

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Конспект лекцій

Суми
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Конспект лекцій

для студентів 3 курсу бакалавр,
спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
денна та заочна ФН

Суми
2022

УДК – 5150-(075.8)
Р-99

Укладачі:

Чепіжний А.В., к.т.н., ст. викладач; завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ
Рясна О.В., старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ /Конспект лекцій для студентів 3 курсу бакалавр, спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», денна та заочна ФН /Суми, 2022 рік, 63 ст., рис. 33, табл. 1, бібл. 6

В конспекті лекцій наведені всі теми для вивчення дисципліни.

Конспект лекцій призначений для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання, спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Рецензенти: Герасименко В.О., к.ф-м.н., доцент, завідувач кафедрою вищої математики СНАУ

Кравченко В.О., к. ф-м. н. , доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Відповідальний за випуск: Чепіжний А.В., к.т.н., ст. викладач; завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету. Протокол № 6 від « 25 » травня 2022 року

© Сумський національний аграрний університет, 2022

Тематичний план

№ п/п	Назва розділу, теми	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1	Лекції	16	4

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Лекційний матеріал	7
1.1 Лекція №1. Тема №1. Визначення електричного апарата. Класифікація електричних апаратів	7
1.2 Лекція №2. Тема №2. Електричні апарати. Основні типи.....	17
1.3 Лекція №3. Тема №3. Електромеханічні явища в апаратах.....	27
1.4 Лекція №4. Тема №4. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі.....	33
1.5 Лекція №5. Тема №5. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі без урахування потоків розсіювання.....	36
1.6 Лекція №6. Тема №6. Електромагніти постійного струму.....	39
1.7 Лекція №7. Тема №7. Основні положення теорії комутації електричних кіл.....	44
1.8 Лекція №8. Тема №8. Електричні контакти. Фізичні явища в електричному контакті.....	53
Список рекомендованої літератури.....	63

ВСТУП

Дисципліна «Електричні апарати» є однією з основних профільюючих дисциплін у системі підготовки інженера - енергетика.

В даному конспекті лекцій стисло розглядаються основи теорії, принципи роботи, конструкції вузлів апаратів та режими їх роботи і експлуатаційні характеристики, а також рекомендації по вибору електричних апаратів і розрахунку їх окремих вузлів. Конспект написано у відповідності до силабусу курсу «Електричні апарати» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що розрахована на 16 год. лекцій і 14 години практичних занять на протязі одного семестру. Автори намагалися викласти матеріал таким чином, щоб при відносно невеликому об'ємі конспекта лекцій акцентувати увагу на розумінні фізичних процесів і явищ, що відбуваються в електричних апаратах, та основах роботи найбільш широко вживаних електричних апаратів в номінальному режимі, режимі перевантаження та режимі короткого замикання.

Основною задачею предмету є вивчення призначення, будови, принципу дії та використання електричних апаратів напругою до і вище 1000 В, як широко використовуються при вироблені, передачі та споживанні електричної енергії.

Дисципліна базується на знаннях з вищої математики, фізики, загальної електротехніки, промислової електроніки, теоретичної механіки. Оволодіння студентами навчальної дисципліни «Електричні апарати» дозволяє успішно засвоїти такі спеціальні дисципліни, як «Монтаж електрообладнання і систем керування», «Електротехнології в АПК», «Енергетичні установки», «Проектування систем електрифікації, автоматизації і електропостачання». «Електротехнології та електроосвітлення» та застосовувати знання при розв'язанні практичних виробничих завдань.

1. Лекційний матеріал

1.1 Лекція №1. Тема №1: Визначення електричного апарата. Класифікація електричних апаратів

1. Основні теорії апаратів електричних

2. Класифікація електричних апаратів.

1. Основні теорії апаратів електричних

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.ін.

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 й 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 й ін., а також у системах автоматики, телемеханіки, електрозв'язку, радіотехніці, в автоматизованих системах керування, електричному транспорті, тягових підстанціях

2. Класифікація електричних апаратів.

Електричні апарати умовно можна розділити **на п'ять основних видів** [2]:

- **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.ін.;
- **апарати керування**, що керують режимом роботи електроустаткування (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 електроустаткування, 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 електроустаткування, 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.

а 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 просто 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 підрозділити на наступні групи:

1) *контролюючі (реле)*, основною функцією яких є контроль заданих параметрів електричного ланцюга, 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.

3. 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 амперів 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.

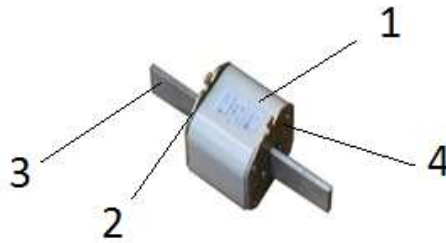


Рис. 1 – Конструкція запобіжника:

1 – корпус; 2 – плавка вставка; 3 – контактний вивід; 4 – кришка.

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 широких. 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).

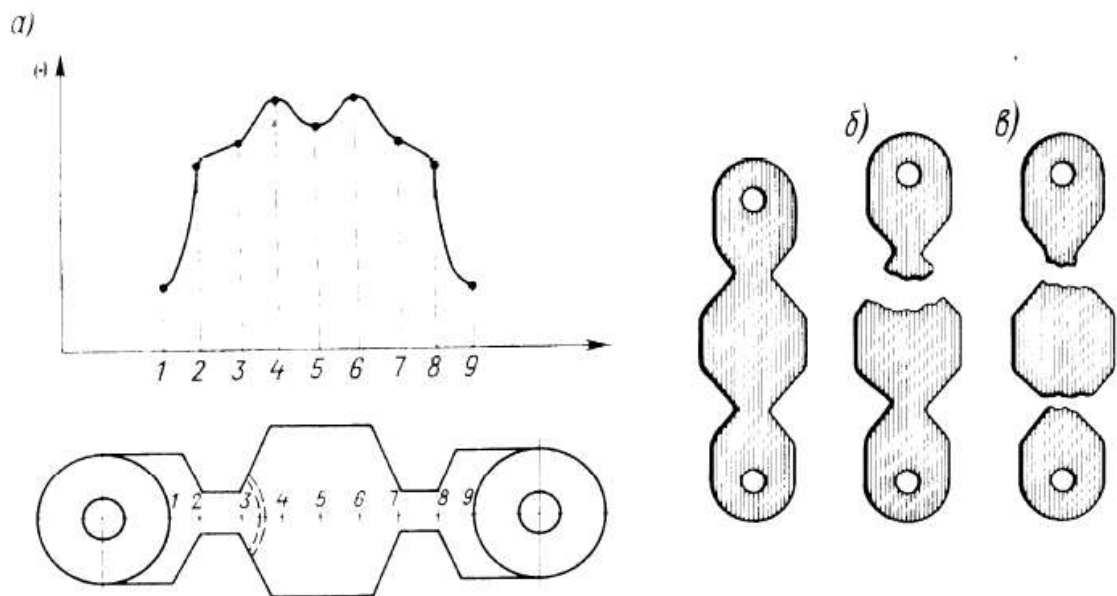


Рис. 2 – Плавка вставка запобіжника

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 0,01-0,1 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): неререверсивний 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 кнопочового поста на корпусі пускача:

- кнопок „пуск” і „стоп” (п+с) на неререверсивних 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, блокувальних) 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 наявністю 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.ін.

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.

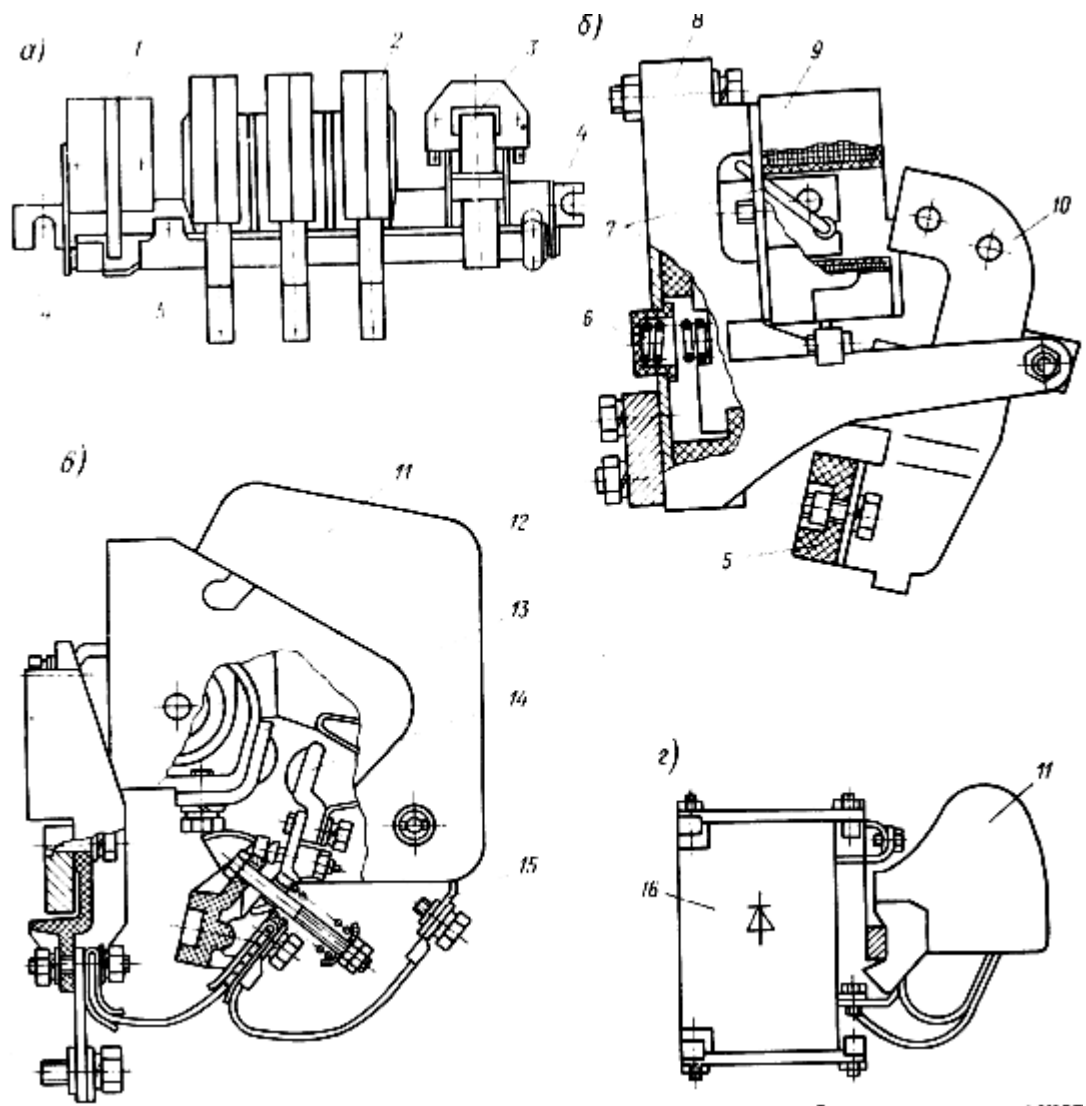


Рис. 3 – Контактори серії КТ6600, КТ64 і КТ65:
а – умовне зображення триполюсного контактора;
б – електромагнітна система; в – контактна і дугогасна системи;
г – схема контактора з бездуговою комутацією

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 підтискною (вона ж амортизує) пружиною 6. Унутрішній (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 металокерамічної композиції на основі срібла. Рухомий контакт –

застосовують напівпровідникові прилади. Так, наприклад, гібридний підйомного типу. Для обмеження вильоту полум'я в камерах установлені пружинні гасники полум'я.

Для прискорення гасіння рухомий контакт забезпечений рогом 15. Для поліпшення умов комутації струму в апаратах керування контактор (рис. 4) об'єднує в собі звичайну контактну систему і напівпровідникову приставку, що шунтує, з тиристорів VS1 і VS2.

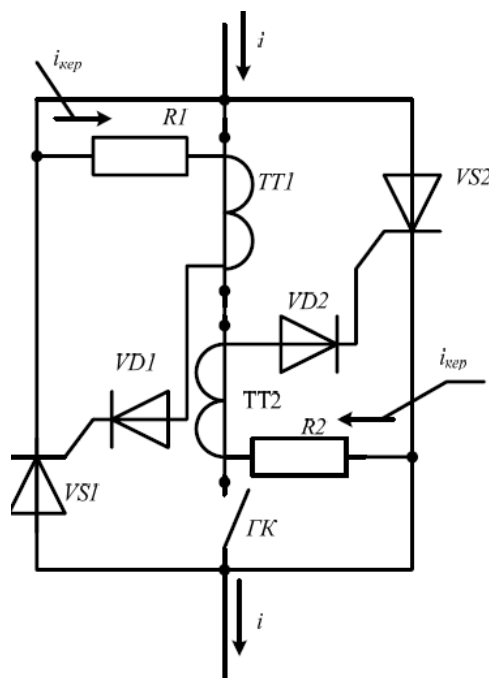


Рис. 4– Гібридний контактор

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 $U_{л}$ 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 $VD1$, $VD2$ 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.

Один із тиристорів пропускає першу півхвилю струму. За нулем струму він виявляється закритим від електромагнітних.

