

Металокераміка. Механічна суміш двох металів, що практично не сплаваються. Одержана методом спікання суміші їхніх порошків або методом просочування одного сплаву в інший. При цьому один із металів має добру провідність, а інший має велику механічну стійкість. Цей матеріал є тугоплавким і дугостійким. Металокераміка, таким чином, поєднує в собі високу дугостійкість з доброю провідністю. Найбільш поширеними композиціями металокераміки є: срібло – вольфрам, срібло – молібден, срібло – нікель, срібло – оксид кадмію, срібло – графіт, срібло – графіт – нікель, мідь – вольфрам, мідь – молібден і ін. Застосовується металокераміка як дугогасні контакти (композиції із сріблом у основному для змінного струму) на середні і великі струми вимикання, а також як головні контакти – на номінальні струми до 600 А.

Контрольні запитання

1. Дайте означення терміну “електричний контакт”.
2. Назвіть основні типи контактів в залежності від форми контактування.
3. Класифікація контактів за призначенням.
4. Як конструктивно виконуються одноступеневі та багатоступеневі контактні системи?
5. Які існують контактні вузли на малі струми вимкнення?
6. Які існують контактні вузли на середні і великі струми вимкнення?
7. Наведіть основні конструктивні особливості та межі застосування важільних, місткових, врубних, роликкових, торцевих та розеткових контактів.
8. Наведіть основні матеріали, з яких виконують контактні з'єднання.
9. Охарактеризуйте термін “перехідний опір контакту” та дайте його визначення.
10. Як залежить перехідний опір контакту від температури?
11. Від яких чинників залежить температура площини контактування?
12. Наведіть основні типи конструкцій контактних з'єднань.
13. Які основні вимоги ставляться до контактних систем комутування?
14. В чому полягає різниця між робочими та дугогасними контактами?
15. Назвіть основні причини, які призводять до зношування контактів.
16. Від яких чинників залежить зношування контактів при замиканні?
17. Від яких чинників залежить зношування контактів при розмиканні?
18. Наведіть методи та способи боротьби з дрижанням контактів.
19. Наведіть способи компенсації електродинамічних сил в контактних з'єднаннях.
20. Наведіть основні матеріали контактних з'єднань та дайте їм коротку характеристику.
21. Наведіть найбільш поширені композиції дугогасних контактів з металокераміки.

1. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1967. – 380 с.
2. Таев И.С. Электрические аппараты, общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 270 с.
3. Основы теории электрических аппаратов: Учебное пособие для электротехнических специальностей вузов / Б.К. Буль, Г.В. Буткевич, А.Г. Годжелло и др./ Под редакц. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
4. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1974. – 544 с.
5. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
6. Проектирование электрических аппаратов: Учебник для вузов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др. / Под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1985. – 448с.
7. Электрическая часть станций и подстанций / Под ред. А.А. Васильева. – М.: Энергия, 1980. – 608 с.
8. Афанасьев В.В., Добрянская Н.А. Математическая модель гашения дуги // Изв. вузов. Электромеханика. – 1980. – №3.
9. Брон О.Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. – Л.: Госэнергоиздат, 1967.
10. К Регаллер, Р. Рейхарт. Физика дуги и переходные процессы в сетях / Под ред. К. Регаллера. – М.: Энергоиздат, 1981. – 345 с.
11. Ульянов С.А. Электрические переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 350 с.
12. Электрическая часть станций и подстанций: Учебник для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова и др./ Под ред. А.А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 567 с.
13. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
14. Рожкова Л. Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
15. Бортник И.М., Кук Ч.М. Характеристики зажигания заряда в шестифтористой сере при сверхвысоких напряжениях // ЖТФ. – 1972. – Т. 42. – №1.
16. Теория и конструкция выключателей. Пер. с англ./ Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское отд, 1982. – 496 с.
17. Буткевич Ю.В. Дуговые процессы при коммутации электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1973.
18. Залесский А.М. Электрическая дуга отключения. – Л.: Госэнергоиздат, 1973.

19. Полтев А.И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. – Л.: Энергия, 1979. – 240 с.
20. Улиссова И.Н. Вакуумные коммутационные аппараты за рубежом. – М.: Информэлектро, 1983. – 80 с.
21. Зелінський В.В. Фізичні основи електричних апаратів: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДГУ, 2001. – 134 с.
22. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. – М.: Энергия, 1971. – 104 с.
23. Основы теории электрических аппаратов /Под ред. Ю.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970.
24. Крижанский С.М., Бородянский Г.Я. Простая модель дугового разряда переменного тока в продольном потоке газа// Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1976. Вып. 4 (60).
25. [http// www.rzva.com.ua/](http://www.rzva.com.ua/)
26. [http// www.teu.tavrida.com/](http://www.teu.tavrida.com/)
27. Мировая энергетика: прогноз развития до 2020 года: Пер. с англ. Под ред. Ю.Н. Старшинова. – М.: Энергия, 1980. – 256 с.
28. Кузнецов Ю.С. Аппараты распределения электрической энергии напряжением до 1000 В. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.
29. Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с..
30. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов по спец. "Электрические аппараты" / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др. /Под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
31. Электротехнический справочник / Под ред. проф. МЭИ. Т1-3.– 7-е издание., испр. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 1988.
32. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для средн. проф.обр./ Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 448 с.

Навчальне видання

Петро Дем'янович Лежнюк
Віктор Цезарович Зелінський

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор О. Д. Скалоцька

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 21.07р. Гарнітура Times New Roman
Формат 29,7x42 ¼ Папір офсетний
Друк різнографічний Ум. друк. арк. 11.7
Тираж 75 прим.
Зам. № 2007-160

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ.