

Міністерство освіти і науки України
Технічний коледж Луцького НТУ



ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Курс лекцій
для студентів спеціальності
5.05070103 «Електропостачання»
денної форми навчання

Луцьк
РВВ Луцького НТУ
2016

УДК 621. 3 (07)
Е 87

До друку _____ Голова Навчально-методичної ради Луцького НТУ

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій
Луцького НТУ
_____ директор бібліотеки.

Затверджено Навчально-методичною радою Луцького НТУ,
протокол № _ від « » _____ 2016 року.

Рекомендовано до видання Навчально-методичною радою Технічного
коледжу Луцького НТУ, протокол № __ від « » _____ 2016 року.
_____ Голова Навчально-методичної ради коледжу

Розглянуто і схвалено на засіданні циклової комісії викладачів зі
спеціальності «Електропостачання» Технічного коледжу Луцького НТУ,
протокол № __ від « » _____ 2016 року.

Укладач: _____ В.В. Лишук, кандидат технічних наук, доцент
Луцького НТУ

Рецензент: _____ Й.Р. Селепина, кандидат технічних наук,
ст. викл. Луцького НТУ

Відповідальний
за випуск _____ Т.М. Бондарук, заст. дир. з НВЧ Технічного
коледжу Луцького НТУ

Електричні апарати [Текст]: Курс лекцій для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання / уклад. Лишук В.В. – Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2016. – 92 с.

Призначене для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання.

© В.В. Лишук, 2016

Передмова

Електричний апарат – це електротехнічний пристрій, який використовується для включення і відключення електричних кіл, контролю, виміру, захисту, управління і регулювання установок, призначених для передачі, перетворення, розподілу і споживання електроенергії. Під електричними апаратами розуміють широкий спектр різноманітних пристроїв, вживаних у побуті, промисловості й енергетиці.

Залежно від основних функцій апарати відносять до силових, допоміжних кіл і кіл керування. До силових і допоміжних кіл входять переважно виконавчі апарати систем керування. Це струмоприймачі й заземлюючі пристрої, що з'єднують електричні кола ЕРС із контактною мережею і через колісні пари – з рейками; комутаційні апарати для групування машин при пуску і гальмуванні; резистори й реактори, що застосовують для регулювання в цих режимах. Сюди ж відносяться апарати прямого захисту, що безпосередньо впливають на коло, котре захищають (наприклад, швидкодіючі автоматичні вимикачі), і апарати непрямого захисту, що працюють як датчики визначених величин.

Напівпровідникові апарати представляють новий напрямок розвитку електричних апаратів. Його виникнення безпосередньо пов'язане з революційним розвитком силової електроніки і мікросхемотехніки, що розпочався в останні десятиліття. Цей напрямок дозволив, використовуючи нові принципи побудови електричних апаратів на базі елементів вказаної електронної техніки, радикально покращувати комутаційну зносостійкість і швидкодію новостворюваних апаратів, а також розширювати їх функціональні можливості. Динамічному просуванню напівпровідникових апаратів сприяв загальний прогрес у техніці, що висуває до електричних апаратів високі вимоги, які стає все складніше вирішувати на базі традиційних принципів їх побудови.

Тема 1. Визначення електричного апарата. Класифікація. Основні розділи теорії електричних апаратів

Електричні апарати є засобами керування електричним струмом. Функція апаратів полягає в керуванні параметрами, що характеризують струм: електричною напругою, електричною потужністю і енергією, частотою електричного струму (напруги), магнітним потоком і т.д.

У технічному відношенні до функцій керування струмом належать:

- комутація (включення – відключення) електричного струму і пов'язаних із ним параметрів;
- автоматичне і неавтоматичне регулювання, стабілізація, зміна за заданим законом електричного струму і пов'язаних із ним параметрів;
- розподіл струму (електричної енергії) за об'єктами і споживачами;
- захист електротехнічного устаткування від аварійних режимів (короткого замикання, перевантаження, зміни частоти струму, напрямку потоків енергії та ін.);
- контроль параметрів електричного струму для подачі інформації на вхідні органи автоматичних регуляторів, апаратів захисту, перетворення параметрів струму (його виду, форми кривої, частоти та ін.) для створення швидкодіючих, високочутливих, високоефективних і надійних електричних апаратів і систем керування.

Електричні апарати є основними засобами автоматизації та електрифікації народного господарства. Вони широко застосовуються в енергетиці (електричні станції), в різних схемах керування електроустаткуванням, електротермії, світлотехніці, плазменній техніці, а також у системах автоматики, телемеханіки, електрозв'язку, радіотехніці, в автоматизованих системах керування, електричному транспорті, тягових підстанціях.

Електричні апарати умовно можна розділити на п'ять основних видів:

- **апарати високої напруги**, що керують режимом роботи електричних мереж і систем високої напруги (6, 10, 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ). Із їхньою допомогою виконують оперативні

переключення в мережах і системах, а також здійснюється захист від струмів к.з., від перенапруг, перевантаження і т.д.;

– **апарати керування**, що керують режимом роботи електроустановки (наприклад, рухомого складу, тягових електричних мереж, розподільних мереж на номінальну напругу 127, 220, 380, 500, 660, 1140 В), а також здійснюють їх автоматичний захист від аварійних режимів;

– **електричні апарати автоматики**, що здійснюють функції контролю електричних і неелектричних параметрів працюючого електроустановки, виробляють сигнали до схеми автоматики і керування, що відповідають контрольованим параметрам, а також включають реле автоматики і захисту, (наприклад, АВР і АПВ тягових підстанцій);

– **автоматичні регулятори і стабілізатори**, призначені для автоматичного регулювання за заданим законом того чи іншого вихідного параметра на заданому рівні;

– **підсилювачі й перетворювачі**, що здійснюють посилення слабких сигналів, подаваних на вхід, до відносно великих на виході (підсилювачі), а також перетворення однієї форми сигналу в іншу (перетворювачі) (наприклад, сигналів постійного струму в змінний струм чи навпаки);

– **напівпровідникові апарати (НПА)** відносять до класу електричних низьковольтних апаратів (до 1000 В). Вони призначені для комутації, управління і захисту електричних кіл і електроустановки, а також для контролю і регулювання різних електричних і неелектричних процесів [3].

НПА класифікують: за родом струму, типом використовуваного в полюсах силового електронного ключа (ЕК) і за виконуваними функціями. За родом струму НПА поділяють на апарати *постійного й змінного* струму.

За типом використовуваного ЕК комутаційні НПА ділять на *безконтактні й гібридні*.

У *безконтактних НПА* струм електричного кола комутується безпосередньо напівпровідниковими елементами, де в основному використовують силові одноопераційні тиристори, які надалі називатимемо тиристорами. За способом вимкнення тиристорів такі НПА поділяють на апарати з *природною й примусовою* (штучною конденсаторною) *комутацією*. Природну комутацію застосовують у

безконтактних НПА змінного струму і здійснюють шляхом зняття сигналів управління з тиристорів із подальшим замиканням останніх при природному проходженні струму в їх колі через нуль. Примусову комутацію застосовують у НПА постійного струму, а при підвищених вимогах до швидкодії – і в НПА змінного струму. Таку комутацію здійснюють за допомогою систем примусової комутації місткості. У зв'язку з тим, що застосування примусової комутації в швидкодіючих безконтактних НПА змінного струму призводить до багатократного зростання їх маси, габаритних показників і вартості, а також (і це особливо важливо), істотно знижує надійність апарату. НПА такого типу використовують рідко. У даний час для усунення вказаних недоліків ці НПА зазвичай використовуються на базі повністю керованих напівпровідникових приладів.

У *гібридних НПА* як силовий комутаційний елемент застосовують *гібридні ЕК*, що дозволяє використовувати в цьому апараті переваги як контактних (зменшені масо – габаритні показники, підвищена перевантажувальна здатність по струму), так і безконтактних (підвищена комутаційна зносостійкість). Оскільки відключення електричного кола в цих апаратах, як і в безконтактних, проводиться силовими тиристорами, то вони можуть бути як із *природною*, так і з *примусовою* комутацією.

Щодо виконуваних функцій (призначення) ПА можна розділити на наступні групи:

1) *контролюючі* (реле), основною функцією яких є контроль заданих параметрів електричного кола, і при відхиленні цих параметрів подача того або іншого сигналу або команди відповідно до заздалегідь встановленої функціональної залежності (на відключення, на виправлення параметра і т. ін.);

2) *пускорегулюючі* (або апарати управління), призначені для здійснення пуску, регулювання швидкості обертання, напруги і струму електричних машин (контактори, пускачі);

3) *захисні*, такі, що здійснюють оперативне й аварійне ввімкнення і вимкнення електричних кіл, а також забезпечують захист цих кіл і електроустаткування від перевантажень, струмів короткого замикання та інших ненормальних режимів роботи (автоматичні вимикачі, перемикачі живлення);

4) *суміщаючі функції управління й захисту* (автомати-пускачі, напівпровідникові станції управління);

5) *регулюючі*, призначені для автоматичної безперервної стабілізації або регулювання заданого параметра електричного ланцюга або системи (регулятори (стабілізатори) напруги й струму).

При цьому ми бачимо, що загальним для ПА останніх чотирьох груп є те, що всі вони є *силовими комутаційними апаратами*.

Окрім специфічних вимог до даного апарату, всі ПА мають задовольняти загальним вимогам, які перераховані нижче в порядку їх важливості:

1) надійна робота в нормальному режимі протягом заданого часу і за умови, що відповідне цьому часу число функцій не перевищує нормованого;

2) безвідмовне виконання необхідних функцій в передбачених ненормальних режимах, при цьому максимальні величини струмів і напруг у напівпровідникових елементах апарату не повинні перевищувати значення, що дорівнює 0,85 від гранично-допустимого значення вказаних величин;

3) максимальне застосування при розробці систем управління і регулювання НПА сучасних комплектуючих виробів електронної промисловості, прогресивних цифрових методів обробки інформації, резервування і систем діагностики;

4) мала трудомісткість і, відповідно, витрати матеріалів (особливо дорогих), мала номенклатура вживаних матеріалів, комплектуючих виробів, максимальна вживаність стандартизованих, нормалізованих і уніфікованих вузлів і деталей, блоковість конструкції та її вузлів;

5) простота монтажу, пристосованість окремих апаратів і їх блоків до вбудови в комплектні пристрої, швидке відновлення працездатності після відмови апарату;

6) висока перешкодостійкість;

7) зручне поєднання із сучасними засобами автоматики й обчислювальної техніки;

8) малі масо-габаритні показники і невисока вартість;

9) малі експлуатаційні витрати;

10) естетичність конструкції.

Сучасна теорія електричних апаратів включає чотири основних розділи:

– теорія електромагнітних, електродинамічних, індукційних та інших явищ в апаратах;

- теорія комутації електричних кіл, що розглядає динамічні процеси і характеристики в електричних колах і елементах апаратів при вимкненні й увімкненні струму;
- теорія тепло- і масоперенесення в електричних апаратах;
- теорія автоматичного регулювання.

1.1. Призначення, принцип дії і будова електричних апаратів

Запобіжники (рис.1) захищають установки від надструмів. При виникненні струму к.з. у них перегоряє металева плавка вставка, виникає й гаситься електрична дуга і коло розривається. На тягових підстанціях МЕТ застосовують для захисту електроустаткування від надструмів. Запобіжники низької напруги виготовляють на струми від міліамперів до тисяч ампер і напругою до 660 В, а запобіжники високої напруги – до 35 кВ і вище.

Найважливішою характеристикою запобіжника є залежність часу перегорання плавкої вставки від струму – часострумова характеристика.

Запобіжник працює в двох різко відмінних режимах: у нормальних умовах і при перевантаженнях і коротких замиканнях. Струм, на який розрахована плавка вставка для тривалої роботи, називають *номінальним струмом плавкої вставки*.



Рис.1. Загальний вид запобіжників

Зазвичай до того самого запобіжника можна вставляти плавкі вставки на різні номінальні струми.

Номінальний струм запобіжника, зазначений на ньому, дорівнює найбільшому з номінальних струмів плавких вставок, призначених для даної конструкції запобіжника.

Вставку виконують у вигляді пластинки з вирізами (рис.2б), що зменшують її переріз на окремих ділянках. На цих звужених ділянках виділяється більше теплоти (рис.2а), ніж на широкіх. Плавка вставка плавиться в одному, найбільш гарячому місці. При короткому замиканні нагрів звужених ділянок йде настільки інтенсивно, що практично відводом теплоти від них можна знехтувати.

У багатьох конструкціях плавкій вставці надають таку форму, за якої електродинамічні сили, що виникають при струмах короткого замикання, розривають вставку ще до того, як вона встигне розплавитися (рис.2в).

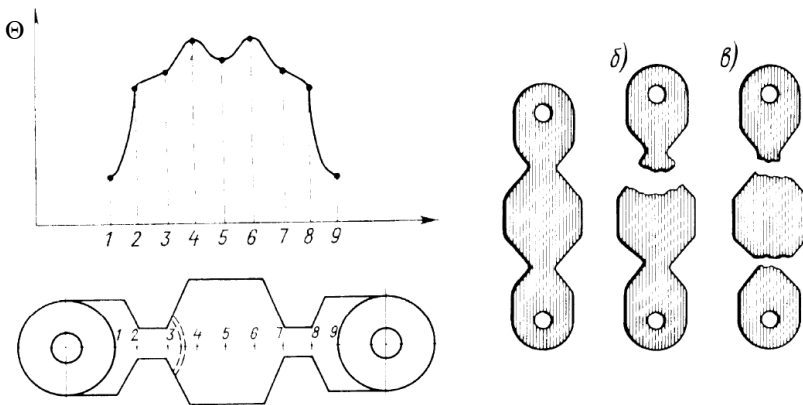


Рис.2. Плавка вставка запобіжника

На рис.2а схематично зображений розподіл температур Θ залежно від зони. Найвища температура має місце в звужених місцях.

Металургійний ефект полягає в тому, що багато легкоплавких металів (олово, свинець та ін.) здатні в розплавленому стані розчиняти деякі тугоплавкі метали (мідь, срібло та ін.). Отриманий таким способом розчин має інші характеристики, ніж вихідні матеріали. Для прискорення плавлення вставки при перевантаженнях і зниження загальної температури усієї вставки при її плавленні на дроти наплавляють

невеликі олов'яні кульки. При струмах перевантаження, коли температура вставки досягає температури плавлення олова, кулька розплавляється і розчиняє частину металу, на якому він напаяний.

Вставка перегоряє в тому місці, де була наплавлена кулька. При цьому температура вставки виявляється набагато нижчою від температури плавлення металу, з якого вона виконана. У номінальному режимі кулька практично не впливає на температуру нагрівання вставки.

Вимикачі високої напруги служать для комутації струму в нормальному режимі й короткому замиканні, коли струми досягають десятків кілоампер.

Основні типи: масляні; автогазові; елегазові; повітряні; вакуумні; електромагнітні.

Розрив кола струму у вимикачах здійснюється за рахунок гасіння електричної дуги, що виникає між контактами, коли газорозрядний проміжок перетворюється з провідника електричного струму на ізолятор за $0,01 \div 0,1$ с.

Апарати керування призначені для частих оперативних вимкнень і увімкнень нормальних струмів навантаження і нечастих комутацій струмів перевантаження, що звичайно перевищують номінальні в 5–20 разів. До апаратів керування належать: контактори, пускачі, командоапарати, електромагнітні муфти, реле керування.

Апарати розподілу енергії здійснюють захист установок і мереж від аварійних режимів роботи (струмів к.з. і перевантаження, зниження напруги в мережі). До апаратів розподілу енергії належать: автоматичні повітряні вимикачі (автомати), запобіжники і та ін.

Автоматичні вимикачі серії ВА21 призначені для захисту електричних кіл від перевантажень і коротких замикань, оперативних включень і відключень цих кіл (у тому числі – асинхронних електродвигунів) і проведення струму в номінальному режимі, **ВА21–43Т** – для міського транспорту (однополюсні в триполюсному габариті).

Пускачі головним чином призначені для застосування в стаціонарних установках дистанційного пуску безпосереднім підключенням до мережі, зупинки і реверсування трифазних асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором при напрузі до 380 і 660 В змінного струму частотою 50 Гц. За наявності теплових реле пускачі здійснюють захист керованих електродвигунів від перевантаження неприпустимої тривалості.

Пускачі з обмежувачами перенапружень придатні для роботи в системах управління із застосуванням напівпровідникової техніки. Пускачі придатні для роботи в системах управління із застосуванням мікропроцесорної техніки при шунтуванні вмикаючої котушки з пристроєм, що подавляє завади або при управлінні за допомогою тиристорів [3].

Класифікація:

- за видом схеми включення навантаження (як правило електродвигуна): нереверсивний або реверсивний;
- за номінальною напругою головного кола.

За категорією розміщення:

- ступінь захисту IP00 (відкриті): для установки в опалювальних приміщеннях на панелях, у закритих шафах та інших місцях, захищених від потрапляння води, пилу і сторонніх предметів;
- ступінь захисту IP40 (у оболонці): для установки всередині не опалювальних приміщень, де немає значної кількості пилу і виключене потрапляння води на оболонку пускача;
- ступінь захисту IP54 (у оболонці): для внутрішніх і зовнішніх установок у місцях, захищених від безпосередньої дії сонячного випромінювання і атмосферних опадів.

Наявності кнопочного поста на корпусі пускача:

- кнопок „пуск” і „стоп” (п+с) на нереверсивних пускачах;
- кнопок „пуск вперед”, „пуск назад” і „стоп” (п+п+с) на реверсивних пускачах.

Деякі модифікації пускачів передбачають наявність на корпусі сигнальної лампи „увімкнено”.

Наявності додаткових сигнальних та блок-контактів:

- такими, що замикають (з) або розмикають (р) в різних комбінаціях;
- додаткові контакти можуть бути вбудовані у пускач або виготовлені у вигляді окремої приставки. Частина додаткових контактів може бути використана в схемі пускача, наприклад, в реверсивному пускачі;
- для здійснення електричного блокування.

Роду струму і по напрузі котушки, що втягує:

- змінного струму на різні напруги із стандартного ряду;
- постійного струму.

За наявності теплового реле: теплові реле характеризуються номінальним струмом неспрацьовування на середній установці й зазвичай допускають регулювання струму неспрацьовування в межах 15% від номінального значення. Пускачі можуть комплектуватися обмежувачами перенапружень, різними настановними виробами і т.д.

Контактори. Їх розрізняють за родом струму: постійного, змінного, а також змінного струму підвищеної частоти (до 10 кГц). Вони можуть виконуватися з керуванням на постійному чи на змінному струмі частотою 50 чи 60 Гц незалежно від роду струму головного кола.

За найбільшою частотою включень на годину в повторно-короткочасному режимі роботи контактори поділяють на класи: 0,3; 1,3; 10; 30, що відповідає частоті 30, 120, 300, 1200, 3600 включень на годину. Нормована механічна зносостійкість досягає 30 млн циклів, комутаційна зносостійкість має бути не меншою від 0,1 механічної. Контактори в основному виконують за 10-м класом і на відповідну механічну зносостійкість.

Контактори серії КТ6600 (рис.3) випускають на струми до 160 А напругою 660 В, частотою 50 і 60 Гц і 440 В постійного струму.

Контактори серії КТ64 і КТ65 випускаються на струми до 630 А і тією самою напругою і являють собою комбінований апарат із контактора серії КТ6600 і напівпровідникового блоку бездугової комутації.

Конструкція контакторів (рис.3а) – моноблочна з поворотною рухомою системою. Контактор складається з електромагніта 3, контактної і дугогасної системи 2 і блоків допоміжних контактів 1. Нерухомі частини контактора укріплені на базовій металевій рейці 4, рухомі – на самоустановленому пластмасовому валі 5. Якір 10 електромагніта (рис.3б) на зовнішньому полюсі має екран із підтискнуою (вона ж амортизує) пружиною 6. Внутрішній (стосовно котушки) полюс має коротко замкнутий виток 7. Магнітна система не має повітряного зазору, що значно знижує споживану потужність котушки 9. Весь вузол збирають на підставці 8.

Головні контакти 13 і 14 виконані з накладками з метало-керамічної композиції на основі срібла. Рухомий контакт – підйомного типу. Для обмеження вильоту полум'я в камерах установлені пружинні гасники полум'я.

