

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

О.В. Ковальов

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Курс лекцій

Мелітополь, 2020

Автор: О.В. Ковальов

Дозвіл до впровадження та видання надано Вченою радою факультету енергетики і комп'ютерних технологій Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (протокол № 11 від «12» червня 2020 р.)

Рецензенти:

І.П. Назаренко – д.т.н., професор кафедри «Електротехнології і теплові процеси», Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.

В.Т. Діордієв – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Електроенергетика і автоматизація», Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.

Ковальов О.В.

Електричні машини: курс лекцій / О.В. Ковальов. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 175 с.

У курсі лекцій викладено зміст дисципліни «Електричні машини»: будова машин постійного струму загальнопромислового виконання; основи теорії машин постійного струму, поняття і оцінювання комутації; призначення, будова і принцип дії силових трансформаторів, основи теорії трансформаторів, енергетика силових трансформаторів; методики проведення досліджень і випробувань силових трансформаторів, експлуатаційні якості трансформаторів; особливості будови, принцип дії і галузі використання спеціальних видів трансформаторів.

© О.В. Ковальов,

© Таврійський державний

агротехнологічний університет, 2020

ЗМІСТ

Вступ	4
Тема №1. Основні теоретичні відомості і загальні питання будови і устрою машин постійного струму	5
Тема №2. Генератори постійного струму	16
Тема №3. Двигуни постійного струму	38
Тема №4. Комутація машин постійного струму	67
Тема №5. Основні теоретичні відомості і загальні питання будови і устрою силових трансформаторів	81
Тема №6. Енергетика силових трансформаторів	120
Тема №7. Режими роботи силових трансформаторів	130
Тема №8. Спеціальні трансформатори	157
Список літератури	174

ВСТУП

Електричні машини – комплексна дисципліна про будову і роботу електричних машин, принципи дії і процеси перетворення енергії в електричних машинах.

Основи дисципліни базуються на знаннях студентів з фізики, теоретичних основ електротехніки, електротехнічних матеріалів, математики та інших наук. Курс «Електричні машини» є складовою частиною навчального процесу, який забезпечує одержання теоретичних знань, професійних навичок, потрібних для успішного вирішення виробничих завдань.

Метою і завданням дисципліни «Електричні машини» є:

- вивчення основних фізичних законів, на яких базується принцип дії і процеси перетворення енергії; набуття та свідоме застосування знань з електричних машин;
- знання взаємозалежності електричних, енергетичних і техніко-економічних характеристик електричних машин.

Конспект лекцій розроблено на підставі типової програми навчальної дисципліни для підготовки фахівців зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у вищих навчальних закладах II-IV рівнів акредитації/ В.Ф. Яковлев, Ю.М. Куценко, В.М. Смуригін, О.М. Балахонов, М.М. Вітренко, Р.М. Чуєнко. – К.: «Аграрна освіта», 2010. – 20с.».

Конспект складається з 8 (восьми) тем, що охоплюють матеріал дисципліни «Електричні машини», в порядку викладення матеріалу, передбаченому типовою програмою навчальної дисципліни. Кожна тема складається з лекцій, кількість яких визначається робочою програмою навчальної дисципліни.

Тема №1. Основні теоретичні відомості і загальні питання будови і устрою машин постійного струму

Лекція №1 «Будова машин постійного струму»

Мета: Засвоєння особливостей будови та устрою машин постійного струму, призначення і особливостей окремих елементів конструкції.

План лекції:

- 1.1 Введення в дисципліну: задачі і зміст курсу «Електричні машини»
- 1.2 Призначення та види машин постійного струму.
- 1.3 Будова машин постійного струму загального призначення.
- 1.4 Принцип дії узагальненої машини постійного струму.
- 1.5 Принцип оберненості машин постійного струму.

1.1 Введення в дисципліну: задачі і зміст курсу «Електричні машини»

Електричні машини – комплексна дисципліна про будову і роботу електричних машин, принципи дії і процеси перетворення енергії в електричних машинах.

Основи дисципліни базуються на знаннях студентів з фізики, теоретичних основ електротехніки, електротехнічних матеріалів, математики та інших наук. Курс «Електричні машини» є складовою частиною навчального процесу, який забезпечує одержання теоретичних знань, професійних навичок, потрібних для успішного вирішення виробничих завдань.

Метою і завданням дисципліни «Електричні машини» є:

- вивчення основних фізичних законів, на яких базується принцип дії і процеси перетворення енергії;
- набуття та свідоме застосування знань з електричних машин;
- знання взаємозалежності електричних, енергетичних і техніко-економічних характеристик електричних машин.

1.2 Призначення та види машин постійного струму

Машиною постійного струму (МПС) називається така обертова електрична машина, в якій під час основного процесу перетворення енергії споживається або виробляється електрична енергія постійного струму.

За призначенням розрізняють наступні види МПС:

1. Генератори постійного струму (ГПС), призначені для генерування електричної енергії постійного струму.
2. Двигуни постійного струму (ДПС), призначені для приведення в рух робочих машин і механізмів з регулюванням частоти обертання в широких межах.
3. Електромашинні підсилювачі (ЕМП) постійного струму, призначені для підсилення потужності постійного струму, до яких відносяться ЕМП з поперечним та повздовжнім полем.
4. Електромашинні перетворювачі постійного струму в змінний струм і навпаки, до яких відносяться двофазні перетворювачі, однофазні

перетворювач постійного струму та одноякірний перетворювач змінного струму в постійний.

5. Електричні машини постійного струму систем автоматики, до яких відносяться виконавчі двигуни із звичайним якорем, з порожнім и дисковим якорем с печатними обмотками; тахогенератори, призначені для контролю і вимірювання частоти обертання механізмів і машин.

6. Спеціальні види МПС: уніполярні машини, магнітогідродинамічні машини (МГД), вентильні двигуни постійного струму та ін.

Машини постійного струму використовуються в якості двигунів та генераторів. Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю досить простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

Машини постійного струму серії П застосовуються як двигуни і генератори у різних галузях промисловості і сільського господарства. Випуск машин серії П припинений, але поки що в експлуатації знаходиться значна кількість машин. Електричні машини серії П охоплюють діапазон потужностей від 0,3 до 200 кВт (при 1500 об/хв.) і мають 11 габаритів. Габарит визначається зовнішнім діаметром якоря.

Електричні машини серії 2П замінили машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія 2П машин постійного струму охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким діапазоном регулювання швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, покращені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи. Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- за регульовальними властивостями: двигуни з нормальним регулюванням з діапазоном до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму. З метою значного зниження (в 2 - 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів в новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного устаткування, створеного для серії 4А.

В уніфікованій конструкції типу 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку,

компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки

Перевагами уніфікованої конструкції двигунів постійного струму в порівнянні з явнополюсними традиційної конструкції є:

- розподіл статорних обмоток двигунів у порівняно великій кількості пазів, що приносить позитивний ефект, що виражається в поліпшенні тепловіддачі, і дозволяє істотно збільшити щільності струмів;

- повна компенсація поля реакції якоря по всій його окружності;

- застосування повністю шихтованого магнітопроводу, що зменшує його магнітну несиметрію і практично усуває відставання в часі змін магнітного потоку додаткових полюсів від зміни струму в їхніх обмотках і, отже, підвищує комутаційну здатність двигунів у стаціонарних і динамічних режимах роботи;

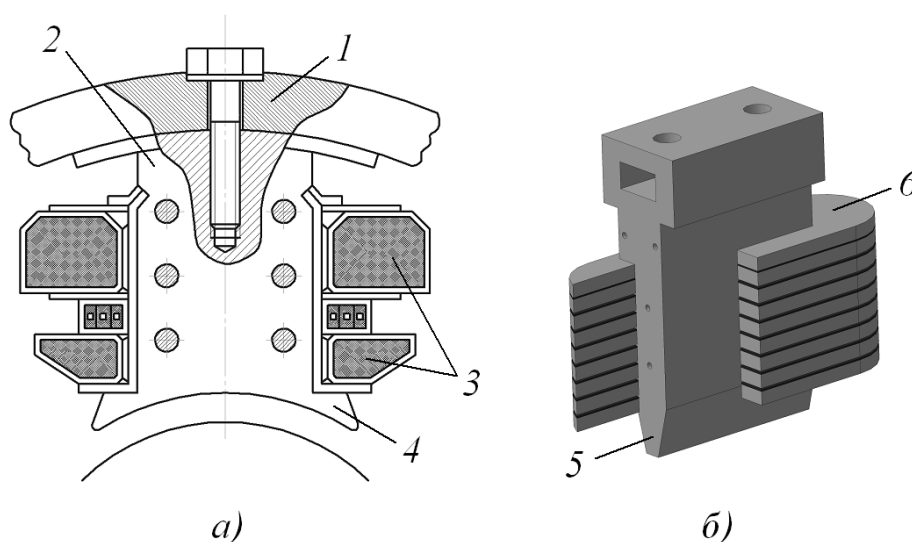
- перехід до ступеня захисту IP44 в уніфікованих двигунах від звичайно застосовуваної у двигунах традиційної явнополюсної конструкції ступеня захисту IP23, що підвищує надійність цих двигунів в експлуатації.

1.3 Будова машин постійного струму загального призначення

Машина постійного струму складається зі статора, ротора (якоря) і повітряного проміжку.

Нерухома частина - статор - складається зі станини (корпуса), ярма, головних і додаткових полюсів з обмотками.

Головні полюси призначені для створення основного магнітного потоку машини і складаються з осердя і обмотки, додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками. Осердя полюсів набираються з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5-1 мм або з листів конструкційної сталі товщиною до 2 мм (рисунок 1).



1 - станина; 2 - осердя основного (головного) полюса; 3 - обмотка збудження; 4 - полюсний наконечник; 5 - осердя додаткового полюса; 6 - обмотка додаткового полюса

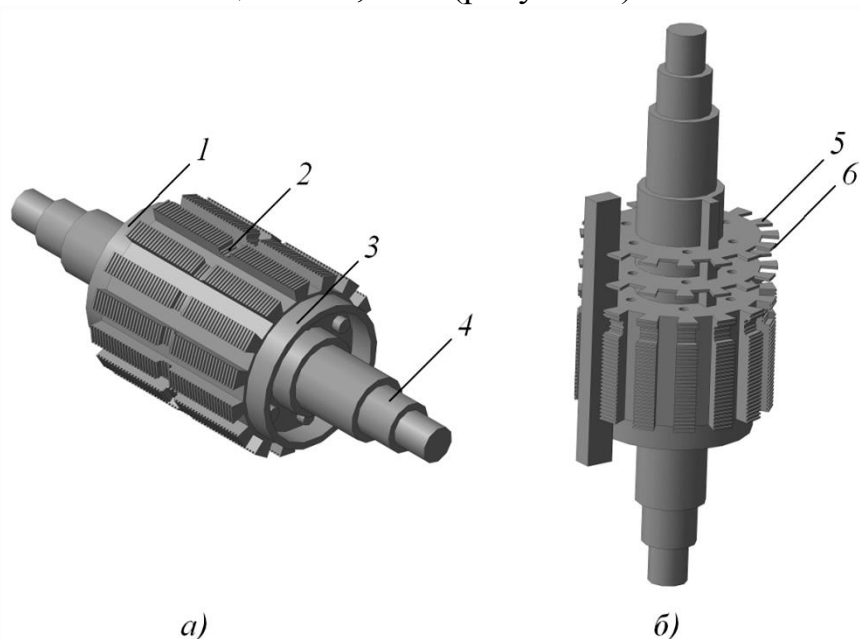
Рисунок 1- Будова основних і додаткових полюсів

Ярмо в машинах постійного струму призначено для створення шляху, за яким замикається постійний магнітний потік машини. Зазвичай, ярмо виконується масивним зі сталевих труб (для машин малої потужності), сталюого прокату або сталюого лиття і одночасно виконує функції станини - частини, до якої кріпляться інші нерухомі частини і за допомогою якої машина закріплюється на фундаменті або основі.

Оскільки магнітний потік в сталих режимах роботи машини практично не змінюється, то виштамповані листи не ізолюються один від іншого. Осердя полюсів стягуються шпильками, або масивними сталевими стрижнями. Нижня, розширена частина осердя головних полюсів називається полюсним наконечником або полюсним башмаком.

Обмотки головних і додаткових полюсів виготовляють з ізолюваного мідного проводу круглого або прямокутного перерізу (рисунок 1). Розташована на полюсі обмотка часто розділяється на декілька котушок, які розділяються дистанційними шайбами, для покращення охолодження.

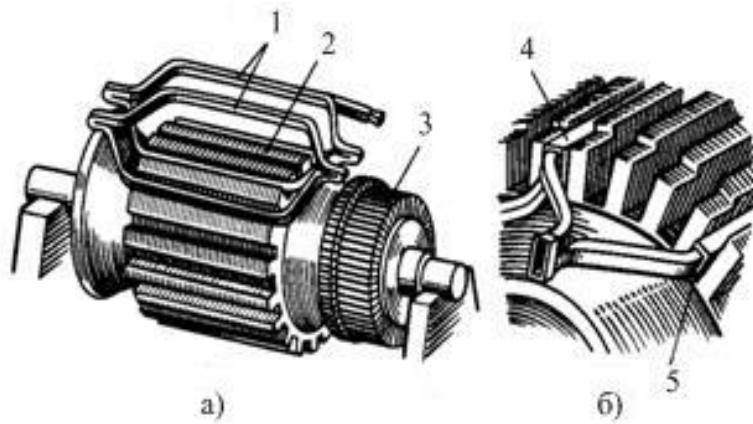
Ротор машини постійного струму складається з якоря і колектора, які розташовані на валу. Осердя якоря набирається з штампованих дисків електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм (рисунок 2).



1, 3 - натискні шайби (для утримання обмотки); 2 - виточка для укладання бандажа; 4 - місце для пресування колектора; 5 - ізоляційна плівка; 6 - сталевий лист

Рисунок 2- Будова осердя якоря (а) і його збирання (б)

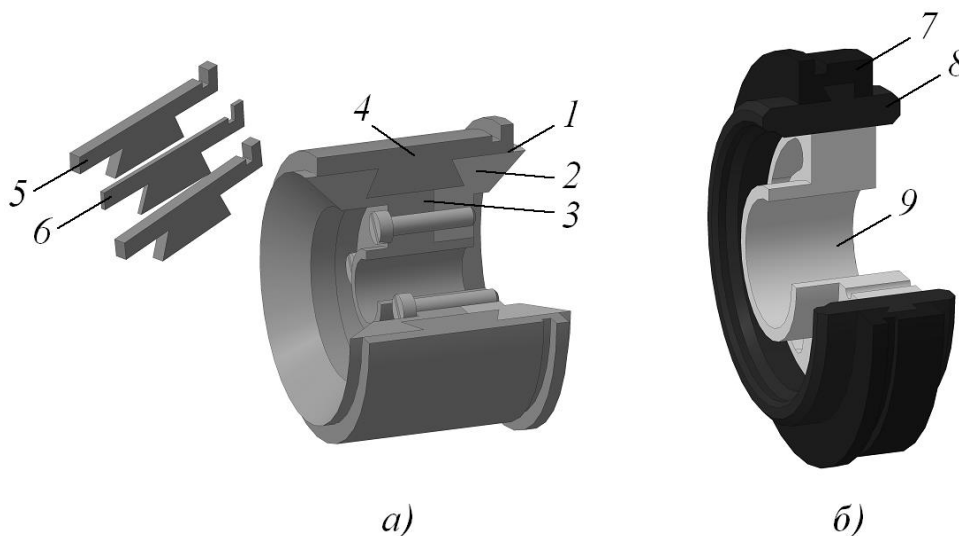
Диски насаджуються безпосередньо на вал (в машинах малої та середньої потужності) або набираються на якірну втулку (в машинах великої потужності). Осердя якоря діаметром більше 100 см та більше виготовляються зі штампованих сегментів. В осерді якоря в залежності від вибраної системи вентиляції можуть бути аксіальні або радіальні канали. Аксіальні канали утворюються отворами в дисках осердя. Радіальні канали утворюються дистанційними розпірками, які розділяють осердя на окремі пакети. В пази на поверхні якоря укладається обмотка якоря (рисунок 3).



1 - якірні котушки; 2 - осердя якоря; 3 - колектор; 4 - верхня сторона якірної котушки; 5 - нижня сторона якірної котушки
Рисунок 3 - Будова якірних котушок (а) і розташування їх в пазах (б)

Обмотку якоря виготовляють з круглого або прямокутного обмотувального проводу. Зазвичай, обмотка складається з окремих, заздалегідь намотаних якірних котушок, які ізолюють і укладають в пази осердя якоря. Обмотку виконують двохшаровою, в кожний паз укладають дві сторони різних якірних котушок - одну над іншою. Кожна якірна котушка включає в себе декілька секцій, кінці яких припадають до відповідних колекторних пластин. Секції обмотки можуть бути одно- або багатовитковими.

Колектор машини постійного струму (рисунок 4) складається з мідних пластин товщиною 3-15 мм, ізолюваних одна від іншої міканітовими прокладками товщиною близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний переріз і разом з прокладками складають кільце, яке скріплюється за допомогою фланців.

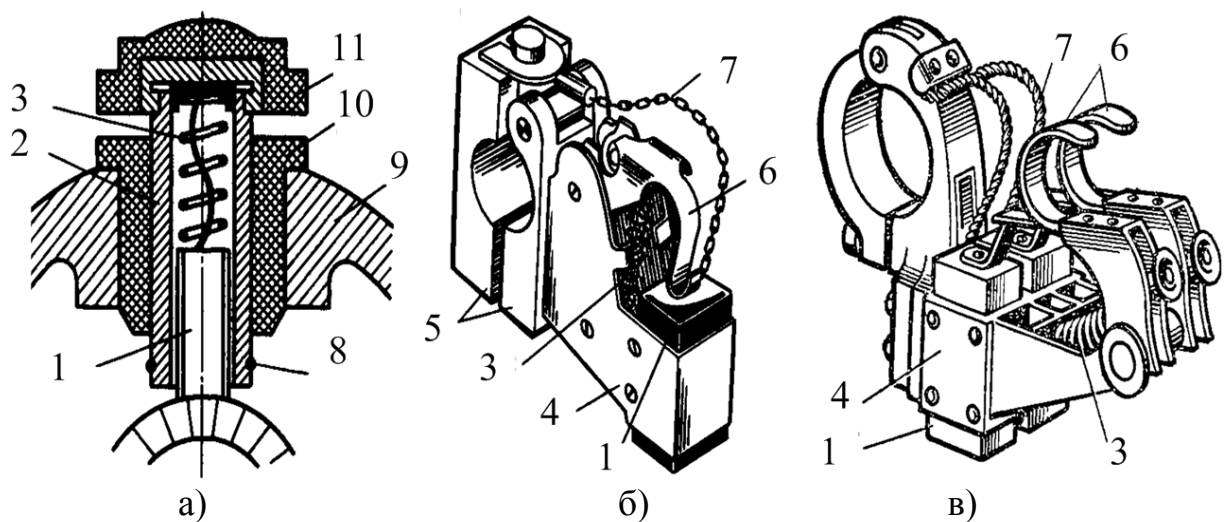


1 - ізоляційні манжети; 2 - натискний фланець; 3 - корпус; 4 - колекторна пластина; 5 - виступаюча частина колекторної пластини; 6 - ізоляційна прокладка; 7 - колекторна пластина з ізоляційними прокладками; 8 - пластмаса; 9 - втулка.

Рисунок 4 - Будова колектора машини постійного струму з металевим (а) і пластмасовим (б) корпусом

Секції обмотки якоря впаюють в прорізи, які розташовані в виступаючій частині пластин. В машинах малої і середньої потужності використовують колектори, в яких мідні пластини і міканітові прокладки запресовані в пластмасу. Поверхню зібраного колектора обточують на токарному верстаті і шліфують. Для того, щоб міканітові прокладки при спрацюванні колектора на виступали над пластинами і не викликали вібрації щіток, їх фрезерують на 0,8 - 1,5 мм нижче поверхні колектора.

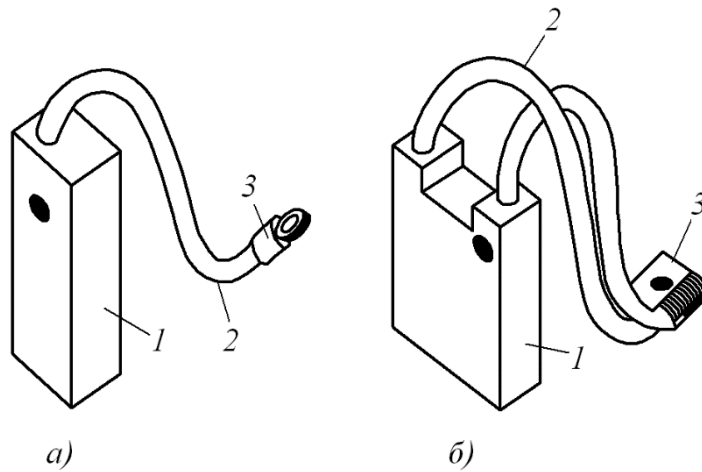
Для відведення та підведення струму до колектора використовується щіточний апарат, до складу якого входять: щітки, щіткоутримувач, щіточні пальці, траверса і струмові шини. Щіткоутримувачі (рисунок 5) закріплюються на щіточних пальцях, які кріпляться до щіточної траверси і електрично ізолюються від неї. Траверса закріплюється на нерухомій частині машини. Зазвичай передбачається можливість повороту траверси для встановлення щіток в правильне положення.



1 - щітка; 2 - обойма; 3 - пружина; 4 - обойма; 5 - затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 - натискні пластини; 7 - щітковий канатик; 8 - затискач для вивідного провідника; 9 - підшипниковий щит; 10 - ізоляційна втулка; 11 – ковпак

Рисунок 5 - Будова щіткоутримувачів МПС малої (а), середньої (б) і великої (в) потужності

В залежності від складу, способу виготовлення та фізичних властивостей всі щітки (рисунок б) ділять на шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, мідно-графітні, бронзо-графітні та срібно-графітні. Вибір і застосування щіток залежить від типу машини, умов і режимів роботи.



1 - щітка; 2 - щітковий канатик; 3 - кабельний наконечник.
Рисунок 6 - Будова щіток МПС малої (а) і великої (б) потужності

Колектор і щіточний апарат найбільш відповідальні вузли, від конструкції і якості яких залежить надійна робота машини постійного струму.

1.4 Принцип дії узагальненої машини постійного струму

Принцип дії машини постійного струму розглядається на основі моделі машини постійного струму (рисунок 7). Статор машини постійного струму називається індуктором. Він складається з двох полюсів 1, що створюють основний магнітний потік Φ , і ярма (станини), не наведено на рисунку 7. Ротор найпростішої машини постійного струму складається з якоря 2, який представлений у вигляді сталевого осердя з обмоткою з одного витка, і колектора 3, який представлений у вигляді двох ізольованих одна від одної пластин. До колектора прилягають дві нерухомі щітки 4, що з'єднують обмотку якоря із зовнішніми колами.

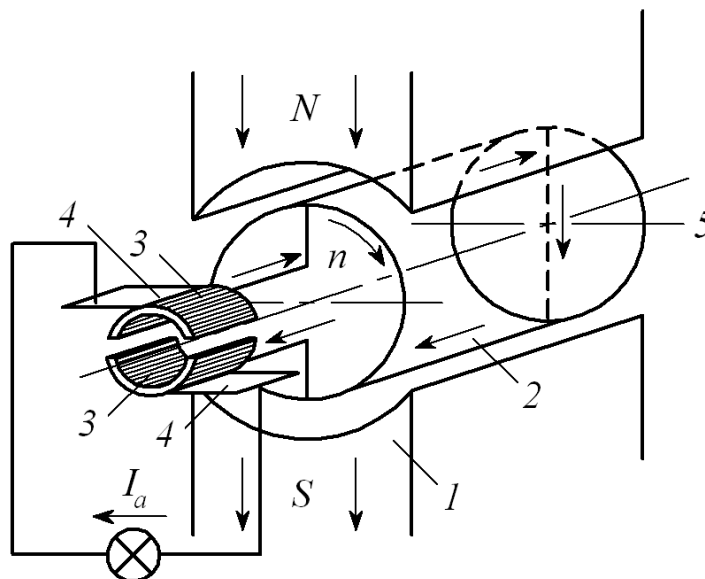


Рисунок 7 – Модель машини постійного струму

Магнітний потік Φ виходить з північного полюса N , пронизує ярмо, входить у південний полюс S і замикається по ярму, повертаючись до північного полюса N .

Величина магнітної індукції в повітряному проміжку між якорем і полюсами змінюється від максимального значення під полюсами, до нуля на лінії геометричної нейтралі 5.

Режим генератора. Якір машини постійного струму обертається первинним двигуном за годинниковою стрілкою. В провідниках обмотки якоря індукуються електрорушійна сила (ЕРС), напрям якої може бути визначено за правилом правої руки. Оскільки потік полюсів Φ вважається постійним, то індукована ЕРС створюється виключно внаслідок обертання якоря і називається *ЕРС обертання*.

Величина ЕРС обертання, що індукуються в провіднику обмотки якоря

$$e_{np} = B \cdot l \cdot v, \quad (1)$$

де B - величина магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом і якорем в місці розташування провідника;

l - активна довжина провідника, тобто довжина, на протязі якої провідник розташований у магнітному полі;

v - лінійна швидкість руху провідника.

В обох провідниках, внаслідок симетрії, індукуються однакові e_{np} , які складаються за контуром витка, утворюючи повну ЕРС якоря машини

$$E_a = 2e_{np} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v. \quad (2)$$

Оскільки провідники обмотки якоря при обертанні проходять по чергово під північним та південним полюсом машини, то напрям ЕРС в провіднику змінюється. За формою крива ЕРС провідника повторює криву розподілення індукції B в повітряному проміжку (рисунок 8,а). Частота ЕРС залежить від частоти обертання якоря і кількості пар полюсів.

При підключенні обмотки якоря за допомогою щіток до зовнішньої мережі, по ній і по обмотці якоря потече струм I_a . В обмотці якоря струм буде змінним і його крива буде аналогічною кривій ЕРС (рисунок 8, а). Однак в зовнішній мережі напрям струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. При обертанні якоря з колектором (рисунок 7) і зміні напрямку ЕРС в провіднику, одночасно відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Внаслідок чого, під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, що з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом. В результаті чого, полярність щіток і напрям струму в зовнішній мережі залишаються незмінними.

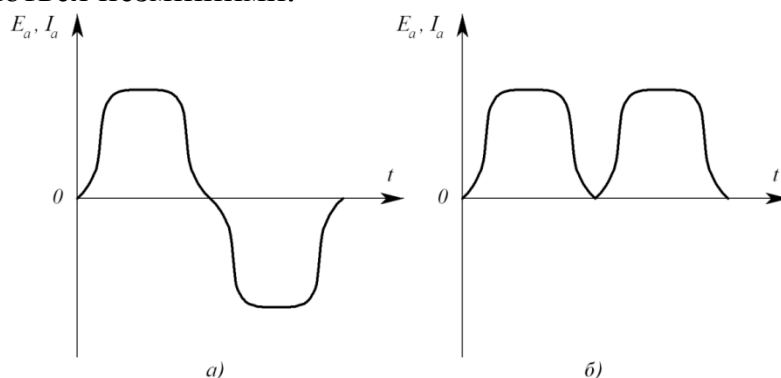


Рисунок 8 – Форма кривої ЕРС і струму в якорі (а) і зовнішній мережі (б) моделі машини постійного струму

Таким чином, в генераторі колектор виконує функцію механічного випрямляча, який перетворює змінний струм обмотки якоря в постійний струм в зовнішній мережі.

Змінивши знак напівперіода кривої ЕРС і струму I_a (рисунок 8, а), отримаємо форму кривої ЕРС і струму I_a в зовнішній мережі (рисунок 8, б).

Напруга постійного струму на затискачах генератора визначається E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки якоря r_a

$$U_a = E_a - I_a \cdot r_a. \quad (3)$$

Провідники обмотки якоря із струмом I_a розташовані в магнітному полі і на них діють електромагнітні сили (рисунок 3, а)

$$F_{np} = B \cdot l \cdot I_a, \quad (4)$$

напрямок яких визначається за правилом лівої руки. Електромагнітні сили створюють механічний обертовий момент M_{em} , який називається електромагнітним моментом,

$$M_{em} = F_{np} \cdot D_a, \quad (5)$$

де D_a - діаметр якоря, мм.

В режимі генератора M_{em} діє в протилежному обертанню якоря напрямку і є гальмівним.

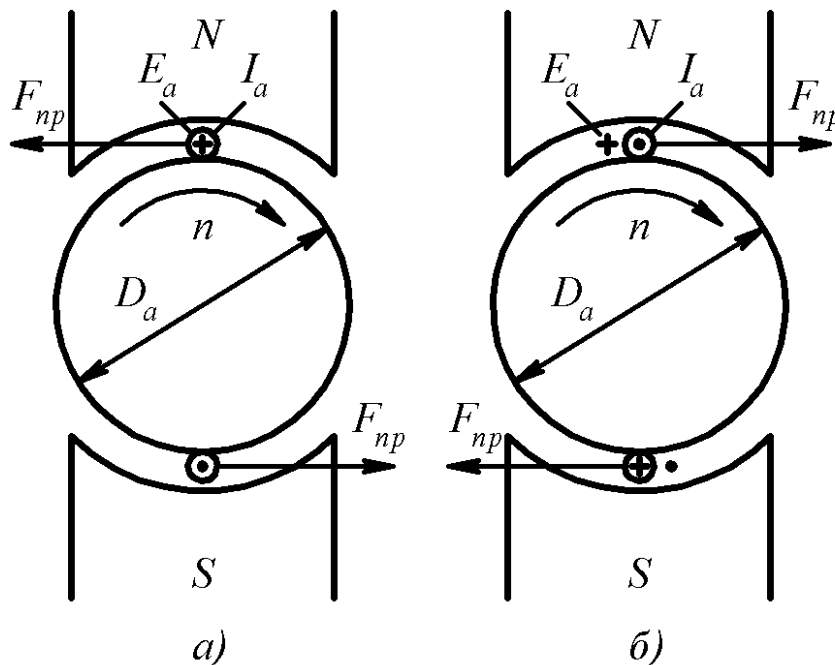


Рисунок 9 – Робота моделі машини постійного струму в режимі генератора (а) і двигуна (б)

Режим двигуна. До обмотки якоря підводиться постійна напруга U_a від зовнішнього джерела живлення, по обмотці якоря протікає струм I_a . При цьому на провідники обмотки якоря діють електромагнітні сили F_{np} і створюється електромагнітний момент M_{em} (рисунок 9, б). Значення величин F_{np} і M_{em} визначаються рівняннями (4) і (5). При достатньому значенні M_{em} ,

якір машини буде обертатися і розвивати механічну потужність. Момент M_{em} при цьому є обертовим і діє в напрямку обертання якоря.

В режимі двигуна колектор перетворює постійний струм, що споживається з зовнішньої мережі, в змінний струм, що протікає в обмотці якоря, і виконує функції механічного інвертора струму.

Провідники обмотки якоря в режимі двигуна обертаються в магнітному полі, в них індукується E_a , величина якої визначається виразом (2). При збереженні напрямку обертання якоря, напрямки напруги U_a і струму I_a в обмотці якоря при зміні режиму змінилися на протилежний (рисунок 9, б).

Таким чином, E_a в двигуні постійного струму направлена зустрічно прикладеній напрузі U_a і струму I_a в обмотці якоря, тому E_a в якорі двигуна постійного струму називається *противоЕРС*.

Напруга, прикладена до затискачів якоря двигуна постійного струму, врівноважується E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки якоря r_a

$$U_a = E_a + I_a \cdot r_a. \quad (6)$$

Аналізуючи рівняння (3) і (6), можна зробити висновок, що в режимі генератора $U_a \leq E_a$, а в режимі двигуна $U_a \geq E_a$.

1.5 Принцип оберненості

Грунтуючись на розглянутому принципі дії машини постійного струму, можна зробити висновок, що будь-яка машина постійного струму може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Така якість притаманна всім типам обертових електричних машин і називається *зворотністю*. Можливість зміни режиму роботи машини постійного струму пояснюється можливістю зміни напрямків моментів, ЕРС та струмів в окремих елементах (рисунок 10).

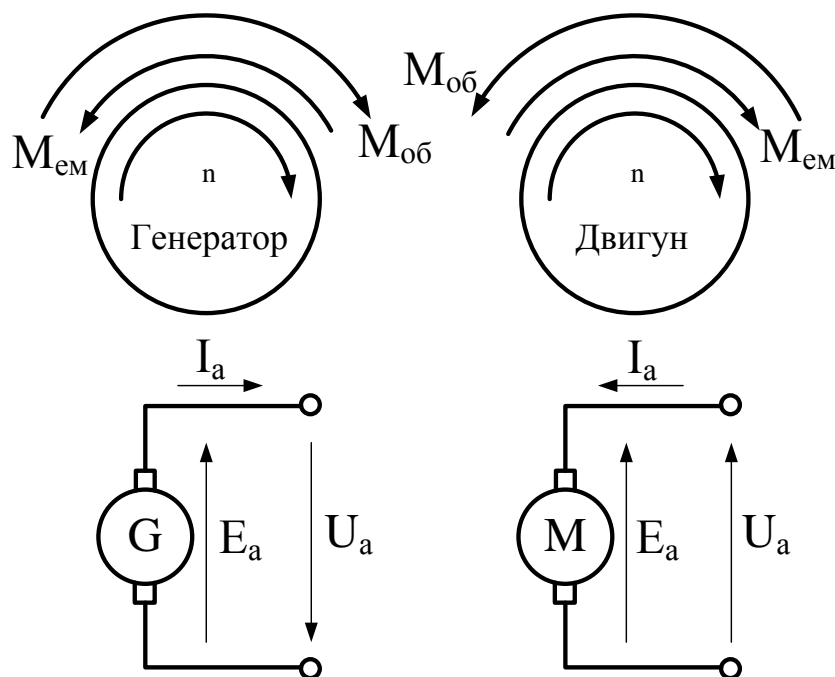


Рисунок 10 - Напрямки ЕРС, струму і моментів в генераторі і двигуні постійного струму

Таким чином, для зміни режиму роботи машини постійного струму при постійній полярності полюсів і щіток і при незмінному напрямі обертання необхідно змінити напрям струму в обмотці якоря.

Посилання на літературу:

[1], с. 348...356;

[3], с. 197...203;

[9], с. 60...63.

Контрольні питання:

1. Наведіть призначення машин постійного струму. Переваги і недоліки основних серій машин постійного струму.
2. З яких основних елементів складаються основні і додаткові полюси машини постійного струму? Призначення основних і додаткових полюсів.
3. З яких основних елементів складається якор машини постійного струму? Призначення якоря машини та особливості будови.
4. З яких основних елементів складається колектор машини постійного струму? Призначення та особливості будови колекторів.
5. З яких основних елементів складається щіточний апарат машини постійного струму? Призначення та особливості будови окремих елементів щіточного апарату.
6. З яких основних функціональних частин складається узагальнена машина постійного струму?
7. Сформулюйте принцип дії узагальненої машини постійного струму в режимі генератора.
8. Сформулюйте принцип дії узагальненої машини постійного струму в режимі двигуна.
9. Яку функцію виконує колектор в машині постійного струму при роботі в різних режимах роботи?
10. Сформулюйте принцип оберненості машини постійного струму.

Тема №2. Генератори постійного струму

Лекція №2 «Основні рівняння та режими роботи генераторів постійного струму»

Мета: Засвоєння призначення та видів, принципу дії та рівнянь, що визначають основні властивості і закономірності, особливостей режимів роботи генераторів постійного струму.

План лекції:

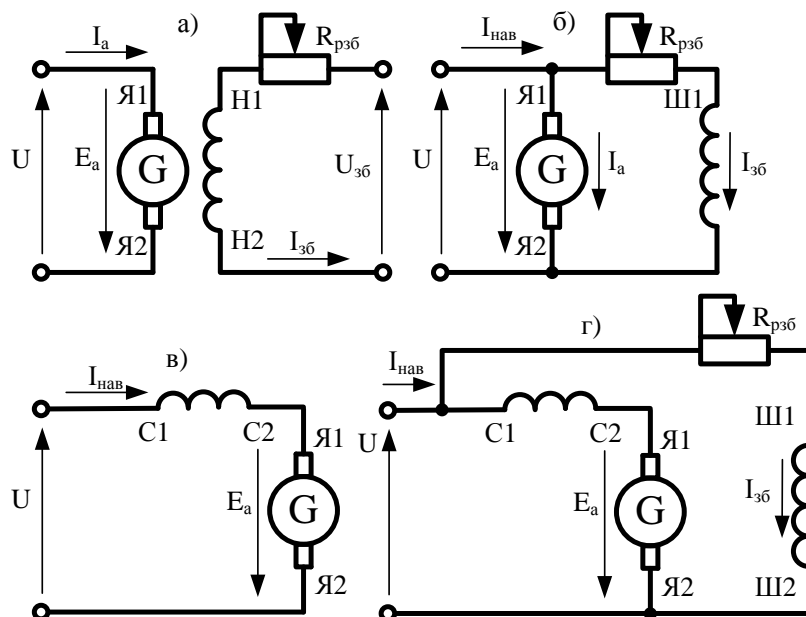
2.1 Призначення та види генераторів постійного струму.

2.2 Принцип дії та основні рівняння генераторів постійного струму.

2.3 Режим холостого ходу та навантаження генераторів постійного струму.

2.1 Призначення та види генераторів постійного струму

Характеристики і властивості генераторів постійного струму визначаються в основному способом живлення обмотки збудження.



Я1-Я2 - обмотка якоря; Н1-Н2 - обмотка незалежного збудження; Ш1-Ш2 - обмотка паралельного збудження; С1-С2 – обмотка послідовного збудження.

Рисунок 1 - схема генератора постійного струму незалежного а), паралельного б), послідовного в) і змішаного збудження г)

За способом живлення обмотки збудження розрізняють наступні типи генераторів постійного струму:

- з незалежним збудженням - обмотка збудження отримує живлення від стороннього джерела постійного струму;

- з паралельним збудженням - обмотка збудження (шунтова обмотка) підключена до обмотки якоря паралельно навантаженню;

- з послідовним збудженням - обмотка збудження (серійна обмотка) підключена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням;

- зі змішаним збудженням - використовуються дві обмотки збудження: одна підключається паралельно навантаженню (шунтова обмотка), друга (серієсна обмотка) послідовно з навантаженням.

Генератори різних типів збудження (рисунок 1) мають однакову будову і відрізняються лише виконанням обмотки збудження.

Обмотки незалежного і паралельного збудження виготовляються з великою кількістю витків з обмотувального проводу малого перерізу, обмотки послідовного збудження виготовляються з невеликої кількості витків з обмотувального проводу великого перерізу. Генератори малої потужності іноді виготовляються з постійними магнітами. Характеристики таких генераторів наближені до характеристик генераторів з незалежним збудженням

Машини постійного струму використовуються як двигуни і як генератори. Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю дуже простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

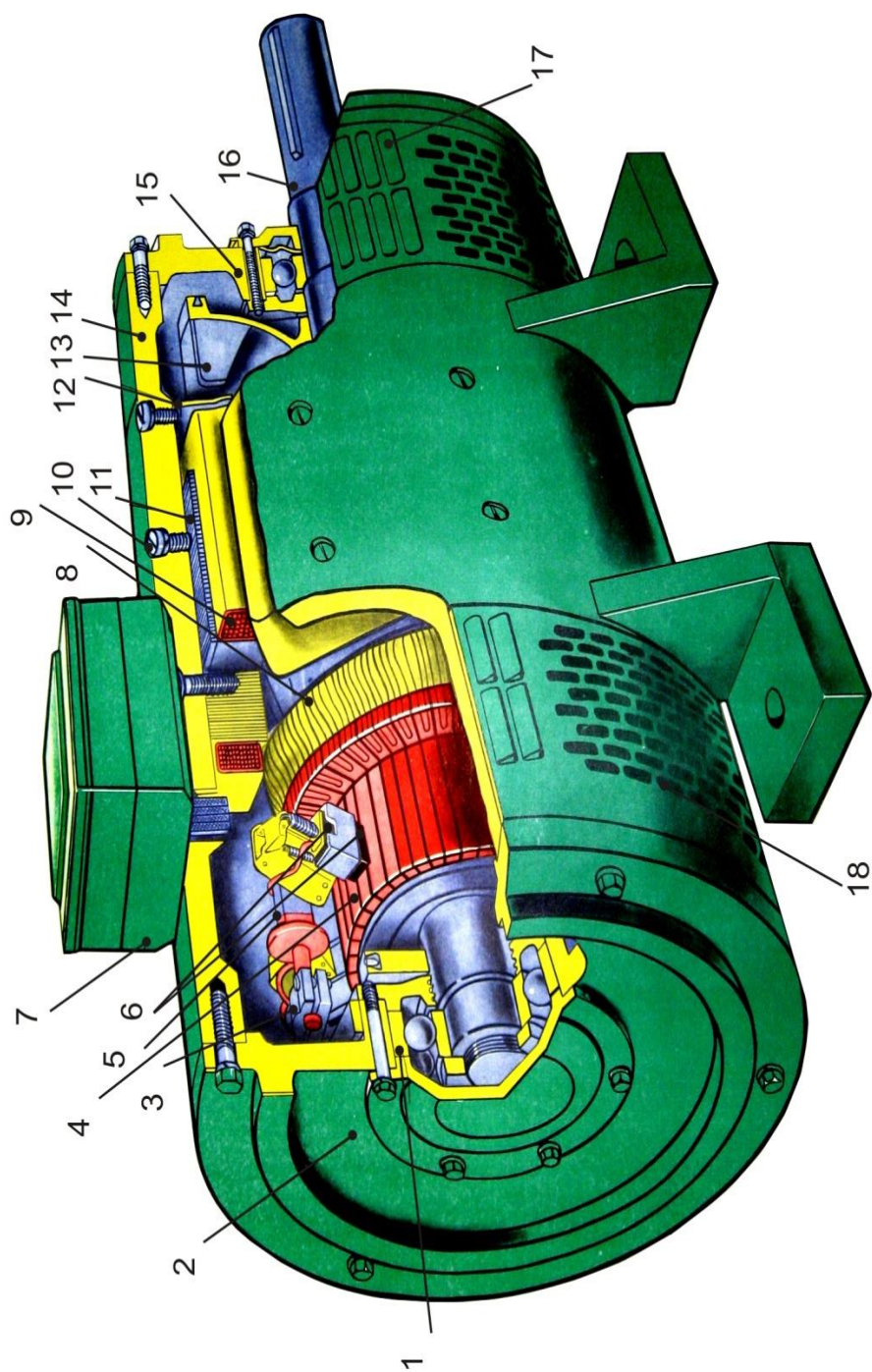
Машини постійного струму серії П застосовуються як двигуни і генератори у різних галузях промисловості і сільського господарства. Випуск машин серії П припинений, але поки що в експлуатації знаходиться значна кількість машин. Електричні машини серії П охоплюють діапазон потужностей від 0,3 до 200 кВт (при 1500 об/хв.) і мають 11 габаритів. Габарит визначається зовнішнім діаметром якоря.

Електричні машини серії 2П заміняють машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія 2П машин постійного струму охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким регулюванням швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, поліпшені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи. Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- по регульовальних властивостях: двигуни з нормальним регулюванням - до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму з метою значного зниження (в 2 - 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного встаткування, створеного для серії 4А.



1 - підшипники; 2 - задній підшипниковий щит; 3 - траверса щіткоутримувачів; 4 - колектор; 5 - палець щіткоутримувача; 6 - щітки; 7 - коробка виводів; 8 - обмотка якоря; 9 - обмотка збудження; 10 - болтове кріплення полюса; 11 - осердя полюса; 12 - повітрянаправляючий щиток; 13 - вентилятор; 14 - корпус; 15 - передній підшипниковий щит; 16 - вал; 17 - жалюзі для виходу повітря; 18 - жалюзі для входу повітря

Рисунок 2 – Будова машини постійного струму

В уніфікованій конструкції типу 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки

Заміна двигунів серії 2П як закритого, так і захищеного виконання на двигуни уніфікованої конструкції серії 4П забезпечує збільшення номінальної потужності в заданому габариті на одну шкалу, зниження матеріалоемності на 15 - 20%, зменшення витрати обмотувальної міді на 25 - 35% і зниження тривалості виготовлення в 2,5 - 3 рази.

2.2 Принцип дії та основні рівняння генераторів постійного струму

В процесі роботи генератора постійного струму в обмотці якоря індукуються ЕРС E_a . При підключенні до генератора навантаження в колі якоря виникає струм, а на виводах генератора встановлюється напруга, обумовлене рівнянням напруг для кола якоря генератора:

$$U = E_a - I_a \sum R. \quad (1)$$

Сумарний опір кола якоря генератора включає

$$\sum R = R_a + R_{on} + R_{ко} + R_c + R_{щ}. \quad (2)$$

Сума опорів всіх ділянок кола якоря: обмотки якоря R_a , обмотки додаткових полюсів R_{on} , компенсаційної обмотки $R_{ко}$, послідовної (серієсної) обмотки збудження R_c і перехідного щіткового контакту $R_{щ}$.

При відсутності в машині яких-небудь із зазначених обмоток в (2) не входять відповідні складові.

Якір генератора приводиться в обертання приводним двигуном, який створює на валу генератора обертаючий момент M_1 . Якщо генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$), то для обертання його якоря потрібний порівняно невеликий момент холостого ходу M_0 . Цей момент обумовлений гальмівними моментами, що виникають у генераторі при його роботі в режимі х.х.: моментами від сил тертя і вихрових струмів у якорі.

При роботі навантаженого генератора в проводах обмотки якоря з'являється струм, який, взаємодіючи з магнітним полем збудження, створює на якорі електромагнітний момент M . У генераторі цей момент спрямований зустрічно обертаючому моменту приводного двигуна, тобто він є навантажувальним (гальмівним).

При незмінній частоті обертання ($n = const$) обертаючий момент приводного двигуна M_1 врівноважується сумою протидіючих моментів: моментом х.х. M_0 і електромагнітним моментом M , тобто

$$M_1 = M_0 + M. \quad (3)$$

Вираз (3) — рівняння моментів для генератора при $n = const$. Помноживши члени рівняння (3) на кутову швидкість обертання якоря Ω , одержимо рівняння потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{em}, \quad (4)$$

де $P_1 = M_1 \Omega$ - механічна потужність, спрямована від приводного двигуна до генератора;
 $P_0 = M_0 \Omega$ - потужність х.х., тобто потужність, спрямована до генератора в режимі х.х. (при відключеному навантаженні);
 $P_{em} = M \Omega$ - електромагнітна потужність генератора.

Електромагнітна потужність

$$P_{em} = E_a I_a, \quad (5)$$

або з урахуванням (3)

$$P_{em} = U I_a + I_a^2 \sum R = P_2 + P_{ea}, \quad (6)$$

де P_2 — корисна потужність генератора (електрична), тобто потужність, що віддається генератором навантаженню;
 P_{ea} — потужність втрат на нагрівання обмоток і щіткового контакту в колі якоря.

З урахуванням втрат на збудження генератора P_{ezb} , отримуємо рівняння потужностей для генератора постійного струму:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{ea} + P_{ezb}. \quad (7)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном P_1 , перетворюється в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття втрат ($P_0 + P_{ea} + P_{ezb}$).

Тому що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їхньої характеристики розглядають за умови $n = const$. До основних характеристик генераторів постійного струму відносяться:

- характеристика холостого ходу - залежність напруги на виході генератора в режимі х.х. U_0 від струму збудження I_{zb} :

$$U_0 = f(I_{zb}) \text{ при } I_{zb} = 0 \text{ і } n = const;$$

- навантажувальна характеристика - залежність напруги на виході генератора U при роботі з навантаженням від струму збудження I_{zb} :

$$U = f(I_{zb}) \text{ при } I \neq 0 \text{ і } n = const;$$

- зовнішня характеристика - залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I :

$$U = f(I_{нав}) \text{ при } R_{pzб} = const \text{ і } n = const,$$

де $R_{pzб}$ — регулювальний опір у колі обмотки збудження;

- регулювальна характеристика - залежність струму збудження I_{zb} від струму навантаження $I_{нав}$ при незмінній напрузі на виході генератора:

$$I_{zb} = f(I_{нав}) \text{ при } U = const \text{ і } n = const.$$

Вид перерахованих характеристик визначає робочі властивості і якості генераторів постійного струму.

2.3 Режим холостого ходу та навантаження генераторів постійного струму

Схема включення генератора незалежного збудження наведена на рисунку 1, а. Реостат $R_{pзб}$, включений в коло збудження, дає можливість регулювати струм $I_{зб}$ в обмотці збудження, а отже, і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження живиться від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, який в цьому випадку називається збуджувачем.

Характеристика холостого ходу. При знятті характеристики $U_0 = f(I_{зб})$ генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$). Установивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінної, поступово збільшують струм в обмотці збудження $I_{зб}$ від нульового значення до $+I_B$, при якому напруга х.х. складає $U_0 = 1,15 \dots 1,25U_{ном}$. Одержують дані для побудови кривої 1 (рисунок 3). Початкова ордината кривої 1 не дорівнює нулю, що пояснюється дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм збудження до нуля, і змінивши його напрямком, поступово збільшують струм у колі збудження до $-I_{зб}$. Отримана в такий спосіб крива 2 називається спадною гілкою характеристики. У першому квадранті крива 2 розташовується вище кривої 1. Пояснюється це тим, що в процесі зняття кривої 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять у зворотному напрямку, тобто зменшують струм збудження від $-I_{зб}$ до $I_{зб} = 0$, а потім збільшують його до значення $+I_{зб}$. В результаті одержують криву 3, яка називається висхідною гілкою характеристики х.х. Спадна і висхідна гілки характеристики х.х. утворюють петлю намагнічування (гистерезису). Провівши між кривими 2 і 3 середню лінію 4, отримаємо розрахункову характеристику х.х.

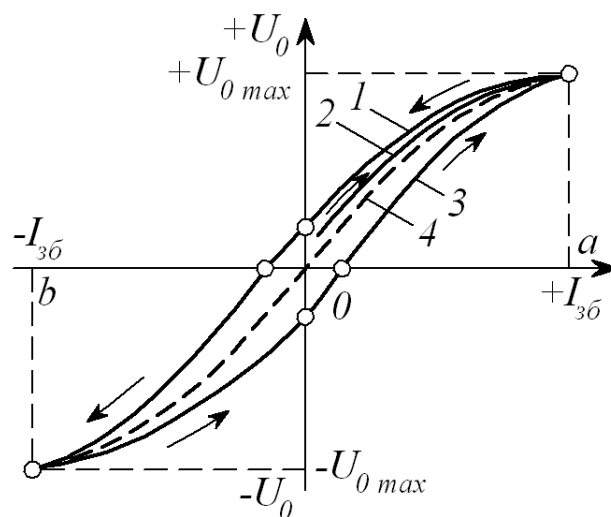


Рисунок 3 - Характеристики холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження

Прямолінійна частина характеристики х.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму магнітна система машини насичується і характеристика здобуває криволінійний характер.

Навантажувальна характеристика генератора. Ця характеристика виражає залежність напруги U на виході генератора від струму збудження $I_{зб}$ при незмінному струмі навантаження, наприклад номінальному, і частоті обертання. При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика 1 розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (рисунок 4). Якщо із точки a , що відповідає номінальній напрузі $U_{ном}$, відкласти вгору відрізок ab , який дорівнює $I_a \sum R$, і провести горизонтально відрізок bc до перетинання з характеристикою х.х., а потім з'єднати точки a і c , то одержимо abc — трикутник реактивний (характеристичний).

Так, при роботі генератора в режимі х.х. при струмі збудження $I_{зб1} = I_{збном}$ напруга на виводах $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_{ном} = ae$. Таким чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{зб1} = I_{збном}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: спадання напруги в колі якоря і впливу реакції якоря. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши спадання напруги $I_a \sum R$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження: $E_a = U + I_a \sum R$. На рисунку 3 ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж у режимі х.х. ($be \leq de$), що пояснюється впливом реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу із точки c опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; у режимі х.х. для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{зб2} \leq I_{зб1}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів збудження ($I_{зб1} - I_{зб2}$), являє собою струм збудження, що компенсує вплив реакції якоря.

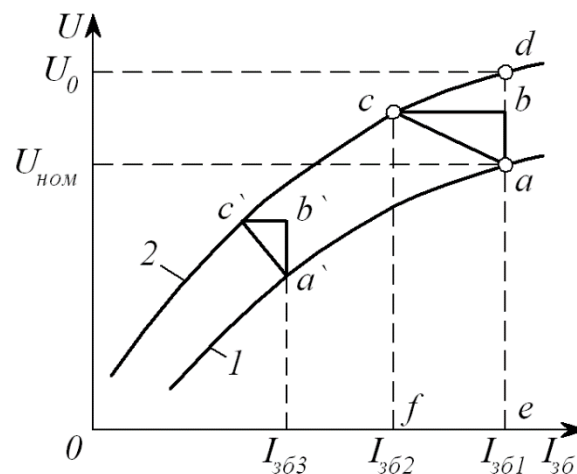


Рисунок 4 - Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, які викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: спадання напруги в ланцюзі якоря визначає катет

$$ab = I_a \sum R. \quad (8)$$

Струм збудження ($I_{\text{зб}1} - I_{\text{зб}2}$), що компенсує дію реакції якоря, визначає катет

$$bc = I_{\text{зб}1} - I_{\text{зб}2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2W_{\text{зб}}}, \quad (9)$$

де F_{qd} і F_{ad} — поперечна і поздовжня складові реакції якоря;

$W_{\text{зб}}$ - число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$, побудований для іншого значення струму збудження $I_{\text{зб}3}$. Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що пояснюється незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' \leq bc$), тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і дія реакції якоря.

Посилання на літературу:

[1], с. 172...192;

[3], с. 251...287;

[9], с. 343...360.

Контрольні питання:

1. Як поділяють генератори постійного струму за способом збудження?
2. Які серії генераторів постійного струму випускаються промисловістю?
3. З яких складових складається сумарний опір якірного кола?
4. Як визначається потужність, необхідна для приводу генератора постійного струму? Які складові входять до рівняння механічної потужності?
5. Якими основними характеристиками визначаються режими роботи генераторів постійного струму? Поясніть можливість отримання навантажувальної характеристики за допомогою реактивного трикутника.

Тема №2. Генератори постійного струму

Лекція №3 «Процеси перетворення енергії, характеристики і властивості ГПС паралельного і змішаного збудження струму»

Мета: Засвоєння та виявлення особливостей перетворення енергії в генераторах постійного струму.

План лекції:

- 3.1 Енергетична діаграма перетворення потужності та енергетичні показники генераторів постійного струму.
- 3.2 Реакція якоря ГПС.
- 3.3 Генератори постійного струму незалежного збудження: електрична схема, характеристики та властивості.
- 3.4 Генератори постійного струму паралельного і змішаного збудження: електрична схема, характеристики та властивості.
- 3.5 Принцип самозбудження ГПС.

3.1 Енергетична діаграма перетворення потужності та енергетичні показники генераторів постійного струму

Енергетична діаграма генератора паралельного збудження представлена на рисунку 1.

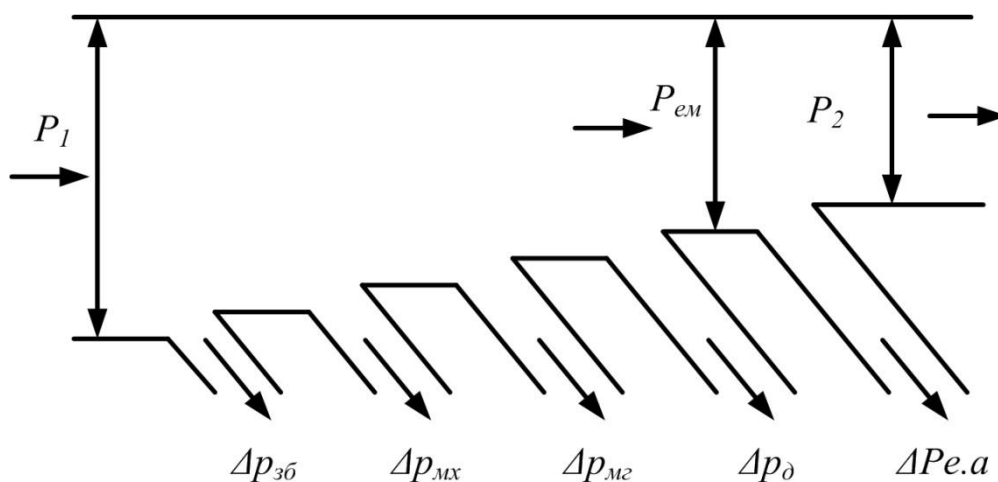


Рисунок 1 - Енергетична діаграма ГПС паралельного збудження

Отримана від первинного двигуна механічна потужність P_1 , за вирахуванням втрат механічних $\Delta p_{мх}$, магнітних $\Delta p_{мг}$ та додаткових Δp_{δ} перетворюється в якорі в електромагнітну потужність P_{em} . Потужність P_{em} частково витрачається на електричні втрати $\Delta p_{e.a}$ в ланцюгу якоря (в обмотках якоря, додаткових полюсів та в компенсаційній і в перехідному опорі щіткового контакту), а решта цієї потужності є корисна потужність P_2 , яку генератор віддає споживачам. Втрати на збудження $\Delta p_{зб}$ в генераторі незалежного збудження покриваються за рахунок стороннього джерела струму.

З урахуванням втрат на збудження генератора $P_{e.зб}$, отримуємо рівняння потужностей для генератора постійного струму

$$P_1 = P_2 + \Delta p_0 + \Delta p_{ea} + \Delta p_{e.зб}. \quad (1)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном P_1 , перетворюється в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття втрат $(\Delta p_0 + \Delta p_{ea} + \Delta p_{e.зб})$. Тому що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їх характеристики розглядають за умови $n = const$.

3.2 Реакція якоря

При холостому ході машини постійного струму в ній існує магнітне поле, яке створюється головними полюсами. При роботі машини з навантаженням струм в обмотці якоря створює магнітне поле якоря. Поле якоря, накладаючись на поле головних полюсів, спотворює і зменшує його. Вплив магнітного поля якоря на магнітне поле головних полюсів називається **реакцією якоря**.

Магнітне поле головних полюсів машини і магнітне поле якоря утворюють результуюче поле. При встановленні щіток на геометричній нейтралі (рисунок 2), поле якоря направлено поперек вісі полюсів, і в даному випадку воно називається **полем поперечної реакції якоря**.

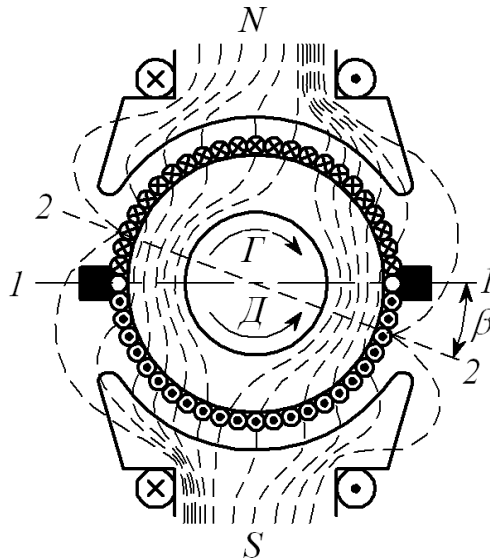


Рисунок 2 - Результуюче магнітне поле при встановленні щіток на геометричній нейтралі

Поперечна реакція якоря викликає ослаблення поля під одним краєм полюса і його підсилення під іншим, внаслідок чого вісь результуючого поля повертається в **генераторі** за напрямком обертання якоря, а в **двигуні** - проти обертання якоря (рисунок 2). Під дією поперечної реакції якоря, нейтральна лінія на поверхні якоря, на якій $B = 0$, повертається з положення геометричної нейтралі в положення, відхилене на деякий кут β . Таке положення називається **лінією фізичної нейтралі**. В генераторі фізична нейтраль розвернута в сторону обертання якоря, а в двигуні - у зворотну сторону.

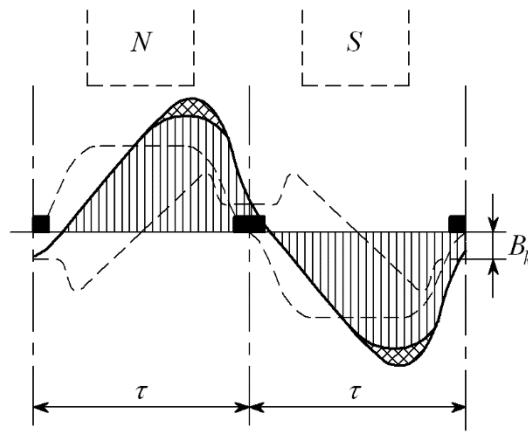


Рисунок 3- Крива розподілення індукції в повітряному проміжку машини постійного струму

При встановленні щіток під кутом 90° до геометричної нейтралі, поле якоря буде діяти вздовж вісі полюсів і називається полем **повздовжньої реакції якоря**. В залежності від напрямку струму в якорі, магнітне поле якоря може здійснювати намагнічуючу і розмагнічуючу дію.

Викривлення результуючого поля машини постійного струму несприятливо впливає на її робочі властивості і характеристики. Наслідки впливу реакції якоря на машину з ненасиченою магнітною системою:

- зрушення фізичної нейтралі відносно геометричної приводить до погіршення умов роботи щіткового контакту і може послужити причиною посилення іскріння на колекторі;

- викривлення результуючого поля машини спричиняє перерозподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини. Це приводить до того, що миттєві значення ЕРС секцій обмотки якоря в моменти проходження їх пазових сторін у зоні максимальних значень магнітної індукції різко підвищуються. В результаті зростає напруга між сусідніми колекторними пластинами U_k , що при значних навантаженнях може призвести до перекривання електричною дугою міканітової прокладки між колекторними пластинами. Наявні на колекторі частки графіту будуть сприяти розвитку електричної дуги, що призведе до виникнення потужної електричної дуги, яка перекриє весь колектор або значну його частину.

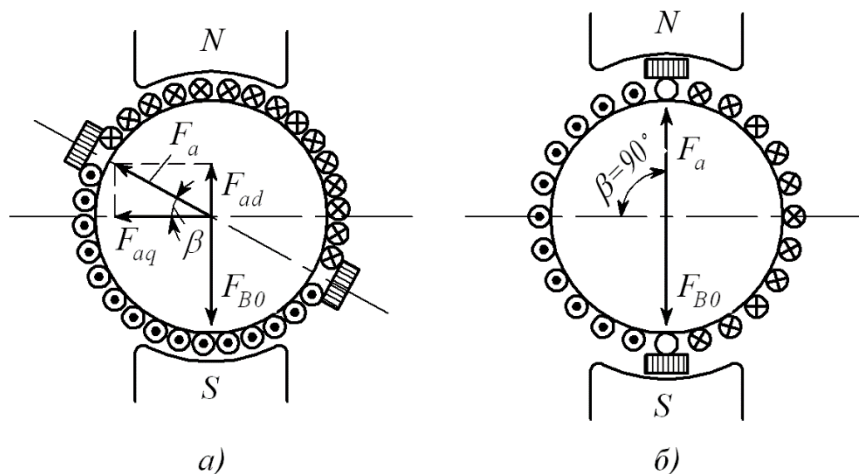


Рисунок 5 – Складові МРС при зсуві щіток з геометричної нейтралі (а) і при утворенні поздовжньої складової МРС (б)

При насиченості магнітної системи машини, що має місце в більшості електричних машин, підмагнічування одного краю полюсного наконечника, що перебуває під ним зубцової зони якоря, відбувається в меншому ступені, ніж розмагнічування іншого краю. При цьому розподіл магнітної індукції в проміжку стає більше рівномірним, однак результуючий магнітний потік машини при цьому зменшується. Таким чином, реакція якоря в машині з насиченою магнітною системою розмагнічує машину. В результаті погіршуються робочі властивості машини: у генераторів знижується ЕРС, у двигунів зменшується обертовий момент.

Вплив реакції якоря на роботу машини збільшується при зсуві щіток з геометричної нейтралі. Це пояснюється тим, що разом із щітками зміщується і вектор МРС якоря. При цьому МРС якоря F_a утворюється поперечною $F_{aq} = F_a \cos \beta$ і поздовжньою складовою $F_{ad} = F_a \sin \beta$, що спрямована по вісі полюсів. Якщо машина працює в генераторному режимі, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря, поздовжня складова МРС якоря діє зустрічно МРС обмотки збудження F_{B0} , що послаблює основний магнітний потік машини; при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова МРС якоря F_{ad} діє узгоджено із МРС F_{B0} , що викликає підмагнічування машини і може бути причиною іскріння на колекторі. Якщо машина працює в режимі двигуна, то при зсуві щіток за напрямком обертання якоря, поздовжня складова МРС якоря F_{ad} підмагнічує машину, а при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова F_{ad} розмагнічує машину. Штучне утворення підмагнічуючої дії поздовжньої реакції якоря F_{ad} а машинах загальнопромислового виконання неприпустимо через порушення роботи щіткового контакту.

Зсув щіток з геометричної нейтралі впливає на поперечну складову МРС якоря - величину, що залежить від кута β , з ростом якого вона зменшується ($F_{aq} = F_a \cos \beta$). Таким чином, в машинах постійного струму можливі такі випадки:

- щітки встановлені на геометричній нейтралі і реакція якоря має тільки поперечну складову;

- щітки зміщені з геометричної нейтралі і реакція якоря має дві складові: поперечну і поздовжню.

- щітки розташовані по вісі, перпендикулярній геометричній нейтралі, (тобто коли $\beta = 90^\circ$), при цьому реакція якоря по поперечній вісі відсутня. Однак такий випадок не має практичного застосування, тому що машина стає непрацездатною: в генераторному режимі ЕРС машини дорівнює нулю, тому що в паралельну гілку обмотки входить рівне число секцій із зустрічним напрямком ЕРС, в режимі двигуна електромагнітні сили сторін обмотки якоря, що діють ліворуч і праворуч від осі щіток, рівні і протилежно направлені, а тому обертаючий момент не створюється.

У зв'язку з тим, що реакція якоря негативно впливає на робочі властивості і характеристики машини постійного струму, при проектуванні машини вживають низку заходів щодо усунення дії реакції якоря або ослаблення її впливу до припустимих меж.

Найбільш ефективним засобом зменшення впливу поперечної складової реакції якоря є застосування в машині компенсаційної обмотки. Компенсаційну обмотку укладають в пази полюсних наконечників (рисунок 6) і включають послідовно з обмоткою якоря таким чином, щоб МРС компенсаційної обмотки F_k була протилежна за напрямком МРС обмотки якоря F_a . Компенсаційну обмотку виконують розподіленою по поверхні полюсних наконечників всіх головних полюсів машини.

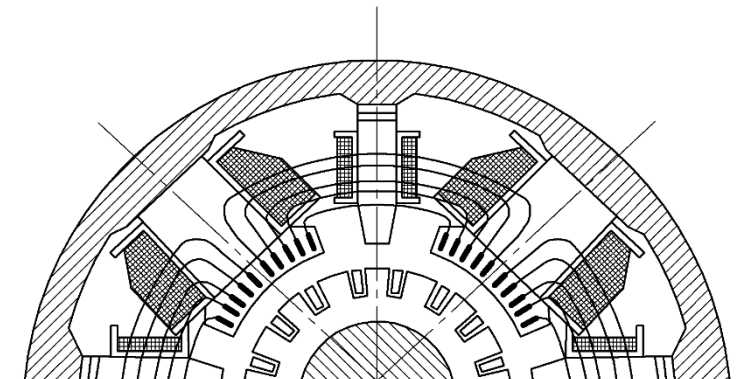


Рисунок 6 – Компенсаційна обмотка машини постійного струму

Включення компенсаційної обмотки послідовно в коло якоря забезпечує автоматичність компенсації МРС якоря при будь-якому (у межах номінального) навантаженні машини. Таким чином, у машині постійного струму з компенсаційною обмоткою при переході від холостого ходу до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку залишається практично незмінним. Однак у просторі між полюсами, частина МРС якоря залишається не скомпенсованою. Небажаний вплив цієї частини МРС на роботу щіткового контакту компенсують застосуванням в машині додаткових полюсів.

Компенсаційні обмотки застосовують лише в машинах середньої і великої потужності - більше 150 - 500 кВт при $U_n \geq 440 В$, які працюють із різкими коливаннями навантаження і різкими змінами режиму роботи. Пояснюється це тим, що компенсаційна обмотка збільшує вартість і ускладнює машину.

У машинах малої і середньої потужності, в яких не використовується компенсаційна обмотка, шкідливий вплив поперечної складової реакції якоря послаблюється відповідним вибором повітряного проміжку під головними полюсами. При цьому слід враховувати, що при досить малому повітряному проміжку і значному струмі якоря, поперечна складова реакції якоря може не тільки послабити магнітне поле під однією з частин головного полюса, але й змінити полярність. Деяке збільшення повітряного проміжку під головними полюсами, особливо на їх краях, значно послаблює дію реакції якоря. Однак, при збільшенні повітряного проміжку, виникає необхідність підвищення МРС обмотки головних полюсів, що веде до збільшення розмірів полюсних котушок, полюсів і габаритів машини.

На цьому ж принципі зменшення МРС поперечної складової реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії, заснований і інший спосіб послаблення дії реакції якоря. Цей спосіб полягає в тому, що осердя головних полюсів виготовляють з листів анізотропної (холоднокатаної) сталі

(сталь марки 3411). За напрямком прокату така сталь має підвищену магнітну проникність, а поперек напрямку прокату - невеликою магнітною проникністю.

Штампування і збирання полюсів з листів такої сталі виконується таким чином, щоб вісь полюса співпадала з напрямком прокату.

3.3 Генератори постійного струму незалежного збудження: електрична схема, характеристики та властивості

Схема включення генератора незалежного збудження наведена на рисунку 7. Реостат $R_{pzб}$ включений в коло збудження дає можливість регулювати струм $I_{зб}$ в обмотці збудження і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження живиться від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, який в цьому випадку називається збуджувачем.

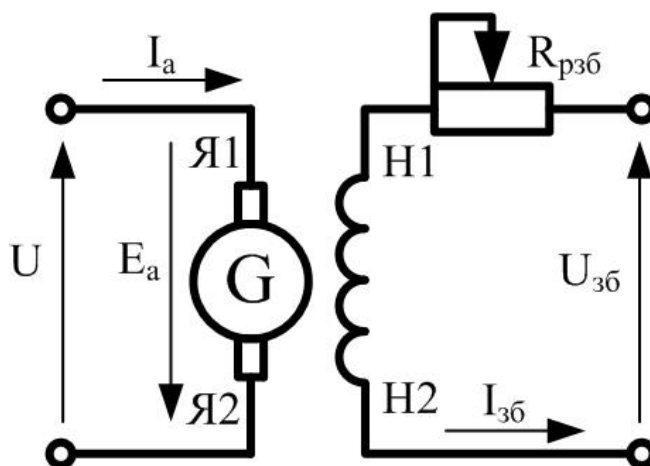


Рисунок 7 - Схема генератора постійного струму незалежного збудження

Характеристика холостого ходу. При знятті характеристики $U_0 = f(I_{зб})$ генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$). Установивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінної, поступово збільшують струм в обмотці збудження $I_{зб}$ від нульового значення до $+I_B$, при якому напруга х.х. складає $U_0 = 1,15 \dots 1,25 U_{ном}$. Одержують дані для побудови кривої 1 (рисунок 8). Початкова ордината кривої 1 не дорівнює нулю, що пояснюється дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм збудження до нуля, і змінивши його напрям, поступово збільшують струм у колі збудження до $-I_{зб}$. Отримана в такий спосіб крива 2 називається спадною гілкою характеристики. У першому квадранті крива 2 розташовується вище кривої 1. Пояснюється це тим, що в процесі зняття кривої 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять у зворотному напрямку, тобто зменшують струм збудження від $-I_{зб}$ до $I_{зб} = 0$, а потім збільшують його до значення $+I_{зб}$. В результаті одержують криву 3, яка називається висхідною гілкою характеристики х.х. Спадна і висхідна гілки характеристики х.х. утворять петлю намагнічування (гистерезису). Провівши

між кривими 2 і 3 середню лінію 4, отримаємо розрахункову характеристику х.х.

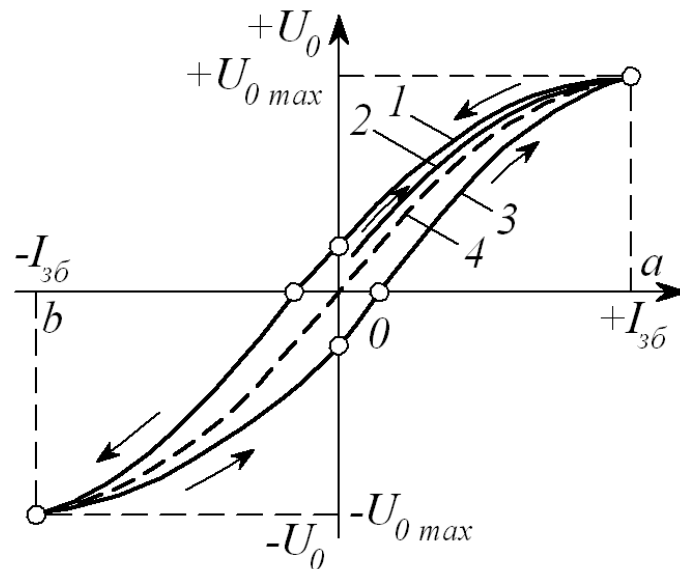


Рисунок 8 - Характеристики холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження

Прямолінійна частина характеристики х.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму магнітна система машини насичується і характеристика здобуває криволінійний характер.

Навантажувальна характеристика генератора. Ця характеристика виражає залежність напруги U на виході генератора від струму збудження $I_{z\delta}$ при незмінних: струмі навантаження, наприклад номінальному, і частоті обертання. При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика 1 розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (рисунок 9). Якщо із точки a , що відповідає номінальній напрузі $U_{ном}$, відкласти вгору відрізок ab , який дорівнює $I_a \sum R$, і провести горизонтально відрізок bc до перетинання з характеристикою х.х., а потім з'єднати крапки a і c , то одержимо abc — трикутник реактивний (характеристичний).

Так, при роботі генератора в режимі х.х. при струмі збудження $I_{z\delta 1} = I_{z\delta ном}$ напруга на виводах $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_{ном} = ae$. Таким чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{z\delta 1} = I_{z\delta ном}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: спадання напруги в колі якоря і впливу реакції якоря. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши спадання напруги $I_a \sum R$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження: $E_a = U + I_a \sum R$. На рисунку 3 ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж у режимі х.х. ($be \leq de$), що пояснюється впливом реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу із точки c опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок cf

являє собою ЕРС генератора при навантаженні; у режимі х.х. для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{зб2} \leq I_{зб1}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів збудження ($I_{зб1} - I_{зб2}$), являє собою струм збудження, що компенсує вплив реакції якоря.

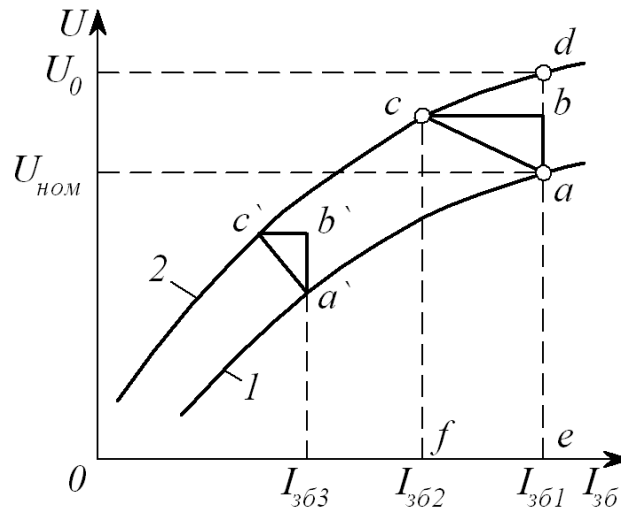


Рисунок 9 - Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, які викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: спадання напруги в ланцюзі якоря визначає катет

$$ab = I_a \sum R. \quad (2)$$

Струм збудження ($I_{зб1} - I_{зб2}$), що компенсує дію реакції якоря, визначає катет

$$bc = I_{зб1} - I_{зб2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2W_{зб}}, \quad (3)$$

де F_{qd} і F_{ad} — поперечна і поздовжня складові реакції якоря;
 $W_{зб}$ - число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$, побудований для іншого значення струму збудження $I_{зб3}$. Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що пояснюється незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' \leq bc$), тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і дія реакції якоря.

Зовнішня характеристика генератора. Ця характеристика представляє собою залежність напруги U на виводах генератора від струму навантаження $I_{нав}$. При знятті даних для побудови зовнішньої характеристики, генератор приводять в обертання з номінальною швидкістю і навантажують його до номінального струму при номінальній нарузі. Потім, поступово зменшуючи навантаження до х.х. ($I_{нав} = 0$), знімають показання приладів. Опір кола збудження $R_{зб}$ і частоту обертання протягом дослідів підтримують незмінними.

На рисунку 3 представлена зовнішня характеристика генератора незалежного збудження, з якої видно, що при збільшенні струму навантаження $I_{нав}$ напруга на виводах генератора знижується; це пояснюється впливом реакції якоря і спаданням напруги в колі якоря. Нахил зовнішньої характеристики до

осі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною напруги генератора при зниженні навантаження

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% . \quad (4)$$

Зазвичай для генератора незалежного збудження $\Delta U_{ном} = 5 \div 10\%$.

Регульовальна характеристика генератора. Характеристика $I_{зб} = f(I_{наб})$ показує, як необхідно змінювати струм у колі збудження, щоб при змінах навантаження генератора напруга на його виводах залишалася незмінною, рівній номінальній. При цьому частота обертання зберігається постійною ($n = const$) .

При роботі генератора без навантаження в колі збудження встановлюють струм $I_{зб0}$, при якому напруга на виводах генератора стає рівною номінальній. Потім поступово збільшують навантаження генератора, одночасно підвищують струм збудження таким чином, щоб напруга генератора у всьому діапазоні навантажень залишалася рівною номінальній. Так одержують висхідну гілку характеристики (рисунок 10, б, крива 1). Поступово зменшуючи навантаження генератора до х.х. і регулюючи відповідним чином струм навантаження, одержують спадну гілку характеристики (рисунок 10, б, крива 2). Спадна гілка регульовальної характеристики розташована нижче висхідної, що пояснюється впливом збільшеного залишкового намагнічування магнітного кола машини в процесі зняття висхідної гілки. Середню криву 3, проведену між висхідною й спадною гілками, називають практичною регульовальною характеристикою генератора.

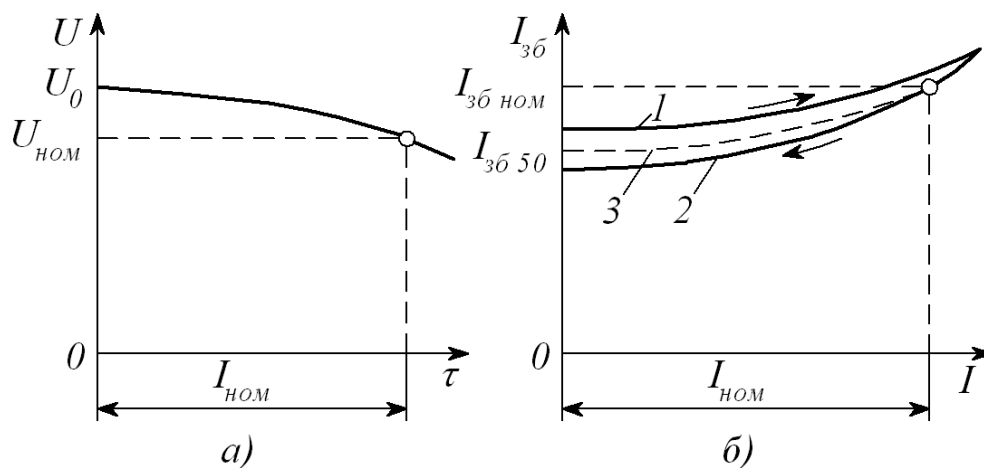


Рисунок 10- Зовнішня (а) і регульовальна (б) характеристики генератора незалежного збудження

Основний недолік генераторів незалежного збудження - це необхідність застосування стороннього джерела енергії постійного струму. Однак можливість регулювання напруги в широких межах, а також порівняно жорстка зовнішня характеристика цього генератора є його перевагами.

3.4 Генератори постійного струму паралельного і змішаного збудження: електрична схема, характеристики та властивості

Навантажувальна і регулювальна характеристики генератора паралельного збудження практично не відрізняються від відповідних характеристик генератора незалежного збудження.

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рисунок 11, крива 1, менш жорстка, ніж у генератора незалежного збудження. Пояснюється це тим, що в генераторі паралельного збудження, крім причин, що викликають зменшення напруги в генераторі незалежного збудження (реакція якоря і спадання напруги в колі якоря), діє третя причина - зменшення струму збудження, викликана зниженням напруги від дії перших двох причин.

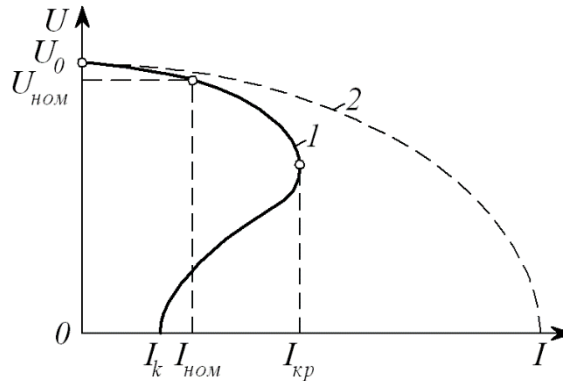


Рисунок 11 - Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Цією особливістю пояснюється і те, що при поступовому зменшенні опору навантаження $R_{нав}$ струм збільшується лише до критичного значення $I_{кр}$, а потім при подальшому зменшенні опору навантаження струм починає зменшуватися. Струм навантаження досягає значення при короткому замиканні $I_{нав} < I_{кр}$. Справа в тому, що зі збільшенням струму підсилюється розмагнічування генератора (посилення реакції якоря і зменшення струму збудження), машина переходить в ненасичений стан, при якому навіть невелике зменшення опору навантаження викликає різке зменшення ЕРС машини. Тому що струм визначається напругою на виводах генератора U і опором навантаження $R_{нав}$, тобто $I = U / R_{нав}$, то при струмах навантаження $I_{нав} < I_{кр}$, коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж зменшується опір навантаження, відбувається зростання струму навантаження. Після того як $I_{нав} = I_{кр}$, подальше зменшення $R_{нав}$ супроводжується зменшенням струму навантаження, тому що в цьому випадку напруга U зменшується швидше, ніж зменшується опір навантаження $R_{нав}$.

Таким чином, коротке замикання, викликане повільним зменшенням опору навантаження, не небезпечно для генератора паралельного збудження. Але при раптовому к.з. магнітна система генератора не встигає розмагнітитися і струм досягає небезпечних для машини значень $I_{к} = (8 \div 12)I_{ном}$ (рисунок 11, крива 2). При такому різкому зростанні струму навантаження, на валу генератора виникає значний гальмівний момент, а на колекторі з'являється сильне іскріння, що переходить у круговий вогонь. Тому необхідно захищати генератор від перевантаження і к.з.

Генератори паралельного збудження широко застосовують в установках постійного струму, тому що відсутність збуджувача вигідно відрізняє ці генератори від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного порушення становить 10-30%.

Генератор змішаного збудження має паралельну і послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється в основному паралельною обмоткою (60-80% від загального потоку). Послідовна обмотка включається згідно з паралельною (щоб МРС обмоток склалися), що забезпечує одержання жорсткої зовнішньої характеристики генератора.

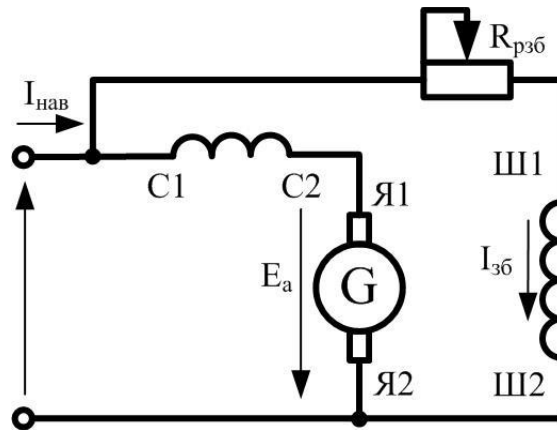


Рисунок 12 - Електрична схема ГПС змішаного збудження

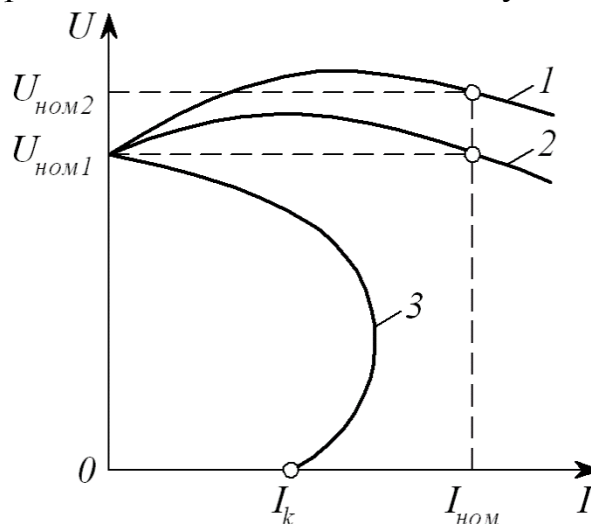


Рисунок 13 - Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

В режимі х.х. генератор має тільки паралельне збудження, тому що $I_{нав} = 0$. З появою навантаження виникає МРС послідовної обмотки збудження, що підмагнічуючи машину, компенсує дію реакції якоря і спадання напруги в якорі.

Зовнішня характеристика в цьому випадку стає найбільш жорсткою (рисунок 13, крива 2), тобто напруга на затискачах генератора при збільшенні струму залишається майже незмінною. Якщо ж потрібно, щоб напруга на затискачах споживача (наприкінці лінії) залишалася практично незмінною, то число витків послідовної обмотки збільшують таким чином, щоб МРС цієї обмотки компенсувала ще й спадання напруги в проводах лінії (рисунок 13, крива 1).

При зустрічному включенні обмоток збудження напруга генератора із збільшенням струму навантаження різко зменшується (рисунок 13, крива 3), що пояснюється дією розмагнічення магнітного кола послідовною обмоткою збудження, МРС якої спрямована проти МРС паралельної обмотки. Зустрічне включення обмоток застосовують лише в генераторах спеціального призначення, наприклад у зварювальних, де необхідно одержати круто падаючу зовнішню характеристику.

Генератори змішаного порушення зі згідним включенням обмоток збудження застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли потрібна сталість напруги в лінії.

3.5 Принцип самозбудження ГПС

Принцип самозбудження генератора постійного струму заснований на тому, що магнітна система машини, будучи збудженою, зберігає тривалий час невеликий магнітний потік залишкового магнетизму осердя полюсів і станини $\Phi_{зал}$ (порядку 2—3% від повного потоку). При обертанні якоря потік індукуює у якірній обмотці ЕРС $E_{зал}$, під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм $I_{збзал}$. Якщо МРС обмотки збудження $I_{збзал} W_{зб}$ має такий же напрямок, як і потік $\Phi_{зал}$, то вона збільшує потік головних полюсів. Це, у свою чергу, викликає збільшення ЕРС генератора, від чого струм збудження знову збільшиться. Так буде тривати до тих пір, поки напруга генератора не буде врівноважена спаданням напруги в колі збудження, тобто $I_{зб} R_{зб} = U_0$.

На рисунку 3 наведена характеристика х.х. генератора (крива 1) і залежність спадання напруги від струму збудження $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$ (пряма 2). Точка перетинання А відповідає закінченню процесу самозбудження, тому що саме в ній $U_0 = I_{зб} R_{зб}$.

Кут нахилу прямій ОА до осі абсцис визначається із трикутника ОАВ:

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_{зб}} = R_{зб},$$

де m_i - масштаб струму (по осі абсцис), А/мм;

m_u - масштаб напруги (по осі ординат), В/мм.

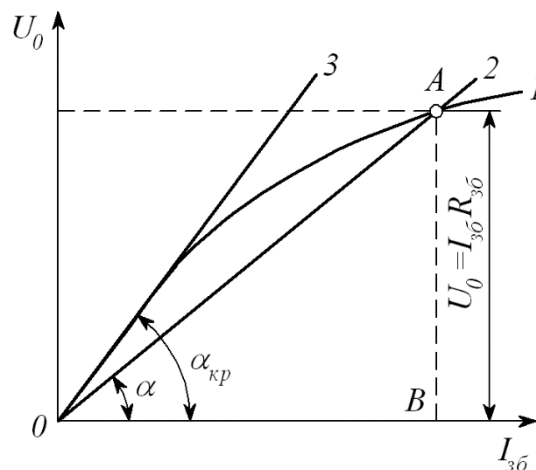


Рисунок 14- До принципу самозбудження ГПС паралельного збудження

З (1) необхідно, щоб кут нахилу прямої $I_{зб}R_{зб} = f(I_{зб})$ до осі абсцис прямо пропорційний опорю кола збудження. Однак, при деякому значенні опорю реостата $R_{пзб}$ опір $R_{зб}$, досягає значення, при якому залежність $I_{зб}R_{зб} = f(I_{зб})$ стає дотичною до прямолінійної частини характеристики х.х. (пряма 3). При виникненні цієї ситуації генератор не самозбуджується. Опір кола збудження, при якому припиняється самозбудження генератора, називають критичним опором $R_{збкрит}$.

Слід зазначити, що самозбудження генератора можливо лише при частоті обертання, що перевищує критичну $n_{кр}$. Ця умова витікає з характеристики самозбудження генератора (рисунок 14), що представляє собою залежність напруги генератора в режимі х.х. від частоти обертання при незмінному опорі кола збудження, тобто $U_0 = f(n)$ при $R_{зб} = const$.

Аналіз характеристики самозбудження показує, що при $n < n_{кр}$ збільшення частоти обертання якоря генератора супроводжується незначним збільшенням напруги, тому що процесу самозбудження не відбувається і поява напруги на виході генератора обумовлена лише залишковим намагнічуванням магнітного кола генератора. Процес самозбудження починається при $n > n_{кр}$. У цьому випадку збільшення частоти обертання супроводжується різким ростом напруги U_0 .

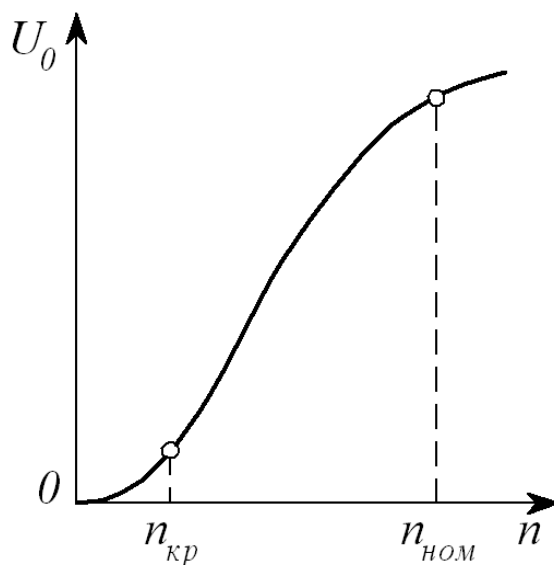


Рисунок 14 - Характеристика самозбудження ГПС паралельного збудження

Однак при частоті обертання, близької до номінального, зростання напруги вповільнюється, що пояснюється магнітним насиченням генератора. Критична частота обертання залежить від опорю кола збудження і з ростом останнього збільшується.

Таким чином, самозбудження генераторів постійного струму можливо при дотриманні наступних умов:

- магнітна система машини повинна мати залишковий магнетизм;

- приєднання обмотки збудження повинне бути таким, щоб МРС обмотки збігалася за напрямком з потоком залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$;
- опір кола збудження повинний бути менше критичного;
- частота обертання якоря повинна бути більше критичної.

Оскільки генератор паралельного збудження самозбуджується лише в одному напрямку, то характеристика х.х. цього генератора може бути знята тільки для одного квадранта вісі координат.

Посилання на літературу:

- [1], с. 172...192;
- [3], с. 251...287;
- [9], с. 343...360.

Контрольні питання:

1. Як розподіляються втрати електричної потужності в генераторах постійного струму? Які складові потужності визначають енергетичні показники генераторів?
2. Що називається реакцією якоря? Яким чином реакція якоря впливає на процеси в генераторах постійного струму?
3. Яким чином можливе зменшення впливу реакції якоря? Якими заходами: конструкційними та електричними, здійснюють зменшення впливу реакції якоря?
4. Якими основними характеристиками визначаються якості генераторів постійного струму незалежного збудження?
5. Наведіть переваги і недоліки генераторів постійного струму незалежного збудження.
6. Наведіть особливості генераторів постійного струму паралельного і змішаного збудження.
7. Якими характеристиками визначаються якості і особливості генераторів паралельного і змішаного збудження?
8. Наведіть умови, які необхідні для здійснення самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження.
9. Якими характеристиками визначаються умови, при яких можливе самозбудження генераторів?
10. Яким чином параметри генератора впливають на перебіг процесу самозбудження генератора?

Тема №3. Двигуни постійного струму

Лекція №4 «Основні рівняння та режими роботи двигунів постійного струму»

Мета: Засвоєння принципу дії та основних рівнянь, що характеризують властивості і процеси, що відбуваються в двигунах постійного струму.

План лекції:

- 4.1 Призначення та види двигунів постійного струму.
- 4.2 Принцип дії та основні рівняння двигунів постійного струму.
- 4.3 Енергетична діаграма перетворення потужності в двигунах постійного струму.

4.1 Призначення та види двигунів постійного струму

Двигуни постійного струму широко застосовуються у промислових, транспортних, кранових та інших установках, де необхідне широке повільне регулювання частоти обертання. Одна і та ж електрична машина може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Ця властивість електричних машин має назву зворотність.

Припустимо, що до двигуна підведена напруга $U_{\text{мережі}} = \text{const}$. При заданій на Рисунок 14.1 полярності полюсів та напрямку струму I_a в якорі (обмотка якоря показана тільки одним проводом) на валу двигуна створюється електромагнітний момент, що обертає M ,

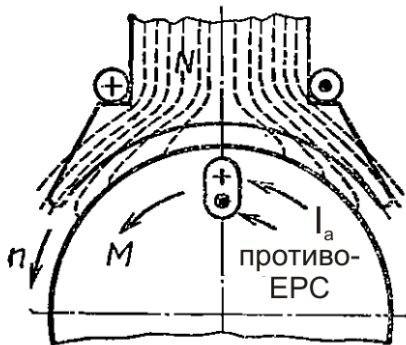


Рисунок 1 – Напрямок моменту та проти-ЕРС обмотки якоря двигуна

направлений проти обертання годинникової стрілки.

Під дією цього моменту двигун обертається у напрямку моменту з постійною частотою n . Застосовуючи правило правої руки, знаходимо, що у проводі (обмотці) якоря наводиться ЕРС e_a , яка направлена зустрічно відносно струму якоря, і тому її називають проти-ЕРС якоря і розглядають як електромагнітну протидію двигуна відносно напруги мережі $U_{\text{мережі}}$.

Електричні машини серії 2П заміняють машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія 2П машин постійного струму охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким регулюванням швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, поліпшені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи.

Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- по регулювальних властивостях: двигуни з нормальним регулюванням - до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регулювальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму з метою значного зниження (в 2 - 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А.

4.2 Принцип дії та основні рівняння двигунів постійного струму

Машини постійного струму мають властивість зворотності, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому якщо машину постійного струму підключити до джерела енергії постійного струму, то в обмотці збудження і в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на якорі електромагнітний момент M , що є не гальмівним, як це мало місце в генераторі, а обертовим.

Під дією електромагнітного моменту якоря машина почне обертатися, тобто машина буде працювати в режимі двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну. У процесі роботи двигуна його якор обертається в магнітному полі. В обмотці якоря індукується ЕРС E_a , напрямком якої можна визначити за правилом «правої руки». Вона не відрізняється від ЕРС, що наводиться в обмотці якоря генератора. У двигуні ж ЕРС спрямована проти струму I_a , і тому її називають протиелектрорушійною силою (проти-ЕРС) якоря.

Для двигуна, що працює з постійною частотою обертання,

$$U = E_a + I_a \sum R. \quad (1)$$

З (1) видно, що підведена до двигуна напруга врівноважується проти-ЕРС обмотки якоря і спаданням напруги в колі якоря. На підставі (1) струм якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum R}. \quad (2)$$

Помноживши обидві частини рівняння (1) на струм якоря I_a , одержимо рівняння потужності для кола якоря:

$$UI_a = I_a^2 \sum R + E_a I_a, \quad (3)$$

де UI_a — потужність в колі обмотки якоря;

$I_a^2 \sum R$ — потужність електричних втрат в колі якоря.

Для з'ясування сутності виразу $E_a I_a$ проведемо наступне перетворення:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a,$$

або

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega.$$

$$[pN / (2\pi a)] \Phi I_a = M$$

тоді

$$E_a I_a = M\omega = P_{em}, \quad (4)$$

де $\omega = 2\pi n / 60$ — кутова частота обертання якоря;

P_{em} — електромагнітна потужність двигуна.

Отже, вираз $E_a I_a$ являє собою електромагнітну потужність двигуна.

Перетворивши вираження (3) з урахуванням (4), одержимо

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum R.$$

Аналіз цього рівняння показує, що зі збільшенням навантаження на вал двигуна, тобто зі збільшенням електромагнітного моменту M , зростає потужність у колі обмотки якоря UI_a , тобто потужність на вході двигуна. Але тому що напруга, що підводиться до двигуна, підтримується незмінною ($U = const$), то збільшення навантаження двигуна супроводжується зростанням струму в обмотці якоря I_a .

В залежності від способу збудження двигуни постійного струму, так само як і генератори, розділяють на двигуни зі збудженням від постійних магнітів (магнітоелектричні) і з електромагнітним збудженням. Останні у відповідності зі схемою включення обмотки збудження відповідно обмотки якоря підрозділяють на двигуни паралельного (шунтові), послідовного (серієсні) і змішаного збудження.

Відповідно до формули ЕРС $E_a = c_e \Phi n$ частота обертання двигуна (об/хв)

$$n = E_a / (c_e \Phi).$$

Підставивши значення E_a з (1), одержимо

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \Phi}, \quad (5)$$

тобто частота обертання двигуна прямо пропорційна напрузі і обернено пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це пояснюється тим, що підвищення напруги U або зменшення потоку Φ викликає збільшення різниці ($U - E_a$); це, в свою чергу, веде до зростання струму I_a . Внаслідок цього збільшення струму підвищує обертаючий момент, і якщо при цьому навантажувальний момент залишається незмінним, то частота обертання двигуна збільшується.

З (5) виходить, що регулювати частоту обертання двигуна можна зміною або напруги U , що підводиться до двигуна, або основного магнітного потоку Φ , або електричного опору в колі якоря $\sum R$.

Напрямок обертання якоря залежить від напрямків магнітного потоку збудження Φ і струму в обмотці якоря. Тому, змінивши напрямок будь-якої із зазначених величин, можна змінити напрямок обертання якоря. Необхідно зауважити, що перемикання загальних затискачів схеми живлення не дає зміни напрямку обертання якоря, тому що при цьому одночасно змінюється напрямок струму і в обмотці якоря, і в обмотці збудження.

4.3 Енергетична діаграма перетворення потужності в двигунах постійного струму

Енергетична діаграма двигуна паралельного збудження представлена на рисунку 2.

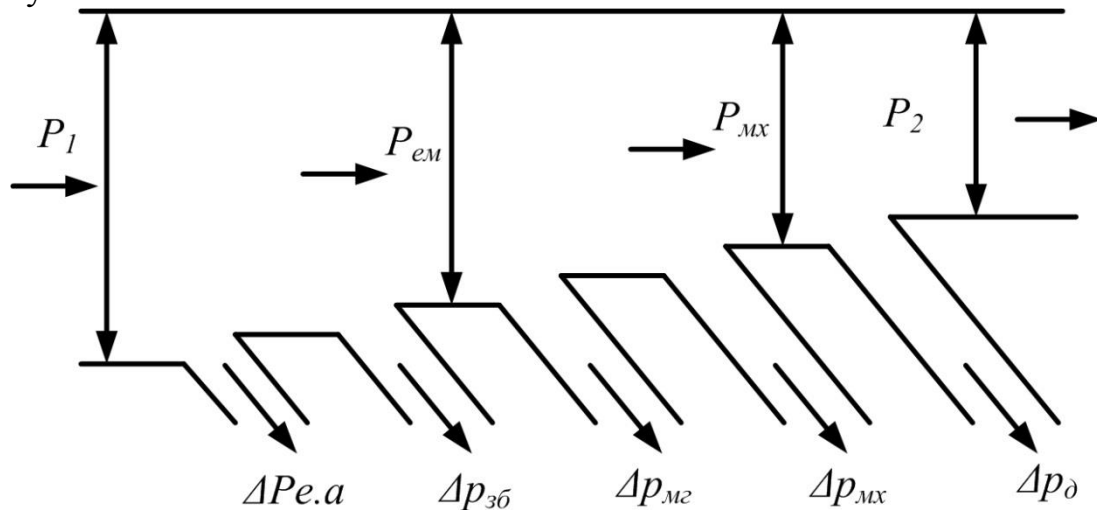


Рисунок 2 – Енергетична діаграма двигуна паралельного збудження

Первинна потужність P_1 є електричною і споживається з мережі живлення. За рахунок цієї потужності покриваються втрати на збудження $\Delta p_{зб}$ та електричні втрати $\Delta p_{e.a}$ у колі якоря, а решта частина складає електромагнітну потужність P_{em} , яка перетворюється у механічну потужність $P_{мх}$. Втрати магнітні $\Delta p_{мг}$, додаткові $\Delta p_{д}$ та механічні $\Delta p_{мх}$ покриваються за рахунок механічної потужності, а решта частина цієї потужності є корисна механічна потужність P_2 на валу. Магнітні втрати відбуваються тільки в осерді якоря, тому що тільки цей елемент магнітопроводу машини постійного струму піддається перемагнічуванню.

Величина магнітних втрат, що складаються із втрат від гістерезису і втрат від вихрових струмів, залежить від частоти перемагнічування значень магнітної індукції в зубцях і спинці якоря, товщини листів електротехнічної сталі, її магнітних властивостей і якості ізоляції цих листів у пакеті якоря.

Електричні втрати в машині постійного струму обумовлені нагріванням обмоток і щіткового контакту. Втрати в колі збудження визначаються втратами в обмотці збудження і у реостаті, включеному в коло збудження:

$$P_{e.zb} = U_{zb} I_{zb} \quad (6)$$

де U_{zb} - напруга на затискачах кола збудження.

Втрати в обмотках кола якоря

$$P_{e.a} = I_a^2 \sum R, \quad (7)$$

де $\sum R$ - опір обмоток у колі якоря, приведений до розрахункової робочої температури $\theta_{раб}$.

Електричні втрати також мають місце і у контакті щіток:

$$P_{e.щ} = \Delta U_{щ} I_a, \quad (8)$$

де $\Delta U_{щ}$ — перехідне спадання напруги на щітках обох полярностей, прийняте відповідно до марки щіток.

Електричні втрати в колі якоря і у щітковому контакті залежать від навантаження машини, тому ці втрати називають змінними.

У машині постійного струму механічні втрати складаються із втрат від тертя щіток об колектор

$$P_k = k_{mp} S_{щ} f_{щ} V_k, \quad (9)$$

тертя в підшипниках P_{II} і на вентиляцію $P_{вен}$

$$P = P_k + P_{II} + P_{вен}, \quad (10)$$

де k_{mp} — коефіцієнт тертя щіток об колектор ($k_{mp} = 0,2 \div 0,3$);

$S_{щ}$ — поверхня зіткнення всіх щіток з колектором;

$f_{щ}$ — питомий тиск щітки;

Окружна швидкість колектора діаметром D_k

$$V_k = \pi D_k n / 60. \quad (11)$$

Механічні магнітні втрати при стабільній частоті обертання ($n = const$) можна вважати постійними.

Сума магнітних і механічних втрат становлять втрати х.х.:

$$P_0 = P_m + P_{мех}. \quad (12)$$

Якщо машина працює як двигун паралельного збудження в режимі х.х., то вона споживає з мережі потужність

$$P_{10} = UI_{a0} + U_{зб} I_{зб} = P_m + P_{мех} + I_{a0}^2 \sum R + \Delta U_{щ} I_{a0} + U_{зб} I_{зб}. \quad (13)$$

Однак через невелике значення струму I_{a0} електричні втрати $I_{a0}^2 \sum R$ і $\Delta U_{щ} I_{a0}$ досить малі і зазвичай не перевищують 3% втрат $P_0 = P_m + P_{мех}$. Тому, не допускаючи помітної помилки, можна записати $P_{10} = UI_{a0} + U_{зб} I_{зб} = P_0 + U_{зб} I_{зб}$, звідки втрати х.х.

$$P_0 = P_{10} - U_{зб} I_{зб}. \quad (14)$$

Таким чином, втрати х.х. (магнітні і механічні) можуть бути визначені експериментально.

У машинах постійного струму є ряд втрат, які складно врахувати, - додаткових. Ці втрати складаються із втрат від вихрових струмів, втрат у зрівнювальних з'єднаннях, у сталі якоря через нерівномірний розподіл індукції при навантаженні, у полюсних наконечниках, обумовлених пульсацією основного потоку через наявність зубців якоря. Додаткові втрати не піддаються точному обліку і становлять незначну величину. Тому, у машинах без компенсаційної обмотки значення додаткових втрат P_0 приймають рівним 1% від корисної потужності для генераторів або 1% від споживано з мережі потужності для двигунів. У машинах з компенсаційною обмоткою значення додаткових втрат приймають рівним відповідно 0,5%.

Потужність на вході машини постійного струму (споживана):

для генератора (механічна потужність)

$$P_{1ген} = M_1 \omega = 0,105 M_1 n, \quad (15)$$

де M_1 — обертаючий момент приводного двигуна;

для двигуна (електрична потужність)

$$P_{1\text{дв}} = UI. \quad (16)$$

Потужність на виході машини (корисна потужність):
для генератора (електрична потужність)

$$P_{2\text{ген}} = UI. \quad (17)$$

для двигуна (механічна потужність)

$$P_{2\text{дв}} = 0,105M_2n. \quad (18)$$

де M_1 і M_2 — момент на валу електричної машини;
 n — частота обертання, об/хв.

Коефіцієнт корисної дії електричної машини являє собою відношення потужностей - корисної P_2 до споживаної P_1

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Визначивши сумарну потужність перерахованих вище втрат

$$\sum P = P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{е.зб}} + P_{\text{еа}} + P_{\text{еи}} + P_{\text{д}}, \quad (19)$$

можна підрахувати ККД машини по одній з наступних формул:
для генератора

$$\eta_{\text{Г}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P}; \quad (20)$$

для двигуна

$$\eta_{\text{ДВ}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI}. \quad (21)$$

ККД машин постійного струму становить 0,75—0,90 для машин потужністю від 1 до 100 кВт і 0,90—0,97 для машин потужністю понад 100 кВт. Набагато менше ККД машин постійного струму малої потужності. Наприклад, для машин потужністю від 5 до 50 Вт $\eta = 0,15 \div 0,50$. Зазначені значення ККД відповідають номінальному навантаженню машини. Залежність ККД машини постійного струму від навантаження виражається графіком $\eta = f(P_2)$, форма якого характерна для електричних машин (рисунку 3).

Коефіцієнт корисної дії електричної машини можна визначати: а) методом безпосереднього навантаження за результатами вимірів підведеної P_1 і P_2 потужності, що віддається; б) непрямим методом за результатами вимірів втрат.

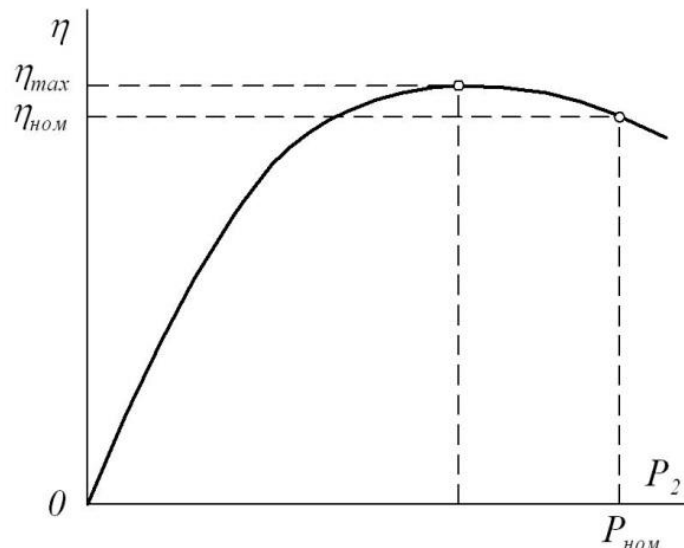


Рисунок 3 - Залежність $\eta = f(P_2)$

Метод безпосереднього навантаження застосовується тільки для машин малої потужності, для інших випадків застосовується непрямий метод, як більше точний і зручний. Установлено, що при $\eta > 80\%$ вимірювати ККД методом безпосереднього навантаження недоцільно, тому що він дає більшу помилку, ніж при застосуванні непрямого методу.

Існує кілька непрямих способів визначення ККД. Найбільш простий спосіб холостого ходу двигуна, коли споживана машиною постійного струму потужність витрачається тільки на втрати х.х. Що ж стосується електричних втрат, то їх визначають розрахунковим шляхом після попереднього виміру електричних опорів обмоток і приведення їх до робочої температури.

Посилання на літературу:

[1], с. 200...217;

[3], с.270...287;

[9], с. 350...360.

Контрольні питання:

1. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму. Які серії двигунів постійного струму найбільш поширені?

2. Що називається електромагнітною потужністю двигуна постійного струму? Як визначається електромагнітна потужність?

3. Наведіть основні рівняння двигуна постійного струму.

4. Наведіть енергетичну діаграму перетворення потужності в двигуні постійного струму. З яких складових складається енергетична діаграма?

5. Як визначається ККД двигуна постійного струму? Наведіть методики визначення ККД двигуна постійного струму.

Тема №3. Двигуни постійного струму

Лекція №5 «Енергетичні показники, регульовальні і пускові властивості двигунів постійного струму. Характеристики і способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму незалежного збудження»

Мета: Засвоєння та ознайомлення з методикою розрахункового визначення енергетичних показників двигунів постійного струму, способами пуску і регулювання частоти обертання. Засвоєння характеристик та властивостей генераторів постійного струму незалежного збудження при різних способах регулювання частоти обертання

План лекції:

- 5.1 Номінальні дані двигунів постійного струму.
- 5.2 Методика розрахункового визначення енергетичних показників двигунів постійного струму за паспортними даними.
- 5.3 Способи пуску і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.
- 5.4 Статичні характеристики двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження.
- 5.5 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження.

5.1 Номінальні дані двигунів постійного струму

Машини постійного струму використовуються як двигуни і як генератори. Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю дуже простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

Машини постійного струму серії П застосовуються як двигуни і генератори у різних галузях промисловості і сільського господарства. Випуск машин серії П припинений, але поки що в експлуатації знаходиться значна кількість машин. Електричні машини серії П охоплюють діапазон потужностей від 0,3 до 200 кВт (при 1500 об/хв) і мають 11 габаритів. Габарит визначається зовнішнім діаметром якоря.

Електричні машини серії 2П заміняють машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія 2П машин постійного струму охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким регулюванням швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, поліпшені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації,

підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи. Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- по регульовальних властивостях: двигуни з нормальним регулюванням - до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму з метою значного зниження (в 2 - 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного встаткування, створеного для серії 4А.

В уніфікованій конструкції типу 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки

Перевагами уніфікованої конструкції двигунів постійного струму в порівнянні з явнополюсними традиційної конструкції є:

- розподіл статорних обмоток двигунів у порівняно великій кількості пазів, що приносить позитивний ефект, що виражається в поліпшенні тепловіддачі, і дозволяє істотно збільшити щільності струмів;
- повна компенсація поля реакції якоря по всій його окружності;
- застосування повністю шихтованого магнітопроводу, що зменшує його магнітну несиметрію і практично усуває відставання в часі змін магнітного потоку додаткових полюсів від зміни струму в їхніх обмотках і, отже, підвищує комутаційну здатність двигунів у стаціонарних і динамічних режимах роботи;
- перехід до ступеня захисту IP44 в уніфікованих двигунах від звичайно застосовуваної у двигунах традиційної явнополюсної конструкції ступеня захисту IP23, що підвищує надійність цих двигунів в експлуатації.

5.2 Методика розрахункового визначення енергетичних показників двигунів постійного струму за паспортними даними

Номинальний струм ДПС, I_n

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{U_n \cdot \eta_n} \quad (1)$$

Номинальні струми якоря та збудження, $I_{на}, I_{нзб}$

$$I_{на} = I_n - I_{нзб} \quad (2)$$

$$I_{\text{нзб}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{зб}}(75^{\circ}\text{C})} \quad (3)$$

$$R_{\text{зб}}(75^{\circ}\text{C}) = R_{\text{зб}}(15^{\circ}\text{C}) \cdot \frac{235 + 75}{235 + 15} \quad (4)$$

Потужність, яка споживається з мережі при номінальному навантаженні,
 $P_{1\text{н}}$

$$P_{1\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \quad (5)$$

Номінальний момент ДПС, $M_{\text{н}}$

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{н}}} \quad (5)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} \quad (6)$$

ЕРС якоря, $E_{\text{а}}$

$$E_{\text{а}} = U_{\text{н}} - I_{\text{на}} \cdot R_{\text{а}}(75^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

$$R_{\text{а}}(75^{\circ}\text{C}) = R_{\text{а}}(15^{\circ}\text{C}) \cdot \frac{235 + 75}{235 + 15} \quad (8)$$

Електромагнітна потужність ДПС, $P_{\text{ем}}$

$$P_{\text{ем}} = E_{\text{а}} \cdot I_{\text{на}} \quad (9)$$

Електромагнітний момент, M

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (10)$$

Момент холостого ходу ДПС, M_0

$$M_0 = M - M_{\text{н}} \quad (11)$$

Сумарні втрати ДПС при номінальному навантаженні, $\Sigma p_{\text{н}}$

$$\Sigma p_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \quad (12)$$

Електричні втрати в колі якоря ДПС, $\Delta p_{\text{еа}}$

$$\Delta p_{\text{еа}} = I_{\text{на}}^2 \cdot R_{\text{а}}(75^{\circ}\text{C}) \quad (13)$$

Електричні втрати в обмотці збудження, $\Delta p_{\text{зб}}$

$$\Delta p_{\text{зб}} = I_{\text{нзб}}^2 \cdot R_{\text{зб}}(75^{\circ}\text{C}) \quad (14)$$

Втрати механічні, магнітні та додаткові, $\Delta p_{\text{мх}} + \Delta p_{\text{мг}} + \Delta p_{\text{д}}$

$$\Delta p_{\text{мх}} + \Delta p_{\text{мг}} + \Delta p_{\text{д}} = P_{\text{ем}} - P_{2\text{н}} \quad (15)$$

Момент холостого ходу M'_0 , що обумовлений сумарними втратами

$$M'_0 = \frac{\Delta p_{\text{мх}} + \Delta p_{\text{мг}} + \Delta p_{\text{д}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (16)$$

Порівняти значення моментів M_0 та M'_0 , які визначені за пунктами 11 та

$$\frac{M_0 - M_0'}{M_0} \cdot 100\%. \quad (17)$$

5.3 Способи пуску і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Приймаємо, U і $\sum R$ незмінними, то струм I_a залежить від проти-ЕРС E_a . Найбільшого значення струм I_a досягає при пуску двигуна в хід. У початковий момент пуску якір двигуна нерухомий ($n = 0$) і в його обмотці не індукується ЕРС ($E_a = 0$). Тому при безпосередньому підключенні двигуна до мережі в обмотці якоря виникає пусковий струм

$$I_{an} = U / \sum R. \quad (18)$$

Опір $\sum R$ невеликий, тому значення пускового струму сягає неприпустимо великих значень, в 10—50 разів перевищуючи номінальний струм двигуна. Такий великий пусковий струм досить небезпечний для двигуна. По-перше, він може викликати в машині коловий вогонь, а по-друге, при такому струмі у двигуні розвивається надмірно великий пусковий момент, що робить ударну дію на обертові частини двигуна і може механічно їх зруйнувати. І нарешті, цей струм викликає різке спадання напруги в мережі, що несприятливо відбивається на роботі інших споживачів, включених у цю мережу. Тому пуск двигуна безпосереднім підключенням у мережу (безреостатний пуск) зазвичай застосовують для двигунів потужністю не більше 0,7-1,0 кВт. У цих двигунах завдяки підвищеному опору обмотки якоря і невеликій масі обертових частин значення пускового струму лише в 3-5 разів перевищує номінальний, що не представляє небезпеки для двигуна. Що ж стосується двигунів середньої і великої потужності, то при їхньому пуску для обмеження пускового струму використовують пускові реостати, що включаються послідовно в коло якоря (реостатний пуск).

Способи регулювання частоти обертання двигунів оцінюються наступними показниками: плавністю регулювання; діапазоном регулювання, обумовленим відношенням найбільшої частоти обертання до найменшої; економічністю регулювання, обумовленою вартістю регулюючої апаратури і втратами електроенергії в ній.

Регулювати частоту обертання двигуна паралельного збудження можна зміною опору в колі якоря, зміною основного магнітного потоку, зміною напруги в колі якоря.

Введення додаткового опору в коло якоря. Додатковий опір (реостат R_{pa}) включають в коло якоря аналогічно пусковому реостату. Однак на відміну від останнього, додатковий опір повинний бути розрахований на тривале протікання струму.

При включенні опору R_{pa} в коло якоря вираз частоти (2.18) приймає вигляд

$$n = \frac{U - I_a (\sum R + R_{pa})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (19)$$

де $n_0 = U / (c_e \Phi)$ — частота обертання в режимі х.х.;

$\Delta n = I_a (\sum R + R_{pa}) / (c_e \Phi)$ - зміна частоти обертання, викликана спаданням напруги в колі якоря.

Зі збільшенням R_{pa} зростає Δn , що призводить до зменшення частоти обертання. Залежність $n = f(R_{pa})$ ілюструється також і механічними характеристиками двигуна паралельного збудження: з підвищенням R_{pa} збільшується нахил механічних характеристик, а частота обертання при заданому навантаженні на валу ($M = M_{ном}$) зменшується. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні (тільки убік зменшення частоти від номінальної), однак він неекономічний через значні втрати електроенергії в регулювальному реостаті ($I_a^2 R_{pa}$), які інтенсивно ростуть зі збільшенням потужності двигуна.

Зміна основного магнітного потоку. Цей спосіб регулювання у двигуні паралельного збудження реалізується за допомогою реостата $R_{pzб}$ в колі обмотки збудження. Так, при зменшенні опору реостата зростає магнітний потік обмотки збудження, що супроводжується зниженням частоти обертання. При збільшенні $R_{pzб}$ частота обертання зростає. Залежність частоти обертання від струму збудження виражається регулювальною характеристикою двигуна $n = f(I_{зб})$ при $I = const$ і $U = const$.

З виразу (18) n збільшується за гіперболічним законом. Але одночасне зменшення Φ веде до росту струму якоря $I_a = M / (c_m \Phi)$. При потоці $\Phi = \Phi'$ струм якоря досягає значення $I'_a = U / (2 \sum R)$, тобто спадання напруги в колі якоря досягає значення, рівного половині напруги, підведеної до якоря ($I'_a \sum R = U / 2$). У цих умовах частота обертання двигуна досягає максимуму n_{max} . При подальшому зменшенні потоку ($\Phi < \Phi'$) частота обертання двигуна починає зменшуватися, тому що через інтенсивне зростання струму I_a друга складова рівняння наростає швидше першого.

При невеликому навантажувальному моменті на валу двигуна максимальна частота обертання n_{max} в багато разів перебільшує номінальну частоту обертання двигуна $n_{ном}$ і є неприпустимою за умовами механічної міцності двигуна, тобто може привести до його «розносу». З огляду на це, при виборі реостата $R_{pzб}$ необхідно стежити за тим, щоб при повністю введеному його опорі частота обертання двигуна не перевищила припустимого значення.

Необхідно також стежити за надійністю електричних з'єднань у колі обмотки збудження двигуна, тому що при розриві цього кола магнітний потік зменшується до значення потоку залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$, при якому частота обертання може досягти небезпечного значення.

5.4 Статичні характеристики двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження

Схема включення в мережу двигуна паралельного збудження аналогічна схемі включення генератора паралельного збудження. Характерною рисою цього двигуна є те, що струм в обмотці збудження не залежить від струму

навантаження (струму якоря). Реостат у колі збудження $R_{pзб}$ служить для регулювання струму в обмотці збудження і магнітного потоку головних полюсів.

Експлуатаційні якості двигуна визначаються його робочими характеристиками, під якими розуміють залежність частоти обертання n , струму I , корисного моменту M_2 , обертового моменту M від потужності на валу двигуна P_2 при $U = const$ і $I_{зб} = const$ (рисунок 1).

Для аналізу залежності $n = f(P_2)$, що називають швидкісною характеристикою, звернемося до виразу (1), з якого видно, що при незмінній напрузі U на частоту обертання впливають два фактори: спадання напруги в колі якоря $I_a \Sigma R$ і потік збудження Φ . При збільшенні навантаження зменшується чисельник $(U - I_a \Sigma R)$, при цьому внаслідок реакції якоря зменшується і знаменник Φ . Звичайне ослаблення потоку, викликане реакцією якоря, незначне і перший фактор впливає на частоту обертання сильніше, ніж другий. У підсумку частота обертання двигуна з ростом навантаження P_2 зменшується, а графік $n = f(P_2)$ здобуває падаючий вид з невеликою опуклістю, зверненої до осі абсцис. Якщо ж реакція якоря у двигуні супроводжується більш значним ослабленням потоку Φ , то частота обертання зі збільшенням навантаження буде зростати, як це показано штриховою кривою на рисунку. Однак така залежність $n = f(P_2)$ є небажаною, тому що вона, як правило, не задовольняє умові сталої роботи двигуна: зі зростанням навантаження на двигун зростає частота обертання, що веде до додаткового росту навантаження і т.д., тобто частота обертання n двигуна необмежено збільшується і двигун іде «у рознос». Щоб забезпечити характеристиці частоти обертання форму падаючою кривою, у деяких двигунах паралельного збудження застосовують легку (з невеликим числом витків) послідовну обмотку збудження, яку називають стабілізуючою обмоткою. При включенні цієї обмотки згідно з паралельною обмоткою збудження її МРС компенсує дію реакції якоря таким чином, що потік Φ у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінним.

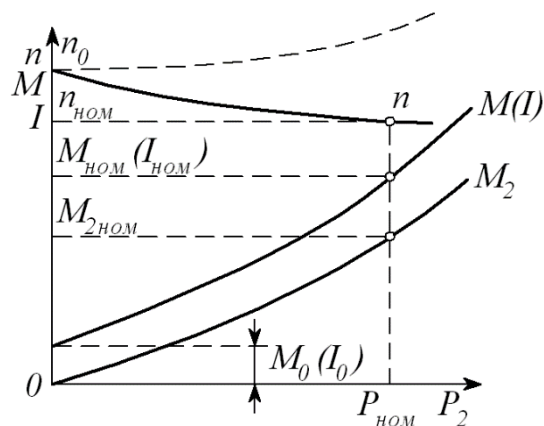


Рисунок 1 - Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Зміна частоти обертання двигуна при переході від номінального навантаження до х.х., виражена у відсотках, називають номінальною зміною частоти обертання:

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100, \quad (20)$$

де n_0 — частота обертання двигуна в режимі х.х.

Для двигунів паралельного збудження $\Delta n_{ном} = 2 \div 8\%$, тому характеристику частоти обертання двигуна паралельного збудження називають жорсткою.

Залежність корисного моменту M_2 від навантаження встановлена формулою $M_2 = 9,55P_2/n$. При $n = const$ графік $M_2 = f(P_2)$ мав би вид прямої. Однак зі збільшенням навантаження частота обертання двигуна знижується, і тому залежність $M_2 = f(P_2)$ криволінійна.

При $n = const$ обертаючий момент двигуна $M = M_0 + M_2$. Тому що робочі характеристики двигуна будують за умови $I_{зб} = const$, що забезпечує сталість магнітних втрат у двигуні, то момент х.х. $M_0 = const$. Тому графік залежності $M = f(P_2)$ проходить паралельно кривій $M_2 = f(P_2)$. Якщо прийняти потік $\Phi = const$, то графік $M_2 = f(P_2)$ є в той же час виразом залежності $I = f(P_2)$, тому що $M = c_M \Phi I_a$.

Для одержання аналітичного виразу механічної характеристики $n = f(M)$ проведемо перетворення виразу (1):

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum R}{c_e \Phi}; \quad (21)$$

підставивши в нього значення струму якоря

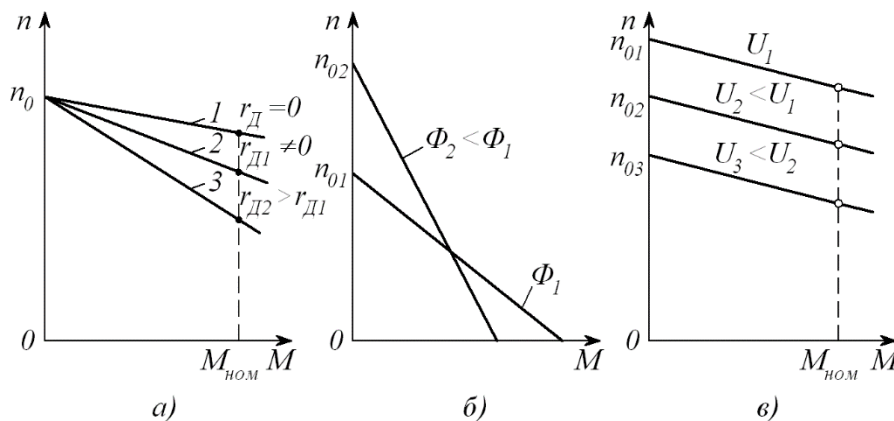
$$I_a = M / (c_M \Phi), \quad (22)$$

одержимо

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum R}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (4)$$

де n_0 — частота обертання в режимі х.х.;

Δn — зміна частоти обертання, викликана зміною навантаження на валу двигуна.



а) - при введенні в коло якоря додаткового опору; б) - при зміні основного магнітного потоку; в) - при зміні напруги в колі якоря

Рисунок 2 - Механічні характеристики двигуна паралельного збудження

Якщо не зважати на дію реакції якоря, то (тому що $I_{зб} = const$) можна прийняти $\Phi = const$. Тоді механічна характеристика двигуна паралельного збудження являє собою пряму лінію, нахилену до осі абсцис (рисунок 2). Кут нахилу механічної характеристики тим більше, чим більше значення опору, включеного в коло якоря. Механічну характеристику двигуна при відсутності додаткового опору в колі якоря називають природною (пряма 1). Механічні характеристики двигуна, отримані при введенні додаткового опору в коло якоря, називають штучними (прямі 2 і 3).

Вид механічної характеристики залежить також і від значення основного магнітного потоку Φ . Так, при зменшенні Φ збільшується частота обертання х.х. n_0 і одночасно збільшується Δn , тобто збільшуються обидві складові рівняння. Це приводить до різкого збільшення нахилу механічної характеристики, тобто до зменшення її жорсткості (рисунок 1).

При зміні напруги на якорі U міняється частота обертання n_0 , а Δn залишається незмінною. У підсумку жорсткість механічної характеристики (якщо знехтувати впливом реакції якоря) не міняється (рисунок 1), тобто характеристики зміщуються по висоті, залишаючись паралельними один одному.

5.5 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження

Способи регулювання частоти обертання двигунів оцінюються наступними показниками: плавністю регулювання; діапазоном регулювання, обумовленим відношенням найбільшої частоти обертання до найменшої; економічністю регулювання, обумовленою вартістю регулюючої апаратури і втратами електроенергії в ній.

З (20) виходить, що регулювати частоту обертання двигуна паралельного збудження можна зміною опору в колі якоря, зміною основного магнітного потоку, зміною напруги в колі якоря.

Введення додаткового опору в коло якоря. Додатковий опір (реостат R_{pa}) включають в коло якоря аналогічно пусковому реостату. Однак на відміну від останнього, додатковий опір повинний бути розрахований на тривале протікання струму.

При включенні опору R_{pa} в коло якоря вираз частоти (1) приймає вигляд

$$n = \frac{U - I_a(\sum R + R_{pa})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (23)$$

де $n_0 = U / (c_e \Phi)$ — частота обертання в режимі х.х.;

$\Delta n = I_a(\sum R + R_{pa}) / (c_e \Phi)$ - зміна частоти обертання, викликана спаданням напруги в колі якоря.

Зі збільшенням R_{pa} зростає Δn , що призводить до зменшення частоти обертання. Залежність $n = f(R_{pa})$ ілюструється також і механічними характеристиками двигуна паралельного збудження (рисунок 1): з підвищенням R_{pa} збільшується нахил механічних характеристик, а частота обертання при

заданому навантаженні на валу ($M = M_{ном}$) зменшується. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні (тільки убік зменшення частоти від номінальної), однак він неекономічний через значні втрати електроенергії в регулювальному реостаті ($I_a^2 R_{pa}$), які інтенсивно ростуть зі збільшенням потужності двигуна.

Зміна основного магнітного потоку. Цей спосіб регулювання у двигуні паралельного збудження реалізується за допомогою реостата $R_{pzб}$ в колі обмотки збудження. Так, при зменшенні опору реостата зростає магнітний потік обмотки збудження, що супроводжується зниженням частоти обертання. При збільшенні $R_{pzб}$ частота обертання зростає. Залежність частоти обертання від струму збудження виражається регулювальною характеристикою двигуна $n = f(I_{зб})$ при $I = const$ і $U = const$.

З виразу (21) n збільшується за гіперболічним законом (рисунок 2). Але одночасне зменшення Φ веде до росту струму якоря $I_a = M / (c_M \Phi)$. При потоці $\Phi = \Phi'$ струм якоря досягає значення $I'_a = U / (2 \Sigma R)$, тобто спадання напруги в колі якоря досягає значення, рівного половині напруги, підведеної до якоря ($I'_a \Sigma R = U / 2$). У цих умовах частота обертання двигуна досягає максимуму n_{max} . При подальшому зменшенні потоку ($\Phi < \Phi'$) частота обертання двигуна починає зменшуватися, тому що через інтенсивне зростання струму I_a друга складова рівняння (4) наростає швидше першого.

При невеликому навантажувальному моменті на валу двигуна максимальна частота обертання n_{max} в багато разів перебільшує номінальну частоту обертання двигуна $n_{ном}$ і є неприпустимою за умовами механічної міцності двигуна, тобто може привести до його «розносу». З огляду на це, при виборі реостата $R_{pzб}$ необхідно стежити за тим, щоб при повністю введеному його опорі частота обертання двигуна не перевищила припустимого значення.

Необхідно також стежити за надійністю електричних з'єднань у колі обмотки збудження двигуна, тому що при розриві цього кола магнітний потік зменшується до значення потоку залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$, при якому частота обертання може досягти небезпечного значення.

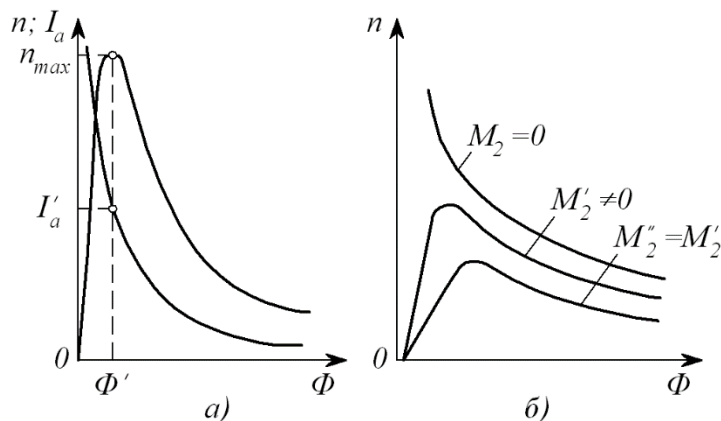


Рисунок 3 - Регулювальні характеристики двигуна паралельного збудження

Недолік розглянутого способу регулювання частоти обертання полягає в тому, що при зміні магнітного потоку Φ змінюється кут нахилу механічної характеристики двигуна.

Вид регулювальних характеристик $n = f(\Phi)$ залежить від значення навантажувального моменту M_2 на валу двигуна: з ростом M_2 максимальна частота обертання n_{\max} зменшується (рисунок 3, б).

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання простий і економічний, тому що у двигунах паралельного збудження струм $I_{зб} = (0,01 \div 0,07)I_a$, а тому втрати в регулювальному реостаті ($I_{зб}^2 R_{рзб}$) невеликі.

Однак діапазон регулювання становить $n_{\max} / n_{\min} = 2 \div 5$. Пояснюється це тим, що нижня межа частоти обертання обумовлена насиченням машини, що обмежує значення магнітного потоку Φ , а верхня межа частоти - небезпекою «розносу» двигуна і посиленням впливу реакції якоря, що спотворююча дія якої при ослабленні основного магнітного потоку Φ підсилюється і веде до іскріння на колекторі або до появи колового вогню.

Зміна напруги в колі якоря. Регулювання частоти обертання двигуна зміною живлячої напруги застосовується лише при $I_{зб} = const$, тобто при роздільному живленні кіл обмотки якоря і обмотки збудження при незалежному збудженні.

Частота обертання в режимі х.х. n_0 пропорційна напрузі, а Δn від напруги не залежить, тому механічні характеристики двигуна при зміні напруги не міняють кута нахилу до осі абсцис, а зміщаються по висоті, залишаючись паралельними одна одній. Для здійснення цього способу регулювання необхідно коло якоря двигуна підключити до джерела живлення з регульованою напругою. Для керування двигунами малої і середньої потужності як джерело можна застосувати регульований випрямляч, у якому напруга постійного струму міняється регулювальним автотрансформатором (АТ), включеним на вході випрямляча (рисунок 4).

Для керування двигунами великої потужності доцільно застосовувати генератор постійного струму незалежного збудження; привод здійснюється за допомогою приводного двигуна (ПД), у якості якого використовують трифазний двигун змінного струму. Для живлення постійним струмом кіл збудження генератора Г и двигуна Д використовується збуджувач В — генератор постійного струму, напруга на виході якого підтримується незмінною. Описана схема керування двигуном постійного струму (рисунок 4) відома за назвою системи «генератор — двигун» (Г-Д).

Зміна напруги в колі якоря дозволяє регулювати частоту обертання двигуна вниз від номінальної, тому що напруга понад номінальну неприпустима. При необхідності регулювати частоту обертання вгору від номінальної можна скористатися зміною струму збудження двигуна.

Зміна напрямку обертання (реверс) двигуна, що працює по системі Г-Д, здійснюється зміною напрямку струму в колі збудження генератора Г перемикачем П, тобто зміною полярності напруги на його затискачах. Якщо двигун постійного струму працює в умовах різкозмінного навантаження, то для зменшення коливань потужності, споживаної ПД із трифазної мережі, на вал

ПД поміщають маховик M , що запасає енергію в період зменшення навантаження на двигун D і віддає її в період інтенсивного навантаження двигуна.

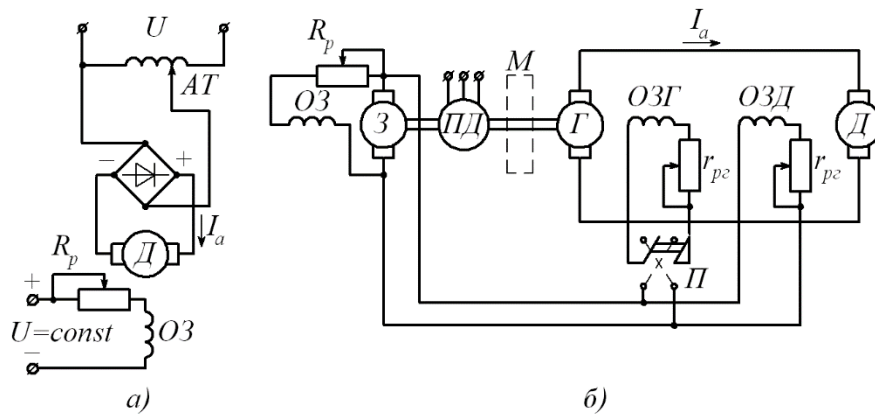


Рисунок 4 - Схеми включення двигунів постійного струму при регулюванні частоти обертання зміною напруги в колі якоря

Регулювання частоти обертання зміною напруги в колі якоря забезпечує плавне економічне регулювання в широкому діапазоні $n_{\max} / n_{\min} \geq 25$. Найбільша частота обертання обмежується умовами комутації, а найменша - умовами охолодження двигуна.

Ще однією перевагою розглянутого способу регулювання є те, що він допускає безреостатний пуск двигуна при зниженій напрузі.

Імпульсне регулювання частоти обертання. Сутність цього способу регулювання ілюструється схемою, зображеною на рисунку. Коло обмотки якоря двигуна паралельного (незалежного) збудження періодично переривається ключем K . Під час замикання кола якоря на час t до обмотки якоря підводить напруга $U = U_{\text{зм}}$ і струм у ній досягає значення $I_{a\max}$. Потім ключем K коло якоря розмикають і струм у ній убуває, досягаючи до моменту наступного замикання кола значення $I_{a\min}$ (при розмиканні ключа K струм в обмотці якоря замикається через діод VD). При наступному замиканні ключа K струм досягає значення $I_{a\max}$ і т.д. Таким чином, до обмотки якоря підводить деяка середня напруга

$$U_{cp} = Ut/T = \alpha U, \quad (24)$$

де T - відрізок часу між двома наступними один за одним імпульсами напруги (рисунок 5, б);

$\alpha = t/T$ — коефіцієнт керування.

При цьому в обмотці якоря проходить струм, середнє значення якого $I_{acp} = 0,5(I_{a\max} + I_{a\min})$.

При імпульсному регулюванні частота обертання двигуна

$$n = \frac{\alpha U - I_{acp} \sum R}{c_e \Phi}. \quad (25)$$

Таким чином, імпульсне регулювання частоти обертання аналогічно регулюванню зміною напруги, що підводиться до якоря. З метою зменшення

пульсацій струму в колі якоря включена котушка індуктивності (дросель) L , а частота подачі імпульсів дорівнює 200-400 Гц.

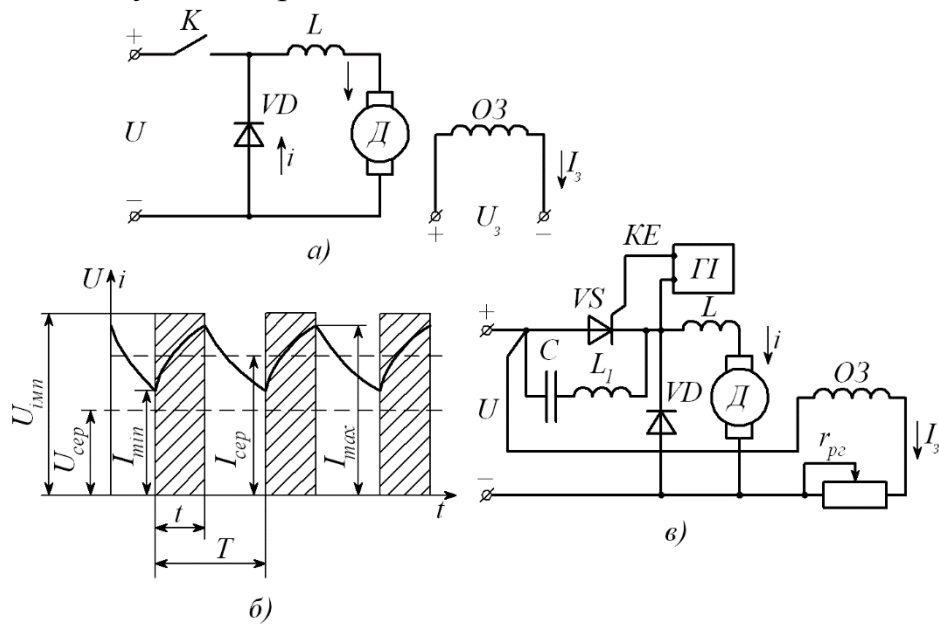


Рисунок 5 - Імпульсне регулювання частоти обертання ДПС

На рисунку 5, у представлена одна з можливих схем імпульсного регулювання, де як ключ застосований керований діод — тиристор VS . Відкривається тиристор подачею короткочасного імпульсу від генератора імпульсів ($ГІ$) на керуючий електрод ($КЕ$) тиристора. Коло L_1C , шунтувальний тиристор, служить для запирання останнього в період між двома керуючими імпульсами. Відбувається це в такий спосіб: при відкриванні тиристора конденсатор C перезаряджається через контур L_1C і створює на силових електродах тиристора напругу, зворотно напрузі мережі, що припиняє протікання струму через тиристор. Параметрами кола L_1C визначається час відкритого стану тиристора: $t = \pi\sqrt{L_1C}$.