Питання до самоперевірк. 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

Питання для самоконтролю

1. Обґрунтуйте призначення тягових електричних апаратів.
2. Проаналізуйте функції керування струмом за допомогою електричних апаратів.
3. Проаналізуйте сферу застосування тягових електричних апаратів.
4. Обґрунтуйте класифікацію електричних апаратів.
5. Проаналізуйте призначення, принцип дії й застосування на МЕТ запобіжників.
6. Призначення вимикачів високої напруги.
7. Обґрунтуйте призначення апаратів керування.
8. Обґрунтуйте принцип дії гібридного (напівпровідникового) контактора.
9. Проаналізуйте відмінність пускачів від контакторів.
10. Обґрунтуйте призначення електромагнітних муфт.
11. Проаналізуйте умови, за яких відкривається тиристор гібридного контактора.

1.2 Лекція 2 Тема №2. Електричні апарати. Основні типи

1. Апарати автоматичні, геркони, герсикони реле.
2. Реле.
3. Датчики.
4. Автоматичні регулятори й стабілізатори.
5. Підсилювачі й перетворювачі

1. Апарати автоматичні, геркони, герсикони.

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 спрацювання 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).

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 магнітопровода 1. Із зростанням струму ця сила зростає і при досягненні струмом $I_{нг}$ критичного значення $P_{ем}$ виявляється достатньою для подолання сили поворотної пружини $P_{п}$, якір притягається, 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 $I_{нг}$ знизиться до певного значення, електромагнітна сила буде недостатньою для утримання якоря. Під дією сили пружини $P_{п}$ 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.

За електромагнітним принципом працюють **магнітокеровані контактні (МК) апарати** [3]. Контакти запаяні у скляний балон з інертним газом для зменшення впливу на них навколишнього середовища, тому їх називають **герметизованими контактами (герконами)** (рис. 6).

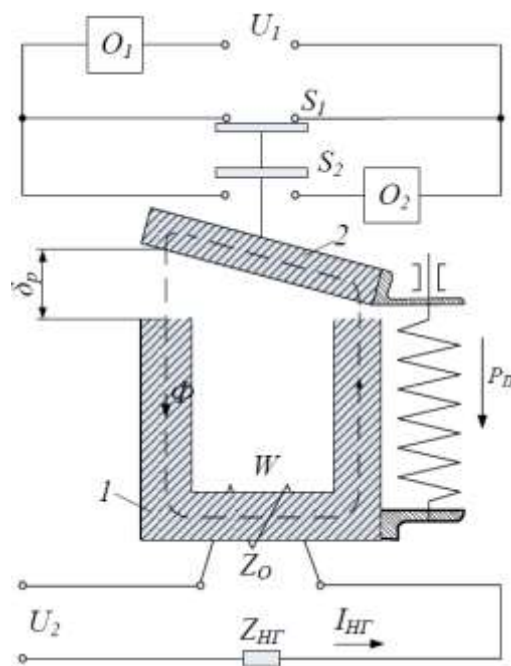


Рис. 5 – Найпростіше електромагнітне реле

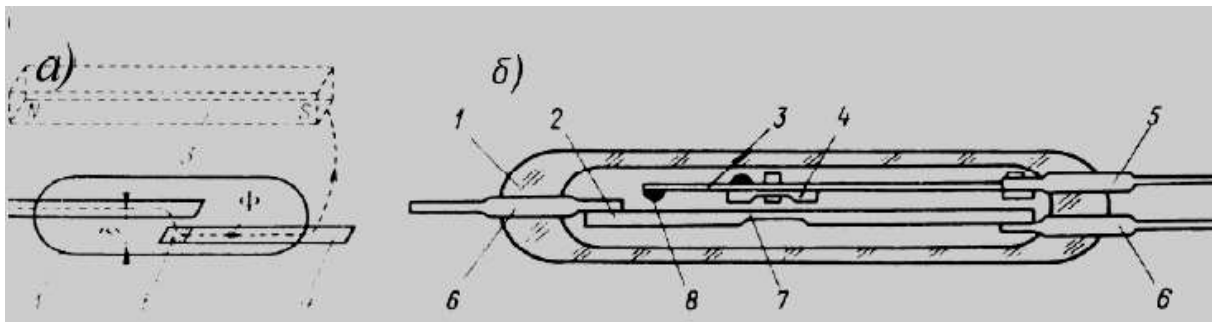


Рис. 6 – Геркон

Найпростіша конструкція МК [2] (рис. 6а) являє собою скляний балон 1 із двома електродами 2 і 4. Балон заповнений інертним газом (азот, аргон, водень і та ін.) або вакуумований до залишкового тиску $0,13 - 0,0013$ Па. Електроди виконані з магнітного матеріалу (звичайно пермалою) і є одночасно магнітопроводом. Кінці електродів покривають шаром якогось дорогоцінного металу (золото, паладій, радій або їх сплави), що утворюють робочу поверхню F для контактування.

Керування МК здійснюється магнітним полем, що може створюватися котушкою або постійним магнітом 3. Магнітний потік Φ через електроди і повітряний зазор δ (зазор контактів), при деякому його значенні приводить до замикання робочих поверхонь електродів і утворення замкнутого електричного кола. При ослабленні (зникненні) магнітного потоку електроди за рахунок своїх пружних властивостей розмикаються, розриваючи електричне коло. впаєних у скляний балон 1. Нерухома контактна система являє собою магнітопровід 2, що містить ділянку зменшеного перерізу 7 і два виводи 6; рухома система містить у собі вивод 5, контактну пластину 3 і якір 4, установлений проти ділянки магнітопровода зменшеного перерізу.

Системи мають основні й дугогасні контакти. Основні контакти утворюються полюсними поверхнями якоря і магнітопровода. Дугогасні контакти 8 складаються з напайок, виконаних із тугоплавкого матеріалу, установлених на магнітопроводі й у кінці пружного елемента.

У даний час розроблені й впроваджені **герсикони** (герметичні силові контакти). Наприклад, герсикони КМГ–12 випускають на номінальний струм, що включається, – 63 А, що відключається – до 180 А. Максимальна потужність двигуна, що може запускатися при напрузі 380 В, дорівнює 3 кВт, при частоті включення до 1200 разів за годину. Механічна і комутаційна зносостійкість при потужності двигуна 1,8 кВт складає 107 циклів. Час спрацьовування – не більше 20 мс. Висока надійність і простота конструкції роблять герсикони дуже перспективними для застосування в комутаційних електричних апаратах.

На відміну від герконів [4] тут застосовані різні деталі для контактів і магнітопровода (рис. 7). В середину герметичної оболонки (плата 1, корпус 14 і кришка 9) введені полюси 2 і 4 електромагніти. Один полюс

забезпечує тверде кріплення кінця феромагнітної пружини якоря 12, що несе рухому контакт– деталь 10, а другий утворює з цією пружиною робочий зазор у колі магнітопровода. Феромагнітна пружина із зовнішнього боку шунтована більш тонкими феромагнітними пружинними пластинками 13, що значно збільшують загальний переріз якоря електромагніта, але вони практично не підвищують протидіюче зусилля. Це дозволяє при відносно невеликій магніторушійній силі одержати необхідне електромагнітне зусилля. Магніторушійна сила створюється котушкою 3, розміщеною поза герсиконом.

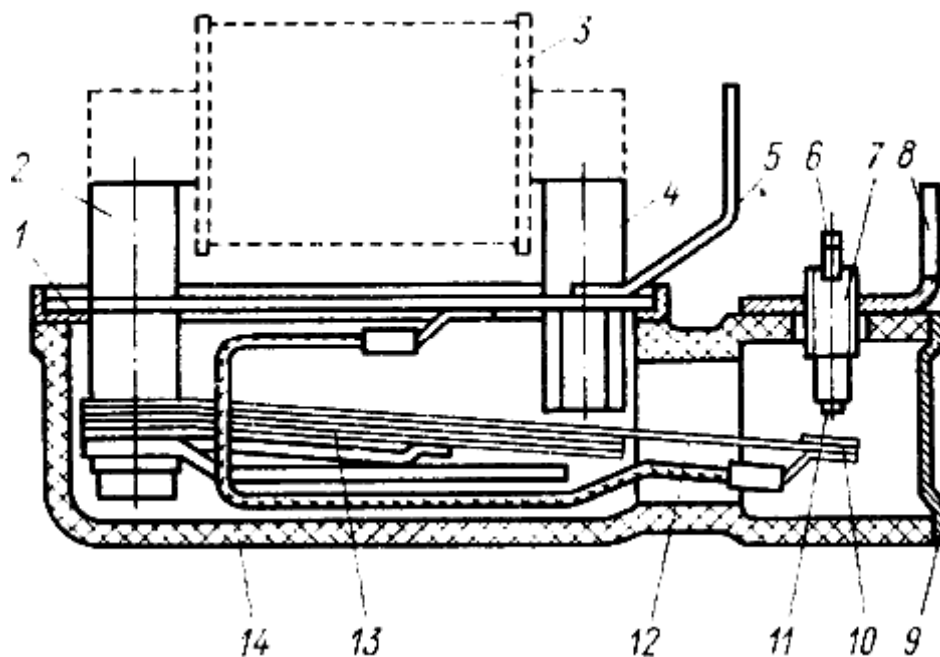


Рис. 7– Герсикон

Контакт – деталі герсикона виконані масивними з напайками з тугоплавкого матеріалу. Підвід струму до рухомої контакт–деталі здійснюють за допомогою гнучкого зв'язку високої провідності. Нерухому контакт – деталь 11 кріплять на кінці спеціального регульовального гвинта 7, введенного всередину герметичної оболонки. Таке кріплення дозволяє регулювати зазор, провал і контактне натискання. Зовнішні затиски 5 і 8 розташовані поза герметичним корпусом. Ніпель 6 служить для забезпечення відкачки повітря з герметичного корпусу і заповнення його захисним газом, що забезпечує електричну міцність (до 3000 В).

2.Реле.

Теплове реле – реагує на величину струму, що протікає нагрівальним елементом НЕ, який включається в коло струму навантаження Інг. Що більший цей струм, то вища температура

нагрівання НЕ – 2 [рис. 8], 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 пластина 1 згинається.

Вимірювальні пристрої реле включають до електричної схеми установки. **Струмові реле** реагують на величину струму, 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.

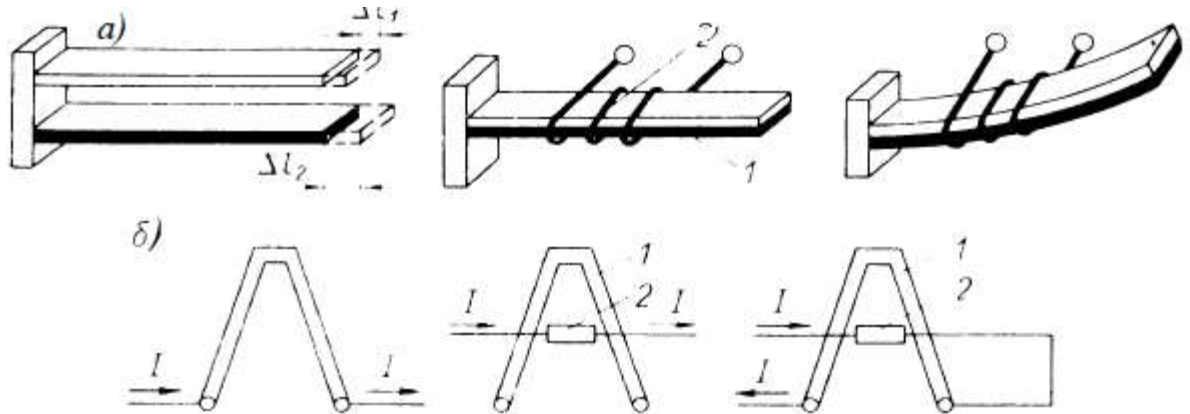


Рис. 8 – Принцип дії біметалічних теплових реле (а) і способи нагрівання пластин (б)

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

Твердотельні реле змінного струму, класифікація

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.ін.

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).

Способи управління

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 «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.

Організація захисту реле

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 [1, стор. 247]. 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 типа забезпечується комутація всіх трьох фаз живлячої напруги. Реле групи ТМА управляються позитивною напругою, ТМБ — негативним. Напруга ізоляції — 1500 В. На рис. 1 наведені схеми включення двох варіантів. Дані наведені в табл. 1.

У схемах автоматичного керування 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.

Таблиця 1 – Характеристики трифазних реверсивних реле

Найменування	$U_{\text{ком}}, \text{В}$	$U_{\text{пик}}, \text{В}$	$I_{\text{ком}}, \text{А}$	$I_{\text{ком.імп}}, \text{А}$	Корпус
5П55.30ТМА–10–8	420	800	10	70	Д8 [1, с. 252]
5П55.30ТМА–15–8			15	150	
5П55.30ТМА–25–8			25	350	
5П55.30ТМБ–10–8			10	70	
5П55.30ТМБ–25–8			25	350	
5П55.30ТМА–40–12	420	800	40	400	Д34 [1, с. 252]
5П55.30ТМБ–40–12					

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 спрацювання реле, замикаються контакти, здатні пропустити через себе значно більший струм у порівнянні зі струмом вхідного сигналу.

4.Датчики

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.ін.

Принцип дії **індуктивного датчика тиску** (рис. 10) заснований на тому, що зі зміною тиску P у резервуарі змінюється повітряний зазор δ між якорем $Я$ і магнітопроводом $М$ магнітної системи електромагнітного пристрою.