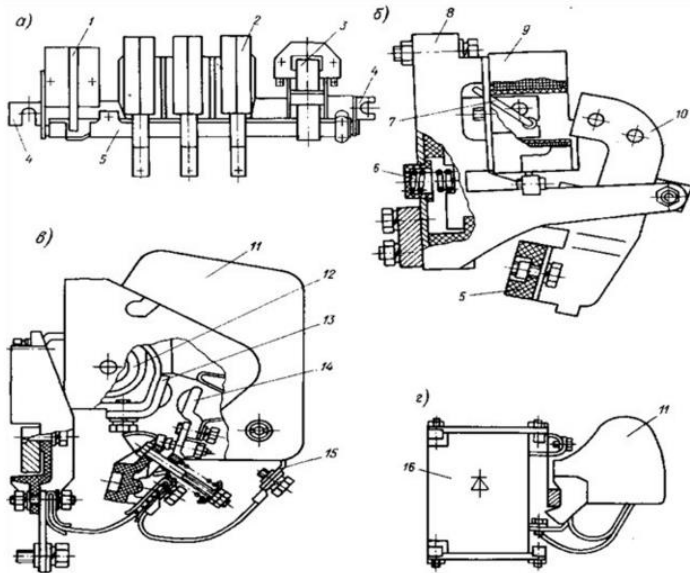


Рис.3. Контактори серії КТ6600, КТ64 і КТ65:

а – умовне зображення триполюсного контактора; б – електромагнітна система; в – контактна і дугогасна системи; г – схема контактора з бездуговою комутацією

Для поліпшення умов комутації струму в апаратах керування застосовують напівпровідникові прилади. Так, наприклад, **гібридний контактор** (рис.4) об'єднує в собі звичайну контактну систему і напівпровідникову приставку, що шунтує, з тиристорів VS_1 і VS_2 .

При відсутності струму $i_{упр}$ на керуючих електродах, тиристори закриті й струми ними не протікають. При включених контактах $ГК$ падіння напруги на них менше граничного U_n і струм через тиристори не протікає. Розмикання контактів приводить до появи електричної дуги; коли падіння напруги на дузі перевищить граничне, один із тиристорів відкривається (відповідно напрямку на півхвилі напруги (струму), тому що на їхні керуючі електроди через VD_1 , VD_2 подають сигнали струму керування зі вторинних обмоток трансформаторів струму. Ці сигнали трансформуються у вторинних обмотках завдяки протіканню струму по первинних обмотках трансформаторів струму, що з'єднані послідовно з головним контактом.

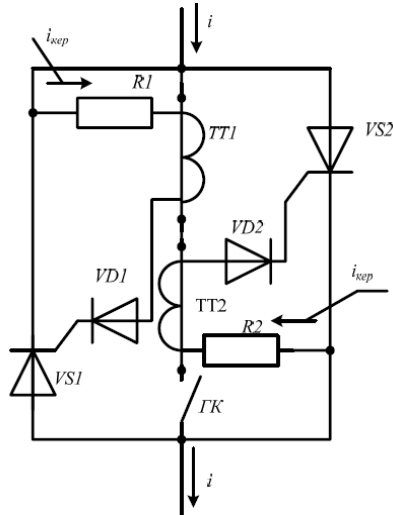


Рис.4. Гібридний контактор

Один із тиристорів пропускає першу півхвилю струму. За нулем струму він виявляється закритим. Але коли струм із кола перейшов у рівнобіжне коло тиристорів, на вторинних обмотках трансформаторів струму вже не трансформуються керуючі сигнали і вони не надходять на керуючі електроди тиристорів. Таким чином, після переходу змінного струму через нуль інший тиристор також виявляється закритим для зворотної півхвилі струму. Отже, при першому переході через нуль протікання струму в головному колі припиняється, тобто це коло зі струмом буде відключене протягом півперіоду.

Існують спеціально виконані контактори, які використовують на міському і залізничному транспорті. Із серії контакторів КТ 6000 виготовляють контактори на 630 і 1000 А з колами керування на постійному і змінному струмі.

Новим напрямком є виробництво вакуумних контакторів на струм 160, 250 і 400 А. Надійність у роботі, безпека в обслуговуванні, малі габарити вигідно відрізняють вакуумні контактори від електромагнітних.

1.2. Апарати автоматичні, реле, датчики, автоматичні регулятори й стабілізатори, підсилювачі й перетворювачі

Апарати автоматичні. Вони працюють на невеликих напругах (до сотень вольт) і невеликих струмах (до 5 А) і виконують функції контролю якого-небудь електричного чи неелектричного вхідного параметра (у першому випадку – реле, в іншому – датчик). Коли вхідний (контрольований) параметр реле досягає заданої величини, відбуваються спрацьовування електричного реле і поява сигналу на виході. Це здійснюється розмиканням чи замиканням контактів (контактні реле) або різкою зміною напруги на виході (безконтактні реле).

У **датчиках** характер залежності вихідного сигналу від вхідного інший – вона має плавний вигляд: мала зміна сигналу викликає пропорційну невелику зміну сигналу на виході.

Електромагнітні реле контролюють значення струму $I_{нг}$ в колі навантажувального резистора $Z_{нг}$ (рис.5).

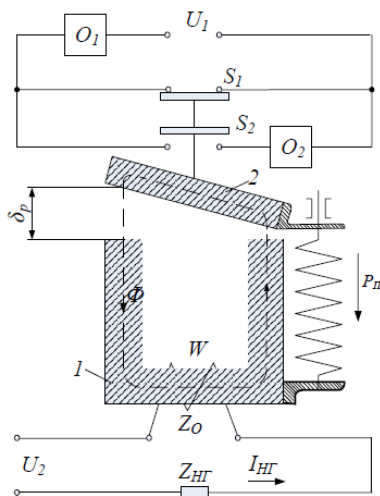


Рис.5. Найпростіше електромагнітне реле

Обмотка реле W включена послідовно в коло контрольованого струму $I_{нг}$. Її опір Z_o практично не впливає на величину $I_{нг}$, тому що $Z_{нг} \gg Z_o$ струм, що протікає по обмотці, $I_{нг}$ створює в магнітопроводі

магнітний потік Φ , в результаті чого виникає електромагнітна сила $P_{ем}$ притягання якоря 2 до магнітопроводу 1. Із зростанням струму ця сила зростає і при досягненні струмом $I_{нз}$ критичного значення $P_{ем}$ виявляється достатньою для подолання сили поворотної пружини $PП$, якорь притягується, контакти O_1 розмикаються і відключають об'єкт керування O_1 , а контакти O_2 замикаються і включають об'єкт керування O_2 під напругу U_1 . Коли струм $I_{нз}$ знизиться до певного значення, електромагнітна сила буде недостатньою для утримання якоря. Під дією сили пружини Pn він перейде в початкове положення і контакти O_1 і O_2 будуть переключати об'єкти O_1 і O_2 . Таким чином, це реле здійснює автоматичне керування об'єктами навантаження в залежності від величини струму.

Теплове реле – реагує на величину струму, що протікає нагрівальним елементом НЕ, який включається в коло струму навантаження $I_{нз}$. Щоб більший цей струм, то вища температура нагрівання НЕ – 2 (рис.6), котра передається консольній закріпленій біметалічній пластині 1. Вона складається з двох шарів: металу з високим температурним коефіцієнтом лінійного розширення і металу з низьким коефіцієнтом. При нагріванні пластинка 1 згинається.

Вимірювальні пристрої реле включають до електричної схеми установки.

Струмові реле реагують на струм, що протікає по обмотці.

Реле напруги спрацьовують, якщо контрольована напруга стане вище (**реле максимальної напруги**) чи нижче заданої (**реле мінімальної напруги**).

Реле потужності реагують на зміну потужності, **реле напрямку енергії** – на зміну напрямку потоку електричної енергії.

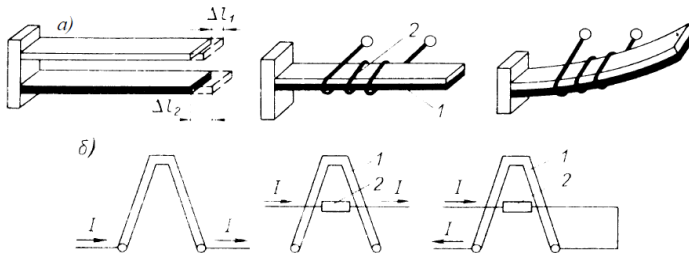


Рис.6. Принцип дії біметалічних теплових реле (а)
і способи нагрівання пластин (б)

Дистанційне реле опору (активного, індуктивного чи повного) вимірює величину електричного опору від місця установки реле до місця пошкодження в мережі, пропорційної відстані (дистанції) між ними і подає відповідний сигнал до схеми автоматичного керування електроустановкою.

Напівпровідникові реле за швидкодією, чутливістю, селективністю і надійністю перевершують електромагнітні реле. У ряді випадків напівпровідникові реле мають характеристики, які неможливо одержати за допомогою електромагнітних реле.

Як напівпровідникові пускачі можна використовувати твердотільні реле.

Твердотільним реле називається оптико-електронний пристрій, у якому сигнал управління передається через оптичний канал і вмикає (вимикає) потужний вихідний електронний пристрій.

Застосування реле:

В даний час реле все більше застосовуються в різних електротехнічних пристроях і виробках автоматичних апаратах, зокрема:

- для комутації електродвигунів змінного струму;
- у системах автоматичного регулювання й управління;
- як контактори в колах змінного струму, в імпульсних джерелах живлення, в швидкодіючих системах захисту і т.д.

Виділяють наступні основні типи тиристорних реле:

- однофазні нормально замкнуті й нормально розімкнені реле (від 1 А до 100 А);
- трифазні нормально розімкнені реле (від 10 А до 150 А);
- однофазні, двофазні й трифазні реверсивні реле вбудованим захистом від міжфазного замикання і миттєвого реверсу (від 10 А до 40 А);
- двоканальні твердотільні реле роздільними каналами або зі на виході з незалежним управлінням каналами (від 1 А і вище).

Реле можуть мати контроль нуля фази силової напруги (тобто включатися при значенні цієї напруги, близькому до нуля, типу ТМ) або не мати цього контролю (типу ТС). Включення в «нулі» напруги має ту перевагу, що мінімізує перешкоди при включенні. За управлінням реле можуть мати струмові або потенціальні входи. Причому струмові входи можуть бути тільки однофазних і двоканальних реле, потенціальні – у всіх. Для струмових входів струм управління

110–25 мА при падінні напруги на вході близько 1,2 В або 2,4 В. Потенціальне управління варіюється в діапазонах:

- постійний (4÷7) і (3÷30) В;
- змінний (6÷30) і (110÷280) В.

Тиристорні структури чутливі до перенапружень: їх поява веде до пробою, тому актуальним є захист виходів реле від перенапружень. Основним засобом такого захисту є шунтування виходів реле варисторами. Для захисту реле від втрати управління через імпульсні перешкоди застосовується шунтування виходів RC-коло.

Для включення й відключення асинхронних двигунів і їх реверсування можна використовувати трифазні реверсивні реле 5П55.30ТМА, ТМБ. Вони забезпечують включення, виключення і реверс трифазних двигунів. Реле мають оптронну розв'язку сигналів, керуючих від силових кіл, а також вхід сигналу блокування ввімкнення реле. У реле даного типу забезпечується комутація всіх трьох фаз живлячої напруги. Реле групи ТМА управляються позитивною напругою, ТМБ – негативним. Напруга ізоляції – 1500 В.

У схемах широко розповсюджені **реле часу і програмні реле**.

Реле часу може створювати регульовану в широких межах витримку часу, відлічувану від моменту подачі сигналу на вхід реле до моменту спрацьовування оперативного органа.

Програмні реле – це різновид реле часу з декількома незалежними контактними групами. Витримки часу від моменту подачі сигналу на вхід цього реле до моменту замикання для тих чи інших контактів – різні і можуть регулюватися в широких межах.

Широко розповсюдженими є **проміжні (комутаційні) реле**, що здійснюють одну з функцій:

- збільшення кількості автономних сигналів на виході при подачі на вхід одиничного сигналу (на виході з'являється велика кількість незалежних сигналів);
- "посилення сигналу". При подачі на обмотку невеликого струму, достатнього для спрацьовування реле, замикаються контакти, здатні пропустити через себе значно більший струм у порівнянні зі струмом вхідного сигналу.

Датчики (первинні перетворювачі) здійснюють контроль неелектричних параметрів, наприклад лінійних і кутових переміщень деталей, тиску газів і рідин, рівнів рідких і сипучих тіл, механічних зусиль і моментів, швидкостей руху і т.д.

Принцип дії **індуктивного датчика тиску** (рис.7) заснований на тому, що зі зміною тиску P у резервуарі змінюється повітряний зазор δ між якорем $Я$ і магнітопроводом M магнітної системи електромагнітного пристрою.

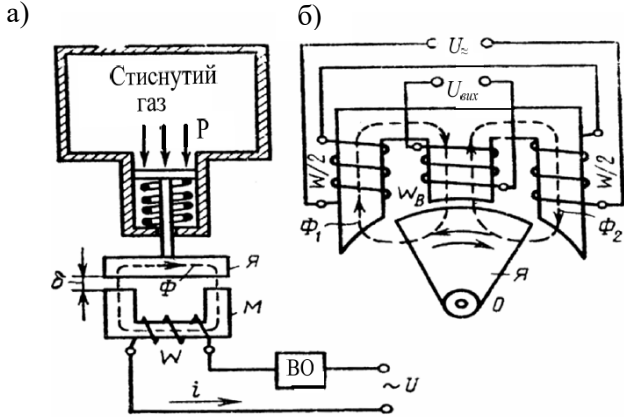


Рис.7. а) індуктивний датчик тиску;
 б) індукційний датчик кутового переміщення

Обмотка ввімкнена на синусоїдальну напругу $U \approx$. Значення струму i , реєстрованого вимірювальним органом ВО, залежить від електричного опору обмотки, що в електромагнітних пристроях є переважно індуктивним: $X = \omega L$.

Індуктивність обмотки

$$L = \frac{w\Phi}{i}$$

де Φ – магнітний потік, створюваний струмом i . У найпростішому випадку

$$\Phi = \frac{wi}{R_{\delta}}$$

де R_{δ} – магнітний опір повітряних зазорів, дорівнює

$$R_{\delta} = \frac{2\delta}{\mu_0 S},$$

S – площа полюса на магнітопроводі.

Тоді

$$R_{\delta} = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi f} \cdot \frac{i}{w\Phi} = \frac{U \cdot i \cdot 2\delta}{2\pi f w i \mu_0 S} = \frac{U \cdot \delta}{\pi \mu_0 w^2 S},$$

де μ_0 – магнітна проникність повітря, Гн/м.

Отже за контрольованим струмом можна робити висновок щодо значення тиску P , якому відповідає визначений зазор у магнітній системі.

Принцип дії *індукційного* датчика (рис.76), що реагує на кутові переміщення рухомої системи заснований на тім, що на крайніх стержнях магнітопровода розмішені дві половини обмотки $2(W/2)$, на яку подана напруга $U \approx$ змінного струму підвищеної частоти. Якір $Я$ пов'язаний із рухомою системою, кутове переміщення якої контролюється датчиком. У нейтральному середньому положенні якір розташований симетрично стосовно магнітопровода, коли магнітні провідності повітряних зазорів для потоків Φ_1 і Φ_2 однакові. Поток $\Phi_1 = \Phi_2$. Таким чином, потік у середньому стержні дорівнює нулю і ЕРС у вихідній обмотці не наводиться.

При кутовому переміщенні якоря виявляються неоднаковими магнітні провідності повітряних зазорів і виникає нерівність потоків Φ_1 і Φ_2 . Магнітний потік у середньому стержні стає відмінним від нуля, тому в обмотці W в наведеться ЕРС.

Ємнісні датчики змінюють ємність конденсатора від зміни контрольованої величини. Наприклад, якщо в циліндричному конденсаторі частина простору між циліндрами заповнюється рідиною, а інша – повітрям, то в залежності від зміни обсягу заповнення рідиною змінюється результуюча ємність конденсатора і його реактивний електричний опір. За зміною цього опору можна судити про рівень рідини в резервуарі.

Магнітопружні датчики використовують ефект зміни магнітної проникності деяких матеріалів із появою в них механічної напруги й деформації. Від магнітної проникності магнітопровода, на який намотана обмотка, залежить індуктивний електричний опір цієї

обмотки. Якщо вона включена в коло змінного струму, то зміна магнітної проникності при механічному впливі в пристрої приведе до відповідної зміни струму.

Автоматичні регулятори й стабілізатори призначені для підтримки на заданому рівні вихідного параметра об'єкта чи керування регулювання. Такими параметрами можуть бути напруга генератора, температура об'єкта чи струм в електричній схемі установки.

Стабілізатори (поширені стабілізатори електричного струму, напруги й потужності) поділяються на параметричні, компенсаційні й імпульсні.

Дія **параметричних стабілізаторів** заснована на використанні нелінійних елементів, що включаються до схеми послідовно з лінійними елементами таким чином, щоби при широкому діапазоні змін вхідного параметра вихідний параметр змінювався значно менше, ніж вхідний параметр.

У **компенсаційних стабілізаторах** вихідний параметр порівнюють із заданим, у результаті виробляється різницевий сигнал, що впливає на виконавчий елемент стабілізатора доти, поки цей сигнал не наблизиться до нуля.

Імпульсні стабілізатори найбільш економічні, тому що вихідний регулюючий елемент працює в ключовому режимі. При цьому падіння напруги на ньому мінімальне, отже мінімальними є втрати електричної енергії.

Підсилювачі здійснюють функцію посилення електричного сигналу. Їхня основна характеристика – залежність вихідного параметра $I_{\text{вих}}$ від вхідного $I_{\text{вх}}$. Має монотонний характер (без розривів і стрибків) (рис.8), плавна зміна вхідного сигналу викликає плавну зміну вихідного параметра.

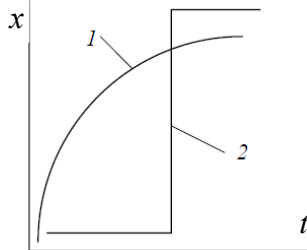


Рис.8. Плавна (1) і стрибкоподібна (2) зміни вихідного сигналу

Магнітні й напівпровідникові підсилювачі є основою апаратів, що забезпечують стрибкоподібну залежність між $I_{вих}$ і $I_{вх}$. Їх називають безконтактними комутаційними апаратами.

Найпростіший магнітний підсилювач – це електромагнітний елемент, індуктивний електричний опір якого змінюється в широких межах. У дроселі насичення є дві обмотки (рис.10).

Обмотка навантаження n включена в коло змінного струму i_n , обмотка керування $w_{кер}$ – в колі постійного струму $i_{кер}$. Струм навантаження i_n залежить від суми індуктивних опорів: об'єкта навантаження X_n і магнітного підсилювача X_M (X_M залежить від магнітного стану магнітопроводу.) У загальному випадку індуктивний опір дорівнює:

$$X = \omega L = \omega \frac{w_n \Phi}{i} = \omega \frac{w_n i w_n}{i R_M} = \omega \cdot w_n^2 \frac{\mu S}{l_M},$$

де ω – кутова частота струму, що намагнічує; w_n – число витків навантажувальної обмотки; Φ – магнітний потік; R_M – магнітний опір магнітопроводу; S , l_M – поперечний переріз і довжина сталевго магнітопроводу. Якщо осердя не намагнічується постійним струмом ($i_{кер} = 0$), то в магнітопроводі буде створюватися лише магнітний потік від струму i_n в обмотці w_n – він буде невеликий, магнітопровід залишається ненасиченим, його ефективна магнітна проникність висока, а індуктивний опір X великий ($X_M > X_n$). Тоді струм навантаження $i_n = U / (X_n + X_M)$ буде невеликий.

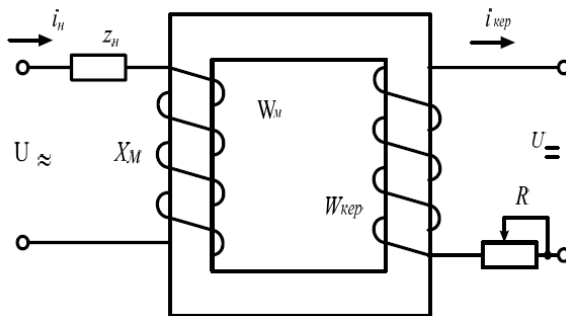


Рис.10. Схема магнітного підсилювача

Якщо ж здійснити підмагнічування постійним струмом ($i_{кер} > 0$), то в магнітопроводі будуть існувати два магнітних потоки: від струму i_n через обмотку w_n і від струму $i_{кер}$ через обмотку $w_{кер}$. Результуючий магнітний потік і індукція в сталевому магнітопроводі зростуть, матеріал магнітопроводу ввійде в режим насичення, магнітна проникність цього матеріалу різко знизиться й індуктивний електричний опір X_m зменшиться. У колі змінного струму потече повний струм навантаження. У такий спосіб подача струму керування $i_{кер}$ до обмотки $w_{кер}$ "вмикає" повний струм навантаження i_n в колі змінного струму, а зняття струму керування "вимикає" струм навантаження.

Напівпровідникові підсилювачі будуються на базі транзисторів, тиристорів та інших подібних приладів.

Функцію безупинної (періодичної) комутації струму виконують різні перетворювачі змінного струму в постійний (і навпаки), перетворювачі одного рівня постійної напруги в інші (перетворювачі напруги) та ін.

Питання до самоперевірки

1. Яке призначення апаратів автоматики?
2. Принцип дії найпростішого електромагнітного реле.
3. Призначення дистанційного реле опору.
4. Призначення датчиків.
5. Принцип дії найпростішого магнітного підсилювача.
6. Принцип дії магнітокерованих контактних апаратів (герконів).
7. Принцип дії теплових реле.
8. Призначення і принцип дії біметалічної пластини теплового реле.
9. За якими показниками напівпровідникові реле перевершують електромагнітні?
10. Призначення реле часу і програмних реле.
11. Призначення автоматичних регуляторів і стабілізаторів.