Значення середньої напруги U_{cp} регулюється зміною частоти проходження керуючих імпульсів від генератора імпульсів на тиристор VS .

Жорсткі механічні характеристики і можливість плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні визначили області застосування двигунів паралельного збудження у верстатних приводах, вентиляторів, а також у багатьох інших випадках регульованого електропривода, де потрібна стійка робота при коливаннях навантаження.

Посилання на літературу:

[1], с. 200...217;

[3], с.270...287;

[9], с. 350...360.

Контрольні питання:

1. Які дані відносяться до номінальних даних двигунів постійного струму?
2. Наведіть методику розрахунків основних енергетичних показників двигунів постійного струму. Порівняйте значення втрат за видами та відносно сумарних втрат.
3. Наведіть способи пуску двигунів постійного струму.
4. Наведіть способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.
5. Проведіть аналіз рівня механічної і електромеханічної характеристики двигунів постійного струму.
6. Наведіть статичні характеристики двигунів незалежного збудження. Поясніть характер зміни величин.
7. Які способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму незалежного збудження застосовуються у виробництві?
8. Наведіть особливості кожного способу регулювання. Діапазони і характеристики способів регулювання частоти обертання.
9. Наведіть схему та особливості регулювання частоти обертання двигунів постійного струму незалежного збудження по системі Г-Д (генератор – двигун).
10. Наведіть схему та особливості імпульсного регулювання частоти обертання двигуна постійного струму.

Тема №3. Двигуни постійного струму

Лекція №6 «Характеристики і способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму послідовного та змішаного збудження»

Мета: Засвоєння характеристик та властивостей генераторів постійного струму послідовного збудження при різних способах регулювання частоти обертання

План лекції:

- 6.1 Статичні характеристики і властивості двигунів постійного струму послідовного збудження.
- 6.2 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму послідовного збудження.
- 6.3 Статичні характеристики і властивості двигунів постійного струму змішаного збудження.
- 6.4 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму змішаного збудження

6.1 Статичні характеристики і властивості двигунів постійного струму послідовного збудження

У цьому двигуні обмотка збудження включена послідовно в коло якоря, тому магнітний потік Φ у ньому залежить від струму навантаження $I = I_a = I_{зб}$. При невеликих навантаженнях магнітна система машини не насичена й залежність магнітного потоку від струму навантаження прямо пропорційна, тобто $\Phi = k_\phi I_a$. У цьому випадку знайдемо електромагнітний момент:

$$M = c_M k_\phi I_a I_a = c'_M I_a^2$$

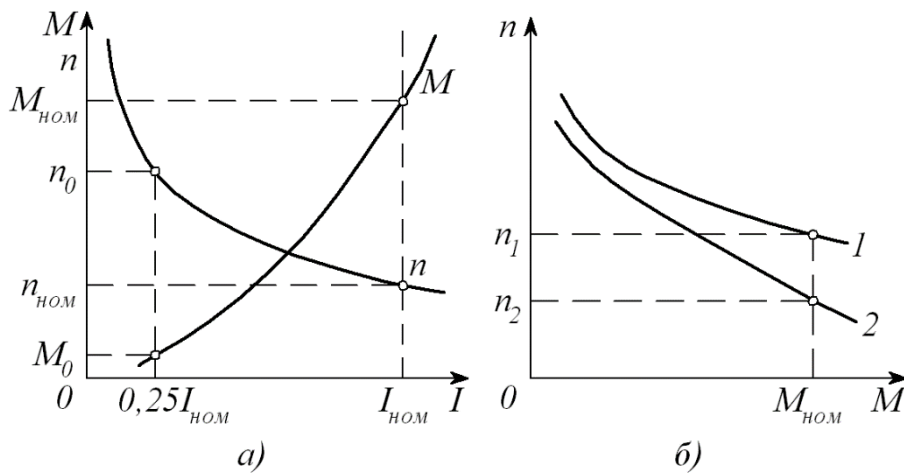
Формула частоти обертання прийме вид

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e k_\phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{c'_e I_a}, \quad (1)$$

де k_ϕ — коефіцієнт пропорційності.

На рисунку 1 представлені робочі характеристики $M = f(I)$ і $n = f(I)$ двигуна послідовного збудження. При більших навантаженнях настає насичення магнітної системи двигуна. У цьому випадку магнітний потік при зростанні навантаження практично не змінюється і характеристики двигуна здобувають майже прямолінійний характер. Характеристика частоти обертання двигуна послідовного збудження показує, що частота обертання двигуна значно міняється при змінах навантаження. Таку характеристику прийнято називати м'якою.

При зменшенні навантаження двигуна послідовного збудження частота обертання різко збільшується й при навантаженні менше 25% від номінальної може досягти небезпечних для двигуна значень («рознос»). Тому робота двигуна послідовного збудження або його пуск при навантаженні на валу менше 25% від номінального неприпустима.



а - робочі характеристики; б - механічні характеристики; 1 - природна характеристика; 2 - штучна характеристика.

Рисунок 1 - Двигун послідовного збудження

Для більш надійної роботи вал двигуна послідовного збудження повинен бути жорстко з'єднаний з робочим механізмом за допомогою муфти і зубчастої передачі. Застосування пасової передачі неприпустимо, тому що при обриві або скиданні ремня може відбутися «рознос» двигуна. З огляду на можливість роботи двигуна на підвищених частотах обертання, двигуни послідовного збудження, відповідно до Держстандарту, випробовують протягом 2 хв на перевищення частоти обертання на 20% понад максимальної, зазначеної на заводському щитку, але не менше ніж на 50% більше номінальної.

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження $n = f(M)$ представлені на рисунку 1, б. Різко падаючі криві механічних характеристик (природна 1 і штучна 2) забезпечують двигуну послідовного збудження сталу роботу при будь-якому механічному навантаженні. Властивість цих двигунів розвивати великий обертовий момент, пропорційний квадрату струму навантаження, має важливе значення, особливо в тяжких умовах пуску і при перевантаженнях, тому що з поступовим збільшенням навантаження двигуна потужність на його вході росте повільніше, ніж обертаючий момент. Ця особливість двигунів послідовного збудження є однією із причин їхнього широкого застосування в якості тягових двигунів на транспорті, у всіх випадках електропривода з тяжкими умовами пуску і поєднанні значних навантажень на валу двигуна з малою частотою обертання.

Номінальна зміна частоти обертання двигуна послідовного збудження

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_{[0,25]} - n_{ном}}{n_{ном}} 100\% , \quad (2)$$

де $n_{[0,25]}$ — частота обертання при навантаженні двигуна, що становить 25% від номінальної.

6.2 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму послідовного збудження

Частоту обертання двигунів послідовного збудження можна регулювати або зміною напруги U , або магнітного потоку обмотки збудження. У першому

випадку в коло якоря послідовно включають регулювальний реостат R_{pa} (рисунок 2, а). Зі збільшенням опору цього реостата зменшуються напруга на вході двигуна і частота його обертання. Цей метод регулювання застосовують головним чином у двигунах невеликої потужності. У випадку значної потужності двигуна цей спосіб неекономічний через великі втрати енергії в R_{pa} . Крім того, реостат R_{pa} , що розраховується на робочий струм двигуна, виходить громіздким і дорогим.

При спільній роботі декількох однотипних двигунів частоту обертання регулюють зміною схеми їхнього включення відносно один одного (рисунок 2, б). Так, при паралельному включенні двигунів кожний з них виявляється під повною напругою мережі, а при послідовному включенні двох двигунів на кожний двигун доводиться половина напруги мережі. При одночасній роботі більшої кількості двигунів можлива більша кількість варіантів включення. Цей спосіб регулювання частоти обертання застосовують в електровозах, де встановлено кілька однакових тягових двигунів.

Зміна напруги, що підводиться до двигуна, можлива при живленні двигуна від джерела постійного струму з регульованою напругою. При зменшенні напруги його механічні характеристики зміщуються вниз, практично не міняючи своєї кривизни (рисунок 3).

Регулювати частоту обертання двигуна зміною магнітного потоку можна трьома способами: шунтуванням обмотки збудження реостатом r_{pz} , секціонуванням обмотки збудження і шунтуванням обмотки якоря реостатом r_{iu} . Включення реостата r_{pz} , шунтуючого обмотку

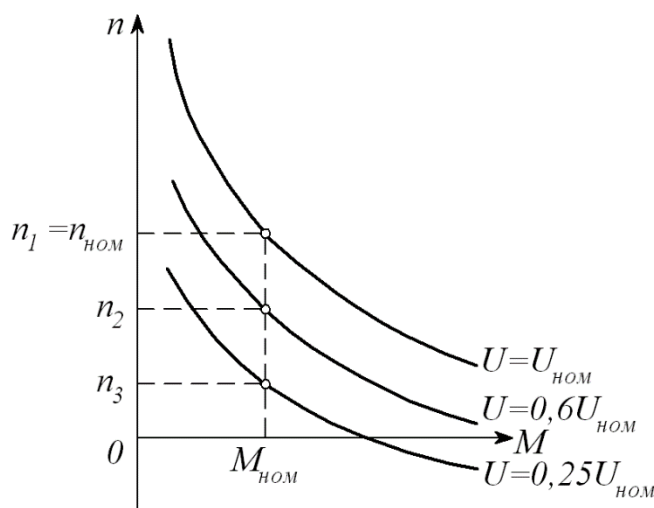


Рисунок 2 - Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при зміні напруги

збудження (рисунок 2), а також зменшення опору цього реостата веде до зниження струму збудження $I_{зб} = I_a - I_{pz}$, а отже, до зростання частоти обертання. Цей спосіб економічніший за попередній (рисунок 3, а), застосовується частіше і оцінюється коефіцієнтом регулювання $k_{pz} = (I_{pz} / I_a) \cdot 100\%$. Звичайний опір реостата r_{pz} приймається таким, щоб $k_{pz} \geq 50\%$.

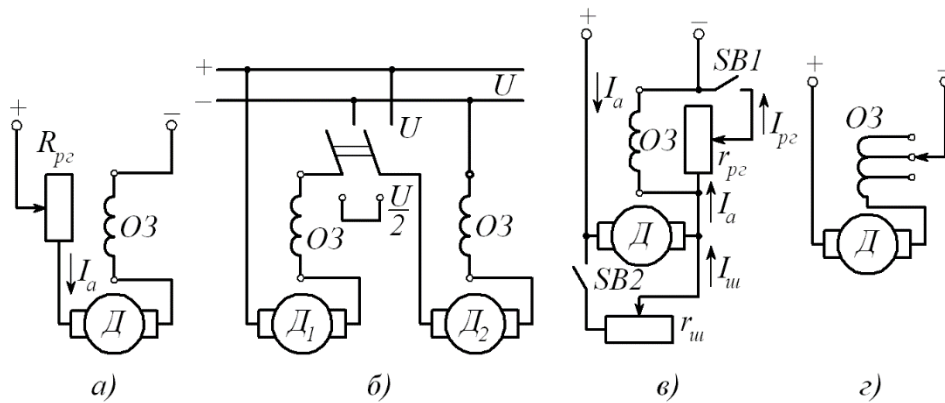


Рисунок 3 - Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження

При секціонуванні обмотки збудження відключення частини витків обмотки супроводжується зростанням частоти обертання. При шунтуванні обмотки якоря реостатом r_u (рисунок 3, в) збільшується струм збудження $I_{зб} = I_a + I_u$, що викликає зменшення частоти обертання. Цей спосіб регулювання, хоча й забезпечує глибоке регулювання, неекономічний і застосовується дуже рідко.

6.3 Статичні характеристики і властивості двигунів постійного струму змішаного збудження

Двигун змішаного збудження має дві обмотки збудження: паралельну і послідовну). Частота обертання цього двигуна

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \quad (3)$$

де Φ_1 і Φ_2 — потоки паралельної і послідовної обмоток збудження.

Знак плюс відповідає згідному включенню обмоток збудження (МРС обмоток складаються). У цьому випадку зі збільшенням навантаження загальний магнітний потік зростає (за рахунок потоку послідовної обмотки Φ_2), що веде до зменшення частоти обертання двигуна. При зустрічному включенні обмоток потік Φ_2 при збільшенні навантаження розмагнічує машину (знак мінус), що, навпаки, підвищує частоту обертання. Робота двигуна при цьому стає нестійкою, тому що зі збільшенням навантаження частота обертання необмежено росте. Однак при невеликому числі витків послідовної обмотки зі збільшенням навантаження частота обертання не зростає і у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінною.

На рисунку 4 показані робочі і механічні характеристики двигуна змішаного збудження при згідному включенні обмоток збудження. На відміну від механічних характеристик двигуна послідовного збудження останні мають більше пологий вид.

Слід зазначити, що за своєю формою характеристики двигуна змішаного збудження займають проміжне положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного і послідовного збудження залежно від того, в якій з обмоток збудження (паралельній або послідовній) переважає МРС.

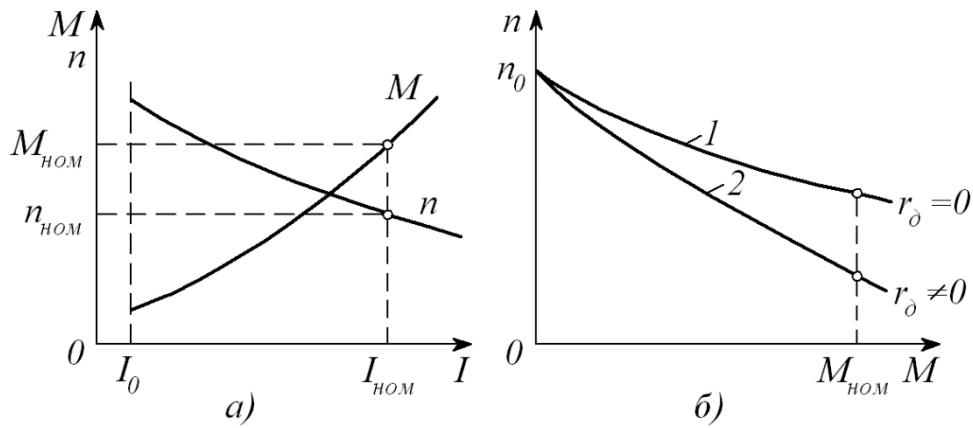


Рисунок 4 - Робочі (а) і механічні (б) характеристики двигуна змішаного збудження

Двигун змішаного збудження має переваги в порівнянні із двигуном послідовного збудження. Цей двигун може працювати на холостому ході, тому що потік паралельної обмотки Φ_1 обмежує частоту обертання двигуна в режимі х.х. і усуває небезпеку «розносу». Регулювати частоту обертання цього двигуна можна реостатом у колі паралельної обмотки збудження. Однак наявність двох обмоток збудження робить двигун змішаного збудження більше дорожчим у порівнянні із двигунами розглянутих вище типів, що обмежує його застосування. Двигуни змішаного збудження застосовують зазвичай там, де потрібні значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, ustalена робота і припустимо лише невелике зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на вал (прокатні стани, вантажні підйомники, насоси, компресори).

6.4 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму змішаного збудження

Способи регулювання частоти обертання двигунів оцінюються наступними показниками: плавністю регулювання; діапазоном регулювання, обумовленим відношенням найбільшої частоти обертання до найменшої; економічністю регулювання, обумовленою вартістю регулюючої апаратури і втратами електроенергії в ній.

З (1) виходить, що регулювати частоту обертання двигуна паралельного збудження можна зміною опору в колі якоря, зміною основного магнітного потоку, зміною напруги в колі якоря.

Введення додаткового опору в коло якоря. Додатковий опір (реостат R_{pa}) включають в коло якоря аналогічно пусковому реостату. Однак на відміну від останнього, додатковий опір повинний бути розрахований на тривале протікання струму.

При включенні опору R_{pa} в коло якоря вираз частоти (1) приймає вигляд

$$n = \frac{U - I_a(\sum R + R_{pa})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (4)$$

де $n_0 = U / (c_e \Phi)$ — частота обертання в режимі х.х.;

$\Delta n = I_a (\Sigma R + R_{pa}) / (c_e \Phi)$ - зміна частоти обертання, викликана спаданням напруги в колі якоря.

Зі збільшенням R_{pa} зростає Δn , що призводить до зменшення частоти обертання. Залежність $n = f(R_{pa})$ ілюструється також і механічними характеристиками двигуна паралельного збудження (рисунок 1): з підвищенням R_{pa} збільшується нахил механічних характеристик, а частота обертання при заданому навантаженні на валу ($M = M_{ном}$) зменшується. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні (тільки убік зменшення частоти від номінальної), однак він неекономічний через значні втрати електроенергії в регульовальному реостаті ($I_a^2 R_{pa}$), які інтенсивно ростуть зі збільшенням потужності двигуна.

Зміна основного магнітного потоку. Цей спосіб регулювання у двигуні паралельного збудження реалізується за допомогою реостата $R_{pзб}$ в колі обмотки збудження. Так, при зменшенні опору реостата зростає магнітний потік обмотки збудження, що супроводжується зниженням частоти обертання. При збільшенні $R_{pзб}$ частота обертання зростає. Залежність частоти обертання від струму збудження виражається регульовальною характеристикою двигуна $n = f(I_{зб})$ при $I = const$ і $U = const$.

З виразу (4) n збільшується за гіперболічним законом. Але одночасне зменшення Φ веде до росту струму якоря $I_a = M / (c_M \Phi)$. При потоці $\Phi = \Phi'$ струм якоря досягає значення $I'_a = U / (2 \Sigma R)$, тобто спадання напруги в колі якоря досягає значення, рівного половині напруги, підведеної до якоря ($I'_a \Sigma R = U / 2$). У цих умовах частота обертання двигуна досягає максимуму n_{max} . При подальшому зменшенні потоку ($\Phi < \Phi'$) частота обертання двигуна починає зменшуватися, тому що через інтенсивне зростання струму I_a друга складова рівняння (4) наростає швидше першого.

При невеликому навантажувальному моменті на валу двигуна максимальна частота обертання n_{max} в багато разів перебільшує номінальну частоту обертання двигуна $n_{ном}$ і є неприпустимою за умовами механічної міцності двигуна, тобто може привести до його «розносу». З огляду на це, при виборі реостата $R_{pзб}$ необхідно стежити за тим, щоб при повністю введеному його опорі частота обертання двигуна не перевищила припустимого значення.

Необхідно також стежити за надійністю електричних з'єднань у колі обмотки збудження двигуна, тому що при розриві цього кола магнітний потік зменшується до значення потоку залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$, при якому частота обертання може досягти небезпечного значення.

Вид регульовальних характеристик $n = f(\Phi)$ залежить від значення навантажувального моменту M_2 на валу двигуна: з ростом M_2 максимальна частота обертання n_{max} зменшується (рисунок 3, б).

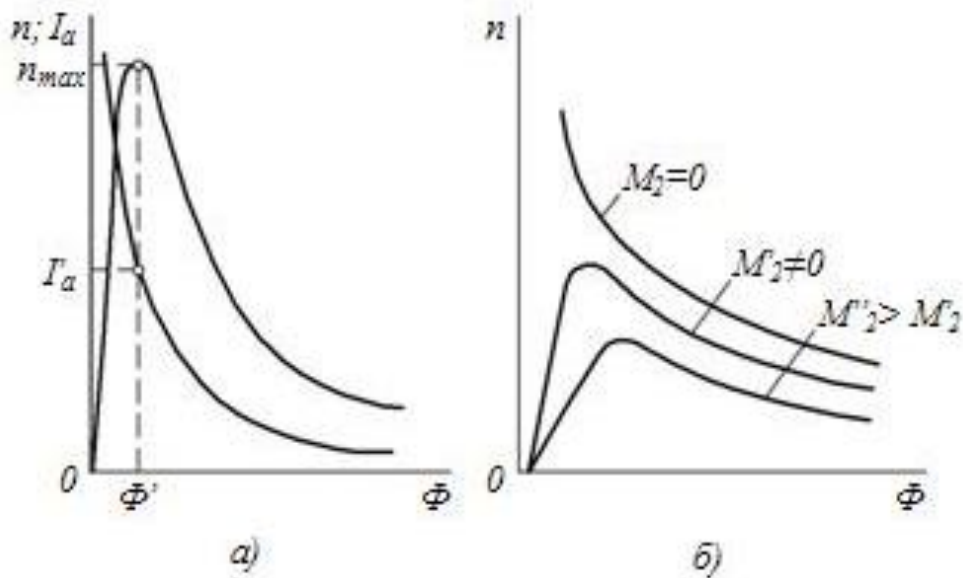


Рисунок 5 - Регульовальні характеристики двигуна паралельного збудження

Недолік розглянутого способу регулювання частоти обертання полягає в тому, що при зміні магнітного потоку Φ змінюється кут нахилу механічної характеристики двигуна.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання простий і економічний, тому що у двигунах паралельного збудження струм $I_{зб} = (0,01 \div 0,07)I_a$, а тому втрати в регульовальному реостаті ($I_{зб}^2 R_{рзб}$) невеликі.

Однак діапазон регулювання становить $n_{max} / n_{min} = 2 \div 5$. Пояснюється це тим, що нижня межа частоти обертання обумовлена насиченням машини, що обмежує значення магнітного потоку Φ , а верхня межа частоти - небезпекою «розносу» двигуна і посиленням впливу реакції якоря, що спотворююча дія якої при ослабленні основного магнітного потоку Φ підсилюється і веде до іскріння на колекторі або до появи колового вогню.

Зміна напруги в колі якоря. Регулювання частоти обертання двигуна зміною живлячої напруги застосовується лише при $I_{зб} = const$, тобто при роздільному живленні кіл обмотки якоря і обмотки збудження при незалежному збудженні.

Частота обертання в режимі х.х. n_0 пропорційна напрузі, а Δn від напруги не залежить, тому механічні характеристики двигуна при зміні напруги не міняють кута нахилу до осі абсцис, а зміщаються по висоті, залишаючись паралельними одна одній. Для здійснення цього способу регулювання необхідно коло якоря двигуна підключити до джерела живлення з регульованою напругою. Для керування двигунами малої і середньої потужності як джерело можна застосувати регульований випрямляч, у якому напруга постійного струму міняється регульованим автотрансформатором (АТ), включеним на вході випрямляча (рисунок б).

Для керування двигунами великої потужності доцільно застосовувати генератор постійного струму незалежного збудження; привод здійснюється за допомогою приводного двигуна (ПД), у якості якого використовують трифазний двигун змінного струму. Для живлення постійним струмом кіл

збудження генератора Г и двигуна Д використовується збуджувач В — генератор постійного струму, напруга на виході якого підтримується незмінною. Описана схема керування двигуном постійного струму (рисунок б) відома за назвою системи «генератор — двигун» (Г-Д).

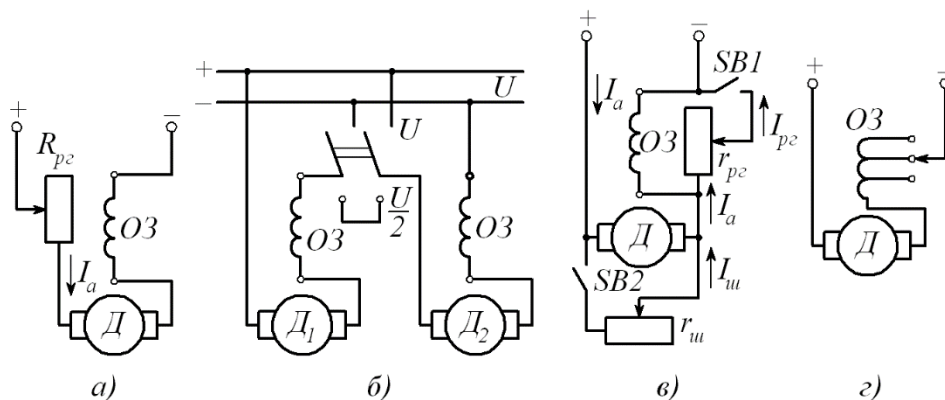


Рисунок б - Схеми включення двигунів постійного струму при регулюванні частоти обертання зміною напруги в колі якоря

Зміна напруги в колі якоря дозволяє регулювати частоту обертання двигуна вниз від номінальної, тому що напруга понад номінальною неприпустима. При необхідності регулювати частоту обертання вгору від номінальної можна скористатися зміною струму збудження двигуна.

Зміна напрямку обертання (реверс) двигуна, що працює по системі Г-Д, здійснюється зміною напрямку струму в колі збудження генератора Г перемикачем П, тобто зміною полярності напруги на його затискачах. Якщо двигун постійного струму працює в умовах різкозмінного навантаження, то для зменшення коливань потужності, споживаної ПД із трифазної мережі, на вал ПД поміщають маховик М, що запасає енергію в період зменшення навантаження на двигун Д і віддає її в період інтенсивного навантаження двигуна.

Регулювання частоти обертання зміною напруги в колі якоря забезпечує плавне економічне регулювання в широкому діапазоні $n_{\max} / n_{\min} \geq 25$. Найбільша частота обертання обмежується умовами комутації, а найменша - умовами охолодження двигуна.

Ще однією перевагою розглянутого способу регулювання є те, що він допускає безреостатний пуск двигуна при зниженій напрузі.

Посилання на літературу:

- [1], с. 200...217;
- [3], с. 270...287;
- [9], с. 350...360.

Контрольні питання:

1. Наведіть статичні характеристики двигунів послідовного збудження. Поясніть характер зміни величин.
2. Які способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму послідовного збудження застосовуються у виробництві?

3. Наведіть особливості кожного способу регулювання. Діапазони і характеристики способів регулювання частоти обертання.
4. Наведіть схему та особливості регулювання частоти обертання двигунів постійного струму послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження.
5. Наведіть схему та особливості регулювання частоти обертання двигуна постійного струму при зміні числа витків обмотки збудження.
6. Наведіть статичні характеристики двигунів змішаного збудження. Поясніть характер зміни величин.
7. Які способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму змішаного збудження застосовуються у виробництві?
8. Наведіть особливості кожного способу регулювання. Діапазони і характеристики способів регулювання частоти обертання.
9. Наведіть схему та особливості регулювання частоти обертання двигунів постійного струму змішаного збудження шунтуванням обмоток послідовного і паралельного збудження.
10. Наведіть схему та особливості регулювання частоти обертання двигуна постійного струму при зміні числа витків обмоток збудження.

Тема №4. Комутація машин постійного струму

Лекція №7 «Комутаційні процеси в машинах постійного струму»

Мета: Засвоєння поняття і оцінки комутації, принципів іскріння та процесів, що відбуваються в машині постійного струму при комутації.

План лекції:

- 7.1 Поняття і оцінка комутації машин постійного струму.
- 7.2 Принцип іскріння щіток машин постійного струму.
- 7.3 Процес і види комутації.
- 7.4 Методика експериментальної перевірки і налагодження комутації.
- 7.5 Комутаційна ЕРС якоря.

7.1 Поняття і оцінка комутації машин постійного струму

Процес зміни струму в секціях обмотки якоря при переході з однієї паралельної гілки в іншу називають комутацією. Під комутацією розуміють всі явища і процеси, які відбуваються в щіточному контакті при роботі електричних машин. Якість комутації визначає працездатність машини та її надійність в експлуатації. Важливо, щоб комутація відбувалася без значного іскріння поблизу контактних поверхонь щіток, оскільки сильне іскріння призводить до пошкодження поверхні колектора і щіток і унеможливорює нормальну довготривалу роботу машини.

Причини, що викликають іскріння на колекторі, розділяють на механічні, потенційні й комутаційні.

Механічні причини іскріння - слабкий тиск щіток на колектор, биття колектора, його еліптичність або негладка поверхня, забруднення поверхні колектора, виступи міканітової ізоляції над колекторними пластинами, нещільне закріплення або вібрація траверси, пальців або щіткотримачів, а також інші причини, що викликають порушення електричного контакту між щіткою і колектором. При цьому можливий короткочасний розрив контакту між щіткою і колекторними пластинами і виникнення електричної дуги. Окремо до механічних причин можна віднести велику швидкість колектора - приблизно 50 м/с і вище.

Потенційні причини іскріння з'являються при виникненні перенапруги між сусідніми колекторними пластинами внаслідок дії реакції якоря. У цьому випадку іскріння найбільш небезпечно, тому що воно зазвичай супроводжується появою на колекторі електричної дуги.