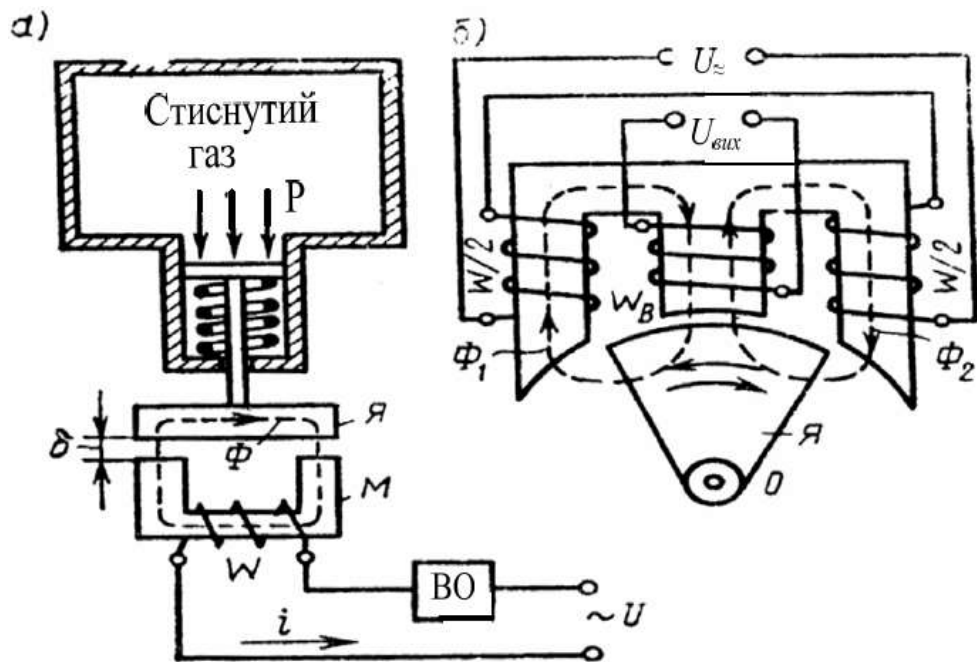


Рис. 10 – а) індуктивний датчик тиску; б) індукційний датчик кутового переміщення

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 $L = (W * \Phi) / i$, де Φ – магнітний потік, створюваний струмом i . У найпростішому випадку $\Phi = (i * \Phi) / R\delta$, де $R\delta$ – магнітний опір повітряних зазорів, дорівнює $R\delta = (2 * \delta) / (\mu_0 * S)$, S – площа полюса на магнітопроводі. Тоді

$$I = U / X = U / (\omega * L) = (U / (2 * \pi * f)) * (i / (W * \Phi)) = (U * i * 2 * \delta) / (2 * \pi * f * W * i * W * \mu_0 * S) = (U * \delta) / (\pi * \mu_0 * W^2 * S),$$

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. 10б), що реагує на кутові переміщення рухомої системи і заснований на тім, що на крайніх стержнях магнітопровода розміщені 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. Потoki $\Phi_1 = \Phi_2$. 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_b 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 магнітопроводу, 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.

4. Автоматичні регулятори й стабілізатори.

Автоматичні регулятори й стабілізатори призначені для підтримки на заданому рівні вихідного параметра об'єкта чи керування регулювання. Такими параметрами можуть бути напруга на клеммах 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.

5. Підсилювачі й перетворювачі

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. 11,1), плавна зміна вхідного сигналу викликає плавну зміну вихідного параметра.

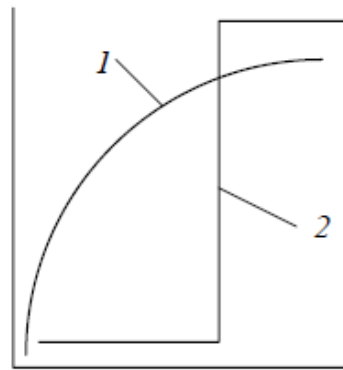


Рис. 11 а,б

На рисунку 11: 1) плавна зміна вихідного сигналу; 2) стрибкоподібна залежність вихідного сигналу, викликана особливим режимом, коли невелика зміна вхідного сигналу приводить до стрибка вихідного сигналу

Магнітні й напівпровідникові підсилювачі є основою апаратів, що забезпечують стрибкоподібну залежність між $I_{вух}$ 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. 12).

Обмотка навантаження W_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:

$$X = \omega * L = \omega * ((W_n * \Phi) / i) = \omega * (W_n / i) * ((i * W_n) / R_m) = \omega * W_n^2 \cdot \mu * S / l_m,$$

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 сталевого 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.

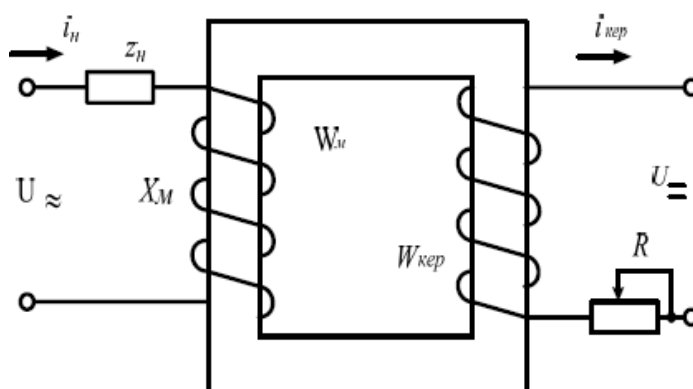


Рис. 12 – Схема магнітного підсилювача

Якщо ж здійснити підмагнічування постійним струмом ($i_{кер} > 0$), то в магнітопроводі будуть існувати два магнітні потоки: від струму i_H через обмотку W_H і від струму $i_{кер}$ через обмотку $W_{кер}$. Результуючий магнітний потік і індукція в сталевому магнітопроводі зростуть, матеріал магнітопроводу увійде 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_H 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) і 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.

Лекція № 3 Тема №3: Електромагнітні явища в апаратах.

1. Електромагнітні явища
2. Рівняння електромагнітного поля і магнітних кіл
3. Розрахунок магнітних кіл

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.

Майкл Фарадей ввів поняття про силові трубки магнітного потоку, що мають властивості натягнутих пружних елементів: у поздовжньому напрямку вони скорочуються (виявляють сили поздовжнього тяжіння $P_{\text{под}}$), а в поперечному – відштовхуються (виявляють сили бічного розпору $P_{\text{б}}$). У джерелах замість поняття про силові трубки використовують поняття про магнітні силові лінії (рис. 1).

При протилежному напрямку струму напрямом магнітних силових ліній у просторі між провідниками однаковий (рис. 2). Їхня густина (індукція) тут підвищена, і виникаючі сили бічного розпору створюють електродинамічні сили відштовхування між провідниками. При однаковому напрямку струмів (рис. 2) навколо обох провідників виникає спільний магнітний потік Φ і завдяки поздовжньому тяжінню силових ліній виникають електродинамічні сили притягання провідників один до одного. Це правило сформульоване академіком **В. Ф. Міткевичем**. Різнопольсні магнітні елементи (рис. 3) притягуються один до одного, а однополюсні – відштовхуються один від одного.

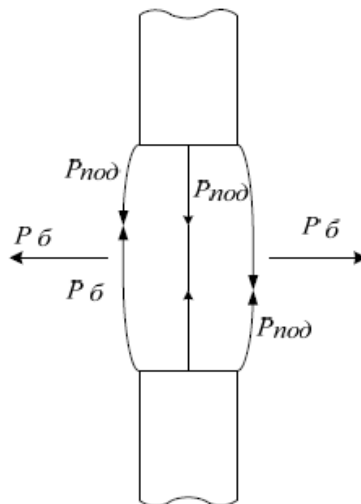


Рис. 1 – Магнітні силові лінії

Інший 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.

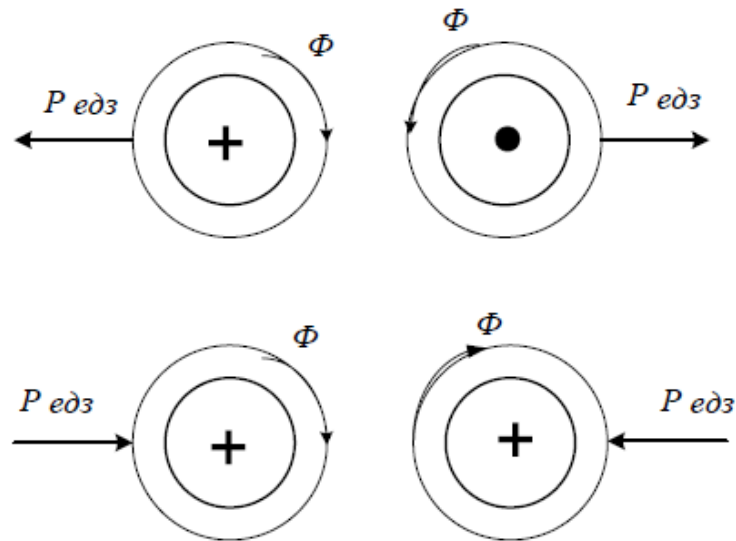


Рис. 2 – Електродинамічні сили ($P_{едз}$ – електродинамічне зусилля; Φ – магнітний потік).

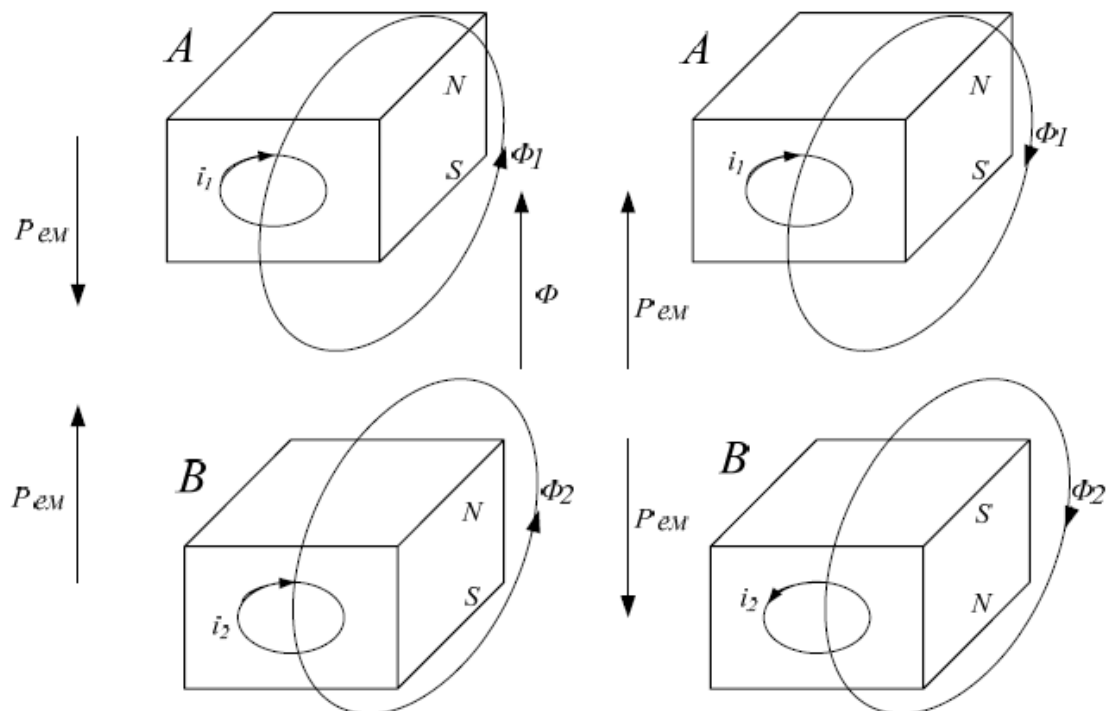


Рис. 3 – Електромагнітні взаємодії

В електромагнітах електромагнітне поле (рис. 3) створюється струмами, що протікають по обмотках намагнічування. Струм i_0 в обмотці W створює потік Φ . 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.ін. Сила поздовжнього тяжіння з'явиться у вигляді електромагнітних сил притягання рухомого елемента А до нерухомого полюса В у зазорі δ_1 (аналогічні сили будуть діяти й у неробочому зазорі δ_2).

Сили відштовхування в електромагнітах не виникають, тому що потік орієнтує мікроструми і потік від них тільки в одному напрямку (рис. 4).

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.

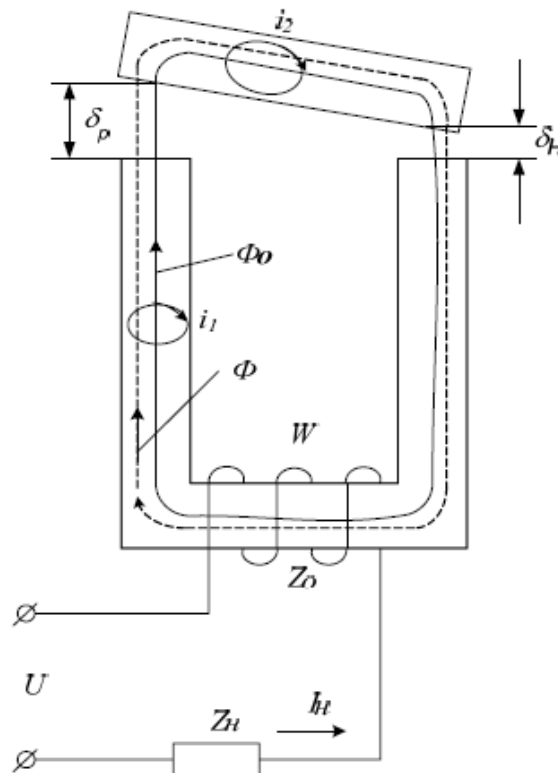


Рис. 4 – Магнітне поле в електромагніті

3.1. Рівняння електромагнітного поля і магнітних кіл

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:

$$\Sigma H * l = i * W.$$

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

$$Edl = -d\Phi / dt ,$$

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:

$$e = -d\psi / dt ,$$

де e – електрорушійна сила, що наводиться, В;

ψ – потокозчеплення, Вб;

$$\psi = \Phi * W .$$

Щодо електромагнітних елементів синусоїдального змінного струму закон Фарадея записують так:

$$U = 4,44 * f * W * \Phi ,$$

де U – напруга, В (діюче значення); f – частота, Гц; W – число витків обмотки; Φ – амплітудне значення магнітного потоку, Вб.