Тема 2. Електромеханічні явища в апаратах. Основні закони в магнітних колах.

При виникненні навколо провідника зі струмом магнітного поля навколишнє середовище набуває особливих властивостей, що визначають можливість електромагнітних взаємодій між провідниками зі струмом і феромагнітними тілами.

Основний різновид електромагнітних взаємодій – індукційно-динамічні, які виникають у системах зі струмами, що змінюються. Їх сутність зводиться до того, що в провідниковому елементі (диску, котушці), вміщеному в магнітне поле, що змінюється, наводиться ЕРС і з'являється наведений струм. Цей струм створює магнітний потік. Взаємодія потоку від наведеного струму з основним магнітним потоком приводить до виникнення механічних сил. Отже індукційні динамічні сили також визначають взаємодію двох потоків, створених різними струмами.

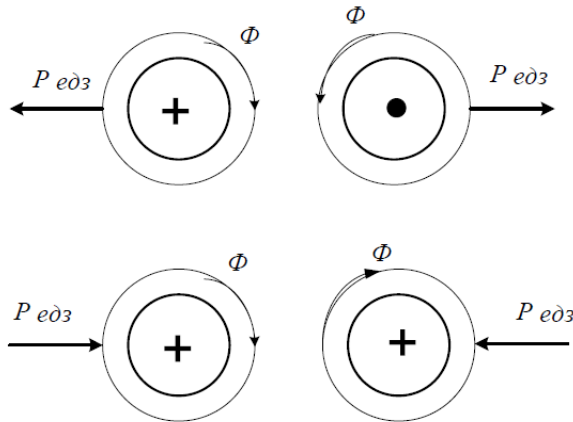


Рис.11. Електродинамічні сили
(P_{edz} – електродинамічне зусилля; Φ – магнітний потік)

В електромагнітах електромагнітне поле (рис.12) створюється струмами, що протікають по обмотках намагнічування. Струм i_0 в обмотці w створює потік Φ_0 . Під його впливом займають визначене спрямоване положення мікроструми у феромагнетику – матеріал намагнітиться, з'явиться потік Φ_1 за рахунок мікрострумів i_1, i_2, i_3 і т.д.

Сила поздовжнього тяжіння з'явиться у вигляді електромагнітних сил притягання рухомого елемента A до нерухомого полюса B у зазорі δ_1 (аналогічні сили будуть діяти й у неробочому зазорі δ_2).

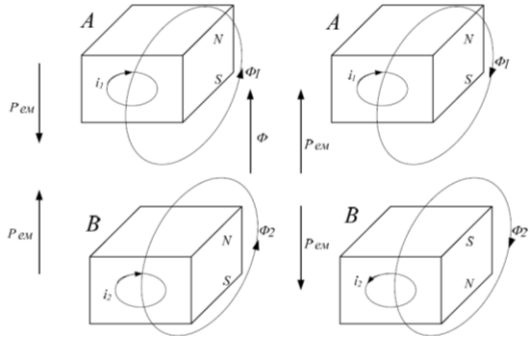


Рис.12. Електромагнітні взаємодії

Сили відштовхування в електромагнітах не виникають, тому що потік орієнтує мікроструми і потік від них тільки в одному напрямку (рис.13).

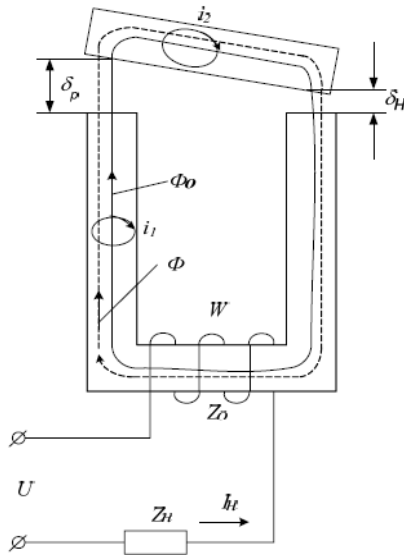


Рис.13. Магнітне поле в електромагніті

Таким чином, електромагнітна сила притягання полюсів, що виникає в електромагнітах, може бути пояснена як результат взаємодії мікрострумів у якорі зі струмом в обмотці, що намагнічує, і мікрострумами в нерухомому сталевому магнітопроводі.

Електромагнітне поле характеризується наявністю у визначеній сфері простору взаємозалежних електричних і магнітних полів. Воно створюється струмами, що протікають провідниками чи обмотками, а також мікрострумами у феромагнітних матеріалах (постійні магніти).

Взаємозв'язок між електричними і магнітними характеристиками цього поля описують рівняння Максвелла.

Перше рівняння в елементарних умовах щодо обмотки з числом витків W і струмом i записують так:

$$\sum Hl = iw$$

Друге рівняння Максвелла показує взаємозв'язок між електричними і магнітними параметрами поля в динамічному режимі їхньої зміни:

$$\int E dl = -\frac{d\Phi}{dt},$$

де dl – довжина ділянки контуру, м; Φ – магнітний потік, Вб; E – напруженість електричного поля, В/м; t – час, с.

Ця формула виражає закон електромагнітної індукції Фарадея, що в елементарній формі має вигляд:

$$e = -\frac{d\psi}{dt},$$

де e – електрорушійна сила, що наводиться, В; ψ – потокозчеплення, Вб:

$$\psi = w\Phi.$$

Щодо електромагнітних елементів синусоїдального змінного струму закон Фарадея записують так:

$$E = 4,44 f w \Phi_m.$$

де U – напруга, В (діюче значення); f – частота, Гц; w – число витків

обмотки; Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку, Вб.

Магнітне поле в практичних умовах звичайно організують шляхом застосування магнітопровідникових матеріалів – феромагнетиків. Сталеві магнітопроводи мають малий магнітний опір для магнітного потоку. Їх використовують для підведення магнітного потоку до тієї чи іншої робочої зони, аналогічно електричним провідникам, що підводять струм до навантаження (двигуна, резистора і т.д.).

Звичайно магнітні поля в електромагнітних елементах є об'ємними. Але в ряді випадків можна обмежитися розглядом плоско – рівнобіжної структури поля.

Електромагнітні пристрої апаратів мають феромагнітні елементи, що різко зменшують магнітний опір для потоку, і повітряні зазори, утворені стиками феромагнітних деталей (паразитні зазори), чи спеціально створювані робочі повітряні зазори. Завдяки різниці магнітних провідностей повітря і феромагнетика в робочих зазорах створюється сила притягання сталевих деталей одна до одної, що використовують для переміщення рухомих елементів (тяговий електромагніт).

В інших видах апаратів у магнітному полі повітряного зазору розташовується провідник (рамка) зі струмом, що переміщується в результаті взаємодії струму з магнітним потоком (феродинамічна система) і та ін.

Для електромагнітів характерні три види магнітних потоків: **робочий потік** – Φ_δ у зазорі δ_p , що створює електромагнітну силу притягання якоря до полюса електромагніта;

потік випучування $\Phi_{вин}$ із граней поблизу робочого повітряного зазору δ_p , що також створює деяку частку тягової сили;

потік розсіювання – між стержнями магнітопроводу. Якщо уподібнити магнітний потік струму в електричному колі, то за аналогією з електричними колами можна скласти еквівалентну схему заміщення магнітного кола.

Ділянки магнітопроводу і повітряні зазори зображують у вигляді опорів. Магнітний опір на кожній із ділянок вважають незмінним уздовж ділянки.

2.1. Розрахунок магнітних кіл

Під магнітним колом розуміють сукупність тіл і середовищ, в якій під впливом збудника магнітного поля виникає потік магнітної індукції.

Магнітне поле виникає завжди, коли через провідне середовище протікає постійний струм. Графічно поле зображують у вигляді магнітних силових ліній і в кожній точці воно характеризується вектором магнітної індукції \vec{B} , спрямованим по дотичній до лінії поля. На рис.14 представлено магнітне поле прямолінійного струму.

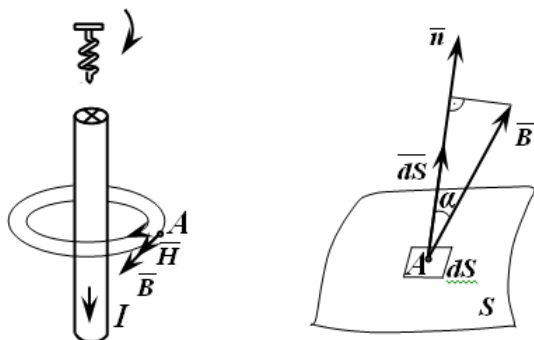


Рис.14. Магнітне поле прямолінійного струму

Однією з основних характеристик магнітного поля є скалярна величина – магнітний потік Φ , тобто потік вектора магнітної індукції \vec{B} через деяку поверхню S (рис.14):

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos(\vec{B}, d\vec{S}),$$

який може мати додатне або від'ємне значення в залежності від кута α , утвореного напрямками векторів \vec{B} і $d\vec{S}$.

Оскільки лінії магнітної індукції неперервні та замкнені, то потік вектора магнітної індукції крізь замкнену поверхню дорівнює нулю:

$$\Phi = \oiint \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

В однорідному магнітному полі, коли для всіх точок простору вектор магнітної індукції $\vec{B} = const$ і напрямок його перпендикулярний до площини S ($\alpha = 0^\circ$; $\cos \alpha = 1$), то магнітний потік

$$\Phi = BS,$$

що дає право говорити про величину вектора магнітної індукції, як про його потік, віднесений до одиниці поверхні:

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

При неоднорідному полі ця формула має вигляд:

$$B = \frac{d\Phi}{dS}.$$

У міжнародній системі одиниць (SI) магнітна індукція вимірюється в теслах (Тл) або веберах на квадратний метр ($Bб/м^2$), а магнітний потік у веберах (Вб).

При розрахунку магнітних кіл застосовують також допоміжну величину – вектор напруженості магнітного поля \vec{H} , який за напрямком збігається з вектором магнітної індукції \vec{A} і зв'язаний з ним співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H},$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність середовища, яка враховує роль його внутрішньоатомних струмів у створенні магнітного поля і для вакууму має значення:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м} \approx 1,256 \times 10^{-6} \text{ Гн/м}.$$

Для діамагнітних матеріалів (вісмут, мідь тощо) $\mu_a \leq \mu_0$ і для парамагнітних матеріалів (платина, алюміній та ін.) $\mu_a \geq \mu_0$, тобто величина абсолютної магнітної проникності майже не відрізняється від значення μ_0 , а для феромагнітних речовин вона в тисячі разів перевищує значення μ_0 і, крім того, нелінійно залежить від величини напруженості магнітного поля: $\mu_a = f(H)$ (рис.15).

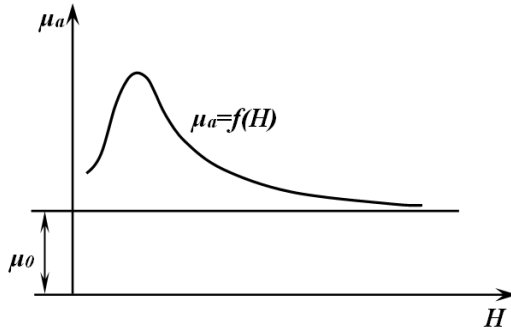


Рис.15. Залежність $\mu = f(H)$

Якщо магнітне поле збуджується в однорідному середовищі, то напруженість H не залежить від магнітних властивостей цього середовища і враховує лише величини намагнічувальних струмів і форму провідників, які вони обтікають.

Напруженість магнітного поля вимірюється в (A/m) .

Між величинами, що характеризують магнітні та електричні кола, існує формальна аналогія, яка дозволяє ввести для магнітних кіл ряд понять, аналогічних поняттям, що використовуються при дослідженні процесів в електричних колах:

1. Магнітний потік Φ аналогічний до струму I в електричному колі.

2. Магніторухійна сила (МРС) або нагнічуючи сила $F = wI$, де w – кількість витків у котушці пристрою, I – струм котушки, аналогічна до електрорухійної сили (ЕРС) в електричному колі:

$$F = wI = \oint \bar{H} d\bar{l}, \text{ A};$$

$$e = \oint \bar{E} d\bar{l}, \text{ B}.$$

Аналогія полягає в тому, що МРС F збуджує в магнітному колі магнітний потік Φ , подібно до того, як ЕРС e створює в електричному колі струм I . Як і ЕРС, МРС є величиною напрямленою. Додатній напрямок МРС співпадає з поступальним рухом правоходового гвинта, якщо його повертати за напрямком струму в котушці. Формальність цієї аналогії в тому, що ЕРС існує й за відсутності струму в електричному колі (якщо коло розімкнене), в той

час як існування МРС завжди пов'язане з одночасним існуванням струму.

3. Магнітна напруга (різниця магнітних потенціалів) аналогічна електричній напрузі:

$$U_{M_{ab}} = \int_a^b \bar{H} \bar{dl}, A$$

$$U_{ab} = \int_a^b \bar{E} \bar{dl}, B.$$

При визначенні магнітної напруги $U_{M_{ab}}$ слід мати на увазі:

а) якщо на ділянці магнітного кола між точками a і b $\bar{H} = const$ і співпадає за напрямком з елементом шляху \bar{dl} , то $\bar{H} \bar{dl} = H dl \cos 0^\circ = H dl$, тому

$$U_{M_{ab}} = H \int_a^b dl = H l_{ab},$$

де l_{ab} – довжина шляху між точками a і b ;

б) якщо на ділянці магнітного кола між точками a і b напруженість $\bar{H} \neq const$, то весь шлях можна поділити на i окремих частин таким чином, щоб для кожної k -тої частини напруженість виявилась сталою величиною ($H_k = const$), тоді

$$U_{M_{ab}} = \sum H_k l_k.$$

4. Магнітний опір аналогічний нелінійному електричному статичному опору:

$$R_M = \frac{U_M}{\Phi} = \frac{l_{cep}}{\mu_a S}, \Gamma H^{-1};$$

$$R_{cm} = \frac{U}{I}, Ом$$

Оскільки магнітна проникність μ_a феромагнітних матеріалів залежить від магнітної індукції B ($\mu_a = f(B)$), то магнітний опір R_M

не може розглядатись як постійна величина; якщо магнітне коло утворене ділянками з різною магнітною проникністю, то магнітні опори ділянок будуть різні.

5. Магнітна провідність аналогічна електричній провідності:

$$G_M = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu_a S}{l_{\text{сер}}}, \text{ Гн};$$

$$G = \frac{1}{R_{\text{см}}}, \text{ См.}$$

У загальному випадку R_M та G_M – функції магнітного потоку Φ (непостійної величини), тому поняттями R_M та G_M при розрахунках користуються лише в тих випадках, коли магнітне коло в цілому, або його ділянка, для якої визначається R_M та G_M , не насичені (частіше за все це буває, коли в магнітному колі наявний досить великий повітряний проміжок).

Закон повного струму. Циркуляція вектора напруженості H магнітного поля по замкненому контуру довжиною l рівна алгебраїчній сумі струмів ($\sum I$), які охоплюються цим контуром:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I.$$

Якщо контур інтегрування охоплює w витків котушки, які обтікає струм I , то закон повного струму набуває вигляду:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = wI = F.$$

Перший закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума магнітних потоків у будь-якому вузлі магнітного кола рівна нулю:

$$\sum \Phi = 0.$$

Другий закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума МРС, що діють у будь-якому контурі магнітного кола, дорівнює алгебраїчній сумі магнітних напруг на тому ж контурі:

$$\sum wI = \sum F = \sum U_M = \sum Hl.$$

Другий закон Кірхгофа для магнітних кіл по суті являє собою іншу форму запису закону повного струму.

Закон Ома ($U_M = R_M \Phi$) у більшості випадків не може бути застосований для розрахунку магнітних кіл внаслідок того, що магнітний опір R_M – змінна величина ($R_M = f(\Phi)$).

2.2. Різновидності магнітних кіл

Магнітні кола, так само, як і електричні, можуть бути нерозгалуженими і розгалуженими.

На рис.16 зображено нерозгалужене магнітне коло, в якому магнітопровід складається з двох однорідних феромагнітних ділянок завдовжки відповідно l_1 й l_2 , а також двох однакових повітряних проміжків довжиною l_n кожен.

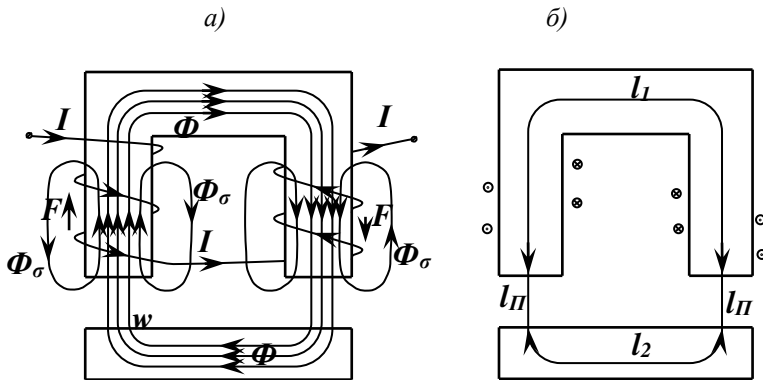


Рис.16. Нерозгалужене магнітне коло

Обмотка збудження, складена з двох послідовно з'єднаних котушок із загальним числом витків w , обтікається струмом I і створює намагнічувальну силу $F = wI$, яка збуджує основний магнітний потік Φ , однаковий для всіх перерізів магнітопроводу, і невеликий магнітний потік розсіювання Φ_σ , що замикається в навколишньому повітряному середовищі.

Основною частиною магнітного кола є феромагнітні ділянки, які під впливом намагнічувальної сили F намагнічуються самі і забезпечують необхідну конфігурацію магнітного поля, тим часом як повітряні проміжки мало впливають на форму магнітних силових ліній, але істотно впливають на величину збуджуючого магнітного потоку.

При розрахунку магнітних кіл існує два типи задач: пряма і обернена.

Пряма магнітна задача. Задано: магнітний потік Φ , геометричні розміри магнітопроводу, крива намагнічування магнітопроводу та кількість витків w обмотки. Необхідно визначити намагнічувальну силу $F = wI$, а потім і струм I обмотки намагнічування.

Спочатку знаходять величини магнітної індукції B_i на кожній ділянці магнітопроводу, як $B_i = \Phi / S_i$, за якими визначають відповідні напруженості магнітного поля \dot{I} , на окремих ділянках магнітного кола, де S_i – площа поперечного перерізу i -тої ділянки магнітопроводу.

Для феромагнітних ділянок величини \dot{I} , визначають за кривою намагнічування $B_i = F(H_i)$, яка відповідає даному матеріалу, а для повітряних проміжків за формулою:

$$H_{II} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{1,256 \times 10^{-6}} \cong 0,8 \times 10^6 \text{ B}.$$

Враховуючи, що в межах кожної однорідної ділянки величина напруженості H магнітного поля залишається практично сталою, застосуємо закон повного струму для середньої магнітної лінії магнітопроводу, на якому знаходяться w витків котушки з струмом I :

$$H_1 l_1 + 2H_{II} l_{II} + H_2 l_2 = wI.$$

Знайдене значення намагнічувальної сили $F = wI$ звичайно збільшують на 10 ÷ 20% для врахування магнітного потоку розсіювання Φ_σ .

Оскільки основним опором нерозгалуженого магнітного кола є повітряний проміжок, то при попередніх розрахунках можна

знехтувати магнітними напругами H_1l_1 і H_2l_2 і вважати, що намагнічувальна сила:

$$F \approx 2H_{II}l_{II}.$$

Вибір числа витків w обмотки збудження є неозначеною задачею, якщо не відома величина напруги, що її живить, оскільки необхідна намагнічувальна сила $F = wI$ може бути створена при будь-якій комбінації величини струму, що тече в обмотці збудження, і числа її витків w . При заданій напрузі число витків w обмотки визначається за формулою:

$$w = U \frac{kS_0}{\rho l_{cep} F}.$$

Обернена магнітна задача. Коли розв'язується обернена магнітна задача, тобто коли необхідно за заданою намагнічувальною силою $F = wI$ визначити збуджуваний нею магнітний потік Φ , задають ряд значень магнітного потоку $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, визначають для кожного з них відповідну намагнічувальну силу $(wI)_1, (wI)_2, \dots, (wI)_n$, а потім будують магнітну характеристику $\Phi = F(wI)$, що дає можливість знайти графічно необхідний магнітний потік Φ за заданою величиною намагнічу вальної сили wI (рис.17).