Комутаційні причини іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при переході секцій обмотки якоря з однієї паралельної гілки в іншу. При виході колекторної пластини з-під щітки відбувається короткочасний розрив контакту і виникає коротка електрична дуга, яка пошкоджує збігаючі частини щіток і колекторних пластин.

Іскріння, викликане комутаційними або потенційними причинами, призводить до пошкодження поверхонь щіток і колекторних пластин, сприяє виникненню вібрацій і пошкодженню ізоляції колекторних пластин, тобто призводить до виникнення механічних причин. Нестабільність щіточного

контакту, обумовлена механічними причинами, в свою чергу, суттєво впливає на електричні і магнітні процеси в машині. Тому, як правило, іскріння щіток на колекторі - результат комплексної дії всіх причин.

Якість комутації оцінюється ступенем іскріння - класом комутації - під збігаючою стороною щітки, з-під якої виходять пластини колектора при його обертанні.

Відповідно до стандартів, існують наступні класи комутації - ступені іскріння:

- ступінь «1» - іскріння відсутнє (темна комутація);

- ступінь « $1\frac{1}{4}$ » - слабе іскріння під невеликою частиною щітки, відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках;

- ступінь « $1\frac{1}{2}$ » - слабе іскріння під більшою частиною щітки, що приводить до появи слідів почорніння на колекторі, легко усувається протиранням поверхні колектора бензином, і слідів нагару на щітках;

- ступінь «2» - іскріння під всім краєм щітки. Допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженні. Приводить до появи слідів почорніння на колекторі, які не усуваються протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках;

- ступінь «3» - значне іскріння під всім краєм щітки з появою великих іскор, які вилітають, що приводить до значного почорніння колектора, не усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також до подгару і руйнування щіток. Допускається тільки для моментів прямого (безреостатного) включення або реверсування машин, якщо при цьому колектор і щітки залишаються в стані, придатному для подальшої роботи.

Якщо припустимий ступінь іскріння в паспорті електричної машини не зазначений, то при номінальному навантаженні вона не повинна перевищувати $1\frac{1}{2}$.

7.2 Принцип іскріння щіток машин постійного струму

При обертанні якоря секції його обмотки переходять з однієї паралельної гілки до іншої, внаслідок чого напрям струму в них змінюється (рисунок 1).

Більшу частину часу струм секції дорівнює струму паралельної гілки

$$i_a = \frac{I_a}{2a}.$$

Зміна напрямку струму відбувається за час T_k , на протязі якого з'єднані з секцією колекторні пластини контактують із щіткою. Цей час, на протязі якого секція замкнена накоротко щіткою, називається періодом комутації. Період комутації

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k}, \quad (2)$$

де $b_{щ}$ - ширина щітки;

v_k - швидкість колектора.

В сучасних машинах $T_k = 0,001 \dots 0,0001 \text{ с}$, внаслідок чого середня швидкість зміни струму в секції $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{сеп}} = \frac{2i_a}{T_k}$ дуже велика. В секції індукується велика ЕРС само- і взаємоіндукції, яка називається реактивною ЕРС

$$e_p = -L_{\text{рез}} \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

де $L_{\text{рез}}$ - результуюча індуктивність секції обмотки.

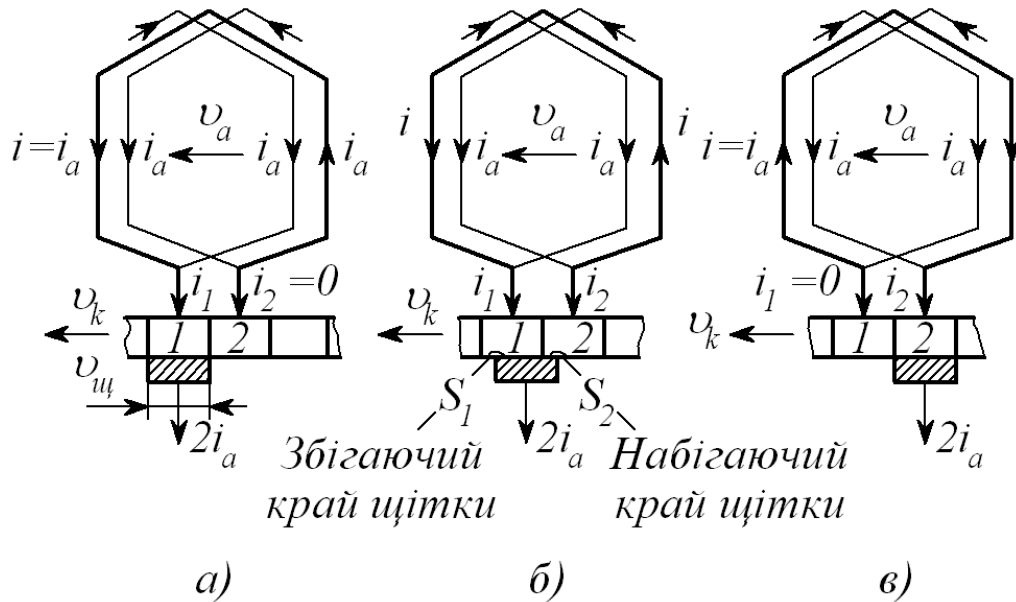


Рисунок 1- Схема розподілення струмів в комутуючій секції

Реактивна ЕРС перешкоджає зміні струму - «загальмовує» його. Крім реактивної ЕРС в секції також індукується ЕРС обертання, яка утворюється зовнішнім магнітним полем і називається комутуючою

$$e_k = 2B_k l_a v_a W_c, \quad (4)$$

де B_k - індукція в повітряному проміжку в зоні руху комутуючої секції;

W_c - кількість витків комутуючої секції.

Фізичний процес комутації при припущенні, що ширина щітки дорівнює ширині колекторної пластини, проходить в три основні етапи (рисунок 1). В перший момент часу (рисунок 1, а) струм i в комутуючій секції, приєднаної до пластин 1 і 2, дорівнює i_a і направлений від пластини 2 до пластини 1. Струм щітки $2i_a$ проходить через пластину 1, тобто $i_1 = 2i_a$ і $i_2 = 0$. В проміжному положенні (рисунок 1, б) одна частина струму щітки $2i_a$ проходить через пластину 1, а друга частина - через пластину 2, причому $i_1 + i_2 = 2i_a$. В кінці процесу комутації (рисунок 1, в) пластина 1 виходить з-під щітки, і струм, що проходить по ній, стає рівним нулю. При цьому струм щітки $2i_a$ проходить через пластину 2, тобто $i_2 = 2i_a$ і $i_1 = 0$, а струм i в секції змінює свій напрям порівняно зі струмом в початковий момент комутації. Для розглянутого контура комутуючої секції можна скласти рівняння

$$e_p + e_k = i_1 R_1 + i R_c - i_2 R_2, \quad (5)$$

де i_1 і i_2 - миттєві значення струмів колекторних пластин;
 i - струм в комутуючій секції;
 R_1 і R_2 - опори перехідних контурів між
щіткою і колекторними пластинами;
 R_c - опір секції.

Оскільки опір секції завжди значно менший опорів щітчного контакту, то він суттєво не впливає на процес комутації і його значенням можна знехтувати. Тоді, отримуємо основне рівняння комутації

$$e_p + e_k = i_1 R_1 - i_2 R_2. \quad (6)$$

Основне рівняння комутації - нелінійне диференційне рівняння із змінними коефіцієнтами, аналітичне рішення якого можна отримати при різних спрощуючих припущеннях.

7.3 Процес і види комутації

Прямолінійний вид комутації має місце в машині, якщо в процесі комутації в комутуючій секції ЕРС не наводиться або, що більш реально, сума ЕРС у комутуючій секції дорівнює нулю. У цьому випадку для комутуючої секції, замкнутою щіткою, у відповідності із другим законом Кирхгофа можна записати

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0. \quad (7)$$

Оскільки,

$$i_1 = i_a + i; \quad i_2 = i_a - i. \quad (8)$$

Одержимо

$$(i_a + i)R_1 - (i_a - i)R_2 = 0.$$

звідки струм у комутуючій секції

$$i = i_a (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1). \quad (9)$$

Закон зміни струму комутуючій секції у функції часу визначається рівнянням

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right). \quad (10)$$

Це рівняння є лінійним, а тому графік $i = f(t)$ являє собою пряму лінію, що перетинає вісь абсцис у крапці $t = 0,5T_k$ (рисунок 2). Комутація, при якій струм у комутуючій секції змінюється за прямолінійним законом, називають прямолінійною (ідеальною) комутацією.

Досить важливим фактором, що визначає якість комутації, є щільність струму в перехідному контакті «щітка-пластина»: j_1 - щільність струму під збігаючим краєм щітки; j_2 - щільність струму під набігаючим краєм щітки.

Щільність струму під щіткою прямо пропорційна тангенсу кута між віссю абсцис і графіком комутації, тобто $j_1 \equiv \operatorname{tg} \alpha_1$ і $j_2 \equiv \operatorname{tg} \alpha_2$. Графік прямолінійної (ідеальної) комутації має вигляд прямої лінії. При цьому $\alpha_1 = \alpha_2$, а отже, щільність струму в перехідному контакті «щітка — колектор» на протязі всього періоду комутації залишається незмінною ($j_1 = j_2 = \operatorname{const}$).

Фізично це пояснюється тим, що при прямолінійній комутації зменшення струму, що проходить через збігаючу пластину колектора, пропорційна зменшенню площі контакту щітки із цією пластиною, а наростання струму через набігаючу пластину пропорційно збільшенню площі контакту щітки із цією пластиною.

На рисунку 2, видно, що до моменту часу, коли щітка втрачає контакт із збігаючою пластиною, струм через цю пластину зменшується до нуля. Таким чином, при прямолінійній комутації пластину колектора виходить з-під щітки без розриву струму. Викладені властивості прямолінійної (ідеальної) комутації - сталість щільності струму під щіткою й вихід пластини з-під щітки без розриву струму - є основними, і завдяки їм цей вид комутації не супроводжується іскрінням на колекторі.

У випадку криволінійної комутації при відсутності додаткових полюсів, ЕРС обертання спрямована згідно з реактивною ЕРС. У цьому випадку в контурі комутуючої секції діє сума ЕРС

$$\sum e = e_p + e_k. \quad (11)$$

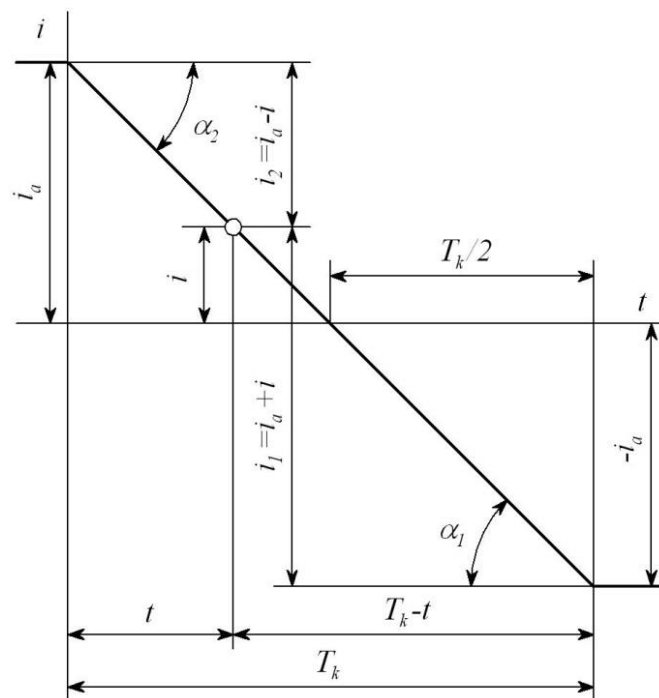


Рисунок 2 - Графік струму прямолінійної комутації

Значення струму в комутуючій секції при криволінійній уповільненій комутації з урахуванням основного закону комутації

$$i = [i_a(R_2 - R_1)/(R_2 + R_1)] + [\sum e/(R_2 + R_1)]. \quad (12)$$

Перша складова правої частини отриманого виразу являє собою струм прямолінійної комутації, друга складова правої частини виразу (12) визначає значення додаткового струму комутації, що виникає в контурі комутуючої секції під дією ЕРС

$$i_o = [\sum e/(R_2 + R_1)]$$

Таким чином, струм у комутуючій секції при криволінійній уповільненій комутації дорівнює сумі двох складових

$$i = i_{np} + i_o. \quad (13)$$

Характер зміни струму i_{np} визначається графіком, наведеним на рисунку 2. Для визначення характеру зміни додаткового струму комутації i_o за період комутації необхідно попередньо з'ясувати, як змінюються за період комутації величини, що визначають цей струм, а саме ЕРС $\sum e$ і сума опорів $(R_2 + R_1)$.

Якщо в машині немає додаткових полюсів і магнітна індукція в зоні комутації B_k невелика, то ЕРС $\sum e$ визначається головним чином реактивною ЕРС e_p . При прямолинійному законі зміни струму $\frac{di}{dt} = const$ і $\sum e = const$.

Закон зміни суми опорів $(R_2 + R_1)$ визначається виразом

$$R_2 + R_1 = \frac{R_{S_k}}{U_k i} \left(\frac{1}{T_k - t} + \frac{1}{t} \right) = R \left(\frac{T_k}{T_k - t} + \frac{T_k}{t} \right) \quad (14)$$

де R - опір перехідного контакту « щітка-пластина», коли пластина колектора повністю перекрита щіткою і площа її перехідного контакту дорівнює S_k

На початку ($t = 0$) і наприкінці ($t = T_k$) комутації $R_2 + R_1 = \infty$; при $t = 0,5T_k$ сума опорів $R_2 + R_1 = 4R$. На рисунку 3, а представлений графік $(R_2 + R_1) = f(t)$. Цьому закону зміни суми опорів і сталості ЕРС $\sum e$, відповідає крива 1 зміни додаткового струму комутації $i_o = f(t)$ представлена на рисунку 3, б

Графік зміни результуючого струму комутації, отриманий додаванням ординат графіків струму прямолинійної комутації (рисунок 2) і додаткового струму комутації (рисунок 3, крива 1), представлений на рисунку 4. Криволінійний вид цього графіка обумовлений криволінійністю графіка $i_o = f(t)$. Фізично це пояснюється реактивною дією сумарної ЕРС, що наводиться в комутуючій секції та перешкоджає змінам струму в цій секції від $+i_a$ на початку комутації до $-i_a$ в кінці. Із цієї причини в середині періоду комутації (крапка а) струм у комутуючій секції $i_a = i_o$ не дорівнює нулю, як це мало місце при прямолинійній комутації, а дорівнює додатковому струму комутації i_o , який у цей момент часу ($t = 0,5T_k$) має найбільше значення.

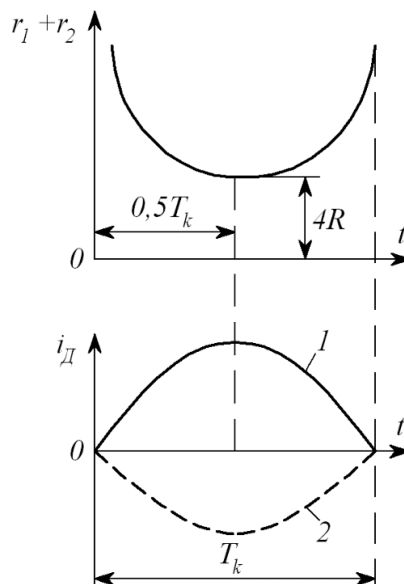


Рисунок 3 - Графіки змін опорів $(R_2 + R_1)$ і струму i_o

Зменшення струму i_a до нуля і зміна його напрямку наступають у другій половині періоду комутації в момент часу $t \geq 0,5T_k$, тобто в порівнянні із прямолінійною комутацією, процес зміни напрямку струму в комутуючій секції затягується в часі. У підсумку графік комутації набуває криволінійного вигляду. Із цієї причини таку комутацію називають криволінійною уповільненою. Характерна ознака цього виду комутації - неоднакова щільність струму під щіткою на початку і наприкінці періоду комутації.

Середнє значення щільності струму під набігаючим краєм щітки j_2 , що має контакт із пластиною 2, менше середнього значення щільності струму j_1 під збігаючим краєм, щітки, що має контакт із пластиною 1 (рисунок 6). З одного боку, це пояснюється тим, що $tg\alpha_2 \leq tg\alpha_1$, (рисунок 3), а з іншого боку, тим, що при $t = 0,5T_k$ струми, що відходять в обмотку якоря через пластини 1 і 2, не рівні: $i_2 \leq i_1$. При криволінійній уповільненій комутації площа S_1 зіткнення пластини 1 із щіткою зменшується швидше, ніж струм $i_1 = i_a + i_D$, а тому щільність струму під збігаючим краєм щітки підвищується. До кінця періоду комутації ця щільність струму досягає найбільшого значення $j \equiv tg\alpha'_1$, де α'_1 відповідає $t \approx T_k$ (рисунок 5).

При значних навантаженнях машини щільність струму під збігаючим краєм, щітки може досягти неприпустимо великих значень і викликати іскріння на колекторі. Однак, як показує досвід, можлива поява іскріння й при невеликих навантажувальних струмах у колі якоря. Це свідчить про те, що збільшення щільності струму під збігаючим краєм, щітки не єдина причина іскріння на колекторі. Іскріння виникає також при розмиканні замкнутого накоротко щіткою кола комутуючої секції при виході збігаючої пластини колектора з-під щітки. У момент розмикання комутуючої секції з додатковим струмом комутації накопичена в ній енергія магнітного поля витрачається на створення електричної дуги між збігаючим краєм щітки і збігаючою колекторною пластиною.

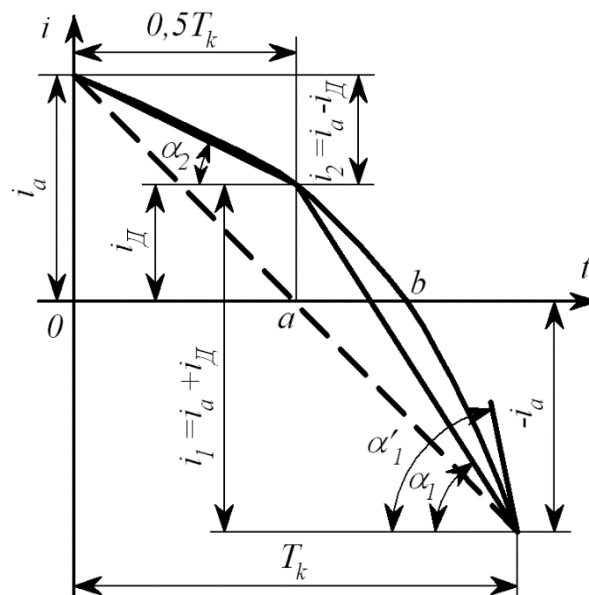


Рисунок 5 - Графік струму криволінійної уповільненої комутації

Викладені вище властивості криволінійної уповільненої комутації - підвищення щільності струму під збігаючим краєм щітки і вихід збігаючої пластини з-під щітки з розривом кола струму комутації - створюють умови до виникнення іскріння на колекторі під збігаючими краями щіток.

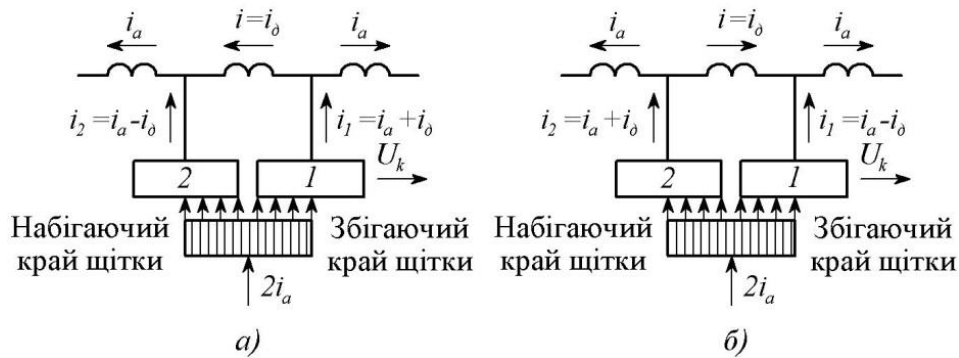


Рисунок 6- Розподіл щільності струму під щіткою при криволінійній уповільненій (а) і прискореній (б) видах комутації

Ще один вид криволінійної комутації спостерігається при встановленні додаткових полюсів, що призводить до збільшення ЕРС e_k , яка стає більше реактивної ЕРС e_p (рисунок 7).

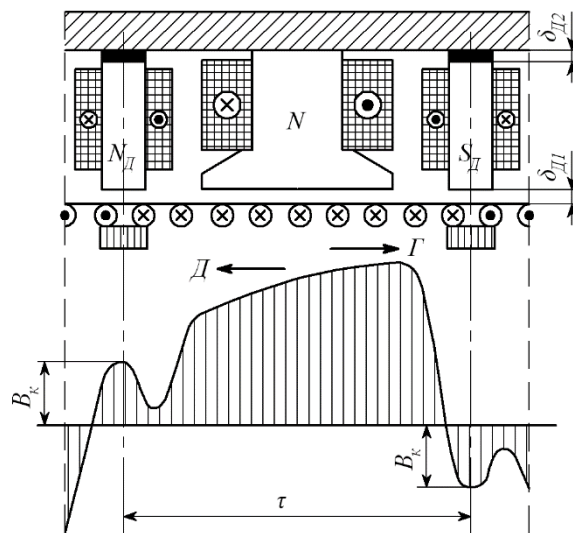


Рисунок 7 - Результуюче магнітне поле в повітряному проміжку машини з додатковими полюсами в генераторному режимі (Γ) і режимі двигуна (Δ)

У цьому випадку сумарна ЕРС $\sum e$ змінить свій знак, а додатковий струм комутації - свій напрямок на протилежне в порівнянні з тим, яке він мав при криволінійній уповільненій комутації (рисунок 5, крива 2).

Графік зміни результуючого струму комутації $i_2 = i_a + i_\delta$ у цьому випадку приймає вид, представлений на рисунку 8, тобто комутація стає криволінійною прискореною, тому що струм у комутуючій секції досягає нульового значення за час $t \leq 0,5T_k$. Для криволінійної прискореної комутації характерне

підвищення щільності струму під набігаючим краєм щітки (рисунок 7, б). Пояснюється це тим, що при цьому виді комутації площа зіткнення пластини 2 із щіткою наростає повільніше, ніж збільшується струм $i_2 = i_a + i_o$.

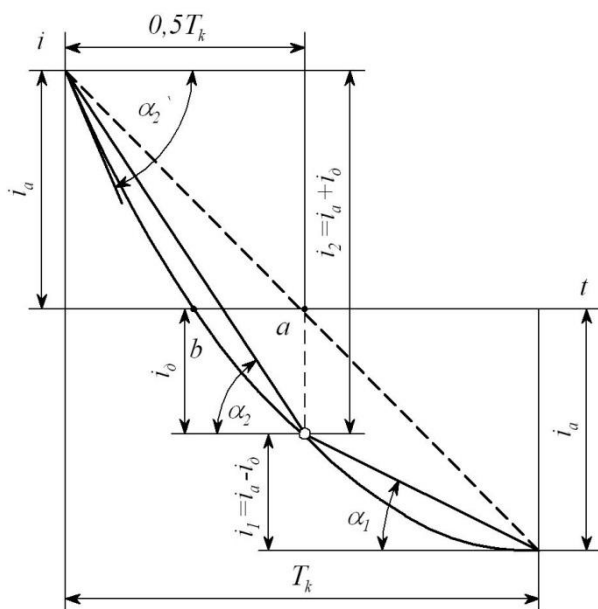


Рисунок 8 - Графік струму криволінійної прискореної комутації
 Найбільше значення щільності струму $j'_2 \equiv tg \alpha'_2$ відповідає початку періоду комутації ($t \approx 0$). При значних навантаженнях це може привести до іскріння під набігаючим краєм щітки. Це пояснюється тим, що при прискореній комутації вихід пластини, що збігає, з-під щітки відбувається з розривом кола додаткового струму комутації, що має напрямок, протилежний струму уповільненої комутації.

7.4 Методика експериментальної перевірки і налагодження комутації

З погляду забезпечення задовільної комутації доцільніше застосовувати щітки із збільшеним перехідним падінням напруги в перехідному контакті і відповідно у щітці, тобто використовувати щітки із збільшеним опором. Однак припустима щільність струму в щітковому контакті цих щіток невелика, а тому їхнє застосування в машинах зі значним робочим струмом веде до необхідності збільшення площі щіткового контакту, що вимагає збільшення площі колектора за рахунок його довжини. Це привело б до збільшення габаритів машини і додатковій витраті міді. Тому щітки із збільшеним опором застосовують переважно в машинах з відносно високою номінальною напругою, а отже, і з невеликим робочим струмом.

Щітки для електричних машин розділяють на чотири групи, що розрізняються складом, способом виготовлення і характеристиками: графітні, електрографітовані, вугільно-графітні, мідно-графітні. Вибирають щітки відповідно до рекомендацій, вироблених на підставі багаторічного досвіду проектування і експлуатації електричних машин. Найбільше застосування в машинах постійного струму напругою 110 - 440 В отримали електрографітовані щітки з падінням напруги 2,4...3,5 В на пару щіток.

Збільшенню перехідного опору щіткового контакту, а отже поліпшенню комутації, сприяє політура колектора - тонка оксидна плівка на поверхні колектора, що має підвищений електричний опір.

Суттєво впливає на сумарну ЕРС у комутуючій секції реактивна ЕРС e_p . Величина реактивної ЕРС в значній мірі залежить від ширини щітки: чим ширше щітка, тим більше число колекторних пластин перекриває вона одночасно, а отже, тим більше секцій одночасно комутується, що викликає підвищення реактивної ЕРС. Зменшення значення реактивної ЕРС за рахунок використання вузьких щіток також небажано через недостатню механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контактної поверхні при використанні вузьких щіток необхідно збільшувати їх довжину, а це призводить до необхідності збільшення довжини колектора. Найбільш доцільні щітки шириною в 2-3 колекторні пластини.

Помітно впливає на реактивну ЕРС застосування того чи іншого типу обмотки якоря. Так, якщо обмотку якоря виконати з кроком меншим, ніж полюсна поділлка (укорочена обмотка), то активні сторони одночасно комутуючих секцій виявляться в різних пазах, що буде сприяти зменшенню ЕРС. Реактивна ЕРС може бути ослаблена зменшенням індуктивності секцій L_{pez} . Для цього використовують одновиткові секції, закладені в неглибокі пази. Однак здійснення багатьох заходів привело б до створення громіздких і неекономічних машин. Тому при проектуванні машин постійного струму вибір зазначених параметрів пов'язують із прагненням одержати компактну й економічну машину. При цьому реактивна ЕРС може бути в значній мірі зменшена або навіть повністю усунута створенням у зоні комутації (по осі щіток) комутуючого поля певної полярності і величини. Створюється таке поле добавочними полюсами або зрушенням щіток з геометричної нейтралі.

Призначення добавочних полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб наводима цим полем комутуюча ЕРС e_k компенсувала реактивну ЕРС e_p . В машині постійного струму без застосування заходів по поліпшенню комутації, комутуюча і реактивна ЕРС спрямовані в одну сторону, тобто діють згідно.

Сумарна ЕРС у комутуючій секції $\sum e$ буде дорівнювати нулю, якщо за допомогою добавочних полюсів створити в зоні комутації магнітне поле з магнітною індукцією B_k такої величини і напрямку, щоб ЕРС взаємно компенсувалися, тоді комутація стане прямолінійною (ідеальною). Для забезпечення компенсації реактивної ЕРС при різних навантаженнях машини обмотку додаткових полюсів включають послідовно з обмоткою якоря. У цьому випадку МРС додаткових полюсів F_d при різних навантаженнях машини змінюється пропорційно струму якоря i_a , тобто пропорційно МРС якоря F_a .

Добавочні полюси розташовують між головними. При цьому щітки встановлюють на геометричній нейтралі. Всі машини постійного струму потужністю понад 1 кВт забезпечуються добавочними полюсами, число яких приймають рівним числу головних полюсів або ж удвічі меншим. Наявність добавочних полюсів дозволяє збільшити лінійне навантаження машини і при заданій потужності отримати машину менших масогабаритних показників.