Магнітне поле в практичних умовах звичайно організовують шляхом застосування магнітопровідникових матеріалів – ферромагнетиків. 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.ін.).

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

Електромагнітні пристрої апаратів мають ферромагнітні елементи, що різко зменшують магнітний опір для потоку, і повітряні зазори, утворені стиками ферромагнітних деталей (паразитні зазори), чи спеціально створювані робочі повітряні зазори. Завдяки різниці магнітних провідностей повітря і ферромагнетіку 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_r , що створює електромагнітну силу притягання якоря до полюса електромагніта; **потік випучування** $\Phi_{вип}$ із граней поблизу робочогоповітряного зазору δ_r , 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 (рис. 17).

Для зручності розрахунку магнітне коло заміняють еквівалентним електричним колом, названим **схемою заміщення**. У схемі джерело МДС зображують як батарею з силою, що намагнічує $F = I \cdot W$. Ділянки магнітопроводу і повітряні зазори зображують у вигляді опорів (рис. 17)

Магнітний опір на кожній із ділянок вважають незмінним уздовж ділянки.

Розрахунок ведуть за законами Кірхгофа. При цьому слід врахувати, що аналогія з електричним колом тут формальна. В електричному колі з лінійними опорами залежність $I = f(U)$ **лінійна**. У магнітному колі має місце насичення, і залежність $\Phi = f(F)$ набуває нелінійного характеру.

Провідність (опір) потоків розсіювання G_σ являє собою розподілену провідність. Зображуємо її як ряд паралельно включених провідностей $G_\sigma = V_{уд.} \cdot p / l$,

де $V_{уд.}$ р., питома провідність (провідність на одиницю довжини);
 l – довжина ділянки.

Чим більше ділянок, тим точніше розрахунок. У ній через "R" із цифровими індексами позначають магнітні опори ділянок сталевих магнітопроводу, через $R_{\delta 1}$ і $R_{\delta 2}$ – магнітні опори повітряних зазорів, а через $F = i \cdot W$ – магніторушійну силу, що створює магнітні потоки Φ_δ і Φ_σ (i – струм в обмотці, W – число витків обмотки).

Провідність (опір) потоків розсіювання G_σ являє собою розподілену провідність. Зображуємо її як ряд паралельно включених провідностей $G_\sigma = \Lambda_{уд.} \cdot p / l$, де $\Lambda_{уд.}$ р., питома провідність (провідність на одиницю довжини); l – довжина ділянки. Чим більше ділянок, тим точніший розрахунок.

3. Розрахунок магнітних кіл

Розрахунок магнітних кіл подібний розрахунку електричних кіл заснований на застосуванні таких співвідношень:

1. Алгебраїчна сума магнітних потоків у будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю (аналогічно першому закону Кірхгофа): $\sum \Phi = 0$.

2. Алгебраїчна сума падінь "магнітних потенціалів" за замкнутим контуром магнітного кола дорівнює алгебраїчній сумі магніторушійних сил, що діють у цьому ж контурі (аналогічно другому закону Кірхгофа). Магніторушійна сила обмотки з числом витків W при струмі в ній i дорівнює $F = i \cdot W$. Під падінням магнітного потенціалу на певній ділянці магнітного кола мається на увазі добуток магнітного потоку Φ на магнітний опір R_m цієї ділянки. Тоді маємо:

$$\oint \Phi dR_M i W = \sum \Phi R_M = i W,$$

$$\text{звідси: } \Phi = (i W) / R_M.$$

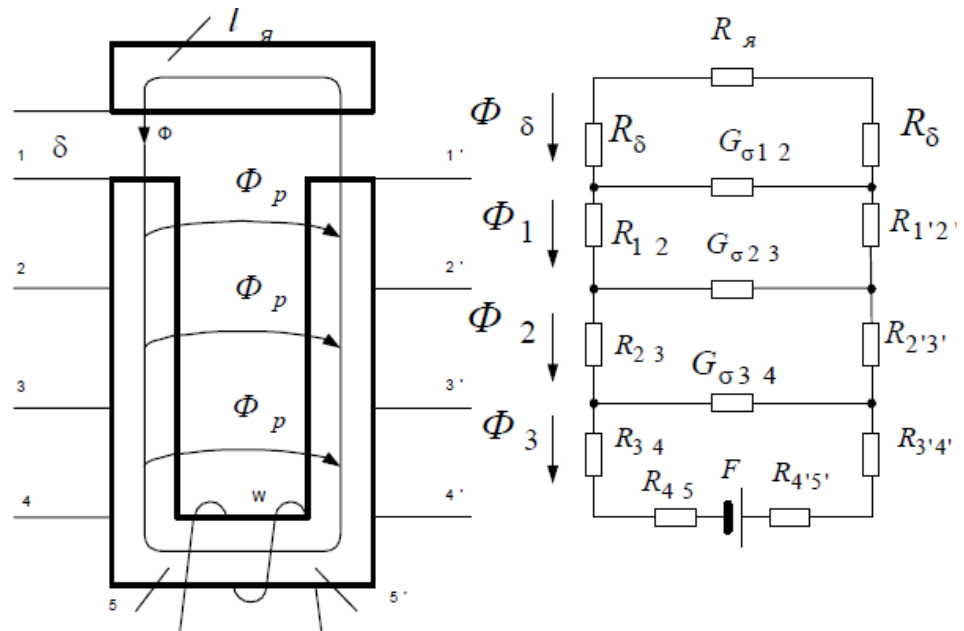


Рис. 5 – Схема заміщення магнітних кіл

3. Елементарна форма закону повного струму виражається залежністю

$$\sum H * l = i * W.$$

4. Взаємозв'язку між потокозчепленням Ψ , потоком Φ , числом витків W , перерізом магнітопроводу S , індукцією B , напруженістю поля H и магнітною проникністю μ :

$$\Psi = \Phi * W;$$

$$\Phi = B * S;$$

$$B = \mu * H,$$

$$\text{де } \mu = \mu_0 * \mu_{отн},$$

$\mu_{отн}$ – відносна магнітна проникність, а

$\mu_0 = 1,25 * 10^{-6}$ Гн/м – магнітна проникність повітря.

5. Магнітний опір R_M ділянки магнітного кола перерізом S і довжиною l дорівнює $R_M = l / (\mu * S)$, де μ – магнітна проникність. Магнітна провідність ділянки $\Lambda_M = 1 / R_M = (\mu * S) / l$. Електромагнітні елементи характеризуються індуктивністю $L = \Psi / i = (W * \Phi) / i$, де Φ – потік, створений обмоткою з числом витків W при протіканні нею струму i (при зчепленні потоку Φ з усіма витками обмотки). Якщо використовувати залежність $\Phi = (i * W) / R_M$, одержимо $L = (W * \Phi) / i = (W / i) * (i * W) / R_M = W^2 / R_M$, $L = W^2 * \Lambda_M$.

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. Обґрунтуйте величину магнітного опору магнітопроводу як малу чи велику.
9. Закон розрахунку магнітних кіл (аналогічний першому закону Кирхгофа для електричних кіл).
10. Закон розрахунку магнітних кіл (аналогічний другому закону Кирхгофа для електричних кіл).
11. Поясніть закон повного струму для магнітних кіл

Лекція №4. Тема №4. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі

1. Магнітопроводи.
2. Графічний метод
3. Метод розбивки поля на найпростіші фігури.

1. Магнітопроводи.

Магнітопроводи. Як матеріал магнітопроводів використовують сталь і її сплави. Для електромагнітних систем застосовують так звані магнітом'які матеріали із вузькою петлею гістерезиса і високою магнітною проникністю. Ці матеріали характеризуються кривою намагнічування, що являє собою залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля.

Для постійних магнітів застосовують магнітотверді матеріали, що мають широкую гістерезисну петлю і малу магнітну проникність.

Повітряні зазори. При розрахунку магнітного кола необхідно визначити провідність повітряного зазору прямо пропорційну перерізу обсягу, яким проходить магнітний потік і обернено пропорційну довжині зазору. Для порівняно простих форм полюсів магнітна провідність повітряних зазорів може бути обчислена аналітично. Наприклад, для

полюсів (рис. 18) при малому повітряному зазорі між ними і при магнітних лініях, що йдуть паралельно,

$$\Lambda = (\mu_0 \cdot S) / \delta, \text{ Гн},$$

де S – переріз повітряного зазору, м^2 ;

δ – його довжина, м;

μ_0 – магнітна проникність повітря, $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$,

для полюсів (рис. 18а)

$$\Lambda = (\mu_0 \cdot a \cdot v) / \delta, \text{ а для полюсів на рис. 18б } \Lambda = (\mu_0 \cdot \pi \cdot d^2) / (4 \cdot \delta).$$

У дійсності навіть для цього простого випадку визначення провідності становить деякі труднощі.

У повітряному зазорі магнітні лінії будуть випучувати (рис. 18,в). Переріз провідного повітряного зазору S' (рис. 18,г). буде трохи більше перерізу полюса S , і дійсна провідність буде більшою, ніж підрахована за останнім рівнянням. При відносно простих формах полюсів випучування магнітних ліній вдається врахувати поправочним коефіцієнтом.

Вважають, що

$$S' = (a + x) \cdot (b + y) \text{ (рис. 18г).}$$

Наприклад, провідність між полюсами (рис. 18,в) буде

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \left(a + \frac{0.307 \cdot \delta}{\pi} \right) \cdot \left(b + \frac{0.307 \cdot \delta}{\pi} \right)$$

Поправочний коефіцієнт $(0,307/\pi)$ враховує випинання магнітних ліній у зазорі.

Для полюсів більш складних форм аналітичних виразів не існує, провідності зазорів можуть бути розраховані графічним методом або методом розбивки поля на найпростіші фігури.

Графічний метод

Графічний метод заснований на побудові картини магнітного поля наступною розбивкою його на елементарні трубки. Цей метод точний, але складний і трудомісткий.

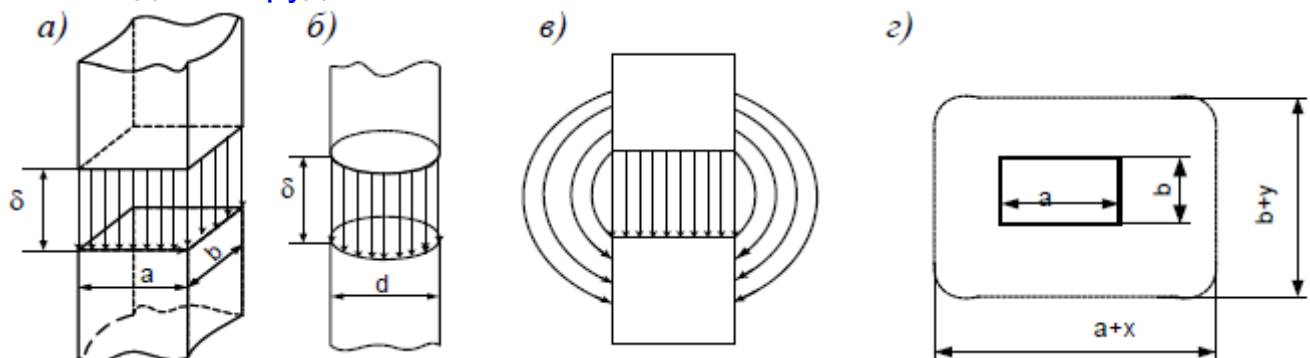


Рис. 18 – Визначення провідності повітряних зазорів

2. Метод розбивки поля на найпростіші фігури.

Найбільш широко використовують **метод розбивки поля нанайпростіші фігури**. Цей метод дає достатню для практики точність. Полягає він у наступному. Магнітне поле в повітряному зазорі розбивають на ряд найпростіших геометричних фігур, для яких відомі аналітичні вирази провідностей. Провідність зазору підраховують як суму провідностей усіх геометричних фігур, на які розбите поле. Наприклад, поле між чотирикутним полюсом і площиною (рис. 19) може бути представлене у вигляді суми наступних найпростіших фігур: паралелепіпеда перерізом $a \cdot b$ і висотою δ (1), чотирьох чвертей циліндра радіусом δ і довжиною твірних a і b (2), чотирьох чвертей порожнього циліндра товщиною $m = (1.2) \cdot \delta$, внутрішнім радіусом δ і довжиною твірних a і b (3), чотирьох (на кутах) половин кульового квадранта радіусом δ і чотирьох половин кульової оболонки товщиною m і внутрішнім радіусом δ .