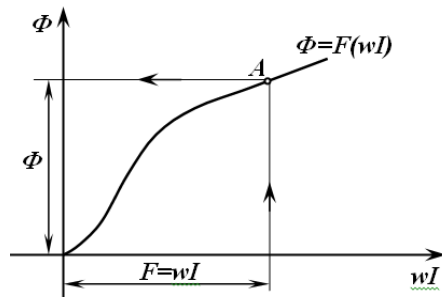


Рис.17. Залежність $\Phi = f(F)$

Розрахунок величин магнітних потоків у розгалуженому магнітному колі, збуджених намагнічувальними силами обмоток,

розміщених на окремих ділянках магнітопроводу, проводять, виходячи з принципу неперервності магнітного потоку, згідно з яким алгебраїчна сума потоків в ділянках магнітного кола, збіжних до одного вузла, дорівнює нулю, тобто $\sum \Phi_i = 0$, і співвідношення $\sum w_i l_i = \sum H_i l_i$, яке показує, що в будь-якому контурі магнітного кола алгебраїчна сума намагнічувальних сил дорівнює алгебраїчній сумі добутоків напруженостей магнітного поля на відповідні їх довжини ділянок магнітного кола.

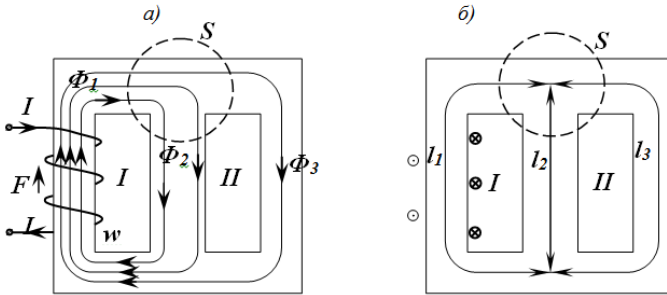


Рис.18. Розгалужене магнітне коло

Якщо магнітні потоки, спрямовані до вузла, вважати додатними, а потоки спрямовані від вузла, – від’ємними, то стосовно до вузла S розгалуженого магнітного кола (рис.18,*a*) рівняння неперервності магнітного потоку запишеться так:

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

При обході контурів I і II в напрямку обертання годинникової стрілки можна записати ще два рівняння:

$$wI = H_1 l_1 + H_2 l_2;$$

$$0 = H_3 l_3 - H_2 l_2.$$

Оскільки між величинами магнітних потоків Φ_1, Φ_2, Φ_3 і відповідними їм напруженостями магнітного поля H_1, H_2, H_3 існує нелінійна залежність, яка визначається відповідними кривими намагнічування $B_i = F_i(H_i)$, то систему рівнянь зручно розв’язати графічно.

Для цього необхідно для кожної ділянки розгалуженого магнітного кола побудувати криву $\Phi_i = F_i(H_i l_i)$, для чого треба абсцису кожної кривої намагнічування $B_i = F_i(H_i)$ помножити на довжину l_i відповідної ділянки магнітопроводу, виміряну по середній магнітній лінії, а ординату кожної кривої помножити на площу S_i поперечного перерізу тієї ж ділянки.

Криві $\Phi_1 = F_1(H_1 l_1)$, $\Phi_2 = F_2(H_2 l_2)$ і $\Phi_3 = F_3(H_3 l_3)$ відповідно для трьох стрижнів магнітопроводу побудовано на рис.19.

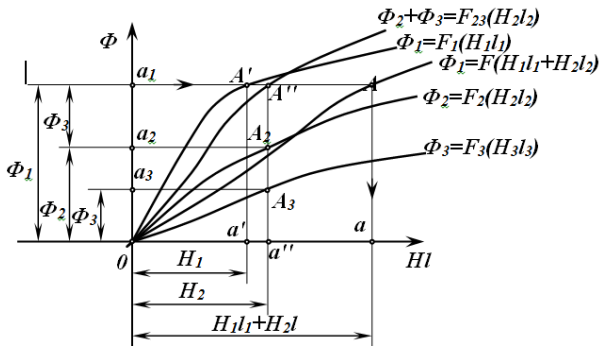


Рис.19. Криві $\Phi_1 = F_1(H_1 l_1)$, $\Phi_2 = F_2(H_2 l_2)$ і $\Phi_3 = F_3(H_3 l_3)$

Розв'яжемо графічно рівняння. З цією метою, додаючи ординати кривих $\Phi_2 = F_2(H_2 l_2)$ і $\Phi_3 = F_3(H_3 l_3)$, знайдемо криву $\Phi_2 + \Phi_3 = F_{23}(H_2 l_2)$, додаючи до абсцис якої відповідні абсциси кривої $\Phi_1 = F_1(H_1 l_1)$, одержимо криву $\Phi_1 = F(H_1 l_1 + H_2 l_2)$, на якій можна за відомою величиною магнітного потоку Φ_1 знайти відповідну їй величину магнітної напруги $(H_1 l_1 + H_2 l_2)$, яка дорівнює шуканій намагнічувальній силі wI .

Одночасно з цим визначаються магнітні напруги $H_1 l_1$ і $H_2 l_2$ проєкціями точок A' й A'' на вісь абсцис і величини магнітних потоків Φ_2 і Φ_3 , як ординати точок A_2 й A_3 .

При врахуванні магнітних потоків розсіювання така задача розв'язується методом послідовного наближення.

2.3. Нелінійні магнітні кола змінного струму

Для підсилення магнітного поля і надання йому необхідної конфігурації – машини і апарати змінного струму містять в собі сталеві осердя (магнітопроводи). Щоб зменшити втрати енергії від вихрових струмів при частоті змінного струму $f = 50 \text{ Гц}$ ці осердя виконують з листової електротехнічної сталі товщиною $0,25 \pm 0,5 \text{ мм}$.

Залежність магнітного потоку від струму нелінійна, але зміна в часі магнітного потоку практично синусоїдна. Доведемо це.

Якщо котушку з осердям під'єднати до джерела синусоїдної напруги (рис.20, а):

$$u = U_m \sin \omega t ,$$

то змінний струм в котушці згідно з законом електромагнітної індукції збудить в осерді змінний магнітний потік Φ . Цей потік індукує в котушці ЕРС самоіндукції:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt} ,$$

де W – кількість витків котушки.

Ця ЕРС непропорційна збуджуючому струму, так як індуктивність котушки з осердям не є сталою величиною ($L \neq const$).

Струм в котушці створюється спільною дією прикладеної напруги $u(t)$ і ЕРС, індукованою магнітним потоком Φ :

$$i = \frac{u + e}{R} ,$$

де R – активний опір котушки.

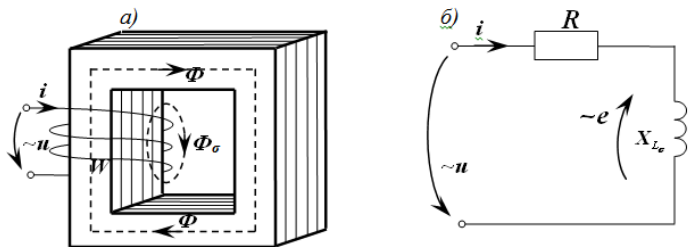


Рис.20. Котушка з осердям

Перепишемо рівність у вигляді:

$$u = R \cdot i - e$$

і отримаємо

$$U_m \sin \omega t = R \cdot i + w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Так як $R \cong 0$, то й $R \times i \cong 0$ і тоді:

$$U_m \sin \omega t = W \frac{d\Phi}{dt}.$$

Звідси знаходимо закон зміни магнітного потоку в часі:

$$d\Phi = \frac{U_m}{W} \sin \omega t dt;$$

$$\Phi = \frac{U_m}{W} \int \sin \omega t dt = \frac{U \sqrt{2}}{W \omega} \cos \omega t + A = \frac{U}{4,44 f W} \sin(\omega t - 90^\circ) = \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Тут враховано, що постійна інтегрування A являє собою постійний магнітний потік в осерді, який при усталеному процесі рівний нулю.

Синусоїдна напруга, яка прикладена до котушки, змушує магнітний потік в осерді змінюватись у часі також синусоїдно.

Знайдемо вираз для ЕРС самоіндукції. Для спрощення прийемо початкову фазу магнітного потоку Φ рівною нулю:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t.$$

Тоді ЕРС самоіндукції:

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W \Phi_m \cos \omega t = \omega W \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

відстає за фазою від магнітного потоку на кут 90° .

Амплітудне значення ЕРС:

$$E_m = \omega W \Phi_m.$$

Діюче значення ЕРС:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} W \Phi_m = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} W = 4,44 f W \Phi_m .$$

Таким чином, ми одержали рівняння трансформаторної ЕРС:

$$E = 4,44 f W \Phi_m .$$

Питання до самоперевірки

1. Проаналізуйте взаємодію двох рівнобіжних провідників при однаковому напрямку струму в них.
2. Проаналізуйте взаємодію двох рівнобіжних провідників при різних напрямках струму в них.
3. Проаналізуйте сутність індукційно–динамічних взаємодій у системах зі струмами, що змінюються.
4. Чому в електромагнітах не виникають сили відштовхування якоря від осердя при будь–якому напрямку струму в обмотці?
5. Поясніть перше рівняння Максвелла в елементарних умовах стосовно до обмотки з числом витків W і струмом i .
6. Поясніть закон електромагнітної індукції Фарадея в елементарній формі.
7. Поясніть закон електромагнітної індукції Фарадея щодо електромагнітних елементів змінного струму.
8. Закон розрахунку магнітних кіл.
9. Поясніть закон повного струму для магнітних кіл.

Тема 3. Електромагніти постійного струму

В електромагнітах постійного струму магнітний потік створюють обмоткою постійного струму. Дія таких електромагнітів не залежить віднапрямку струму в обмотці. Вони найбільш економічні, і завдяки великій розмаїтості конструктивного виконання їх можна пристосовувати до різних умов роботи і різних характерів навантажень; їх використовують як привід для здійснення необхідного переміщення.

Прикладом подібних електромагнітів є **тягові**, що призначені для конкретної механічної роботи при переміщенні тих чи інших робочих органів: електромагнітні муфти зчеплення і гальмування і гальмові електромагніти, електромагніти, що приводять в дію контактні пристрої в контакторах і автоматичних вимикачах; електромагніти реле, датчиків, регуляторів та інших пристроїв.

3.1. Тягова характеристика електромагніту

Тягова характеристика (статична) являє собою залежність електромагнітної сили від робочого зазору для різних постійних значень напруги, підведеної до обмотки, чи струму в обмотці: $P_{em} = f(\delta)$ при $U = const$ чи $P_{em} = f(\delta)$ при $i = const$.

У найпростішому випадку, коли можна знехтувати розсіюванням і магнітним опором сталі ($R_{m\Sigma} = R_\delta$), вважаючи поле в робочому зазорі рівномірним, застосувавши формулу

$$\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$$

для його провідності, формулу Максвела

$$P_{em} = \frac{B^2 S}{2\mu_0},$$

для електромагнітної тягової характеристики одержимо залежність

$$P_{em} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\Phi_\delta^2 S}{2\mu_0 S^2} = \frac{\Phi_\delta^2}{2\mu_0 S} = \frac{(iw)^2 \cdot \Lambda_\delta^2}{2\mu_0 S} = \frac{(iw)^2}{2\mu_0 S} \cdot \left(\frac{\mu_0 S}{\delta}\right)^2 = \frac{\mu_0 S^2 F^2}{2\delta^2},$$

де $\Phi = iw\Lambda_\delta$.

3.2. Протидіючі зусилля електромагніта

Протидіючі зусилля (навантаження) електромагніта являють собою залежність протидіючих сил (у загальному випадку приведених до точки прикладення електромагнітної сили) від робочого зазору $P_n = f(\delta)$. На рис.21 ця залежність наведена у вигляді двох пружин, що вступають у дію.

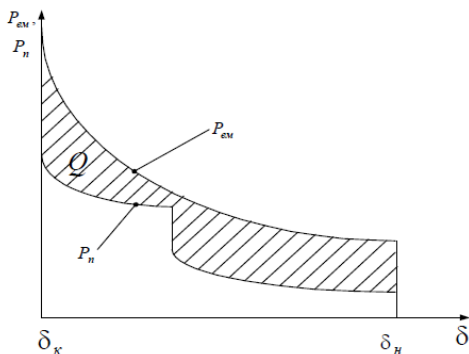


Рис.21. Протидіюча характеристика $P_n = f(\delta)$ і тягова характеристика $P_{ем} = f(\delta)$

Зіставлення протидіючої і тягової характеристики дає змогу зробити висновок (попередньо, без урахування динаміки) щодо працездатності електромагніта. Для нормального спрацьовування електромагніта необхідно, щоб тягова статична характеристика, побудована при $I_{cp} = const$ на всьому діапазоні зміни ходу якоря, проходила вище протидіючої; для чіткого відпускання (повернення), навпаки, тягова характеристика, побудована при $I_{відн} = const$, має проходити нижче протидіючої.

Час спрацьовування електромагніта – це час із моменту подачі сигналу на обмотку електромагніта до переходу якоря в його кінцеве положення. За інших рівних умов воно є функцією початкової протидіючої сили P_{nn} і заштрихованої площі Q на рис.22.

До основних параметрів електромагніта належать наступні:

Гранична потужність, споживана електромагнітом, може обмежуватися як величиною припустимого нагрівання його обмотки, так (у деяких випадках) і умовами живлення кола обмотки електромагніта.

Коефіцієнт запасу (K_3). У більшості випадків МРС рухання можна вважати рівною МРС спрацьовування електромагніта. Відношення МРС, що відповідає сталому значенню струму ($I_{ст}$), до МРС спрацьовування (відповідно до струму спрацьовування $I_{спр}$) (рис.22) називають коефіцієнтом запасу:

$$K_3 = \frac{F_{ст}}{F_{спр}} = \frac{i_{ст}}{i_{спр}} > 1.$$

Параметр спрацьовування являє собою мінімальне значення струму чи напруги, за якого відбувається спрацьовування електромагніта (переміщення якоря від δ_n до δ_k).

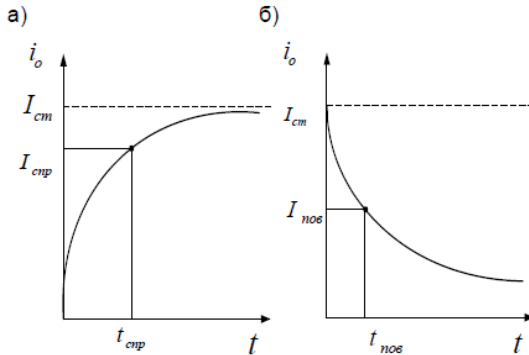


Рис.22. Струм в обмотці електромагніта (i_o) при включенні (а) і виключенні (б)

Параметр відпускання (повернення). Відповідно максимальне значення струму чи напруги, за якого якір повертається до вихідного положення.

Коефіцієнт повернення ($K_{нов}$) – це відношення МРС, при якому відбувається повернення якоря в первісне положення, до МРС спрацьовування називається коефіцієнтом повернення електромагніта:

$$K_{нов} = \frac{F_{нов}}{F_{спр}} = \frac{i_{нов}}{i_{спр}},$$

де $I_{нов}$ – струм повернення електромагніта.

Для звичайних електромагнітів коефіцієнт повернення завжди менше одиниці.

При включенні електромагніта на напругу струм в обмотці змінюється в часі, причому закон зміни струму буде різним: один – до початку руху якоря, другий – інший, коли якір рухається. Тому розрізняють час зрушення якоря і час його руху. Розгляд цих процесів виконують окремо.

На рис.23 наведена залежність струму для ненасиченого електромагніта постійного струму. До початку руху якоря (при початковому зазорі) струм змінюється за експонентою з електромагнітною постійною часу $\tau_{e.n.}$

Після закінчення зрушення t_{zp} починається рух якоря і струм змінюється за кривою «*ab*», що відповідає часу руху t_p . Точка *b*, що лежить на кривій 2, відповідає часу спрацьовування $t_{спр.}$. Після зупинки якоря струм змінюється за експонентою 2 з постійною часу $\tau_{e.к.}$

При включенні електромагніта на напругу U_0 рівняння має вид:

$$U_0 = iR + \frac{d\Psi}{dt}.$$

Представимо потокозчеплення як $\Psi = L_\delta i$, де L_δ – динамічне значення індуктивності електромагніта. Тоді

$$U_0 = iR + L_\delta \frac{di}{dt} + i \frac{dL_\delta}{dt}.$$

У першій стадії включення (ділянка О–а, що на рис.24) індуктивність $L_\delta = L$ можна вважати незмінною, тому що повітряний зазор ($\delta = \delta_n$) і його магнітний опір постійний, а магнітопровід звичайно ненасичений і його магнітний опір можна вважати як таким, що дорівнює нулю.

Вирішення його при початковій умові $t=0$,

$$i = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{en}}} \right),$$

де τ_{en} – початкова постійна часу $\tau_{en} = L/R$.

На ділянці «*ab*» (рис.23) відбувається рух якоря, при цьому струм у обмотці зазвичай зменшується.

Якщо ярів рухається, то індуктивність уже не є постійною – вона збільшується. У цьому випадку завдяки електромагнітній індукції в обмотці наводиться проти – ЕРС руху, що зменшує діючу напругу $U_0 - i \frac{dL_0}{dt}$, яка і призводить до зниження струму:

$$i = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{em}}} \right),$$

де $\tau_{ек}$ – кінцева постійна часу $\tau_{ек} = L_{к} / R, L_{к} > L$.

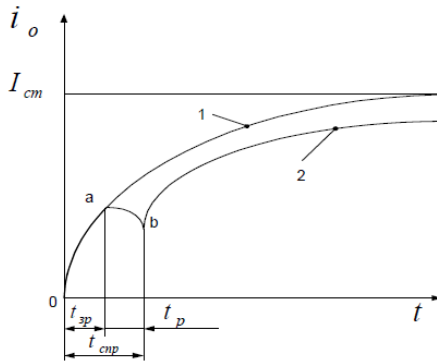


Рис.23. Залежність струму котушки електромагніта від часу його включення, де $t_{зр}$ – час зрушення електромагніта; t_p – час руху; $t_{сnp}$ – час спрацьовування; I_{cm} – стале значення струму

Питання до самоперевірки

1. Що називається протидіючою (механічною) і тяговою характеристикою електромагніта?
2. Перелічіть основні параметри електромагніта.
3. Проаналізуйте основні фактори, що впливають на час спрацьовування електромагніта.
4. Проаналізуйте вплив на контактну систему розташування тягової характеристики електромагніта нижчою протидіючою.
5. Дайте визначення “коефіцієнта запасу” як одного з основних параметрів електромагніта.
6. Охарактеризуйте потужність, котру споживає електромагніт, як один з основних параметрів електромагніта.

Тема 4. Електромагніти змінного струму

Електромагніти змінного струму мають ряд недоліків, не притаманних електромагнітам постійного струму:

- при заданій площі полюса середня сила тяги вдвічі менша, ніж у електромагніта постійного струму;

- кожна одиниця виконаної роботи вимагає визначеної реактивної потужності, що росте пропорційно частоті живильної напруги; звідси впливає також і сильна залежність тягових характеристик від частоти;

- конструкційне виконання електромагнітів обмежене через необхідність виконання магнітопроводу шихтованим з тонколистової електротехнічної сталі;

- додаткове нагрівання магнітопроводу в результаті втрат у ньому й у короткозамкнутому витку (останній встановлюється на осерді з метою усунення вібрації якоря);

- слабко зростаюча по ходу якоря тягова характеристика в багатьох випадках обмежує можливості узгодження її з навантажувальною характеристикою;

- низька стійкість при механічних впливах через підвищену вагу рухомих частин і малу надлишкову силу електромагніта при притягнутому якорі.

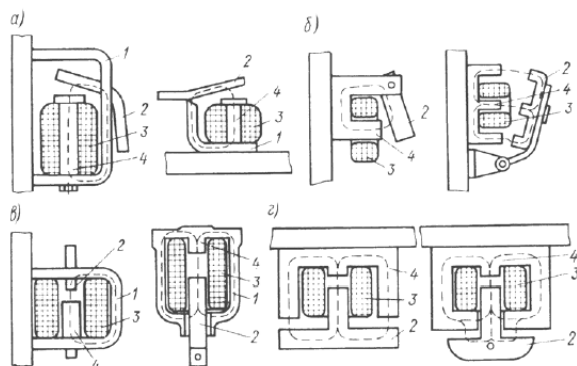


Рис.24. Схеми електромагнітів: а, б – із поворотним якорем; в, г – із прямохідним якорем, 1 – скоба; 2 – якор; 3 – котушка; 4 – осердя

Наявність сучасних високоякісних напівпровідникових діодів дозволяє ціною деякого конструктивного ускладнення пристрою і

збільшення його вартості забезпечити можливість при живленні від мережі змінного струму одержати електромагніт, що працює на випрямленому струмі з характеристиками, близькими до електромагніта постійного струму. Цей напрямок в наразі стає одним із основних у розвитку електромагнітних механізмів змінного струму, особливо для спеціального їхнього застосування.

4.1. Спрацьовування електромагнітів

Прискорення спрацьовування електромагнітів досягається зниженням виникаючих у перехідних режимах вихрових струмів у магнітопроводі (відповідно до принципу інерції Ленца вони викликають магнітні потоки, що перешкоджають динаміці основного процесу), а також застосуванням спеціальних схем (рис.25).

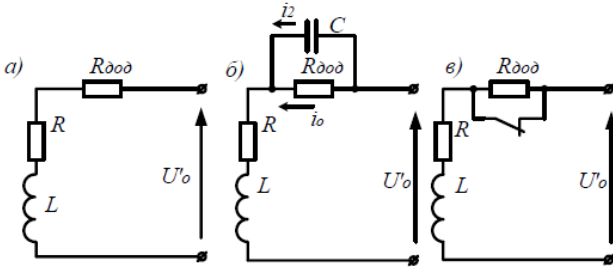


Рис.25. Спеціальні схеми прискорення спрацьовування електромагнітів

Час руху при спрацьовуванні можна зменшити, якщо одночасно зі збільшенням напруги U'_0 включити до схеми додатковий опір $R_{доод}$ (рис.25а), що забезпечує такий же сталий струм, що із напругою U_0 : $I_{cm} = U'_0 / (R + R_{доод})$.

Зменшення часу зрушення тут виходить за рахунок зниження постійної часу ($L / (R + R_{доод})$). Недоліком є те, що це досягається збільшенням втрати потужності в додатковому опорі $R_{доод}$.

У схемі (рис.25б) форсування струму в порівнянні з попередньою схемою виходить за рахунок того, що в перший момент часу після подачі напруги U не заряджена ще ємність C створює, шунтуючи $R_{доод}$, додатковий шлях для струму. Тому за рахунок струму зарядки конденсатора в обмотці електромагніта струм зростає швидше. Недолік цієї схеми – наявність конденсатора значної ємності.

На рис.25в зображена схема форсування спрацьовування за рахунок збільшення струму спрацьовування, тому що додатковий опір включається лише після того, як відбудеться спрацьовування, розімкнеться контакт і струм утримання складе $I_{ymp} = U_o / (R + R_{доо})$. Цей струм завжди менший струму спрацьовування. Недоліком схеми є наявність додаткового (вільного) контакту, що розмикає.

Для уповільнення спрацьовування електромагнітів краще використовувати всі загальні фактори, що приводять до збільшення часу зрушення і часу руху. Найбільш розповсюдженим з перших способів є електромагнітне демпфірування за допомогою короткозамкнених обмоток, виконаних із матеріалу з малим питомим електричним опором (рис.26).

Вихрові струми, що з'являються в екрануючих (охоплюючих магнітопровід) короткозамкнених обмотках чи гільзах у момент замикання (розмикання) основної обмотки, затримують зміну магнітного потоку і створюють уповільнення спрацьовування як при притяганні, так і при відпусканні якоря.

При відпусканні якоря досягається більший сповільнюючий ефект тому що за відключення обмотки перехідний процес відбувається при притягнутому якорі, коли індуктивність системи більша. Тому витримка часу при відпусканні якоря в електромагнітах із короткозамкнутими гільзами може бути отримана в $8 \div 12$ разів більше, ніж при його притяганні.

Робочий процес електромагніта протікає з моменту припинення живлення котушки 4, що намагнічує, до моменту відпускання якоря 3. Витримка часу визначається часом спаду магнітного потоку від початкового значення Φ_n до потоку відпускання $\Phi_{відн}$, при якому механічне зусилля, створюване поворотною пружиною 1, дорівнюватиме електромагнітному зусиллю притягання якоря до осердя 5. Величину цього часу можна регулювати зміною товщини немагнітної прокладки 2 (впливає на початковий потік Φ_n) чи зміною натягу пружини (впливає на $\Phi_{відн}$). Підстава і корпус виконані з пруткової сталі, що дає можливість одержати суцільногнутий магнітопровід із меншим, ніж у звичайних клапанних систем, результирующим немагнітним зазором при притягнутому якорі. Крім того, такий магнітопровід дозволяє розмістити додаткові гільзи на корпусі (під котушкою, що намагнічує, 4) і на основі, що заливають силуміном, одержуючи одночасно демпфуючий контур (показаний пунктиром).

Провід і шина. До складу струмоведучих частин апаратів входять провідники різних видів, що є як частиною апарата, так і використовуються для з'єднання його з іншими елементами устаткування.

Провід електрорухомого складу працює в особливих умовах і тому відрізняється від проводу стаціонарного устаткування. Найчастіше використовують одножильний провід підвищеної гнучкості з мідними жилами, посиленою гумовою ізоляцією й посиленним протигнільним оплетенням марки ПС, чи в гумових шлангах марки ПСШ, а також провід і кабель ППСРВМ та ППСРМО для електрорухомого складу, рейкового транспорту й тролейбусів.

Провід з'єднують затискними контактами, обов'язково передбачають заходи, що запобігають саморозгвинчуванню. Через недостатню стійкість до трясіння поза апаратами не можна нарощувати провід пайкою, крім мало відповідальних відгалужень (наприклад, до освітлювальної арматури). Усі з'єднання роблять на затисках апаратів; на кожний затиск можна встановлювати два – три наконечники проводу.

Усі розбірні електричні з'єднання здійснюють, застосовуючи наконечники. Не допускають використовувати кільця, скрутки.

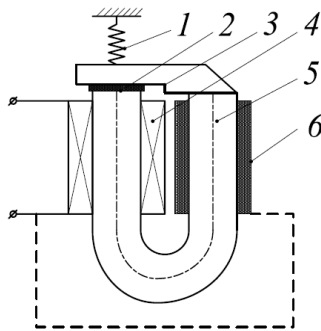


Рис.26. Уповільнення дії електромагніта за допомогою магнітного демпфування

Шину прямокутного перерізу доцільно встановлювати на вузьке ребро й фарбувати в чорний колір. Необхідну площу перерізу шини за цих умов визначають густиною струму в ній. Для нормально охолоджуваної шини з міді, встановленої на вузьке ребро, приймають густиною струму $j = 4 \div 6 \text{ А/мм}^2$.

4.2. Котушки електромагнітів

Котушка – один із головних елементів електромагніта і має задовольняти таким основним вимогам:

- забезпечувати надійне включення електромагніта за найгірших умов, тобто в нагрітому стані, при зниженій напрузі;
- не перегріватися понад припустиму температуру при всіх можливих режимах, тобто при підвищеній напрузі;
- при мінімальних розмірах бути зручною для виробництва;
- бути механічно міцною;
- мати достатній рівень ізоляції, а в деяких апаратах – бути волого-, кислото- і маслостійкою.

У процесі роботи в котушці виникають напруги: **механічні** – за рахунок електродинамічних сил у витках і між витками, особливо при змінному струмі;

термічні – за рахунок нерівномірного нагрівання окремих її частин;

електричні – за рахунок перенапруг, зокрема, при відключенні.

При розрахунку котушки необхідно виконати дві умови: перша – забезпечити необхідну МРС при гарячій котушці та зниженій напрузі; друга – температура нагрівання котушки при цьому має перевищувати припустиму.

У результаті розрахунку мають бути визначені такі величини, що необхідні для намотування: d – діаметр дроту обраної марки; W – число витків; R – опір котушки.

За конструкційним виконанням розрізняють котушки: **каркасні** – намотування здійснюється на металевому чи пластма-совому каркасі;

безкаркасні бандажовані – намотування виконують на знімному шаблоні, після намотування котушки бандажують; **безкаркасні** з намотуванням на осердя магнітної системи.

Електромагнітні механізми застосовують для приведення в дію багатьох апаратів. Конструкція електромагніта може бути класифікована:

1) за способом дії: **утримуючі** – для утримання того чи іншого тягара деталей (наприклад, електромагнітні столи верстатів, електромагніти піднімальних кранів і т.ін.); що **притягають** – роблять певну роботу, притягаючи свій якір;

2) за способом включення: з **рівнобіжною котушкою** – струм у котушці визначають параметрами самого електромагніта і напругою мережі; з **послідовною котушкою** – котушку включають у силове коло; струм у котушці визначають не параметрами електромагніта, а тими пристроями (машини, апарати), в коло яких включена котушка;

3) за родом струму: **постійного струму** – при рівнобіжному включенні струм у котушці залежить від опору її обмотки й прикладеної напруги, електромагнітна система працює за постійної МРС; **змінного струму** – при рівнобіжному включенні струм у котушці залежить від індуктивності системи, що змінюється обернено – пропорційно повітряному зазору; електромагнітна система працює при сталості потокозчеплення; 4) за характером руху якоря: **поворотні** – якір повертається навколо якоїсь осі чи опори (рис.25а,б); **прямоходові** – якір переміщується поступально (рис.25 в, г).

Питання до самоперевірки

1. Проаналізуйте прискорення часу спрацьовування електромагніта при під'єднанні послідовно додаткового резистора і збільшенні напруги живлення.

2. Обґрунтуйте прискорення спрацьовування електромагніта при під'єднанні конденсатора паралельно додатковому послідовно приєднаному резистору.

3. Проаналізуйте роботу електромагнітного реле при шунтуванні додаткового послідовно приєданого резистора контактами даного електромагнітного реле.

4. Проаналізуйте вплив на час спрацьовування електромагніта гільзи з електропровідного матеріалу, яка охоплює магнітопровід.

5. Обґрунтуйте збільшення ефекту сповільненого відпускання реле по відношенню до ефекту збільшення притягання при використанні короткозамкнутої гільзи з електропровідного матеріалу.

6. Порівняйте середнє зусилля притягання електромагнітів постійного і змінного струмів при однаковій площі полюса.

7. Обґрунтуйте переваги електромагнітів постійного струму в порівнянні з електромагнітами змінного струму.

8. Обґрунтуйте необхідність шихтування магнітопроводів електромагнітів змінного струму.

9. Чим обумовлене додаткове нагрівання магнітопроводу електромагніта змінного струму?

Тема 5. Електричні контакти

Електричні апарати складаються з окремих деталей (провідників), електрично з'єднаних між собою. Зіткнення тіл, що забезпечують безперервність електричного кола, називається **електричним контактом**.

Деталь, що стикається з іншою деталлю при утворенні електричного контакту, називається **контакт-деталлю**, а утворення та існування електричного контакту – **електричним контактуванням**.

Електричне контактування (рис.27) є дуже складним явищем. Контактні поверхні завжди мають деяку шорсткість і, як правило, завжди вкриті **плівками**, що утворюються під впливом кисню повітря, озону, азоту та інших хімічних реагентів. Плівки мають товщину до 10^{-6} см і питомий опір $\rho = 10^5$ Ом·см. Металеве контактування здійснюється не всією поверхнею, а лише в деяких точках. Наявна на поверхні металу плівка може бути в одних випадках продавлена зусиллям, що стискає контакти, в інших випадках – пробита під впливом різниці електричних потенціалів. У місці пробію утворюється металевий **перешійок**, що проводить електричний струм.

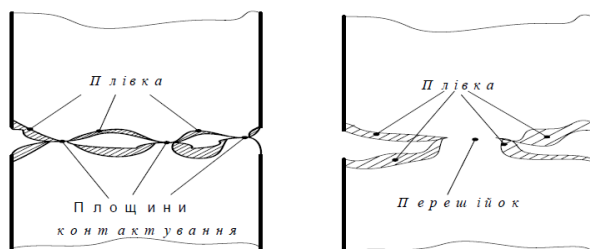


Рис.27. Електричне контактування контакт-деталей

Явище пробію плівки при деякій напрузі називається **фрітінгом**. Воно полягає в тому, що при певному (граничному) значенні напруги, що залежить від виду і товщини плівки, опір її різко падає. Відбувається електричний пробій плівки, що завершується утворенням у ній тонкого металевого провідника, який може залишитися після зняття напруги.

5.1. Різновиди електричних контактів

У місцях **чисто металевого контакту** розвиваються великі сили міжмолекулярних і міжатомних зв'язків. Чисто металеве контактування – явище рідке. Такий контакт при значній площі зіткнення поверхонь неможливо було б розірвати тими силами, що реально існують в електричних апаратах. Імовірно, чисто металеве контактування може спостерігатися лише в місцях дуже вузьких металевих перешийків, що можуть утворитися при пробої плівок і розвиватися (наприклад, під впливом електростатичних сил).

За формою контактування розрізняють три види контактів: точковий, лінійний, поверхневий.

Точковий електричний контакт – електричний контакт, за якого зіткнення робочих поверхонь контакт–деталей відбувається в точці. Отже, контактування здійснюється в одній точці – площадці (наприклад, зіткнення таких поверхонь, як „сфера – сфера”, „сфера – площина”, „вершина конуса – площина” і т.д.).

Лінійний електричний контакт – електричний контакт, за якого зіткнення робочих поверхонь контакт–деталей відбувається по лінії, наприклад, „циліндр–циліндр”, „циліндр–площина”, „виток–виток” і т.д. Фізична картина контактування тут являє собою ряд точок – площадок (мінімум дві), розташованих на одній лінії.

Поверхневий електричний контакт – електричний контакт, за якого зіткнення робочих поверхонь контакт – деталей відбувається по поверхні.

Фізичне контактування відбувається в ряді точок – площадок (мінімум у трьох), розташованих на одній поверхні.

За призначенням контакти можна розділити на **з'єднувальні**, призначені тільки для проведення струму, **комутаційні**, на які додатково покладають завдання включення чи відключення, переключення електричних кіл. Для з'єднувальних контактів характерний поділ на **взаємно нерухомі** нероз'ємні (наприклад, болтові) і **взаємно рухомі** ковзні, або що котяться.

Надійність у тривалій експлуатації **з'єднувальних (що не розмикаються)** контактів буде забезпечена, якщо опір контакту електричному струму буде досить стабільним.

Комутуючі контакти можуть знаходитися в замкнутому (відповідне коло включене) чи розімкнутому стані. Існує багато видів

коммутаційних контактів (наприклад, контакти, що рубають, торцеві, щіткові, пальцеві, розеточні).

За призначенням комутаційні контакти в силових апаратах можна розділити на **головні й дугогасні**. **Головні** звичайно шунтуються **дугогасними**. У процесі розмикання кола головних контактів розмикаються раніше, ніж дугогасних. Тому утворення дуги відбувається тільки на дугогасних контактах.

Головні виявляються захищеними від впливу дуги і служать більш надійно.

Часто функції контактів суміщуються так, що одні й ті самі контакти виконують роль і струмоведучих, і дугогасних.

5.2. Опір електричних контактів

Опір електричного контакту може бути розрахований як сума опорів стягування R_c і сторонніх, зумовлених плівкою R_{nl} :

$$R_k = R_c + R_{nl}.$$

Опір стягування обумовлений тим, що при стискуванні двох провідників, звернених один до одного плоскими поверхнями, торкання відбувається не всією площиною, а тільки окремими ділянками, що розташовані на площині відповідно до мікрогеометрії поверхні. При цьому картина протікання струму різко змінюється, тому що струм має пройти не через весь переріз, а лише через його частину. Опір струму зростає. Опір плівок може змінюватися в процесі експлуатації в дуже широких межах.

Опір обох провідників, які знаходяться в контакті, тобто опір стягування в ідеалізованому контакті, можна подати у вигляді

$$R_c = \frac{\rho}{2a},$$

де ρ – питомий електричний опір середовища, в якому розглядається розтікання струму; a – радіус площадки контактування.

Для гладких поверхонь куля – площа:

$$a_{kn} = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{Pr}{E}},$$

де r – радіус кулі, мм; P – сила стиску, Н; E – модуль пружності, Н/мм².

При стиску двох однакових **кульових** поверхонь

$$a_{\text{кк}} = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{Pr}{E}},$$

Якщо сила стиску розподілена на n однакових круглих площадок, то радіус однієї площадки дорівнює

$$a_{\text{кк}} = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{Pr}{En}},$$

Виникнення плівок на поверхні контактів залежить від матеріалу контактів, їх температури, середовища, в якому знаходяться контакти.

Найбільш розповсюдженою причиною утворення плівок на контактних поверхнях є **окисні процеси** в повітрі. Боротьба з оксидними плівками успішно ведеться конструктивними методами. Конструкцію контактів часто виконують таким чином, щоби при їхньому замиканні й розмиканні вони руйнували плівку і тим самим знижували перехідний опір у контакті в замкнутому стані (наприклад, лінійний контакт).

У **твердих з'єднувальних** контактах захист від утворення оксидних плівок здійснюється змазуванням контактних поверхонь спеціальними змазками перед зборкою і фарбуванням контактного з'єднання теплостійкими фарбами після зборки.

5.3. Перехідний опір контакту

У зоні переходу струму з однієї деталі в іншу має місце відносно великий електричний опір, називаний **перехідним опором контакту**.

Перехідний опір контакту $R_{\text{неп}}$ визначають опором звужених ділянок, якими проходить струм до площадок стиску, і опором вузьких металевих перехідників, що виникають унаслідок фрітінгу.

Із уточненнями (на підставі дослідних даних) значення перехідного опору встановлюють виразом

$$R_{\text{неп}} = \frac{\varepsilon}{Pn},$$

де ε – деяка величина, що залежить від матеріалу і форми контакту, способу обробки контакту і стану контактної поверхні; P – сила, що стискає контакти; n – показник ступеня, що характеризує число точок дотику.

Зі збільшенням числа точок дотику перехідний опір електричного контакту зменшується. В останньому виразі показник ступеня приймають: для одноточкового контакту $n = 0,5$; для багатоточкових $n = 0,7 \div 1$ (для лінійного контакту $n = 0,7 \div 0,8$; для поверхневого $n = 1$). Значення величини ε залежить від стану поверхні контактів, характеру їхньої обробки й особливо – від ступеня окислювання. Для свіжих, неокислених і нормально оброблених одноточкових контактів (обробка на верстаті, остаточна обробка шліфувальним напилком і змащення вазеліном) можна приймати наступні значення ε Ом/Н^{0,5}, що подані в таблиці 1.

Табл. 1.

Мідь	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 натискання подана на рис.28.

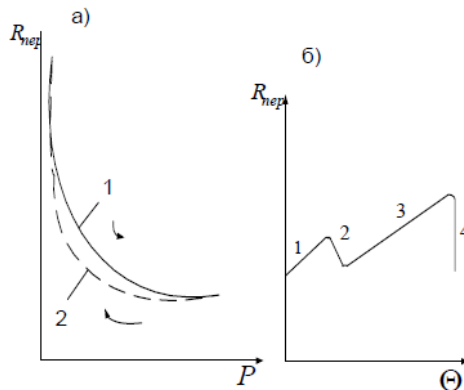


Рис.28. Залежність перехідного опору від сили натискання(а) і температури (б)

Крива 1 відповідає процесу зростання контактного натискання, крива 2 – зниженню натискання. Різний хід кривих обумовлений наявністю залишкових деформацій окремих горбків, по яким відбу-

валосся зіткнення самого контакту при кожному замиканні може бути різним і відрізнятися в досить великих межах: у великих – при малих натисканнях і в менших – при великих натисканнях (більше 100 Н). Пояснюється це тим, що число і розмір площадок контактування при кожному замиканні можуть бути різними.

Значення перехідного опору залежно від натискання практично виражається не якоюсь кривою, а сферою, обмеженою двома кривими.

Залежність перехідного опору від температури. Перехідним опором контакту є опір металу провідника, тому він має тією ж мірою залежати від температури. Однак зі збільшенням температури змінюється структура горбків і площадок зіткнення за рахунок зміни питомого опору змінанню Θ . Тому температурний коефіцієнт тут буде меншим. Для міді $\alpha_1 = \frac{2}{3}\alpha$. Таким чином,

$$R_{пер.г} = R_{пер.х} \left(1 + \frac{2}{3}\alpha \cdot \Theta \right),$$

де: Θ – температура контакту; $R_{пер.г}$ – перехідний опір гарячій; $R_{пер.х}$ – перехідний опір холодний; α – температурний коефіцієнт.

Із зростанням температури перехідний опір спочатку росте (ділянка 1 кривої на рис.28б). Потім при деякій температурі (для міді і срібла при 200÷300 °С) відбувається різке зниження механічних властивостей матеріалу.

При тому ж натисканні збільшується площадка контактування, перехідний опір (ділянка 2) різко падає. Надалі (ділянка 3) він знову зростає лінійно із зростанням температури, і при температурі плавлення матеріалу контакти зварюються, перехідний опір різко падає (ділянка 4).

Шліфування поверхонь не зменшує, а навпаки, збільшує перехідний опір у порівнянні з обробкою напилком. При шліфуванні горбки на поверхні стають більш пологими і їх змінання утруднюється.

Перехідний опір дуже чутливий до окислювання поверхні через те, що окисиди багатьох металів (зокрема міді) є поганими провідниками. У мідних відкритих контактах унаслідок їхнього окислювання з часом перехідний опір може зрости в тисячі разів.

Тема 6. Тепловий розрахунок обмоток електричних апаратів

Обмотки електричних апаратів при протіканні струму ними відносять до об'єктів із внутрішніми джерелами теплоти. Тому тепловий розрахунок обмоток має передбачати спочатку розрахунок втрат потужності в обмотці.