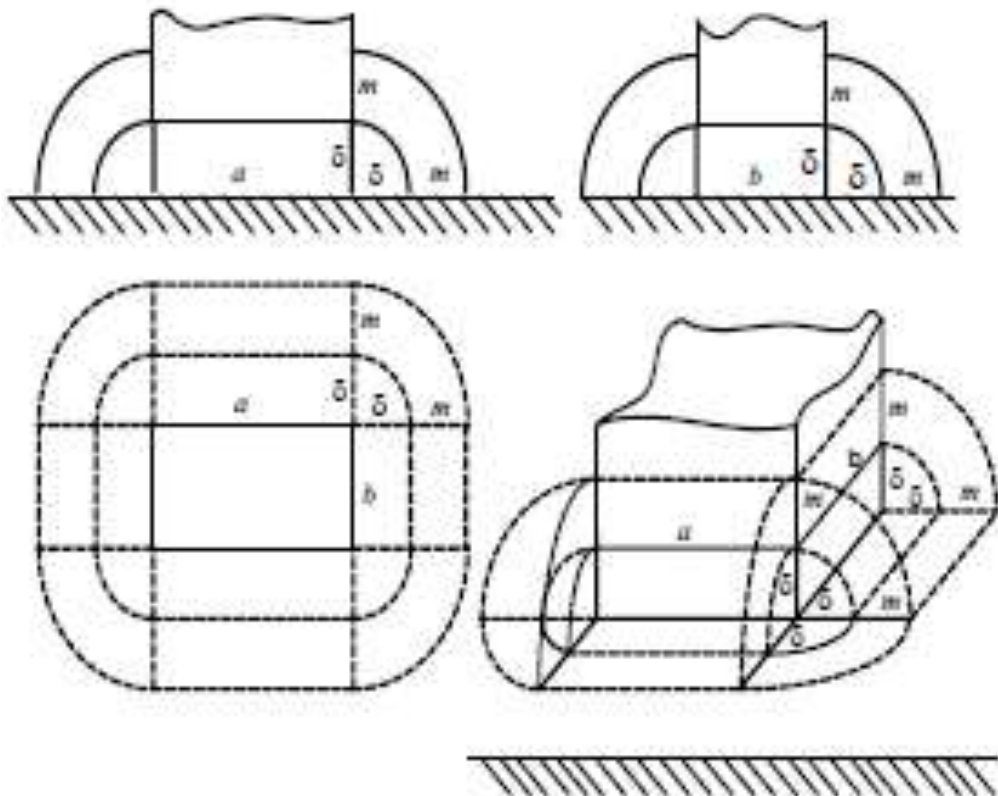


Рис. 19 – Розбивка поля на найпростіші геометричні фігури

Лекція №5. Тема №5. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі без урахування потоків розсіювання.

1. Тороїд з розподіленою обмоткою
2. Розгалужене магнітне коло

Тороїд із розподіленою обмоткою – це найбільш просте нерозгалужене коло (рис. 20), коли потоки розсіювання практично немає. Для цього кола відповідно до другого закону Кірхгофа:

$$\begin{aligned}\Phi \cdot R_m &= I \cdot W; \\ \Phi \cdot (l / (\mu \cdot S)) &= I \cdot W.\end{aligned}$$

МРС ($I \cdot W$) тут витрачають тільки на проведення магнітного потоку через магнітопровід, і значення її f , що припадає на одиницю довжини магнітопроводу $l = \pi \cdot D$, дорівнюватиме напруженості магнітного поля в сталі:

$$F = I \cdot W = H \text{ (А/м)}$$

H – напруженість магнітного поля, А/м; B – індукція, Тл).

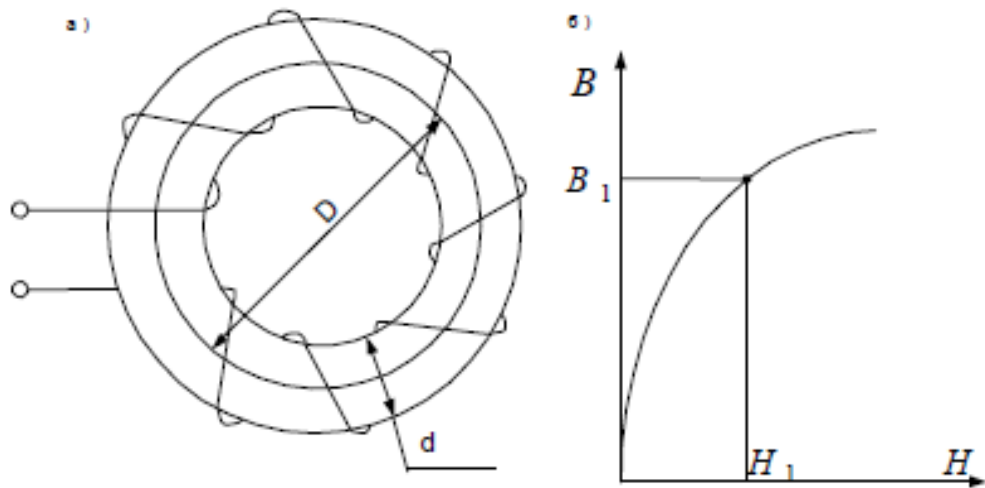


Рис. 20 – Тороїд із розподіленою обмоткою (а) і крива намагнічування сталі (б)

Якщо заданий потік Φ , який протікає через переріз магнітопроводу $S = (\pi \cdot D^2)/4$ відомий, обчислюємо індукцію $B_1 = \Phi/S$. За кривою намагнічування (б) знаходимо відповідну напруженість магнітного поля H_1 .

Шукана МРС:

$$F = I \cdot W = H_1 \cdot l = h \cdot \pi \cdot D.$$

Якщо задана МРС $F = I \cdot W$, обчислюємо напруженість магнітного поля $H_1 = (I \cdot W)/l$. За кривою намагнічування знаходимо індукцію B_1 і, знаючи переріз, визначаємо шуканий потік $\Phi = B_1 \cdot S$.

2. Розгалужене магнітне коло

Магнітний потік у нерозгалуженій частині магнітного кола (рис. 21) – повний потік $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$,

де Φ_1, Φ_2 – потоки в розгалуженій частині магнітопроводу. Повна магніторушійна сила $F = F_1 + F_2$, де F_1, F_2 – падіння магнітних потенціалів на ділянках, обтічних потоками Φ, Φ_1, Φ_2 ; $F_1 = \Phi \cdot R_{m1}$;

$$F_2 = \Phi_1 \cdot (R_{m2} + R_{m3} + R_{m4});$$

$$F_2 = \Phi_2 \cdot (R_{m5} + R_{m6} + R_{m7});$$

де $R_{m1}, R_{m2} \dots R_{m7}$ – відповідних ділянок магнітопроводу. При симетричному щодо осі 1–1 магнітопроводі $R_{m2} = R_{m5}$, $R_{m3} = R_{m6}$ і т.ін., а $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi/2$ і розрахунок ведуть для половини магнітопроводу як для тороїду. Обидві половини являють собою два паралельно включені магнітопроводи з потоком $\Phi/2$, у яких діє МРС F .

Якщо заданий потік Φ , то знаходимо:

$$B_1 = (\Phi/2)/S_1; B_2 = \Phi_1/S_2 = (\Phi/2)/S_2;$$

$$B_3 = \Phi_1/S_3 = (\Phi/2)/S_3; B_7 = \Phi_1/S_7 = (\Phi/2)/S_7;$$

Знаходимо за кривими намагнічування H_1, H_2 і т.ін.

$$F = H_1 \cdot l_1 + H_5 \cdot l_5 + H_6 \cdot l_6 + H_7 \cdot l_7;$$

$$F = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_4 \cdot l_4.$$

а)

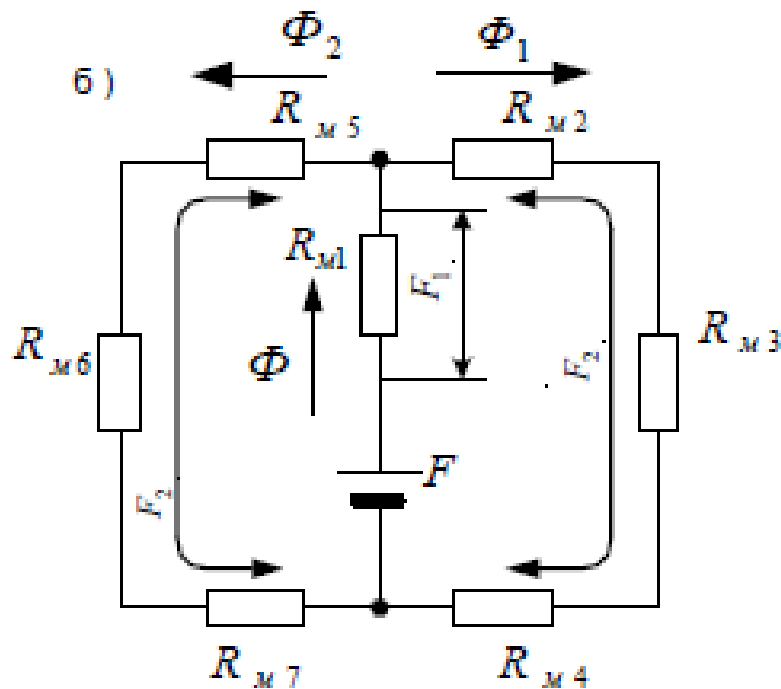
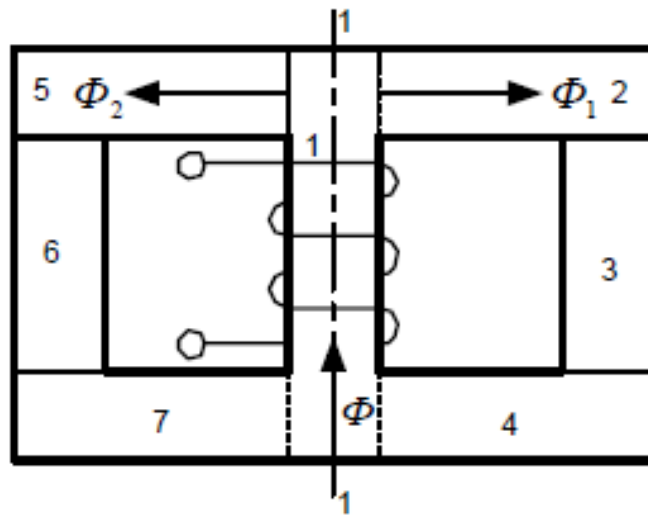


Рис. 21. – Магнітне коло (а) і схема його заміщення (б)

Питання до самоперевірки

1. Обґрунтуйте використання матеріалу магнітопроводу електромагнітних систем.
2. Обґрунтуйте матеріал магнітопроводу постійних магнітів.
3. Проаналізуйте криву намагнічування сталі.
4. Розрахунок тороїду з розподіленою обмоткою при заданій магніторушійній силі.
5. Розгалужене магнітне коло і його розрахунок.

Лекція №6 Тема №6. Електромагніти постійного струму

1. Тягова характеристика.
2. Протидіючі зусилля (навантаження).
3. Основні параметри електромагнітів.
4. Загальне рівняння балансу напруги на обмотці електромагніта.

В електромагнітах постійного струму магнітний потік створюють обмоткою постійного струму. Дія таких електромагнітів не залежить від напрямку 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 автоматики.

Найважливіші характеристики електромагніта:

1. 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 $U=\text{const}$ чи

$P_{em}=f(\delta)$ при $i=\text{const}$.

У найпростішому випадку, коли можна знехтувати розсіюванням і магнітним опором сталі ($R_m \Sigma = R \delta$), вважаючи поле в робочому зазорі рівномірним, застосувавши формулу $\Lambda_m = 1/R_m = (\mu * S)/l$ для його провідності, формулу Максвелла $P_{em} = (B^2 * S)/(2 * \mu_0)$, для електромагнітної тягової характеристики одержимо залежність

$$P_{em} = \frac{B_{\delta}^2 * S}{2 * \mu_0} = \frac{\Phi_{\delta}^2 * S}{2 * \mu_0 * S^2} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2 * \mu_0 * S} = \frac{(I * W)^2 * \Lambda_{\delta}^2}{2 * \mu_0 * S} =$$
$$= \frac{(I * W)^2}{2 * \mu_0 * S} * \left(\frac{\mu_0 * S}{\delta} \right)^2 = \frac{\mu_0 * S * (I * W)^2}{2 * \delta^2} = \frac{\mu_0 * S * F^2}{2 * \delta^2},$$

де $\Phi = (I * W)/R_m = I * W * \Lambda \delta$.

2. Протидіючі зусилля (навантаження) електромагніта являють собою залежність протидіючих сил (у загальному випадку приведених до точки прикладення електромагнітної сили) від робочого зазору

$P_p = f(\delta)$. На рис. 22 ця залежність наведена у вигляді двох пружин, що вступають у дію.