Основними геометричними параметрами циліндричної обмотки є зовнішній діаметр $D_{зов}$, внутрішній діаметр $D_{вн}$, і висота обмотки H . Виходячи із положення закону Ома, можна знайти зв'язок між напругою живлення обмотки U , її МРС, питомим опором ρ і перерізом S проводу. Враховуючи, що обмотка має w витків і середній опір витка обмотки R_{cp} дорівнює опору витка, розташованого в кулі діаметра $D_{cp} = (D_{зов} + D_{вн})/2$, можна перетворити вираження закону Ома в такий спосіб:

$$U = iR = iw \frac{R}{w} = iwR_{cp} = iw \frac{\rho \pi D_{cp}}{S}.$$

Передача теплоти завжди йде від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і відбувається доти, поки температура тіл не зрівняється. Що вища температура нагрітого тіла, то інтенсивніше буде відбуватися передача теплоти. Розрізняють три види передачі теплоти – теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

6.1. Теплопровідність, конвекція, теплопередача

Теплопровідність – це властивість матеріалу передавати теплоту від більш нагрітих місць до менш нагрітих. Передача теплоти може відбуватися всередині одного тіла, між двома дотичними тілами і між двома тілами, розділеними третім.

Кількість теплоти Q , що проходить за одиницю часу t від більш нагрітої ділянки до менш нагрітої, пропорційна площадці (перерізу) S , через яку передається теплота, перепаду температури $(\Theta_1 - \Theta_2)/\delta$ в напрямку, перпендикулярному площадці, і залежить від теплопровідних властивостей середовища λ :

$$Q = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta} \cdot St,$$

де δ – товщина стінки (рис.29).

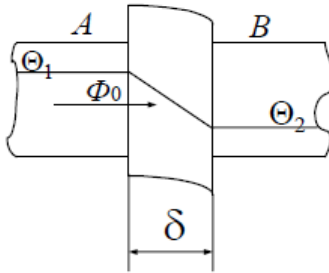


Рис.29. Передача теплоти через плоску стінку (теплота поширюється тільки в одному напрямку); (Φ_0 – густина теплового потоку)

Теплопровідні властивості середовища характеризуються коефіцієнтом **теплопровідності**, який чисельно дорівнює кількості теплоти, що проходить через площадку 1 м^2 протягом 1 секунди при перепаді температури 1 К/м . Цей коефіцієнт позначають λ і вимірюють у Ватах на метр – кельвін.

Конвекція. Газ чи рідина, що стикаються з поверхнею нагрітого тіла (апарата), нагріваються з цієї поверхні. Нагрівання дотичних шарів відбувається за рахунок теплопровідності. Нагріті шари – легші, ніж сусідні, більш холодні шари навколишнього середовища, – піднімаються вгору, несуть відібрану від нагрітого тіла теплоту. Зазначений фізичний процес називається тепловіддачею через конвекцію.

Якщо швидкість руху часток охолоджуючого середовища визначають тільки ступенем їхнього нагрівання на поверхні гарячого тіла, то конвекція називається **природною**.

Якщо швидкість руху часток охолоджуючого середовища задається примусово (за допомогою вентиляторів, насосів), то конвекція називається **штучною**.

Кількість теплоти, що віддається конвекцією за час t ,

$$Q = k_{mk} (\Theta_1 - \Theta_2) \cdot Ft,$$

де k_{mk} – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; Θ_1 – температура нагрітого тіла, К ; Θ_2 – температура охолоджуючого середовища, К , F – поверхня тепловіддачі, м^2 .

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією k_{mk} визначає кількість теплоти, котру віддає за секунду 1 м^2 нагрітої поверхні при різниці

температур нагрітого тіла й охолоджуючого середовища 1 К. Він залежить від багатьох факторів, головні з яких – швидкість руху і теплоємність охолоджуючого середовища, температура поверхні й середовища, геометричні розміри нагрітої поверхні.

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

Фізичні властивості теплових і світлових променів подібні. І ті й інші поширюються зі швидкістю світла, здатні переломлюватися і відзеркалюватися при зустрічі з якимись поверхнями.

Поверхню, що відбиває від себе всі падаючі на неї промені, називають **абсолютно білою** поверхнею. Поверхню, що повністю поглинає всі падаючі на неї промені, називають **абсолютно чорною**. Випромінювальна здатність інших тіл порівнюється з випромінювальною здатністю абсолютно чорного тіла як еталоном.

Кількість теплоти, що випромінюється з поверхні нагрітого тіла за секунду, визначають формулою

$$Q = k_n \left(\frac{\Theta_1}{1000} - \frac{\Theta_2}{1000} \right)^4 \cdot Ft,$$

де k_n – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²·К⁴); Θ_1 – температура нагрітого тіла, К; Θ_2 – температура тіл, на які падають промені, К.

Тепловіддача в сталому режимі. Тепловіддача з поверхні тіла звичайно відбувається одночасно конвекцією й тепловим випромінюванням. При цьому важко встановити, яка частина теплоти передається в навколишнє середовище тим чи іншим видом тепловіддачі, тому вводять поняття **коефіцієнта тепловіддачі** k_T .

Коефіцієнт тепловіддачі k_T визначає кількість теплоти, котру віддає до навколишнього середовища за 1 секунду всіма видами тепловіддачі з 1 м² тепловіддаючої поверхні при різниці температур нагрітого тіла й навколишнього простору 1 кельвін. Коефіцієнт тепловіддачі вимірюють у Вт/(м²·К).

6.2. Нагрівання котушок

Котушка електричних апаратів складається з провідника, ізоляції і прошарків повітря чи просочуючого матеріалу (лак, компаунд). Теплота, що виділяється по всьому обсягу котушки, має проходити до поверхні через матеріали з різною теплопровідністю. У середині котушки температура буде вищою, ніж на поверхні. Чим щільніша котушка, то краща теплопровідність між шарами тим меншою буде різниця температур між зовнішньою поверхнею і внутрішніми шарами. Просочення і компаундування підвищують загальну теплопровідність котушки, а тим самим і тепловіддачу на $5 \div 10$ °С.

Різні ділянки поверхні котушки по-різному беруть участь у тепловіддачі. Зовнішня бічна поверхня, як правило, буває відкритою і є основною тепловіддаючою поверхнею. Тепловіддача з неї відбувається головним чином за рахунок природної конвекції. Всередині котушки проходить осердя. Через малі зазори між осердям і котушкою конвекція тут утруднена, але коли осердя щільно прилягає до котушки, то тепловіддача з внутрішньої поверхні котушки йде за рахунок теплопровідності. Тепловіддача залежить від щільності притискання котушки до осердя, від розміру тепловіддаючої поверхні магнітопроводу. Торцеві поверхні котушки звичайно закриті ізоляційними кріпильними деталями з низькою теплопровідністю. У довгих котушках тепловіддачею з торців нехтують, в коротких котушках її слід урахувати.

Розподіл температури котушкою нерівномірний як у радіальному напрямку, так і за висотою. Точний розрахунок розподілу температури пов'язаний із великими труднощами.

$$\tau_{\text{ст.сер}} = \frac{i_0^2 R_0}{k_{\text{Тсер}} F_{\text{екв}} \left(1 + \frac{i_0^2 R_0}{k_{\text{Тсер}} F_{\text{екв}}} \right)},$$

де i_0 і R_0 – струм і опір холодної котушки; $F_{\text{екв}} = F_{\text{зовн}} + \beta_1 F_{\text{вн}} + \beta_2 F_{\text{торц}}$ являє собою деяку еквівалентну поверхню, що враховує ступінь участі зовнішньої, внутрішньої і торцевої ділянок поверхні в тепловіддачі (тут β_1 і β_2 – експериментальні коефіцієнти). Для котушок контакторів і реле постійного струму рекомендують: $\beta_1 = 0,9$ – для безкаркасних бандажованих котушок; $\beta_1 = 1,7$ – для котушок, намотаних на трубу; $\beta_1 = 2,4$ – для котушок, намотаних на осердя, $\beta_2 = 0$.

У дійсності розподіл температури вздовж радіуса котушки буде мати характер, обумовлений кривою (рис.30). Десь усередині 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 і небагато перевищує середню температуру котушки.

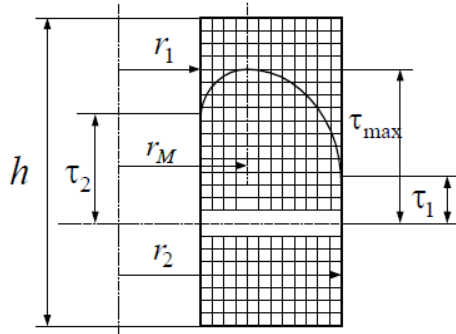


Рис.30. Розподіл температури τ по котушці, h – висота котушки, r – радіус

Питання до самоперевірки

1. Що називається електричним контактом?
2. Що таке контакт-деталь?
3. Що називають фрітінгом при електричному контактуванні в тягових електричних апаратах?
4. Проаналізуйте процес електричного контактування двох контакт-деталей електричного апарата.
5. Проаналізуйте чисто металеве контактування двох контакт-деталей.
6. Обґрунтуйте існування трьох видів контактів за формою контактування.
7. Приведіть класифікацію контактів тягових апаратів за призначенням.
8. Які існують з'єднувальні контакти електричних апаратів?
9. Які існують різновиди комутуючих контактів електричних апаратів?
10. Проаналізуйте призначення головних і дугогасних комутуючих контактів.
11. Чим обумовлений опір стягування електричного контакту?

Тема 7. Параметри контактних конструкцій.

Зазор контактів являє собою найкоротшу відстань між розімкнутими робочими поверхнями рухомих і нерухомих контакт-деталей. Зазор контактів звичайно вибирають за умови гасіння малих струмів.

Під час роботи контакти зношуються. Щоб забезпечити їхній надійний контакт на тривалий термін, кінематику апарата вибирають таким чином, що контакти стикаються раніше, ніж рухома система буде доходити до упора.

Контакт кріплять до рухомої системи через пружину. Завдяки цьому зіткненню з нерухомих контактом рухомий контакт зупиняється, а рухома система просувається ще вперед до упора, стискаючи додатково при цьому контактну пружину. Таким чином, якщо при замкнутому положенні рухомої системи забрати нерухомих, рухомий контакт зміститься на деяку відстань, яку називають **провалом контактів**.

Контактне натискання – сила, що стискує контакти в місці їхнього зіткнення. Розрізняють початкове натискання P_0 в момент початку замикання контакт-деталей, коли провал дорівнює нулю, і кінцеве натискання P_k при повному провалі:

$$P_0 = C\Delta l_1; \quad P_k = P_0 + C\Delta l_2,$$

де C – твердість пружини, тобто значення сили в Ньютонах, необхідної для стиску пружини на 1 см; Δl_1 – первісний стиск пружини; Δl_2 – додатковий стиск пружини при виборі провалу.

У міру зносу контактів зменшується провал, а отже і додатковий стиск пружини. Кінцеве натискання наближається до початкового. Отже початкове натискання є одним із основних параметрів, при якому контакт має зберігати працездатність.

Працездатність комутуючих контактів характеризується процесами при їхньому замиканні (включенні) і розмиканні (відключенні). Розглянемо спочатку процеси при розмиканні і знос контактів при відключенні кола. **Під зносом контактів** розуміють руйнування робочих поверхонь контакт-деталей, яке приводить до зміни їхньої форми, розміру, маси і до зменшення провалу.

Знос, що відбувається під дією електричних факторів, називається **комутаційним зносом** – електричною корозією.

При розмиканні сила, що стискує контакти, знижується до нуля, різко зростають перехідний опір контакту і густина струму **в останній** площадці контактування. Площадка сильно розігрівається, і між розбіжними контактами утворюється контактний перешийок із розплавленого металу, що надалі рветься. При цьому в проміжку між контактами можуть виникнути різні форми електричного розряду. При струмі й напрузі, більших від мінімально необхідних (наприклад, для міді $I = 0,5 \text{ A}$ і $U = 15 \text{ B}$), виникне дуговий розряд.

Якщо струм менше мінімально необхідного, а напруга вища напруги запалювання дуги, то виникне іскровий розряд.

Під дією високої температури чи дуги іскри, а також інших факторів, частина металу контактного перешийка випаровується, частина розприскується і викидається з проміжку між контактами, частина переноситься з одного контакту на інший.

7.1. Процеси при розмиканні і замиканні контактів. Знос контактів

У процесі замикання відстань між контактами поступово зменшується.

При деякій відстані між ними відбувається пробій, виникає дуга, що гасне при замиканні контактів. Знос від цього явища варто враховувати в апаратах на високу напругу. У низьковольтних апаратах це явище можна не брати до уваги.

У комутаційних апаратах при замиканні відбувається комутаційний знос, що викликається явищем **дзенькоту** контактів. У ряді випадків він перевищує знос при розмиканні. Рухома контакт-деталь підходить до нерухомої з визначеною швидкістю. При зіткненні відбувається пружна деформація матеріалу обох контактів. Пружна деформація призводить до відскоку рухомої контакт-деталі. Вона відскакує від нерухомої на деяку відстань, вимірювану сотими й десятими міліметра (іноді до 1-го мм). Під дією контактної пружини відбувається повторне замикання контактів. Цей процес може повторюватися кілька разів із загасаючою амплітудою. При кожному відскоку між контактами виникає електрична дуга, що викликає їхній знос.

Дзенькіт при замиканні можливе внаслідок удару при притяганні якоря. При цьому знос може бути більшим, ніж від удару самих контактів, тому що дзенькіт контактів відбувається при набагато

більших миттєвих струмах (удар пізніший, і струм устигає вирости більше при індуктивному навантаженні).

Швидкість рухів контактів визначається співвідношенням між механічною $P_n = f(\delta)$ (крива 1) і стискувальними зусиллями $P_{ем} = f(\delta)$ (криві 2, 3, 4) характеристиками (рис.31). Чим більше запас стискувального зусилля (кривий 4), то більшою буде швидкість, а отже будуть більшими удар і дзенькіт контактів.

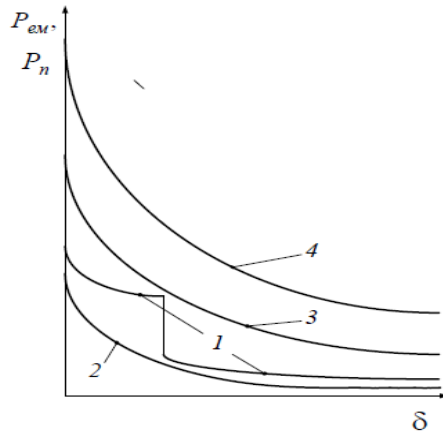


Рис.31. Протидіюча (1) і тягові характеристики (2, 3, 4) апарата

При недостатньому стискальному зусиллі (крива 2) відбуватиметься зупинка рухомої системи в момент зіткнення контактів (двотактне включення), що також призведе до збільшення зносу. Для забезпечення мінімального зносу тягова характеристика повинна забезпечувати чітке включення апарата і не мати надмірних запасів (крива 3).

Початкове натискання на контакти в момент їхнього зіткнення – це сила, що протидіє відскоку контактів при їхньому зіткненні. Природно, що чим більша сила, тим меншими будуть відскок і дзенькіт, а отже – і знос.

7.2. Матеріали для контактних з'єднань

Найбільш поширеними контактами, що застосовуються в електротехніці, є контакти, які служать для періодичного замикання і розмикання електричних кіл (розривні і ковзаючі). В якості контакт-

них матеріалів використовуються чисті тугоплавкі метали і різноманітні сплави, а також металокерамічні композиції.

Ковзаючі контакти забезпечують перехід електричного струму від нерухомих частин пристрою до рухомих, наприклад в потенціометрах, реостатах, електричних машинах.

Розривні контакти забезпечують періодичне замикання чи розмикання електричних кіл протягом тривалого часу, зокрема, в таких пристроях як реле, пускачі, електромеханічні перетворювачі.

Матеріали для таких контактів повинні мати такі властивості:

- 1) малий питомий електричний опір;
- 2) малий спад напруги на контактах;
- 3) стійкість до механічного і електричного зносу;
- 4) не допускати ерозії (вигорання) контактуючих поверхонь;
- 5) не допускати приварювання контактних поверхонь одна з одною при дії електричної дуги при розмиканні контактів;
- 6) стабільність контактного електричного опору.

Контакт повинен бути надійним з'єднанням, здатним проводити струм з низьким і стабільним в часі електричним опором.

Структура площі контакту складається з ділянок з металічним контактом, опір яких визначається сумарним опором металів пари, що утворюють контакт, через який протікає струм без перехідного опору; контактних ділянок, покритих тонкими адгезійними плівками, що пропускають струм завдяки тунельному ефекту; ізолюючих ділянок, покритих плівками оксидів і сульфідів, що не пропускають електричний струм.

Загальна площа контакту є сумою площ цих ділянок, що значно менша контактної поверхні, так званої умовної площі контакту. При цьому стан поверхонь контактів безпосередньо впливає на перехідний опір і нагрівання контактів при проходженні через них струму.

Основні причини зносу контактів під час їх експлуатації залежать від умов експлуатації і зводяться до таких:

- 1) ерозія контактів – порушення форми робочих поверхонь;
- 2) перенос матеріалу з одного контакту на інший, утворення кратерів, і навіть заклинювання контактів;
- 3) електричний знос контактів, зумовлений електричною дугою, іскрінням контактів при розмиканні і вібрацією контактів;
- 4) механічний знос, пов'язаний не тільки з силою удару контактів, але й з контактним тиском і частотою замикань контакту;

5) хімічний знос, на який впливають склад навколишнього середовища, його вологість та температура.

Для зменшення дії ерозії необхідна висока температура плавлення контактних матеріалів.

Вибір матеріалів для розмикаючих контактів проводять за значеннями комутованого струму або за потужністю розмикання електричних кіл.

За значенням комутованого струму розривні контакти поділяють на слабострумові (до одиниць ампер) і сильнострумові (десятки, сотні ампер).

Слабострумові (малопотужні) розмикаючі контакти виготовлюють з благородних і тугоплавких металів та сплавів на їх основі.

Основні області застосування контактних матеріалів:

1) *срібло* – реле, сигнальна апаратура, телефонна і телеграфна апаратура, управління флуоресцентними лампами, контакти допоміжних кіл контакторів і магнітних пускачів;

2) *срібло-мідь-нікель* – реле вуличних сигналів, перетворювачі струму, реле автоматики, електромагнітні лічильники, автомобільні і залізничні сигнальні реле;

3) *срібло-кадмій* – реле, термостати холодильників, стартери, теплові вимикачі;

4) *срібло-оксид міді* – контактори змінного і постійного струму, автоматичні запобіжники;

5) *мідь-вольфрам* – потужні масляні і повітряні високовольтні вимикачі дугових печей та перетворювачі струму.

6) *срібло-вольфрам* – магнітні пускачі і контактори з високою частотою ввімкнень, вимикачі побутових приладів, кнопки керування, високовольтні вимикачі, випрямлячі струму.

Більшість благородних металів застосовують для контактів у вигляді гальванічного покриття (крім срібла, яке може застосовуватись в чистому вигляді). Гальванічні покриття більш зносостійкі в електричному полі. Товщина гальванопокриття зазвичай коливається в межах від одного до декількох десятків мікрометрів.

Сильнострумові (потужні) розмикаючі контакти виготовляють з металокерамічних матеріалів, що отримуються методом порошкової металургії. Металокерамічні контакти володіють рядом переваг в порівнянні зі звичайними металічними:

1) більш стійкі до приварювання та зносу;

2) значно збільшують термін служби контактів при середніх навантаженнях;

3) підвищують надійність і довговічність конструкції апаратів при значній економії срібла.

Металокерамічні матеріали для контактів через які протікають високі струми повинні складатись із незваємодіючих один з одним компонентів.

Срібло і мідь забезпечують високу електро- і теплопровідність, а тугоплавка частина підвищує зносостійкість, термостійкість і опір до зварювання контактів. У низьковольтних апаратах часто використовуються срібло-оксид кадмію, для високовольтних (дугогасних камер) – залізо-мідь-вісмут та ін.

Матеріали для ковзаючих контактів повинні мати малий питомий опір, високу стійкість до стирання, витримувати роботу на високих швидкостях.

Матеріали для ковзаючих контактів можна розділити на пружинні металічні та електротехнічні вугільні.

Як пружинні металічні контактні матеріали використовують спеціальні сорти бронз, наприклад кадмієві та берилієві.

З числа твердих неметалічних провідникових матеріалів найбільше значення мають матеріали на основі вуглецю (електротехнічні вугільні вироби, скорочено – електровугільні вироби). З вугілля виготовляють щітки електричних машин, електроди для прожекторів, для дугових електричних печей і електролітичних ванн, анодів гальванічних елементів, високоомних резисторів, розрядників для телефонних мереж.

В якості сировини для виробництва електровугільних виробів можна використовувати сажу, графіт або антрацит. Для отримання стержневих електродів подрібнена маса із зв'язуючими речовинами, в якості яких використовуються кам'яновугільна смола, а інколи і рідке скло, формується в прес-формах. При високих температурах досягається штучне переведення вуглецю в форму графіту і такий процес називають *графітуванням*.

Природний графіт – шаровий матеріал, один з різновидів чистого вуглецю. Його фізичні властивості в напрямі шарів і перпендикулярно до них різні, тобто він характеризується анізотропією як електричних, так і механічних параметрів. У напрямі шарів електропровідність графіту має металічний характер ($\rho = 8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\alpha_p = -10^{-4} \text{ К}^{-1}$).