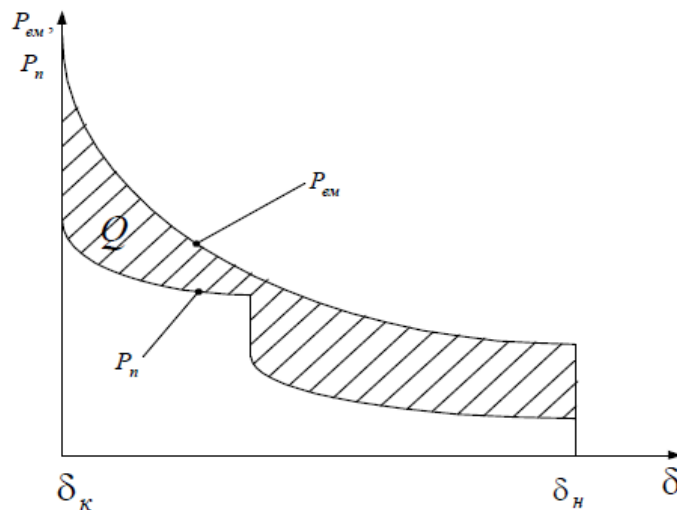


Рис. 22 – Протидіюча характеристика $P_p = f(\delta)$ і тягова характеристика $P_{ем} = f(\delta)$

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 $I_{сп} = \text{const}$ на всьому діапазоні зміни ходу якоря, проходила вище протидіючої; для чіткого відпускання (повернення), навпаки, тягова характеристика, побудована при $I_{отп} = \text{const}$, має проходити нижче протидіючої.

3. 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 $P_{пп}$ і заштрихованої площі Q на рис. 22.

3. Основні параметри електромагнітів.

До основних параметрів електромагніта належать наступні:

Потужність, споживана електромагнітом. 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. 23) називають коефіцієнтом запасу:

$$K_3 = F_{ст}/F_{спр} = I_{ст}/I_{спр} > 1.$$

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

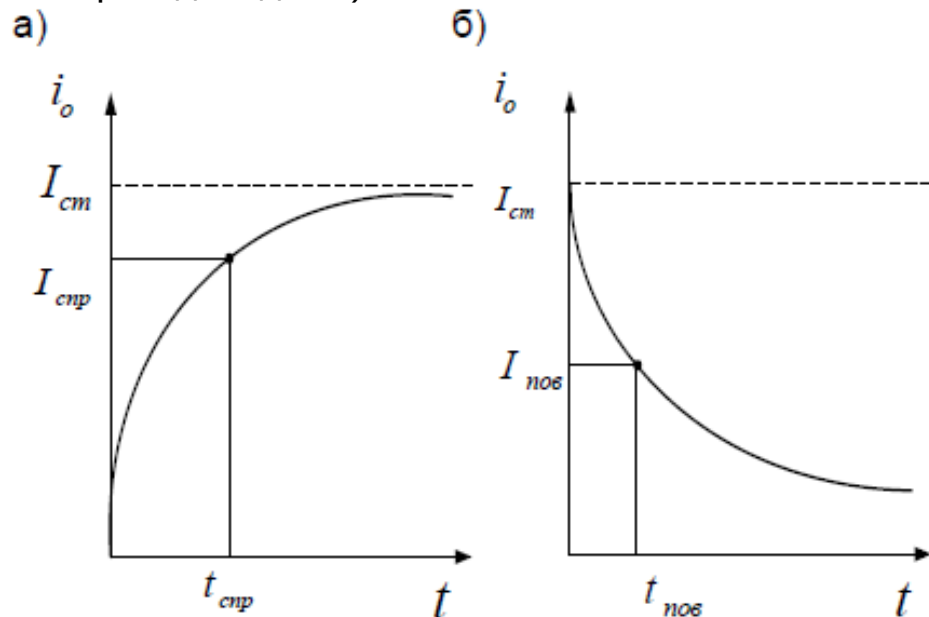


Рис. 23 – Струм в обмотці електромагніта (i_o) при включенні (а) і виключенні (б)

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

Коефіцієнт повернення (Кпов). Відношення МРС, при якому відбувається повернення якоря в первісне положення, до МРС спрацьовування називається коефіцієнтом повернення електромагніта:

$$K_{пов} = F_{пов}/F_{спр} = I_{пов}/I_{спр},$$

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

Для звичайних електромагнітів коефіцієнт повернення завжди менше одиниці.

4. Загальне рівняння балансу напруги на обмотці електромагніта

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 якор рухається. Тому розрізняють час зрушення якоря і час його руху. Розгляд цих процесів виконують окремо.

На рис. 24 наведена залежність струму для ненасиченого електромагніта постійного струму. До початку руху якоря (при початковому зазорі) струм змінюється за експонентою з електромагнітною постійною часу $те.л$.

Після закінчення часу зрушення $t_{зр}$ 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 $t_{сп}$. Після зупинки якоря струм змінюється за експонентою 2 з постійною часу τ е.к. Точні розрахунки перехідних режимів при зміні струму мають проводитися з урахуванням впливу гістерезиса і вихрових струмів.

При включенні електромагніта на напругу U_0 рівняння має вигляд:

$$U_0 = i \cdot R + d\psi/dt.$$

Представимо потокозчеплення як $\psi = L\delta \cdot i$, де $L\delta$ – динамічне значення індуктивності електромагніта. Тоді

$$U_0 = i \cdot R + L\delta \cdot (di/dt) + i \cdot (dL\delta/dt).$$

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 магнітопровод звичайно ненасичений і його магнітний опір можна вважати як таким, що дорівнює нулю. Тоді рівняння набуває вигляд $U_0 = i \cdot R + L \cdot (di/dt)$. Вирішення його при початковій умові $t=0$,

$$i=0: i = (U_0/R) \cdot (1 - e^{-t/\tau_n}),$$

де τ_n – початкова постійна часу $\tau_n = L/R$.

На ділянці «ab» (рис. 24) відбувається рух якоря, при цьому струм у обмотці зазвичай зменшується.

Якщо якорь рухається, то індуктивність уже не можна вважати постійною – вона збільшується. У цьому випадку завдяки електромагнітній індукції в обмотці наводиться проти – ЕРС руху (останній член у рівнянні): $U_0 = i \cdot R + L\delta \cdot (di/dt) + i \cdot (dL\delta/dt)$, що зменшує діючу напругу ($U_0 - i \cdot (dL\delta/dt)$), яка і призводить до зниження струму:

$$i = (U_0 / R) \cdot (1 - e^{-t/\tau_k}),$$

де τ_k – кінцева постійна часу $\tau_k = L_k/R$, $L_k > L$.

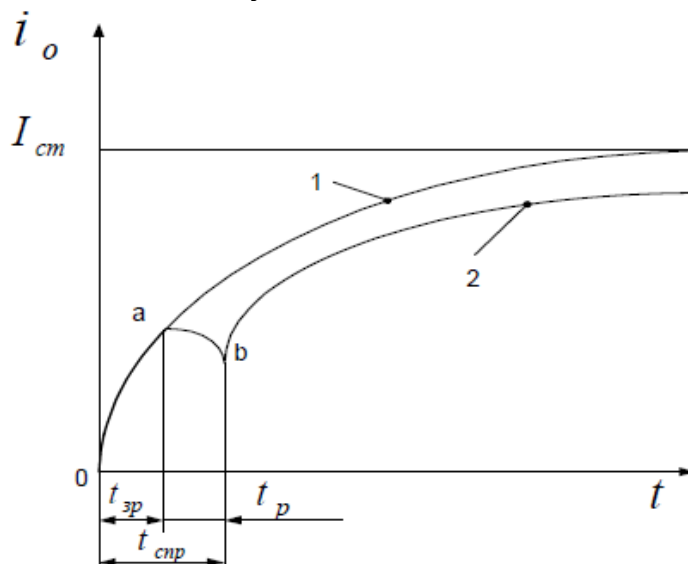


Рис. 24. –Залежність струму котушки електромагніта від часу його включення, де $t_{зр}$ – час зрушення електромагніта; t_p – час руху; $t_{сп}$ – час спрацьовування; I_{cm} – стає значення струму

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 протидіючої.
5. Дайте визначення “коефіцієнта запасу” як одного з основних параметрів електромагніта.
6. Охарактеризуйте потужність, котру споживає електромагніт, як один з основних параметрів електромагніта.
7. Чим пояснюється деяке зниження струму електромагніта на початку руху якоря?

Лекція №7 Тема №7: Основні положення теорії комутації електричних кіл

1. Властивості і характеристики електричної дуги.
2. Комутація електричних кіл.
3. Характер процесів при вимкненні електричного кола.

1. Властивості і характеристики електричної дуги.

Розмикання контакті в комутаційних апаратів супроводжується електричним розрядом, який за певних умов може привести до виникнення дуги.

Електрична дуга – один із видів електричного озряду у газі, тобто такий його стан, коли стає можливим перехід через газ електричного струму. Для виникнення дуги напруга між розімкнутими контактами повинна бути вища 12-20 В, а струм не менше 0,3-0,9А. Повітряний проміжок міжконтактами іонізується і на короткий час стає провідним; виникає дуга, яка супроводжується високою температурою. Електрична дуга явище не тільки електричне, а й теплове. У звичайних умовах, повітря добрий ізолятор. Для пробою повітряного проміжку потрібно створити у ньому певну концентрацію заряджених часток – вільних електронів та позитивних іонів.

Процес відокремлення від нейтральної частки одного або декількох електронів і створення вільних електронів та позитивних іонів називається іонізацією. Для дугових процесів в електричних апаратах най більше зачення для іонізації мають:

- Термоелектронна емісія;
- Автоелектронна емісія у електродів;

Термічна іонізація;

Іонізація поштовхом у дуговому проміжку.

Термоелектронна емісія – це випускання електронів з нагрітої поверхні. При розходженні контактів різко зростають перехідний опір контакту та густина струму в останній α -плямі. Ця пляма розігрівається до розплавлення і створення контактної перешийки з розплавленого металу, який при подальшому розходженні контактів рветься. Відбувається випарювання металу контактів. На негативному електроді створюється електродна пляма, яка служить основою дуги і джерелом випромінювання електронів у перший момент розходження контактів. Густина струму термоелектричної емісії залежить від температури та матеріалу електрода. Вона невелика, може бути достатньою для виникнення електричної дуги, але вона не достатня для її горіння. Автоелектронна емісія це випускання електронів із катода під дією сильного електричного поля. Місце розриву ел. кола може бути уявлено як конденсатор змінної ємності.

Ємність у початковий момент дорівнює нескінченності, а потім зменшується по мірі розходження контактів. Через опір кола цей конденсатор розряджається, і напруга на ньому зростає поступово до напруги мережі. Одночасно збільшується відстань між контактами.

Напруженість поля між контактами під час зростання напруги, яка більше 100 мВ/см, достатня для виривання електронів з катода.

Струм автоелектронної емісії також дуже малий і може розвитку дугового розряду. Перевага термоелектронної або автоелектронної емісії залежить від значення струму, який відключається, матеріалу та чистоти поверхні контактів, швидкості їх розходження і ряду інших факторів.

Термічна іонізація - це процес іонізації під впливом високої температури. Підтримка дуги після її виникнення пояснюється термічною іонізацією. Температура стовпа дуги досягає 4000...7000K, а іноді і більше. При такій температурі сильно зростає кількість часток газу, які швидко рухаються, і сама швидкість їх руху.

При зіткненні стовпів або молекул, які швидко пересуваються, більша частина їх розпадається, створюючи як нейтральні, так і заряджені частки, тобто відбувається іонізація газу. Одночасно йде процес і деіонізації.

При виникненні дуги має перевагу іонізація. У стійко горячій дузі процеси іонізації та деіонізації по інтенсивності однакові. При перевазі деіонізації дуга гасне. Деіонізація йде головним чином за рахунок рекомбінації і дифузії.

Рекомбінація – це процес, при якому по різному заряджені частки взаємностискаються і створюють нейтральні частки.

Дифузія – це процес викидання заряджених часток з дугового проміжку у навколишнє середовище, що зменшує провідність дуги.

Заряджені частки, які викинуті із дуги, в кінці кінців рекомбінують поза простором дуги.

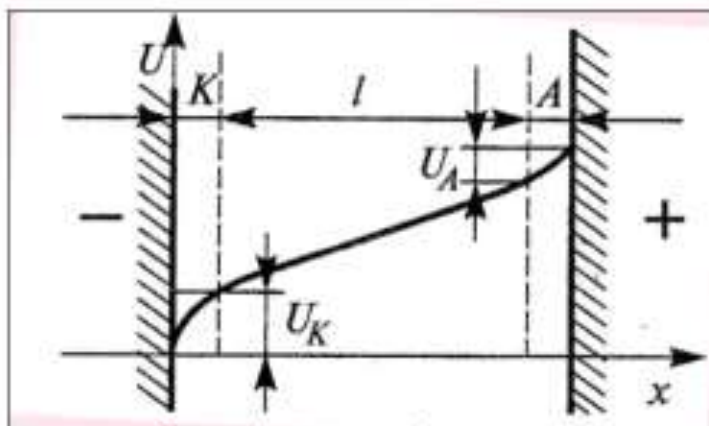
У стабільній і вільно горячій дузі дифузія відіграє зневажливо малу роль.

Іонізація поштовхом. Якщо вільний електрон буде мати достатню швидкість, то при зіткненні з нейтральною часткою (атом, молекула) він може вибити з неї електрон. В результаті створиться вільний електрон і позитивний іон. Вибитий електрон може в свою чергу іонізувати наступну частинку і т.д. Швидкість електрона залежить від різниці потенціалів на довжині його вільного пробігу.

Різниця потенціалів, яку потрібно мати на довжині вільного пробігу, щоб електрон у кінці шляху придбав потрібну швидкість, називають потенціалом іонізації: для газів це 13-16В (азот, кисень, водень); гелій - 24.5В.

Пари металу мають приблизно у два рази менший потенціал.