Окремі частинки графіту легко відділяються і ковзають по його поверхні. Ця властивість використовується в техніці для виготовлення сухих змазок на основі графіту.

Сажа є мілкодисперсним вуглецем з домішкою смолистих речовин. Для них характерний широкий діапазон питомого опору ($\rho = 0,01 \div 400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Електричні щітки застосовують в електричних машинах як змінного, так і постійного струму різного призначення і потужності, в тому числі і в швидкохідних машинах з кільцями для підведення або знімання електричного струму.

Обпалювання щіток для електричних машин проводять при температурі близько $800 \text{ }^\circ\text{C}$; графітовані щітки піддають температурі до $2200 \text{ }^\circ\text{C}$. Для різних марок щіток характерні визначені значення питомого опору, допустимої густини струму, лінійної швидкості на колекторі, коефіцієнта тертя і т.д.

Розрізняють щітки вугільно-графітні (УГ), графітні (Г), електрографітовані (ЕГ), мідно-графітні (МГ). Щітки із вмістом порошкового металу характеризуються особливо малим електричним опором і викликають незначне контактне падіння напруги (між щіткою і колектором). Основні параметри вугільних щіток зображені в таблиці 2.

Табл.2.

Типи щіток	Питомий опір ρ , мкОм·м	Допустима густина струму J , МА/м ²	Допустима лінійна швидкість V , м/с
УГ	18–60	6–8	10–15
Г	10–45	7–11	12–25
ЕГ	10–45	9–11	25–45
МГ	0,05–1,2	12–20	12–25

Від матеріалу контакта значною мірою залежать термін його служби і надійність у роботі. До цих матеріалів висувають наступні вимоги: вони повинні мати високу електричну провідність і теплопровідність, бути стійкими до корозії і мати струмопровідну оксидну плівку, бути дугостійкими, тобто мати високу температуру плавлення і випару, бути твердими, механічно міцними і легко піддаватися механічній обробці, мати невисоку вартість. Ці вимоги

суперечливі, а тому майже неможливо знайти матеріал, що задовольняв би всім вимогам.

Для контактних з'єднань застосовують (зазвичай) мідь, яка задовольняє майже всім перерахованим вище вимогам, за винятком корозійної стійкості.

Оксиди міді мають низьку провідність. Мідь – найпоширеніший контактний матеріал, що використовується як для розбірних, так і для комутуючих контактів. У розбірних з'єднаннях застосовують антикорозійні покриття робочих поверхонь.

У комутуючих контактах мідь застосовують при натисканнях понад 3 Н для всіх режимів роботи, крім тривалого. Для тривалого режиму мідь не рекомендують, але якщо її вже застосували, то треба вжити необхідних заходів для боротьби з окислюванням робочих поверхонь. Мідь може використовуватися і для дугогасних контактів.

При малих контактних натисканнях ($P < 3 \text{ Н}$) застосування мідних контактів не рекомендується.

Питання до самоперевірки

1. Що являє собою зазор контактів як параметр контактних конструкцій тягових електричних апаратів?

2. Що називається провалом контактів як одним із основних параметрів контактних конструкцій тягових електричних апаратів?

3. Проаналізуйте вплив провалу контактів на надійність контактних конструкцій тягових електричних апаратів.

4. Дайте визначення контактного натискання контактних конструкцій тягових електричних апаратів.

5. Проаналізуйте вплив на надійність електричного контакту зміни кінцевого натискання в міру зносу контактів і зменшення провалу контактів тягових електричних апаратів.

6. Що розуміють під зносом контактів електричних апаратів?

7. Проаналізуйте процеси зносу контактів при їхньому розмиканні в тягових електричних апаратах.

8. Проаналізуйте зміну перехідного опору і густину струму в останній точці контактування при розмиканні контактів.

9. Проаналізуйте вплив розмикання контактів на температуру площадки контактування.

10. Проаналізуйте виникнення різних форм розрядів при розмиканні контактів електричних тягових апаратів.

Тема 8. Властивості й характеристика електричної дуги

Розмикання електричних кіл комутуючими пристроями звичайно супроводжується виникненням електричної дуги. Дуга виникає при струмах, більших $0,5 \div 1,0$ А і напругах вищих $15 \div 18$ В. У тягових апаратах дуга з'являється при розмиканні під струмом силових і допоміжних кіл, а також кіл керування з особливо великими індуктивностями.

Пристрої дугогасіння слід розглядати як засоби керування електричною дугою, для чого необхідно знати її властивості й характеристику. Звичайно дугу визначають як один з видів електричних розрядів у газовому середовищі.

Електрична дуга – це процес проходження струму в середовищі іонізованих газів при термічному характері їхньої іонізації.

Інші види проходження струму в газах, а саме – корона, не здійснюють помітного впливу на роботу звичайних тягових апаратів, тому їх тут розглядати не будемо.

Термічна іонізація, властива електричній дузі, значною мірою залежить від **ступеня іонізації** x – відношення числа іонізованих часток N_i до їх загального числа N в одиниці об'єму $x = N_i/N$. У тягових апаратах значення x порівняно невелике ($0,4 \div 0,5$). При цьому іонізуються переважно не частки повітря, а **пари електродів**.

Густина струму в дугах, властивих тяговим апаратам, велика; вона прирбуває в межах $40 \div 90$ А/мм², хоча в окремих випадках може бути і значно вищою. Із підвищенням температури густина струму в дузі зростає. Звичайно на катоді утворюється **катодна пляма** у вигляді розплавленого металу, що випаровується, в безпосередній близькості від якої виникає об'ємний заряд – **електронна хмара**. Незважаючи на відносно невелику різницю потенціалів щодо катода $10 \div 15$ В (це обумовлено незначною відстанню від нього до катода) виникає градієнт потенціалу, що досягає $10^5 \div 10^6$ В/мм. Це надає такі швидкості електронам, за якої вони в стані вибивати з поверхні навіть порівняно холодного катода нові електрони та іони.

Однак стійке горіння дуги відбувається звичайно лише при активному (розпеченому) катоді. Розміри катодної плями випадкові. Його площу, мм², орієнтовно можна підрахувати, користуючись емпіричною залежністю $S \approx 0,02\sqrt{i^3}$, мм², де i – струм, А.

Стовбур дуги являє собою потік іонів, заряджених негативно, хоча в ньому є і якась (дуже невелика) кількість позитивних іонів, а також вільних електронів. Стовбур можна розглядати як своєрідний провідник (рис.33) із багатьма властивостями газів і незначним зв'язком між окремими частками.

Таким чином, стовбур легко деформується під впливом різних зовнішніх факторів.

Падіння напруги за довжиною дуги можна підрозділити на три складові:

$$U_{\delta} = U_{\kappa} + U_c + U_a,$$

Тут U_{κ} – падіння напруги в безпосередній близькості від катода, між катодною плямою та електронною хмарою; U_c – падіння напруги в стовбурі дуги, довжина якого дорівнює майже всій довжині дуги l_{δ} ; U_a – падіння напруги в анода в безпосередній близькості від нього; E – градієнт падіння напруги в дузі:

$$E = \frac{dU_{\delta}}{dl}.$$

Як видно з рис.32, градієнт падіння напруги в стовбурі дуги постійний.

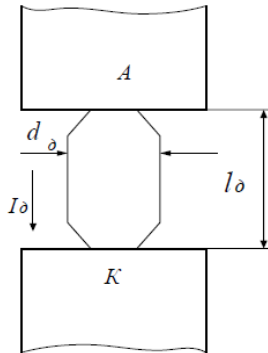


Рис.32. Стовбур дуги
(A – анод, K – катод, l_{δ} – довжина дуги, d_{δ} – діаметр дуги, I_{δ} – струм дуги)

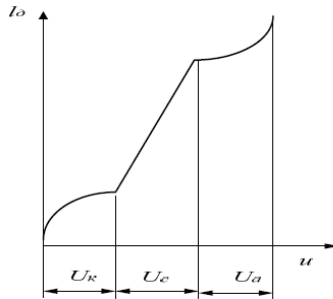


Рис.33. Падіння напруги в дузі

8.1. Потужності втрат у дузі

Падіння напруги в дузі визначає **потужність утрат** ΔP_0 , що розсіюються нею:

$$\Delta P_0 = Ui = i(U_k + U_a + E_c l_0).$$

Потужність втрат у катода витрачається на утворення і підтримку катодної плями, на випар металу і створення електронної емісії – прискорення електронів, що виділяються з плями. Втрати катода виділяються в настільки вузькому просторі, що викликають інтенсивне нагрівання дуги. Саме тут температури найбільші, вони досягають $(6\div 8) \cdot 10^3$ °К. Температура самої контактної плями трохи нижча внаслідок гарної теплопровідності металу електродів, що забезпечує інтенсивне відведення тепла.

Потужність втрат у анода, викликана падінням напруги U_a , витрачається на виділення вільних електронів з негативно заряджених іонів і проникання їх у тіло анода. Вона виділяється в дуже вузькому просторі безпосередньо на поверхні анода. Це викликає значне нагрівання опорної точки дуги на аноді й його оплавлення.

Потужність втрат у стовбурі дуги витрачається на відтворення іонів, загублених у стовбурі внаслідок їхнього розсіювання, тобто це потужність теплових втрат у стовбурі дуги. Вона тим більша, чим більше поверхня стовбура й особливо довжина дуги. Таким чином, падіння напруги в стовбурі E_c пропорційне l_0 . Разом із тим, воно залежить і від градієнта падіння напруги в дузі, що обумовлене знаходженням стовбура дуги і, звичайно, умовами його охолодження.

8.2. Характеристики дуги. Статичні характеристики

Це залежність напруги дуги від струму дуги $U_0(I)$ при постійній її довжині $l_0 = const$ чи $E(I)$, при постійній поперечній швидкості дуги й найбільшій інтенсивності зміни струму, при якій встигають установлюватися теплові баланси й баланси носіїв зарядів для кожного нового значення струму.

Це можливо, якщо струм змінюється дуже повільно. Характеристики $U_0(I)$ для дуг різної довжини подібні за формою, але розташовані тим вище, чим більша довжина дуги l_0 (рис.34).

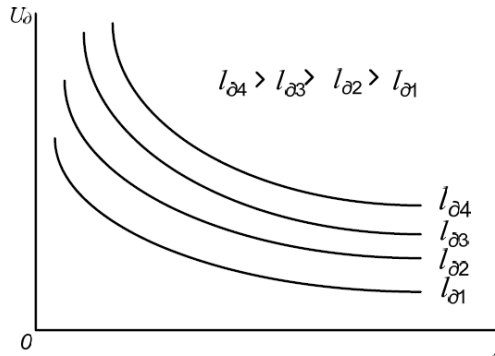


Рис.34. Статичні характеристики $U_0(I)$ для дуг різної довжини

Способи впливу на електричні дуги з метою керування ними й гасіння їх засновані на розглянутих властивостях і характеристиках електричних дуг. До них належать:

- подовження стовбура дуги шляхом переміщення електродів, впливом електромагнітних чи електродинамічних сил, впливом на дугу газового потоку;

- підвищення градієнта падіння напруги в дузі – шляхом охолодження стовбура газовим потоком, збільшенням периметра поперечного переріза стовбура дуги;

- застосування середовища з газами підвищеної теплоємності для посилення теплорозсіювання від стовбура дуги;

- інтенсифікація добору тепла від катодної й анодної плям – збільшенням маси, теплопровідності й теплорозсіювання електродів.

Усі ці способи (найчастіше їх комбінація) застосовують у сучасних тягових апаратах.

8.3. Дугогасні системи

Для обмеження теплового впливу дуги на деталі апарата, час її гасіння звичайно має не перевищувати 0,1 с. Існує мінімальна відстань між контактами l_{min} (мм), починаючи з якої створюються необхідні умови для видування дуги з контактів і розтягання її в дугогасному пристрої:

$$l_{min} = \frac{\pi k_1 b}{i_0},$$

де b – товщина контакту, мм; i_0 – струм дуги в кА, $i_0 = 1 \div 10$ кА; k_1 – залежить від матеріалу контактів (для Cu $k_1 = 0,18$; для Ag $k_1 = 0,85$; для W $k_1 = 2,0$).

Найпростіший спосіб гасіння дуги – *механічний розтяг її стовпа*. При невеликих струмах (\sim до 10 А) дуга розтягується між розбіжними контактами на довжину l і не виходить із міжконтактного проміжку. При значних струмах дуговий стовп видувається нагору під дією сил, що викликані тепловими потоками, чи сил електродинамічної взаємодії дуги зі струмами в струмоведучих елементах. У таких пристроях виникає й гаситься вільна (відкрита) дуга.

Застосовують також *дугогасні грати*, набрані зі сталевих пластин, на які видувається електрична дуга. Дуга переміщується на сталеві пластини під дією електромагнітних сил (магнітний потік від струму дуги “прагне” пройти шляхом найменшого опору – сталевими ділянками), під дією теплових потоків (нагору) і під впливом сил електродинамічної взаємодії струму дуги зі струмоведучими контактними деталями. Пластини, що розбили стовп дуги на ряд коротких дуг, є для них своєрідними радіаторами, які інтенсивно їх охолоджують. Це викликає сильне зростання опору дуг і їхнє гасіння.

Принцип магнітного дугогасіння передбачає вплив на електричну дугу магнітного поля. Його пристрої порівняно прості, не вимагають додаткових джерел енергії, тому одержали в тягових апаратах широке розповсюдження. Таке дугогасіння мають більшість комутаційних тягових апаратів.

Існують два різновиди магнітного дугогасіння: електромагнітне і дугогасіння з постійними магнітами. Останнє застосовують рідко, звичайно тільки в тих випадках, коли необхідно виключити вплив

індуктивності дугогасної котушки на постійну часу кола. Таке дугогасіння застосовують також у розрядниках.

Принцип дії магнітного гасіння дуги заснований на взаємодії магнітного потоку Φ_δ і струму I , що протікає в колі дуги, яку можна розглядати як провідник зі струмом (рис.35).

Сила df_δ , що діє на елемент дуги dl_δ , $df_\delta = i dl_\delta B_\delta \sin\alpha$, де $B_\delta \cdot \sin\alpha$ – складова вектора індукції в зоні елемента dl_δ , нормальна до нього.

Сила F_δ , що діє на весь стовбур дуги довжиною l_δ :

$$F = i \int_0^{l_\delta} B_\delta dl_\delta \sin\alpha.$$

У першому наближенні індукцію в зоні розташування дуги можна усереднити:

$$B_{\delta c} = \frac{1}{l_\delta} \int_0^{l_\delta} B_\delta dl.$$

Величину $B_{\delta c}$ можна вивести з – під знака інтеграла, а

$$L_\delta = \sin\alpha \cdot dl_\delta,$$

де L_δ – відстань між опорними точками дуги. Таким чином,

$$F_\delta \approx B_{\delta c} \cdot I \cdot L_\delta.$$

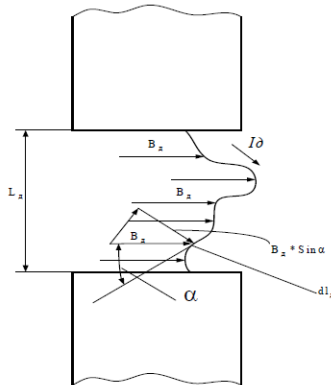


Рис.35. Магнітне гасіння дуги

Отримані залежності описують зв'язок дуги з дугогасним потоком, але використовувати їх безпосередньо для визначення довжини дуги, її швидкості та інших показників важко, з огляду на вплив на дугу багатьох факторів і її випадковий характер.

Котушку, що створює магнітний дугогасний потік, включають послідовно в коло контактів комутаційного апарата. Це забезпечує її автоматичне вимикання після розриву апаратом електричного кола струму. МДС дугогасної котушки пропорційна струму дуги $Q_0 = iw$.

Послідовне включення котушки дозволяє, не змінюючи напрямок сили F_0 , змінювати напрямок струму в апараті, тому що при цьому змінюється напрямок індукції B_0 з метою впливу на дугу в потрібному напрямку для забезпечення дугогасіння.

В апаратах із постійними магнітами, змінюючи напрямок струму в колі, потрібно також змінити полярність магнітів, що викликає труднощі виконання. Таку систему називають розімкнутою.

У сучасних апаратах гасіння дуги при відключенні кола здійснюється в дугогасних пристроях, завданням яких є загасити дугу в малому обсязі (бажано замкнутому) за малий час, при малому зносі частин апаратів, при заданих перенапругах, малих звукових і світлових ефектах.

Значно поширені (особливо в низьковольтних апаратах) дугогасні пристрої, камери яких мають поздовжні щілини. Поздовжньою називають щілину, вісь якої збігається за напрямком із віссю стовбура дуги. У таких камерах основний вплив здійснюють на стовбур дуги. Охолодження стовбура дуги (добір енергії) відбувається за рахунок руху дуги через нерухоме повітря й охолоджуючої дії стінок камери. Явища в електродах (їх всього два) тут можна враховувати в змінному струмі й напрузі нижче 220 В. Рух дуги в пристроях із подовжніми щілинами відбувається за рахунок взаємодії струму дуги зі створюваним зовнішнім магнітним полем і полем контуру струму.

На рис.36 схематично зображені характерні форми поздовжніх щілин камер дугогасних пристроїв. У верхній частині камери між точками 1 і 2 є одна пряма поздовжня щілина 3 із площинорівнобіжних стінок, у камері на рис. 36б – декілька прямих рівнобіжних щілин, аналогічні щілини – у камері на рис.36а. Декілька рівнобіжних щілин застосовують при відключенні великих струмів. Однак рівнобіжні дуги існують недовго. Вони дуже хитливі, і всі, крім однієї,

останньої, швидко згасають. Умови гасіння дуги, що залишилася, такі самі, які у камері з однією щілиною.

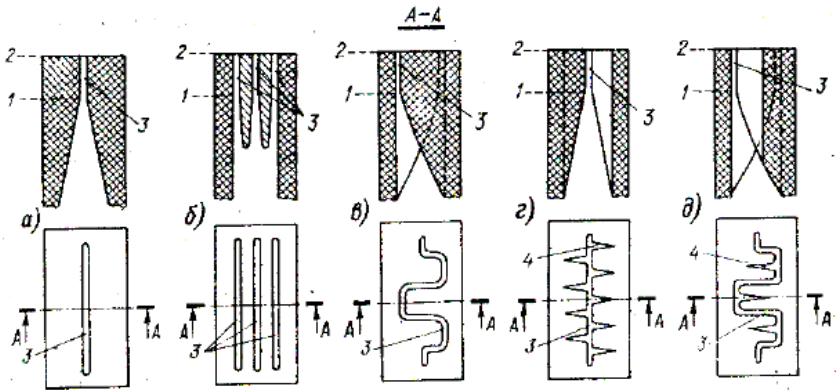


Рис.36. Різновиди дугових камер

На рис.36в наведено камеру з однією поздовжньою щілиною 3, якій надана звивиста форма. При такій формі є можливим у камері невеликих розмірів помістити довгу дугу. Крім того, наявність ребер сприяє підвищенню напруги на дузі. Саме ці особливості обумовлюють ті переваги розглянутої камери, що забезпечують їй широке застосування.

Поздовжня щілина з рядом ребер і розширень 4, за рахунок яких відбувається зростання поздовжнього градієнта напруги, зображена на рис.36г.

Камера (рис.36д) має комбіновану зигзагоподібну щілину 3 з місцевими розширеннями 4. У такій щілині, очевидно, мають сполучатися всі достоїнства зигзагоподібної щілини з перевагами, які дають місцеві розширення. За особливостями руху електричної дуги в поздовжніх щілинах розрізняють щілини широкі й вузькі. *Широкою* називають щілину (рис.37а), ширина якої значно більша діаметра дуги, *вузькою* – щілину (рис.37б), ширина якої менша діаметра дуги чи близька до нього.

Оскільки діаметр дуги залежить від струму, швидкості руху дуги й умов охолодження, то для одних умов щілина буде широкою, для інших – вузькою. У широких щілинах рух дуги мало стиснутий

стінками, переріз її стовбура недеформований. Якісно всі явища тут відбуваються так само, як і у відкрито палаючій дузі. Наявність стінок вносить тільки деякі кількісні зміни до закономірностей, властивих відкритій дузі.

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

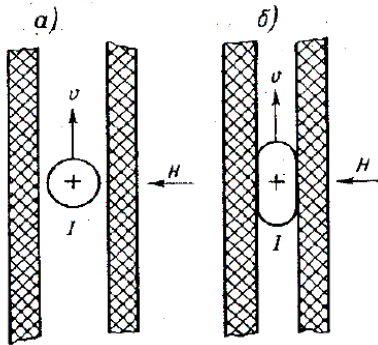


Рис.37. Щілини дуги

Питання до самоперевірки

1. Проаналізуйте умови виникнення електричної дуги при розмиканні електричних контактів.
2. Дайте визначення електричної дуги.
3. Що являє собою стовбур електричної дуги?
4. Проаналізуйте статичну характеристику електричної дуги при різних її довжинах.
5. Проаналізуйте способи впливу на електричну дугу з метою керування або гасіння.
6. Принцип магнітного гасіння дуги в тягових електричних апаратах.
7. Які різновиди магнітного гасіння дуги існують у тягових електричних апаратах?