Потенціал іонізації газової суміші визначається самим низьким із потенціалів іонізації компонентів, які входять у суміш, і дуже мало залежить від концентрації цих компонентів. Розподіл напруги між електродами при горінні дуги показано на рис.7.



Катодний і анодний спади напруги відповідно на ділянках К та А відбуваються на малій довжині дуги (порядку 10-4 см). У сумі ці спади напруги становлять від 15 до 30В залежно від матеріалу та температури катода. Решта частина дуги l називається стовпом дуги і характеризується приблизно рівномірним градієнтом 20-30 В/см.

Дуга має як позитивні, так і негативні значення. До позитивних належить те, що у міру розходження контакту дуга, завдяки зростанню опору і поглинанню енергії запасеної в індуктивностях, забезпечує поступове зменшення струму в колі. Якби дуги не було, то при миттєвому розриві контактів ел.магнітна енергія перетворювалась б на ел. статичну, що при малій ємності кола призвело б до великих перенапруг. При виникненні дуги повинні бути виключені або зменшені її руйнівні дії, спричинені високою температурою. Час горіння дуги повинен бути до 0,1 с при комутації номінального струму.

Показником процесу гасіння дуги є безперервне зменшення струму в ній, що визначається видом характеристики, де – напруга дуги;- струм дуги. Вид характеристики дуги залежить від швидкості зменшення струму в процесі гасіння (рис.8).

Характеристику дуги при умові, що струм знімається дуже повільно, завдяки чому встигає встановитися тепловий баланс між дугою і навколишнім середовищем, для кожного нового значення струму називають **статичною**. Характеристики дуги, що відповідають швидкостям зміни струму, при яких не встигає встановитися тепловий баланс називають **динамічними**. При цьому опір дугового проміжку внаслідок теплової інерції стовпа зростає повільніше

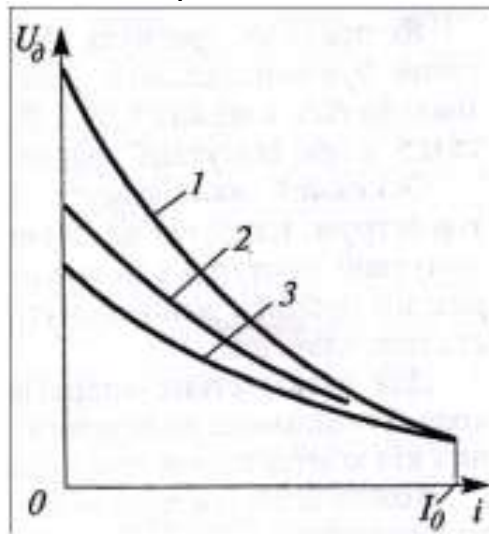


Рис.8 Характеристики дуги: статична; 2,3 – динамічні 1

При однаковому значенні струму опір дугового проміжку менший при динамічному процесі ніж при статичному. Тому динамічні характеристики дуги розташовані нижче статичної. Усі характеристики показані для сталої довжини стовпа дуги і тому виходять з однієї точки.

Динамічні характеристики виражають реальну картину процесу гасіння. Статична використовується для оцінки розривної потужності дугогасильного пристрою. Обрана за статичною характеристикою розривна потужність ьдугогасильного пристрою буде достатньою для динамічних процесів, при яких потужність дуги менша.

2. Комутація електричних кіл.

Якість комутації електричного кола визначається часом та глибиною комутації, комутаційними перенапругами, електричним зносом контактів, звуковими та світловими ефектами при гасінні дуги і т.д. Відношення електричного опору комутуючого органу у вимкненому стані $R_{\text{вимк}}$ до його опору в увімкненому стані $R_{\text{увімк}}$ є глибиною комутації h_k .

$$h_k = \frac{R_{\text{вимк}}}{R_{\text{увімк}}}$$

Для контактних апаратів:

$$h_k = 10^{12} \dots 10^{17}$$

Для безконтактних:

$$h_k = 10^4 \dots 10^7$$

Як правило, прагнуть, щоб час комутації електричного кола апаратом був мінімальним. Для сучасних контактних апаратів цей час знаходиться у межах 0,01...0,1с при номінальних струмах; 0,5с - при комутації граничного струму.

2.1. Основний закон комутації.

Комутований фактор (струм, напруга) не переходить миттєво до нових значень. При комутації контурів з індуктивностями та ємностями виникають перехідні процеси зміни комутованого фактора, який з часом набуває сталого значення. Для електричних апаратів найважливішим є стадія вимикання. Кожне коло із струмом i , у яке ввімкнена індуктивність L , має запас ел. Магнітної енергії, яка витрачається у процесі вимикання:

$$W_e = \frac{Li^2}{2}$$

Якщо коло із струмом « i » вимикається контактами, які запаралелені ємністю C (ємність струмоведучих частин, проводів), то при вимкненні на ній з'являється напруга U_c , яка визначається з умов рівності ел. магнітної та ел.статичної енергії:

$$\frac{Li_0^2}{2} = \frac{CU_c^2}{2},$$

$$\frac{CU_c^2}{2}$$

де $\frac{CU_c^2}{2}$ - ел. статична енергія.

Звідси:

$$U_c = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

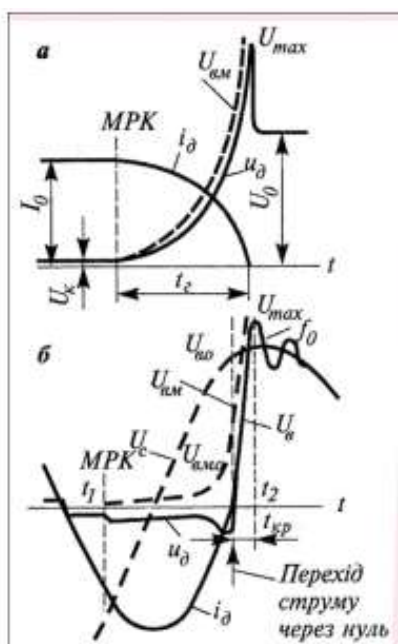
Наприклад, якщо $I_0=100\text{А}$, $L=10^{-2}\text{Гн}$, $C=10^{-8}\text{Ф}$, то

$$U_c = 100 \sqrt{\frac{10^{-2}}{10^{-8}}} = 10^3 \text{ В.}$$

Якби електрична енергія повністю перейшла в електростатичну, то виникла б велика перенапруга, яка б пошкодила елементи кола та створила непереборні труднощі при його вимкненні. Умови вимикання кіл змінного струму легші тому, що при переході струму через нульове значення, ел. магнітна енергія кола перетворюється в нуль. Електрична дуга або іскра, які виникають на контактах, створюють струмопровідний зв'язок у колі до переходу струму через нульове значення, коли

3. Характер процесів при вимкненні електричного кола.

Коли контакти замкнуті і по ним протікає струм, опір їх малий, а електрична міцність проміжку дорівнює нулю. При розімкнутих контактах електрична міцність буде дорівнювати $U_{пр}$ - пробивній напрузі створеного ізоляційного проміжку. У процесі вимикання кола електрична міцність проміжку, яка називається відновною $U_{вм}$, зростає від 0 до $U_{пр}$. У той же час зростає напруга на контактах від – відспадання на замкнутих контактах (декілька мВ) до напруги джерела живлення. Вимикання електричного кола відбувається у змаганні процесів зростання від новної міцності проміжку $U_{вм}$ (крива $U_{вм}$ на рис.9а). та напруги на ньому (крива $u_{дн}$ на рис.9а). Коло вимикається успішно, якщо крива відновної міцності $U_{вм}$ міжконтактного проміжку буде лежати вище кривої напруги на цьому проміжку. У найпростішому випадку контур, що вимикається, складається з послідовно з'єднаних активного опору R , індуктивності L та вимикаючого апарату ВА, підключених до джерела напруги U_0 (рис.10). Ємність C на рис.8 – це зведена ємність проводів та струмоведучих частин.



The diagram shows a parallel RLC circuit. The top horizontal wire contains an inductor labeled L with current i flowing to the right. The bottom horizontal wire contains a resistor labeled R with current i_∂ flowing downwards. A switch, labeled Π and BA , is connected between the two wires. The switch is currently in the open position. To the right of the switch, there is a parallel combination of a capacitor labeled C and a resistor labeled R_w . The voltage across the capacitor and resistor is labeled u_∂ . The total voltage across the inductor and resistor is labeled U_0 .

49

При постійному струмі після моменту розмикання контактів (МРК) починається збільшення опору внаслідок охолодження стовпа дугогасильним пристроєм. При успішному гасінні крива u_d проходить нижче $U_{вм}$. В кінці процесу струм за рахунок інтенсивного зростання опору дуги різко зменшується, а напруга на проміжку стає максимальною. Далі надлишкові заряди, створені на ємності C (рис.10) розтікаються через опір витоку по ізоляції $R_{ш}$ і напруга спадає до напруги джерела живлення U_0 .

Рівняння для контуру (рис.10) в такому випадку записується:

$$iR + L \left(\frac{di}{dt} \right) + u_d = U_0$$

де U_0 – напруга джерела живлення.

Струм в кінці вимикання:

$$i = i_d = 0$$

Таким чином, перенапруга визначається індуктивністю кола і швидкістю зниження струму (при вимиканні кола похідна струму за часом від'ємна). Застосування надмірно швидкодіючих вимикальних пристроїв може бути причиною виникнення перенапруг, які не повинні перевищувати рівень ізоляції (випробувальну напругу) установки. У процесі вимикання струм кола зменшується до 0, починаючи з I_0 . Для забезпечення умови гасіння дуги потрібно мати від'ємну похідну струму за часом у всьому діапазоні його зміни від I_0 до 0. Тобто:

$$i = i_d = 0, \quad (10)$$

Таким чином перенапруга визначається індуктивністю кола і швидкістю зниження струму (при вимиканні кола похідна струму за часом від'ємна). Застосування надмірно швидкодіючих вимикальних пристроїв вможе бути причиною виникнення перенапруг, які не повинні перевищувати рівень ізоляції (випробувальну напругу) установки.

У процесі вимикання струм кола зменшується до 0, починаючи з

$$I_0 = \frac{U_0}{R}$$

. Для забезпечення умови гасіння дуги потрібно мати від'ємну похідну струму за часом у всьому діапазоні його зміни від I_0 до 0. Тобто:

$$L \frac{di}{dt} = (U_0 - iR) - u_d, \quad (10 a)$$

Для виконання (10) потрібно щоб: $(U_0 - iR)$. Це положення формулюється, як умова гасіння дуги постійного струму: у всьому діапазоні зміни струму крива повинна лежати вище реостатної характеристики кола, яке вимикається. Якщо ці характеристики

перетнуться, то в зоні, де $(U_0 - iR)$ буде вище, $\frac{di}{dt}$ похідна буде

додатна і умови гасіння дуги порушуються. За цих умов виникне стійка дуга і електричне коло не буде вимкнено.

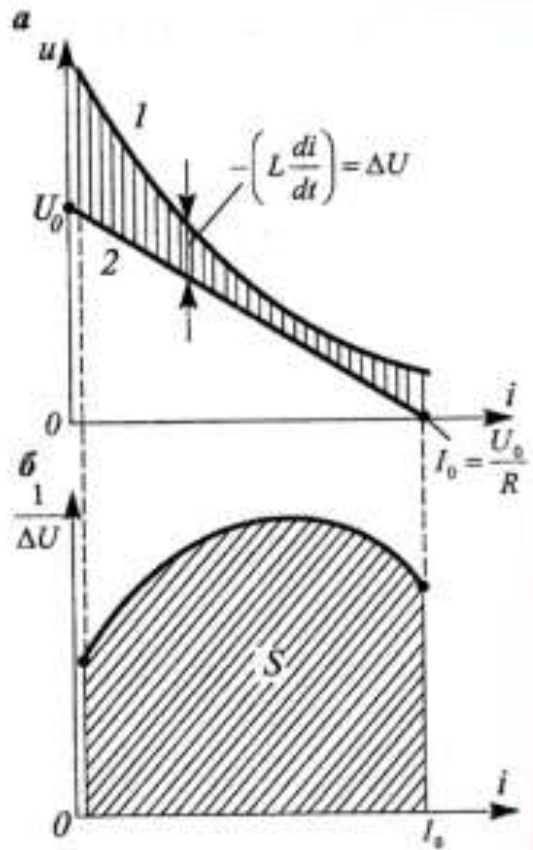


Рис.11 Умова гасіння дуги постійного струму.

Коли відомі ВАХ дугогасильного пристрою (крива 1), та реостатна характеристика кола (крива 2) $\Delta U = L \left(\frac{di}{dt} \right)$ – можна приблизно оцінити час гасіння дуги. Позначимо. При $L = \text{const}$ знаходимо час гасіння дуги t_g , коли струм змінюється від початкового значення до нуля.

Цей час дорівнює:

$$t_g = L \int_{I_0}^0 \frac{di}{\Delta U} \quad (11)$$

Інтеграл (11) обчислюється графічно (дивись рисунок 11б). Він дорівнює заштрихованій площі S . Залежність побудована за значенням ΔU , визначеними із рисунка 11а. **Гасіння дуги при змінному струмі** (рис.9б). Найсприятливіші умови гасіння дуги та вимкнення кола змінного струму настають при переході струму через нуль. У цьому випадку іде найінтенсивніше зростання відновної міцності міжконтактного проміжку. Напруга дуги, яка горіла від t_1 до t_2 , відносно невелика. Поблизу переходу струму через нуль починається інтенсивний процес відновлення напруги на проміжку до миттєвого значення напруги джерела U_v о. Напруга U_v – це відновна напруга.

Умова гасіння дуги змінного струму: Електрична дуга змінного струму буде погашена і коло вимкнене, якщо за переходом струму дуги через нуль, крива відновної міцності U_{BM} міжконтактного проміжку буде лежати вище кривої відновної напруги U_B . Якщо ці криві перетинаються, то виникає повторне загоряння дуги.

Лекція №8 Тема №8: Електричні контакти. Фізичні явища в електричному контакті

- 1.Різновиди електричних контактів.
- 2.Опір електричного контакту

1.Різновиди електричних контактів.

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. 28) 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 перешийок, що проводить електричний струм.

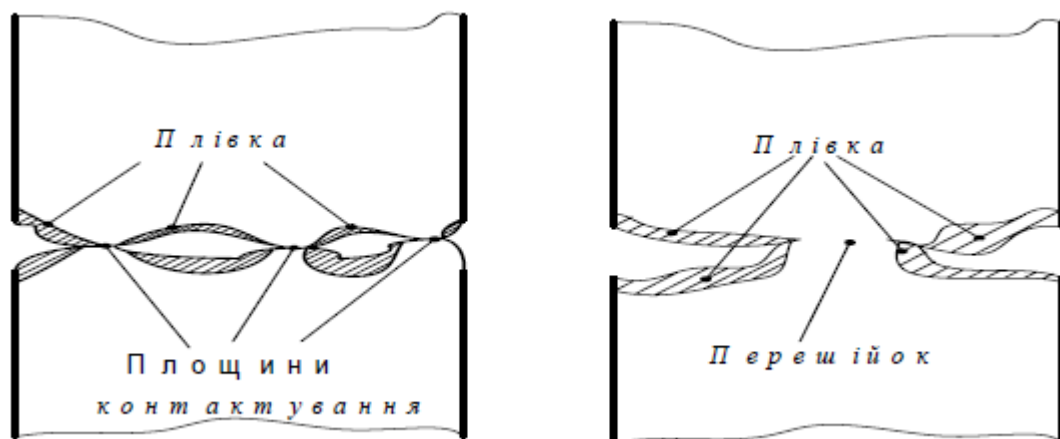


Рис. 28 – Електричне контактування контакт-деталей

Явище пробою 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.

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 пробії 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.ін.).

Лінійний електричний контакт – електричний контакт, за якого зіткнення робочих поверхонь контакт–деталей відбувається по лінії, наприклад, „циліндр–циліндр”, „циліндр–площина”, „виток–виток” і т.ін. 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.

Різновиди електричних контактів

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 комутаційних 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.

2. Опір електричного контакту

Опір електричного контакту може бути розрахований як сума опорів стягування RC і сторонніх, зумовлених плівкою **РПЛ**:

$$RK = RC + RPL.$$

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

$$RC = \rho / (2 \cdot a),$$

де ρ – питомий електричний опір середовища, в якому розглядається розтік струму;

a – радіус площадки контактування.

Для гладких поверхонь куля – площа:

$$a_{к.л.} = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}},$$

де r – радіус кулі, мм;

P – сила стиску,

H ; E – модуль пружності, Н/мм².

При стиску двох однакових **кульових** поверхонь

$$a_{к.к.} = \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}}.$$

Якщо сила стиску розподілена на « n » однакових круглих площадок,

то

радіус однієї площадки дорівнює $\dots \cdot 3 \cdot$

$$a_{к.к.} = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E \cdot n}}.$$

Виникнення плівок на поверхні контактів залежить від матеріалу контактів, їхньої 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 змащеннями перед збіркою і фарбуванням контактного з'єднання теплостійкими фарбами після збірки.

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 $R_{пер}$ визначають опором звужених ділянок, якими проходить струм до площадок стиску, і опором вузьких металевих перешийків, що виникають унаслідок фрітінгу.

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

$$R_{пер} = \varepsilon / Pn,$$

де ε – деяка величина, що залежить від матеріалу і форми контакту, способу обробки контакту і стану контактної поверхні;

P – сила, що стискує 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 $n = 0,7, \dots, 1$ (для лінійного контакту $n = 0,7, \dots, 0,8$; 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}

Мідь $1,0 \cdot 10^{-3}$ Алюміній $1,6 \cdot 10^{-3}$

Срібло $0,5 \cdot 10^{-3}$ Латунь $6,7 \cdot 10^{-3}$

Олово $5 \cdot 10^{-3}$ Сталь $76 \cdot 10^{-3}$.

Залежність перехідного опору від контактного натискання. Ця залежність відповідно до останнього рівняння подана на рис. 29. Крива 1 відповідає процесу зростання контактного натискання, крива 2 – зниженню натискання. Різний хід кривих обумовлений наявністю залишкових деформацій окремих горбків, по яким відбувалося зіткнення.

Слід зазначити, що при тому самому натисканні перехідний опір того 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.

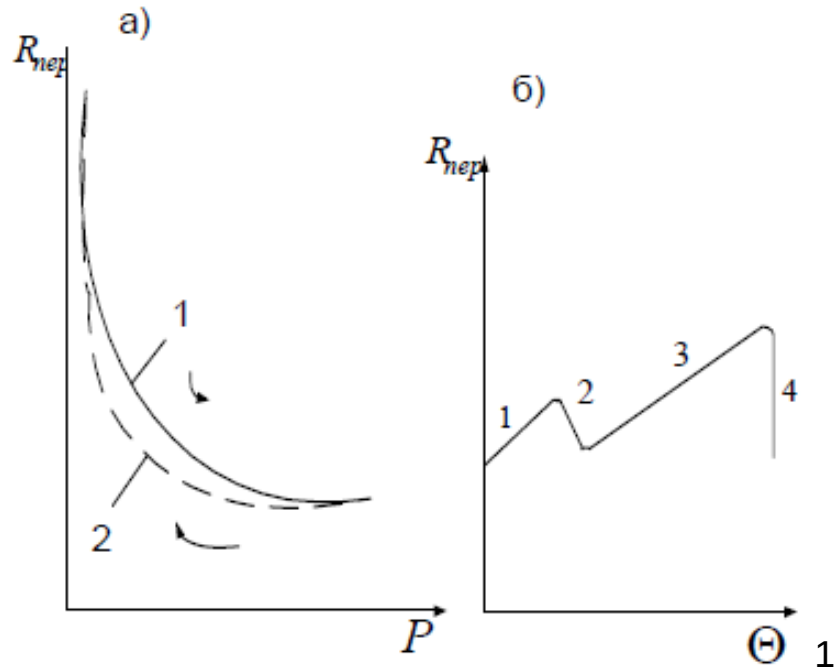


Рис. 29 – Залежність перехідного опору від сили натискання(а) і температури (б)

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 $\alpha_1 = 2/3 \alpha$. Таким чином,

$$R_{пер.г} = R_{пер.хол} * (1 + \frac{2}{3} * \alpha * \Theta),$$

де: Θ – температура контакту; $R_{пер.г}$ – перехідний опір гарячий;

$R_{пер.хол}$ – перехідний 2р - опір холодний; α – температурний коефіцієнт.

З зростанням температури перехідний опір спочатку росте (ділянка 1 кривої на рис. 29б). Потім при деякій температурі (для міді і срібла при 200 – 300 оС) 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).

Залежність перехідного опору від стану контактної поверхні.

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

Залежність перехідного опору від властивостей матеріалу контакту.

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

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 МДС, питомим опором ρ і перерізом S проводу. Враховуючи, що обмотка має W витків і середній опір витка обмотки $R_{ср}$ дорівнює опору витка, розташованого в кулі діаметра $D_{ср} = (D_{зов} + D_{вн})/2$, можна перетворити вираження закону Ома в такий спосіб:

$$U = I \cdot R = (I \cdot W) \cdot (R/W) = (I \cdot W) \cdot R_{ср} = (I \cdot W) \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{ср} / S.$$

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.

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 :

$$Q = \frac{\lambda_1 - \Theta_2}{\delta} \cdot S \cdot t,$$

де δ – товщина стінки (рис. 30).

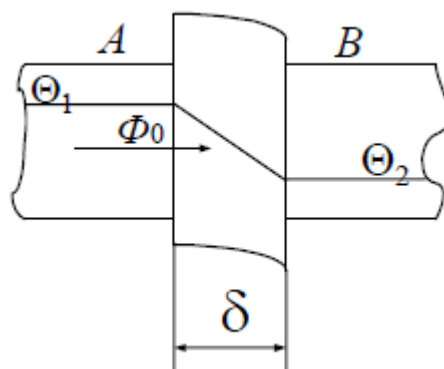


Рис. 30 – Передача теплоти через плоску стінку (теплота поширюється тільки в одному напрямку); (Φ_0 – густина теплового потоку)

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, несутьвідібрану 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 ,

$$Q_{\text{конв}} = K_{\text{тк}} F t (\Theta_1 - \Theta_2)$$

де $K_{\text{тк}}$ – 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 $K_{\text{тк}}$ 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 . 40 мкм), менше – світлові промені (довжина хвилі 0,4 . 0,8 мкм).

Фізичні властивості теплових і світлових променів подібні. І ті й інші поширюються зі швидкістю світла, 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

$$Q = K_{mk} * (\Theta_1 - \Theta_2) * F * t,$$

де K_{mk} – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²*К⁴); $K_{mk} = 5,7 * \sigma$, тут

σ – постійна випромінювання; 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 ватах на квадратний метр – кельвін.

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. Щільніша котушка, то краща теплопровідність між шарами і то меншою буде різниця температур між зовнішньою поверхнею і внутрішніми шарами. Просочення і компаундування підвищують загальну теплопровідність котушки, а тим самим і тепловіддачу на 5.10 °С.

Різні ділянки поверхні котушки в різній мірі 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. В середині 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 можна знехтувати, в коротких котушках її слід урахувувати.

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

У першому наближенні можна визначити середнє перевищення температури $T_{cm. \text{сер.}}$ котушки за потужністю, що виділяється в ній, і середнім коефіцієнтом тепловіддачі $k_{m \text{сер.}}$:

$$T_{cm. \text{сер.}} = \frac{I_0^2 R_0}{k_{m \text{сер.}} F_{\text{екв}} \left(1 + \alpha \frac{I_0^2 R_0}{k_{m \text{сер.}} F_{\text{екв}}}\right)},$$

де I_0 і R_0 – струм і опір холодної котушки; $F_{\text{екв}} = F_{\text{зов}} + \beta_1 F_{\text{вн}} + \beta_2 F_{\text{торц}}$ являє собою деяку еквівалентну поверхню, що враховує ступінь участі зовнішньої

$F_{\text{зов}}$, внутрішньої $F_{\text{вн}}$ і торцевої $F_{\text{торц}}$ 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. 31). Десь усередині котушки на відстані r_M перевищення температури буде максимальним T_{max} , на зовнішній і внутрішній поверхнях – відповідно T_1 і T_2 . Максимальна температура значно перевищує температуру на зовнішній поверхні і небагато перевищує середню температуру котушки.

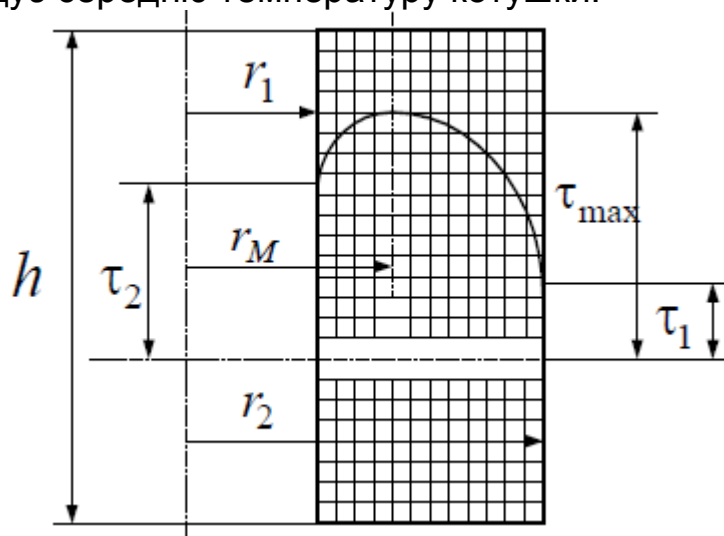


Рис. 31 – Розподіл температури T по котушці, h – висота котушки, r – радіус

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?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Базова

1. А.А.Чунихин „Электрические аппараты», М. Энергоатомиздат 1988.
2. Буркевич.Г.В. Деттьарь В.Г., Славинская А.Г. Задачник по электрическим аппаратам. М. Высшая школа, 1987.
3. Л.А.Родштейн « Электрические аппараты», Л. Энергоиздат., 1981.
4. Н.С.Таев «Электрические аппараты управления» М. Энергоатомиздат 1997; 1984 (В.Ш.).
5. «Проектирование электрических аппаратов» (под ред. Г.Н.Александрова). Л. Энергоиздат.1985.
6. Р.С.Кузнецов Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000В. М. Энергия 1970.

Чепіжний Андрій Володимирович
Рясна Ольга Василівна

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

конспект лекцій

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г.-Кондратьєва 160

Підписано до друку: ____ 2022 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman Суг
Тираж: 25 примірників Замовлення № ____ Ум. друк. арк. 2.6