Тема 9. Напівпровідникові контактори

Напівпровідникові контактори (НПК) – силові комутаційні апарати управління належать до групи пускорегулюючих низьковольтних (до 1000 В).

НПК – це комутаційний апарат з дистанційним управлінням, призначений для частих включень і відключень електричного ланцюга при нормальних струмах навантаження, а також для нечастих відключень при струмах перевантаження ($7\div 10$ кратних по відношенню до номінального). Як навантаження контакторів звичайно використовуються електричні машини.

Існують контактори змінного і постійного струму. Контакттори, призначені тільки для комутації двигунів, називаються магнітними пускачами.

НПК бувають двох видів: *безконтактні* й *гібридні*. Останні зазвичай виконують на базі електромагнітних контакторів, що серійно випускаються, із введенням до їх конструкцій додаткових *напівпровідникових* (тиристорних) блоків, які забезпечують практично комутацію без дуги головних контактів апарату.

НПК повинні задовольняти наступним спеціальним вимогам:

- 1) забезпечувати надійну роботу в тривалому, короткочасному і повторно-короткочасному режимах із урахуванням специфічних особливостей навантаження;
- 2) допускати високу частоту включень, аж до плавного регулювання струму навантаження;
- 3) мати високу технологічність конструкції;
- 4) мати прийнятні габаритні розміри і вартість;
- 5) зручно поєднуватись з сучасними засобами захисту електричних ланцюгів і елементами автоматики й мікропроцесорної техніки.

9.1. Безконтактні напівпровідникові контактори

Безконтактні напівпровідникові контактори (пускачі) змінного струму в основному призначені для здійснення пуску, регулювання швидкості обертання, напруги й струму асинхронних електродвигунів.

Основним виконанням безконтактного НПК, що задовольняє

перерахованим вимогам, є триполюсне виконання із запуском тиристорів силового кола за допомогою оптронних тиристорів і спрощеною схемою управління (рис.38).

Оскільки всі три полюси контактора повністю подібні один до одного, на електричній схемі зображений тільки перший полюс.

Кожен полюс містить наступні функціональні вузли:

– *напівпровідниковий (тиристорний) електронний ключ (ЕК)*, що складається з двох стрічно-паралельно включених тиристорів VS_1 і VS_3 ;

– *схему запуску*, що складається з оптронного тиристора VS_2 , обмежуючого струм резистора R_3 , випрямного моста $VD_3 - VD_6$ і що забезпечує подачу сигналу на тиристори VS у включеному стані контактора;

– *демпфуюче коло*, котре містить резистор R_1 , конденсатор C_1 і служить для обмеження амплітуди і швидкості напруги, що відновлюється, на тиристорах $ЕК$;

– *захисні елементи* (резистори R_4, R_5 і конденсатори C_2, C_3), що підвищують перешкодостійкість електронної частини контактора;

– *коло контролю*, що містить діод VD_1 , світлодіод VD_2 , резистор R_2 і необхідні для сигналізації про працездатність тиристорів $ЕК$ (у справному стані апарата світлодіод має світитися у відключеному стані контактора і згаснути – у включеному);

– *схему управління*, котра складається з кнопок SB_1 (Пуск) і SB_2 (Стоп), малопотужного тиристора VS_4 , що забезпечує підхоплення кнопки SB_1 , обмежуючого резистора R_7 , трьох світлодіодів оптронних тиристорів (VS_2, VS_5, VS_6) і що містить коло контролю (резистор R_8 , світлодіод VD_7), яке сигналізує про справну роботу схеми управління.

При натисненні кнопки SB_1 (Пуск), напруга $+U$ через обмежуючий резистор R_7 поступає на світлодіоди оптронних тиристорів, забезпечуючи таким чином подачу напруги на тиристори і їх включення. Силкові тиристори включають по колу: відкритий оптронний тиристор VS_2 , резистор R_3 , випрямні діоди $VD_3, VD_5, (VD_4, VD_6)$, перехід керуючого тиристора $VS_1 (VS_3)$.

При кожному подальшому переході струму в силовому колі через нуль короткочасно виникає напруга на тиристорах і це приводить до їх повторного включення у вказане вище коло.

При натисненні кнопки SB_2 (Стоп) коло живлення світлодіодів оптронних тиристорів розмикається (тиристор VS_4 переходить у

непровідний стан), оптронні тиристри вимикаються. Унаслідок цього при першому ж переході струму в силовому ланцюзі через нуль тиристри *АЧ* відключаються, забезпечуючи вимкнення контактора. При автоматичному управлінні роботою контактора замість кнопок використовують транзистори, що працюють в ключовому режимі.

Контактори звичайно застосовують для пуску й реверсування асинхронних двигунів, тому тиристри їх *ЕК* мають бути розраховані на напругу, що враховує дію ЕРС обмоток двигуна, що обертається. Використання їх найефективніше за важких умов експлуатації, які характеризуються високою частотою включення, великими значеннями струмів, що включаються і відключаються при низьких коефіцієнтах потужності, наявністю агресивного середовища, підвищеною вибухонебезпекою і т.д.

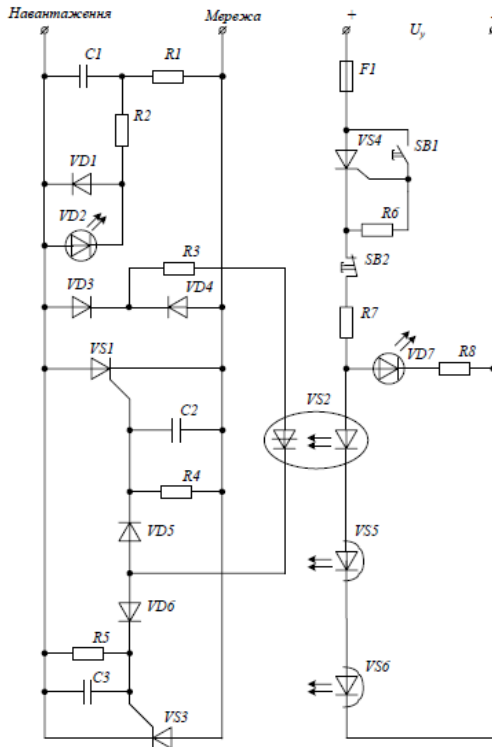


Рис.38. Схема електрична трьохполюсного контактора змінного струму з оптронним управлінням силових тиристорів

Істотно розширюється сфера застосування безконтактних НПК – при введенні в них додаткових пристроїв захисту від аварійних режимів, – а також систем імпульсно – фазового управління. У цьому випадку вони можуть виконувати не тільки додаткові функції автоматичних вимикачів, але й функції станцій управління, суміщаючи режими управління, регулювання й захисту.

Таким чином, *вдосконалені схеми управління безконтактних НПК* дозволяють не тільки розширити їх функціональні можливості за рахунок використання в складі апарата розглянутих раніше уніфікованих пристроїв контролю і захисту, а також застосування систем імпульсно – фазового управління, але й зручно поєднуватися з пристроями автоматики та обчислювальної техніки, що особливо важливо при створенні автоматизованих комплектних пристроїв підвищеної надійності. Принципові електричні схеми вдосконалених схем управління через їх складність тут не наведено.

Розрахунок силової частини безконтактних НПК базується на методах розрахунку *ЕК*.

Пропонується наступний порядок такого розрахунку:

1) на основі аналізу основних параметрів контактора і його функціонального призначення обирається тип *ЕК*;

2) за заданим номінальним струмом контактора на основі методів розрахунку струмового навантаження і теплового режиму силового напівпровідникового прибору (СНП) в безперервному режимі роботи вибирають тип силового тиристора за струмом, при цьому заздалегідь передбачають, що напруга класу тиристорів не менша $2U_{тф}$;

3) для вибраного типу тиристора за допомогою методів розрахунку теплового режиму СНП в повторно короткочасному режимі визначається номінальний робочий струм контактора при заданих частоті і тривалості включення, тут же, використовуючи методи прогнозування цикlostійкості СНП, визначають, за необхідності й цей параметр тиристорів;

4) за допомогою методів розрахунку теплового режиму СНП в короткочасному режимі визначається перевантажувальна здатність контактора по струму ($I/I_{ном} = f(t)$), при цьому захисна характеристика пристроїв контролю струму повинна завжди проходити нижче за цю характеристику;

5) при заданому мінімальному значенні коефіцієнта потужності за допомогою методів розрахунку теплового режиму СПП в імпульсному режимі визначають максимально можливе значення ударного струму к.з., що відключається без пошкодження контактором, яке з урахуванням коефіцієнта запасу $K_3 = 0,85$ і визначає граничну комутаційну здатність апарата;

6) по заданій номінальній напрузі для вибраної схеми *ЕК* за допомогою методів розрахунку комутаційних перенапружень на СПП при відключенні активно – індуктивного навантаження визначають оптимальні (за мінімумом величини перенапруження і його швидкості наростання) параметри захисного *RC* – кола;

7) на підставі аналізу результатів розрахунку комутаційних перенапружень на тиристорах у різних режимах роботи контактора (реверс і відключення асинхронних двигунів, відключення к.з., дія зовнішніх перенапружень і т.ін.), визначаються максимально можливі значення комутаційних перенапружень і швидкостей їх наростання, за яких вибирають клас тиристорів за напругою і групу по du/dt із урахуванням $K_3 = 0,85$.

9.2. Безконтактні напівпровідникові контактори постійного струму (БНКПС)

Безконтактні напівпровідникові контактори постійного струму (БНКПС) можуть виконуватися на базі традиційних одноопераційних тиристорів, двоопераційних тиристорів і JGBT–транзисторів. Оскільки за перевантажувальною здатністю і прямим падінням напруги останні істотно поступаються тиристорам, а високі динамічні параметри JGBT – транзисторів у напівпровідникових контакторах поки не затребувані, то нижче буде розглянуте використання в *БНКПС* тільки двох указаних вище типів тиристорів. При цьому слід зазначити, що ніяких інших утруднень принципового характеру при використанні JGBT–транзисторів в *БНКПС* не виникає. На рис.39 наведено *принципову схему варіанта БНКПС*, виконаного з використанням традиційних тиристорів. Основною перевагою цієї схеми є те, що на її основі можна створювати *НПКПС* на номінальні струми з відносно високою відключаючою здатністю (63А і вище) [3].

Даний контактор складається з наступних функціональних вузлів:

1) *тиристорного ключа з примусовою комутацією місткості*, що містить основний тиристор VS_1 і імпульсну схему примусової комутації: комутуючий тиристор VS_2 , що комутує конденсатор C_4 , комутуючу котушку індуктивності L_1 , зворотний діод VD_2 , додатковий резистор R_3 ;

2) *кола заряду комутуючого конденсатора*, що містить зарядний тиристор VS_3 , котушку індуктивності L_1 , і необхідного для попереднього заряду конденсатора C_4 ;

3) *схеми запуску* основного тиристора VS_1 , що містить контакти кнопок "Пуск" і "Стоп" і обмежувальний резистор R_1 ;

4) *схеми запуску* тиристора VS_2 , що містить діод VD_4 , коло часової затримки (резистор R_6 , конденсатор C_3), розрядний резистор R_8 і стабілітрон VD_3 ;

5) *схеми запуску* тиристора VS_3 , що містить контакти кнопок "Пуск" і "Стоп", коло часової затримки (резистор R_9 , конденсатор C_6);

6) *захисного діода* VD_7 , що виключає вплив індуктивності навантаження LH на тиристорний ключ при відключенні навантаження з індуктивним характером;

7) *демпфуючого кола*, що містить резистор R_2 і конденсатор C_1 і необхідного для обмеження амплітуди й швидкості наростання комутаційних перенапружень;

8) *кіл контролю*, що містять світлодіод VD_1 , резистор R_5 і світлодіод VD_6 , необхідних для сигналізації щодо працездатності тиристорного ключа і кола виключення контактора.

Працює контактор наступним чином. При натисненні кнопки "Пуск" напруга мережі через обмежувальний резистор R_1 подається на перехід тиристора, що управляє VS_1 , забезпечуючи його включення. У включеному стані контактора схема імпульсної примусової комутації перебуває у знеструмленому стані (вона шунтується основним тиристором VS_1), що істотно підвищує надійність роботи даної схеми.

При натисненні кнопки "Стоп" конденсатор C_6 починає заряджатися через резистор R_9 від напруги на навантаженні i ; щойно напруга на ньому досягає напруги перемикання одноперехідного транзистора VT_1 , останній, перемикаючись, забезпечить надійне включення зарядного тиристора VS_3 розрядним струмом конденсатора C_6 . При цьому починається коливальний заряд конденсатора C_4 по такому колу: $+U$, відкритий тиристор VS_1 , котушка індуктивності L_1 , відкритий тиристор VS_3 , $-U$.

Із метою зменшення втрат в колах комутації контактора котушки індуктивності виконують так, щоб її активний опір був мінімальним.

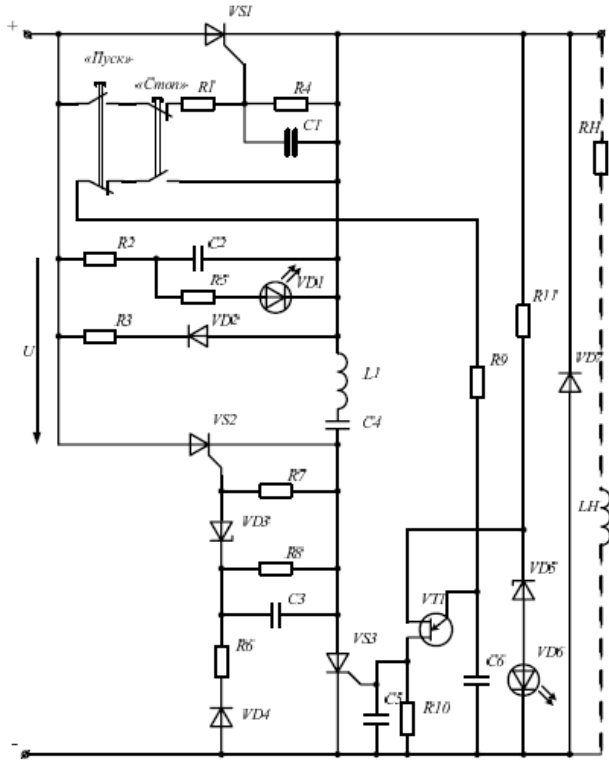


Рис.39. Принципова схема БНКПС

Тому, практично не викривляючи характер даного процесу, можна прийняти, що цей опір дорівнює нулю. У цьому випадку зарядний струм

$$i_{зар} = \frac{U}{\sqrt{\frac{L_1}{C_4}}} \cdot \sin \omega_0 t,$$

де U – напруга мережі.

Амплітуда зарядного струму

$$i_{зар} = \frac{U}{\sqrt{\frac{L_1}{C_4}}} \cdot \sin \omega_0 t.$$

Власна частота контуру заряду

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_4}}.$$

Напруга на конденсаторі

$$u_C = U(1 - \cos \omega_0 t).$$

Заряд конденсатора C_4 припиниться при $i_{зар} = 0$. При цьому конденсатор заряджатиметься до напруги $U_{co} = 2U$. Час його заряджання буде

$$t_{зар} = \pi \sqrt{L_1 \cdot C_4}.$$

Після закінчення заряджання конденсатора C_4 тиристор VS_3 закривається і на ньому виникає напруга ("+" на катоді та "-" на аноді), що дорівнює різниці напруг на комутуючому конденсаторі й навантаженні. Ця напруга через діод VD_4 , коло часової затримки і стабілітрон VD_3 прикладається до переходу комутуючого тиристора, що управляє, VS_2 . Коли напруга на конденсаторі C_3 перевищить напругу стабілізації VD_3 , тиристор VS_2 включиться. До цього часу зарядний тиристор VS_3 вже відновить свої замикаючі властивості.

Включення тиристора VS_2 викличе роботу схеми імпульсної примусової комутації, яка і забезпечить виключення основного тиристора.

Повне відключення навантаження відбудеться при повному перезарядженні конденсатора C_4 і зниженні струму в тиристорі VS_2 нижче за струм утримання.

У даній схемі необхідно, щоб час затримки на включення тиристора VS_3 перевищував час, що дорівнює сумі наступних величин: часу заряджання конденсатора C_4 , часу затримки на включення тиристора VS_2 і часу роботи схеми примусової комутації. У цьому випадку при натиснутій кнопці "Стоп", якщо навіть за якоїсь причини

схема примусової комутації не заборонена тиристор VS_1 , відбудеться повторне її спрацьовування вже при вищій початковій напрузі на конденсаторі C_4 . Останнє є безперечною перевагою даного контактора.

У даний час у зв'язку з розробкою високовольтних (до 10 кВ) повністю керованих IGBT-тиристорів зі струмами, які замикаються, до 5 кА, відносно малими втратами і перевантажувальною здатністю до декількох десятків кА відкрилися чудові перспективи щодо створення на їх основі БНКПС, що суміщають функції управління і захисту без застосування малонадійних вузлів примусової комутації. На нашу думку, такі пристрої найближчим часом набудуть широке застосування (наприклад, на електричному транспорті).

9.3. Гібридні напівпровідникові контактори

Гібридні напівпровідникові контактори завдяки своїм високим техніко-економічним показникам, займають провідне положення серед широкої гами силових комутаційних *НПА* різного призначення. Гібридні контактори вперше в колишньому СРСР були створені в Україні у ВНДІ "Електроапарат" (м. Харків). Тут у 70-ті роки минулого століття були розроблені такі серії гібридних контакторів: для кіл змінного струму – КТ-64, КТП-64 на струми 100, 160, 250, 400 і 630 А, напругою 380 В, частотою 50 Гц; КТ-65, КТП-65 на струми 100÷630 А, напругою 660 В, частотою 50 Гц; для кіл постійного струму – КП-81 на струми 100, 160, 250, 400, 630 А, напругою 220 В.

Дані контактори мають у своєму складі:

– електромагнітний контактор КТ-6000 або КТП-6000, що серійно випускається, застосований у гібридному апараті без яких-небудь істотних конструктивних змін; – спеціально розроблений напівпровідниковий блок (серії БПК-21 для апаратів змінного струму і серії БПК-51 для апаратів постійного струму), що підключається паралельно головному контакту контактора і що забезпечує відсутність електричної дуги на контактах при комутуванні струму навантаження. Причому конструкція блоку дає можливість установлювати його окремо від контактора, що дозволяє використовувати ці блоки для бездугової комутації інших серій контакторів і пускатів.

Література

1. Сосков А. Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: учебник / А. Г. Сосков. – К. : Каравелла, 2005. – 344с.
2. Таев И. С. 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. : Высш. шк., 1987. – 352 с.

Зміст

Передмова	3
Тема 1. Визначення електричного апарата. Класифікація.	
Основні розділи теорії електричних апаратів	4
1.1. Призначення, принцип дії і будова електричних апаратів.....	8
1.2. Апарати автоматичні, реле, датчики, автоматичні регулятори й стабілізатори, підсилювачі й перетворювачі.....	16
Тема 2. Електромеханічні явища в апаратах. Основні закони в магнітних колах	24
2.1. Розрахунок магнітних кіл.....	28
2.2. Різновидності магнітних кіл.....	33
2.3. Нелінійні магнітні кола змінного струму.....	38
Тема 3. Електромагніти постійного струму	41
3.1. Тягова характеристика.....	42
3.2. Протидіючі зусилля електромагніта.....	42
Тема 4. Електромагніти змінного струму	46
4.1. Спрацьовування електромагнітів.....	47
4.2. Котушки електромагнітів.....	50
Тема 5. Електричні контакти	52
5.1. Різновиди електричних контактів.....	53
5.2. Опір електричних контактів.....	54
5.3. Перехідний опір контакту.....	55
Тема 6. Тепловий розрахунок обмоток електричних апаратів	58
6.1. Теплопровідність, конвекція, теплопередача.....	58
6.2. Нагрівання котушок.....	61
Тема 7. Параметри контактних конструкцій	63
7.1. Процеси при розмиканні і замиканні контактів. Знос контактів.....	64
7.2. Матеріали для контактних з'єднань.....	65
Тема 8. Властивості й характеристика електричної дуги	71
8.1. Потужності втрат у дузі.....	73
8.2. Характеристики дуги. Статичні характеристики.....	74
8.3. Дугогасні системи.....	75
Тема 9. Напівпровідникові контактори	80
9.1. Безконтактні напівпровідникові контактори.....	80
9.2. Безконтактні напівпровідникові контактори постійного струму (БНКПС).....	84
9.3. Гібридні напівпровідникові контактори.....	88
Література.....	

Електричні апарати [Текст]: Курс лекцій для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання / уклад. Лишук В.В. – Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2016. – 92 с.

Комп'ютерний набір та верстка: В.В. Лишук.

Видається в авторській редакції

Підп. до друку _____
Формат 60x80/16. Папір офс. Гарн. Таймс.
Ум. друк. арк. Обл. вид. арк.
Тираж прим. Зам.

Редакційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75.
Друк – РВВ Луцького НТУ