Полярність добавочних полюсів залежить від напрямку обертання і режиму роботи машини. В генераторному режимі полярність добавочного полюса повинна бути такою самою як і у слідуючого за нею за напрямом обертання головного полюса, в режимі двигуна – як у попереднього за напрямом обертання головного полюса.

Число витків обмотки добавочних полюсів вибирають таким, щоб МРС добавочних полюсів компенсувала МРС якоря по поперечній вісі в зоні комутації і мала деякий надлишок, необхідний для створення комутуючого поля з індукцією B_k , спрямованого протилежно полю реакції якоря. Якщо машина обладнана компенсаційною обмоткою, то МРС добавочних полюсів зменшують на величину МРС компенсаційної обмотки. Зазвичай, в компенсованих машинах постійного струму МРС добавочних полюсів на 15-30 % більше МРС якоря.

Добавочні полюси забезпечують задовільну комутацію в машині тільки в межах номінального навантаження.

При перевантаженні машини відбувається насичення магнітного кола добавочних полюсів. У цьому випадку реактивна ЕРС змінюється пропорційно струмі навантаження, а зростання ЕРС зовнішнього поля через насичення магнітного кола зменшується. У результаті чого в комутуючій секції з'являється сумарна ЕРС $\sum e$, тобто комутація стає уповільненою. Насиченню осердя добавочних полюсів сприяє магнітний потік розсіювання, що замикається через осердя сусідніх головних полюсів і станину. З метою зменшення магнітного потоку розсіювання і забезпечення більш лінійної залежності потоку додаткових полюсів від струму навантаження, повітряний проміжок добав очного полюса δ_o розділяють на два: один — між осердям полюса і якорем δ_{o1} , а інший між осердям полюса і станиною δ_{o2} . У цьому випадку проміжок δ_{o2} обмежить значення потоку розсіювання. Даний проміжок створюється пакетом немагнітних прокладок, що закладаються між осердям полюса і станиною.

У машинах постійного струму потужністю до 1 кВт, що виготовляються без добавочних полюсів, комутуюче поле в зоні комутації створюється зсувом щіток з геометричної нейтралі. Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі, то поперечне магнітне поле якоря наводить в комутуючих секціях комутаційну ЕРС спрямовану узгоджено з реактивною і сприяє уповільненій комутації. При зрушенні щіток на фізичну нейтраль, комутуюче поле зникає і комутаційна ЕРС дорівнює нулю. При цьому в комутуючих секціях наводиться лише реактивна ЕРС. Якщо щітки зрушити за фізичну нейтраль, то комутуюче поле змінить свій напрямок щодо напрямку при положенні щіток на геометричній нейтралі. Це поле буде наводити в комутуючих секціях комутаційну ЕРС, що дорівнює реактивній ЕРС і протилежну їй за напрямком, тобто реактивна ЕРС буде скомпенсована і комутація стане прямолінійною (ідеальною). Для одержання необхідного ефекту, щітки необхідно зміщати в напрямку обертання якоря в генераторах або проти обертання якоря у двигунах.

Описаний спосіб поліпшення комутації має наступні недоліки:

- комутуюче поле змінюється не пропорційно навантаженню машини, що виключає повну компенсацію реактивної ЕРС у всьому діапазоні навантажень,

тому що для цього необхідно при кожній зміні навантаження міняти положення щіток (зазвичай щітки встановлюють у фіксоване положення, що відповідає повній компенсації реактивної ЕРС при номінальному навантаженні);

- при зсуві щіток з геометричної нейтралі підсилюється розмагнічувальна дія реакції якоря;

- для реверсивних машин зсув щіток з геометричної нейтралі неприпустимий, тому що необхідний напрямок зсуву фізичної нейтралі змінюється зі зміною напрямку обертання якоря.

При значних перевантаженнях або раптовому короткому замиканні машини постійного струму комутація стає різко уповільненою. У цьому випадку між збігаючою колекторною пластиною і збігаючим краєм щітки виникає електрична дуга (рисунок 9).

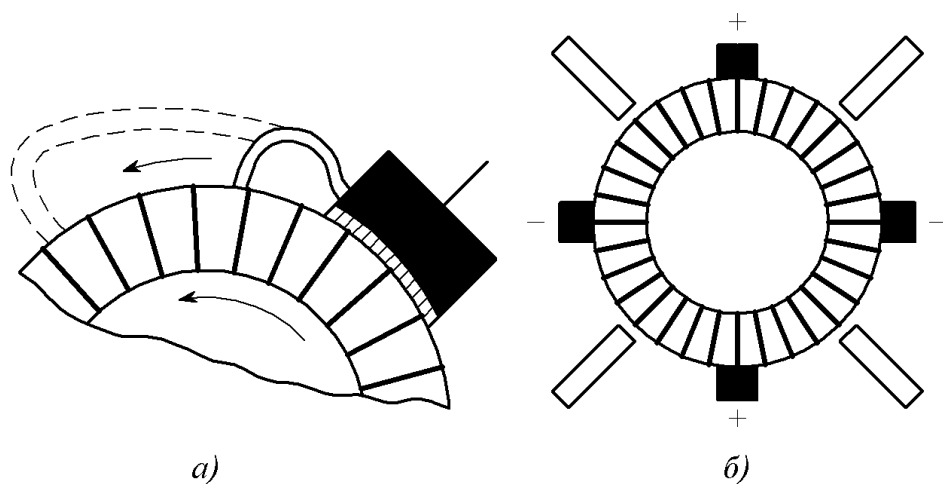


Рисунок 9 - Розтягання електричної дуги на обертовому колекторі (а) і розташування між щітками (б)

Оскільки колектор обертається, то дуга механічно розтягується. Поряд із цим, перевантаження машини супроводжується посиленням реакції якоря, під дією якої розподіл індукції в повітряному проміжку машини стає нерівномірним. В результаті, напруга між сусідніми колекторними пластинами збільшується, перевищуючи припустимі межі. Це, з одного боку, може привести до виникнення електричних дуг між суміжними пластинами, а з іншого боку, поява високого потенціалу на деяких пластинах викликає різке підвищення напруги між щіткою і колекторними пластинами в міру їхнього віддалення від збігаючого краю щітки. Все це створює умови для виникнення електричної дуги між щіткою і колекторними пластинами.

Таким чином, в умовах значного перевантаження в машині постійного струму з'являються комутаційні і потенційні причини для виникнення електричної дуги на колекторі. При цьому електричні дуги, викликані комутаційними причинами, зливаються з дугами, викликаними потенційними причинами, утворюючи навколо колектора потужну електричну дугу, що може перекинутися також і на корпус машини. Описане явище називається коловим вогнем по колектору. Коловий вогонь дуже небезпечний, тому що може привести до важкої аварії машини, включаючи виникнення в машині пожежі.

Добавочні полюси і компенсаційна обмотка зменшують небезпеку виникнення колового вогню, але повністю її не усувають. Тому для захисту

обмотки якоря від ушкодження електричною дугою у випадку виникнення колового вогню в електричних машинах, що працюють в умовах частих перевантажень, між колектором і обмоткою на якорі встановлюють ізолюючий екран. Для гасіння дуги застосовують повітряне дуття. Для створення перешкоди на шляху поширення дуги між щітками різної полярності встановлюють бар'єри з ізоляційного матеріалу.

7.5 Комутаційна ЕРС якоря

Основною причиною незадовільної комутації в машинах постійного струму є додатковий струм комутації

$$i_o = \frac{\sum e}{R} \quad (15)$$

Опір перехідного контакту «щітка – пластина» R включає в себе опір щітки і перехідного контакту.

З отриманого виразу (15) можна зробити висновок, що для зменшення струму i_o , а отже поліпшення комутації, необхідно збільшувати опір R , або зменшувати сумарну ЕРС $\sum e$ у комутуючій секції.

В сучасних машинах $T_k = 0,001 \dots 0,0001 \text{ с}$, внаслідок чого середня швидкість зміни струму в секції $\left(\frac{di}{dt}\right)_{cep} = \frac{2i_a}{T_k}$ дуже велика. В секції індукуються велика ЕРС само- і взаємоіндукції, яка називається реактивною ЕРС

$$e_p = -L_{pez} \frac{di}{dt}, \quad (16)$$

де L_{pez} - результуюча індуктивність секції обмотки.

Реактивна ЕРС перешкоджає зміні струму - «загальмовує» його. Крім реактивної ЕРС в секції також індукуються ЕРС обертання, яка утворюється зовнішнім магнітним полем і називається комутуючою

$$e_k = 2B_k l_a v W_c, \quad (17)$$

де B_k - індукція в повітряному проміжку в зоні руху комутуючої секції;

W_c - кількість витків комутуючої секції.

Посилання на літературу:

- [1], с. 110...138;
- [2], с.219...222,
- [9], с. 354...357.

Контрольні питання:

1. Що розуміють під комутацією?
2. Як розрізняється ступінь іскріння щіток? Які ступені іскріння є припустимими?
3. Наведіть причини виникнення іскріння щіток.
4. Назвіть види комутації та їх основні особливості.

5. Як розрізняється характер зміни комутаційного струму в залежності від виду комутації
6. Які способи поліпшення комутації використовуються в машинах постійного струму? Переваги і недоліки способів поліпшення комутації.
7. Причини та умови появи реактивної ЕРС як основного чинника комутаційних процесів, що відбуваються в машинах постійного струму.
8. Як експериментально визначається клас комутації?
9. Як практично відбувається налагодження комутації?

Тема №5. Основні теоретичні відомості і загальні питання будови і устрою силових трансформаторів

Лекція №8 «Будова та принцип дії силових трансформаторів»

Мета: Засвоєння принципу дії та призначення силових трансформаторів, вивчення будови магнітопроводів і обмоток однофазних та трифазних трансформаторів, призначення елементів системи охолодження і приладів контролю та очистки трансформаторного масла, приладів захисту та регулювання напруги, детальне вивчення конструктивної схеми трифазного силового трансформатора та структури умовного позначення марок електротехнічної сталі і типів трансформаторів.

Основні питання:

- 8.1 Призначення і види трансформаторів.
- 8.2 Будова силових трансформаторів.
- 8.3 Паспортні дані трансформатора.
- 8.4 Принцип дії трансформатора.
- 8.5 Схеми та групи з'єднання обмоток силових трансформаторів.

8.1 Призначення і види трансформаторів

Трансформатором називається статичний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язаних обмотки, призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінної напруги і струму в одну або декілька інших систем змінної напруги і струмів, що мають інші значення за незмінної частоти, з метою передачі потужності.

У загальному випадку вторинна система змінного струму може відрізнятися від первинної будь-якими параметрами: значеннями напруги і струму, числом фаз, формою кривої напруги (струму), частотою. Найбільше застосування в електротехнічних установках, а також в енергетичних системах передачі і розподілу електроенергії мають **силові трансформатори**, за допомогою яких змінюють значення змінної напруги і струму. При цьому число фаз, форма кривої напруги (струму) і частота залишаються незмінними.

Залежно від призначення трансформатори розділяють на **силові трансформатори загального призначення** і **трансформатори спеціального призначення**. Силові трансформатори загального призначення застосовуються в лініях передачі і розподілу електроенергії, а також у різних електроустановках для одержання необхідної напруги.

Трансформатори спеціального призначення характеризуються різноманітністю робочих властивостей і конструктивного виконання. До цих трансформаторів відносяться пічні і зварювальні трансформатори, трансформатори для пристроїв автоматики (пік-трансформатори, імпульсні, множники частоти і т.п.), випробувальні і вимірювальні трансформатори.

Силові трансформатори призначені для роботи в електричних мережах, що здійснюють безпосереднє постачання споживачів електричною енергією.

Потужності маслonaповнених трансформаторів розташовані у діапазоні до 2500 кВА; напруга сторони ВН - до 33 (35) кВ.

Силові трансформатори можуть установлюватися на розподільних підстанціях, у спеціальних приміщеннях, що безпосередньо примикають до виробничих цехів промислових підприємств, у відкритих установках. За їх допомогою здійснюється електропостачання:

- промислових підприємств і установок,
- житлових будинків і приміщень,
- сільськогосподарських підприємств, і т.п.

Напруга електричних мереж цехів підприємств і житлових приміщень (сторона НН) може бути 380В, 220В, 127В. У приміщеннях з підвищеною небезпекою, наприклад, у вибухонебезпечних, сирих і т.д., повинна застосовуватися напруга 36 В, 24 В, 12 В.

Позначення системи охолодження маслонаповнених і сухих ТР звичайно входить в умовну позначку їх типу.

Розподільчі трансформатори призначені для роботи в електричних мережах, що безпосередньо постачають споживачів електричною енергією.

Потужності маслонаповнених розподільчих трансформаторів (РТ) знаходяться у діапазоні до 2500 кВА; напруга сторони ВН — до 33 (35) кВ.

Загальні технічні вимоги до масла наповнених трансформаторів [1] розповсюджуються і на розподільчі трансформатори.

Системи охолодження сухих розподільних трансформаторів:

- М - природне масляне охолодження;
- МГ - природне масляне охолодження в герметичному виконанні (гофрований бак);
- Н - природне охолодження негорючим рідким діелектриком.
- С - природне повітряне охолодження при відкритому виконанні;
- СЗ - природне повітряне при закритому виконанні;
- СГ - природне повітряне при герметичному виконанні;
- СД - повітряне із примусовою циркуляцією повітря;
- СГЛ - природне повітряне з обмотками, залитими в епоксидні смоли, відкритого виконання;
- СГЛЗ- те ж, захищеного виконання.

По виду захисту масла від впливів навколишнього середовища масляні трансформатори можуть виконуватися:

- «з диханням» через пристрої, заповнені силікагелем (ТМ);
- герметичні з гофрованим баком (ТМГ).

Трансформатори серій ТМ і ТМГ призначені для роботи на відкритих площадках, під навісом, у закритих провітрюваних приміщеннях і в умовах підвищеної вологості. Звичайне виконання: трифазний трансформатор з магнітною системою стрижневого типу. Активна частина, що складається з магнітопроводу з обмотками, жорстко з'єднана із кришкою бака. Ізоляція обмоток - папір, електрокартон, масло.

На активній частині кріпиться перемикач відгалужень обмотки ВН із діапазоном регулювання $\pm 2 \times 2,5\%$. Привід перемикача виведений на кришку бака. На кришці розташовуються вводи і розширювальний бак.

Маслонаповнені герметичні трансформатори (серії ТМГ). Герметичні трансформатори серії ТМГ мають гофровані баки, що повністю обмежують контакт трансформаторного масла з навколишнім середовищем.

Трансформатори повністю заливаються маслом; розширювальний бак у герметичних трансформаторів відсутній, оскільки температурні зміни обсягу масла компенсуються пружною деформацією гофрованих стінок бака. Перед заливанням трансформаторне масло дегазується. Протягом усього терміну служби трансформатора масло практично не міняє своїх властивостей; робити відбір проби масла для наступного аналізу не потрібно. Для підтвердження ресурсу роботи протягом 25 років гофровані баки трансформаторів ТМГ піддаються механічним випробуванням на ізносостійкість (10 000 циклів впливу максимального й мінімального тисків).

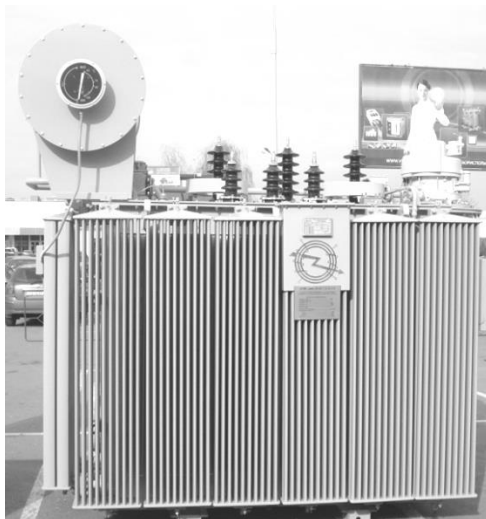


Рисунок 1 - Трансформатор потужністю 630 кВА і напругою 10 кВ (тип ТМ-630/10)

Заливання масла в бак трансформатора під глибоким вакуумом забезпечують підвищену електричну міцність ізоляції обмоток. Повнота заповнення маслом бака контролюється поплавковим показчиком на кришці бака. Регулювання напруги сторони ВН трансформатора рівнями $\pm 2 \times 2,5\%$ здійснюється перемикаючим пристроєм, розташованим усередині бака.

Через відсутність безпосереднього контакту масла з киснем повітря, старіння ізоляції в герметичних трансформаторах істотно вповільнено.

На рисунку 1 представлений загальний вид розподільних масляних трансформаторів типу ТМ, а на рисунку 2 - трансформаторів герметичних типу ТМГ.

Магнітопровід маслonaповнених трансформаторів має стрижневу конструкцію. Для зниження втрат холостого ходу використовується косий стик пластин у місці з'єднання стрижнів і ярем. Застосування ступінчастого розташування стиків пластин (так зване з'єднання «степ-леп») у стрижнях і ярмах може додатково знизити втрати холостого ходу.

Обмотки ВН і НН на стрижні магнітопроводу можуть бути розташовані концентрично або чергуються в осьовому напрямку. Обмотки виконуються з мідного або алюмінієвого ізольованого проводу. Виводи виконують проводом або мідними шинами.



Рисунок 2 - Масляний герметичний трансформатор потужністю 630 кВА напругою 10 кВ (тип ТМГ-630/10)

Основними ізоляційними матеріалами є кабельний папір, електрокартон, паперово-бакелітові циліндри й трубки, гетинакс.

Перемикаючий пристрій встановлюють всередині трансформатора з виводом приводу на кришку або бічну стінку бака. Якості збірки перемикаючого пристрою, підключення до нього регулювальних відгалужень, стану контактів надається особлива увага, оскільки від цього залежить надійність роботи трансформатора; ослаблення контакту веде до його перегріву і часто до виходу трансформатора з ладу.

Для поліпшення охолодження трансформаторів типу ТМ на стінках баків встановлюються радіатори; на кришці бака розміщений розширювальний бак з масловказівником, гільза термометра для виміру температури верхніх шарів масла, знімні вводи обмоток ВН і НН, рукоятка перемикача, повітряосушувач. У нижній частині бака з боку НН розміщена: пробка для взяття проби масла, пробка або кран для зливу масла, болт для заземлення. У дні бака в трансформаторів, починаючи з потужності 100 кВА, є пробка для видалення залишків масла.

До дна бака приварені пластини (швелери), у яких передбачені отвори або вирізи для кріплення трансформаторів до фундаменту. У трансформаторах потужністю 100 кВА та вище на швелерах передбачена установка гладких котків для поздовжнього і поперечного переміщення на місці монтажу.

У трансформаторах серії ТМГ використовуються герметичні зварені баки з гофролистів прямокутної форми, конструкція яких забезпечує компенсацію температурних змін об'єму масла і його охолодження.

У багатьох випадках споживач висуває жорсткі вимоги до пожежонебезпеки трансформаторів.

В 50-60-ті роки широке застосування мали трансформатори, заповнені малогорючою рідиною совтолом (закордонний аналог - аскарел.) Ці рідини у своїй основі мали трихлордифеніли – з'єднання токсичні і практично не

розкладаються в природі. Утилізація совтола пов'язана з технологічними труднощами і обходиться відносно дорого. В 70-х роках застосування цих рідин було припинено.

У наш час замість совтола і аскарела застосовуються рідини на основі кремній-органічних або поліефірних з'єднань.

Сухі трансформатори виготовляються у відкритому виконанні або захищені металевим кожухом, або відкритого виконання з обмотками, залитими епоксидними компаундами. Існує велика розмаїтість конструкцій сухих трансформаторів з різними типами ізоляції.

Перевагою сухих трансформаторів, у порівнянні з масляними, є простота їх конструкції і істотно менша пожежонебезпека. Недоліком сухих трансформаторів з деякими видами ізоляції є можливість їх зволоження. Тому сухі трансформатори встановлюються, як правило, у приміщеннях. Недоліком сухих трансформаторів є також можливість забруднення в процесі експлуатації як обмоток, так і трансформатора в цілому, а особливо в запиленних приміщеннях. У зв'язку з малою тепловою постійною часу, переважувальна здатність сухих трансформаторів істотно менше, ніж масляних.

Найпоширенішими є сухі трансформатори з наступними типами ізоляції: *Сухі трансформатори із застосуванням різних ізоляційних матеріалів класу нагрівостійкості не нижче «F» (155 °C).* В трансформаторах з таким типом ізоляції можуть використовуватися різні склотканини, плівкові і композиційні матеріали типів ЛСК-ТТ, РЭТСАР, ЛЭТСАР, склопластики типів СТЭФ, СТЭФ-НТ, СТ-ЭТФ.

Найпоширеніші сухі трансформатори з ізоляцією класу нагрівостійкості 155°C (рисунок 3). Для захисту від зволоження обмотки таких трансформаторів можуть просочуватися спеціальними лаками. З метою безпеки активна частина трансформатора звичайно укладена в тонкостінний металевий кожух, що має отвори для входу і виходу охолодного повітря.



Рисунок 3 - Активна частина (без захисного кожуха) трансформатора з ізоляцією класу 155 °C с алюмінієвими обмотками потужністю 160 кВА, напругою 15 кВ (тип ТСА-160/15)

Через меншу інтенсивність охолодження повітрям, порівнянню з маслом, сухі трансформатори мають більші розміри, ніж масляні трансформатори тієї ж потужності і напруги.

В особливих випадках підвищеної вологості і обмеження розмірів може застосовуватися більш нагрівостійка та вологостійка ізоляція з додатковим покриттям (просоченням) обмоток спеціальними лаками, наприклад, кремнійорганічними (рисунок 3). Сухі трансформатори з обмотками ВН, залитими епоксидними смолами (рисунок 4). Обмотки ВН таких трансформаторів виконуються з алюмінієвої фольги і заливаються компаундом у вакуумі.

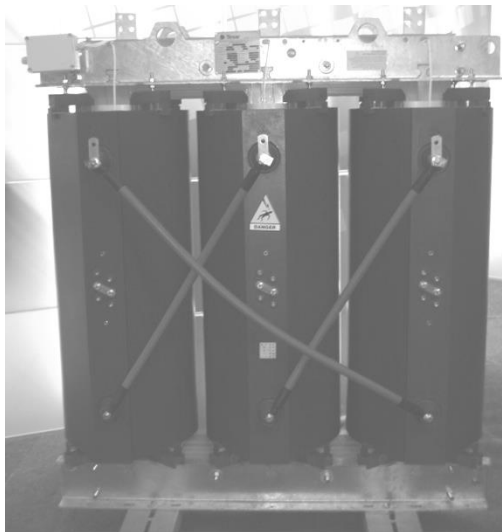


Рисунок 3 - Активна частина сухого трансформатора з ізоляцією класу 180°C потужністю 1000 кВА, напругою 10 кВ (тип ТСЗКУ-1000/10)

Завдяки такій конструкції трансформатори мають високу механічну міцність при струмах короткого замикання і, на відміну від звичайних сухих трансформаторів, їх обмотки не піддані зволоженню і забрудненню. При виготовленні таких трансформаторів, а також при утилізації відходів виробництва потрібні певні заходи щодо захисту персоналу від впливу компонентів смол.

Відомі випадки розтріскування литої ізоляції таких трансформаторів при високих температурах, пов'язаних з перевантаженнями, а також при температурі навколишнього середовища нижче -20 °С.

Від цього недоліку вільні трансформатори, у яких ізоляція складається зі скловолокна або склострічки, просоченої тією же смолою.

Недоліком трансформаторів з литою ізоляцією є їх менша перевантажувальна здатність у порівнянні з масляними трансформаторами

Головна і шарова ізоляція обмотки ВН трансформаторів «Резиблок» складається з скляного волокна (ровинг), насиченого епоксидним компаундом без добавки наповнювача. Всі матеріали екологічні, не виділяють токсичних газів при високій температурі. Для більше інтенсивного охолодження обмоток при їх виготовленні в ізоляції виконуються осьові канали. Певна кількість шарів ровинга, що складає з декількох тисяч скляних волокон діаметром 3-6 мікронів, насиченого компаундом, навивається по радіальному і діагональному напрямках. Великий натяг при намотуванні ровинга дозволяє одержати обмотку з однорідною структурою без дрібних порожнеч або повітряних включень, що підвищує електричну міцність ізоляції. Трансформатори з ізоляцією «Резиблок» мають високу електричну міцність, пожежебезпеку,

високу екологічність, можуть експлуатуватися в особливо складних умовах: морських, тропічних, полярних, у хімічній, гірській або металургійній промисловості. Арамідна ізоляція виконується на основі синтетичних матеріалів (ароматичних поліамід-арамідів). Арамідні матеріали мають високу електричну і механічну міцність, високу стійкість до хімічних продуктів, підвищену нагрівостійкість, не загоряються і не підтримують горіння, мають низьку гігроскопічність.

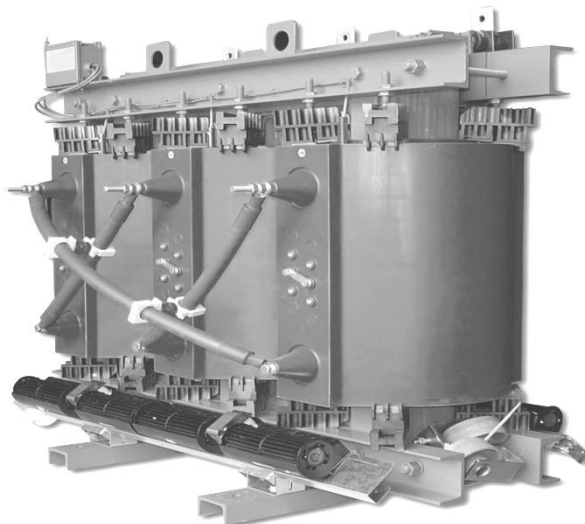


Рисунок 4 - Трансформатор потужністю 1000 кВА, напругою 10 кВ із литою ізоляцією (тип ТСЗЛ-1000/10)

Маючи робочу температуру 220-240°C, сухі трансформатори з арамідною ізоляцією переносять короточасні перевантаження при температурі понад 300°C, екологічно чисті, майже не міняють характеристик при збільшенні вологості навколишнього середовища, що важливо для підтримки високої електричної міцності ізоляції.

Арамідна ізоляція може застосовуватися для ізоляції обмоток як у сухих, так і в масляних трансформаторах. Підвищення в цьому випадку робочої температури обмотки дозволяє підвищити потужність сухих трансформаторів при тих же розмірах.

В маслonaповнених трансформаторах застосування проводів з емалевою ізоляцією для обмоток НН і арамідною для обмоток ВН також дозволяє підвищити робочу температуру обмоток і, отже, зменшити розміри трансформатора або трохи збільшити його потужність при незмінних розмірах. Обмеженням буде припустима температура верхнього масла. При цьому термін служби трансформатора буде істотно збільшений.

8.2 Будова силових трансформаторів

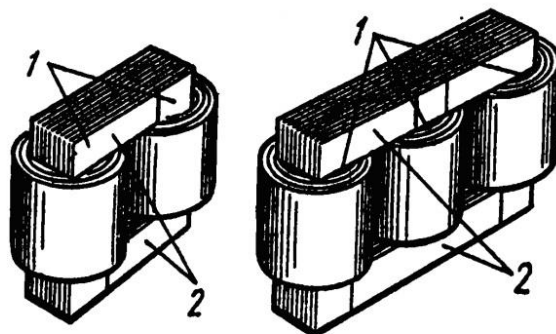
Найбільш розповсюдженим і важливим класом трансформаторів є силові трансформатори, призначені для перетворення енергії змінного струму в електричних мережах енергетичних систем (на електростанціях, підстанціях, промислових підприємствах, міських мережах, в сільському господарстві).

Магнітопровід трансформатора служить для посилення магнітного зв'язку між обмотками і є конструктивною основою для встановлення і кріплення обмоток, відводів і інших деталей трансформатора.

За конструкцією магнітопроводу трансформатори поділяються на *стрижньові і броньові.*

Стрижньовий тип магнітопроводу (рисунок 5) характеризується тим, що ярма з'єднують кінці різних стрижнів та кожне ярмо розташовується тільки з боку торців стрижнів і обмоток трансформатора. При цьому по ярму проходить потік, що дорівнює потоку стрижня.

Броньовий тип магнітопроводу (рисунок 6) характеризується тим, що обидва кінці кожного стрижня з'єднані не менш ніж з двома боковими ярмами, тобто ярма охоплюють не тільки торці обмоток, але і їх бокові сторони. При цьому по ярму проходить потік, що дорівнює половині потоку стрижня, отже, перетин ярма менше перетину стрижня в два рази.

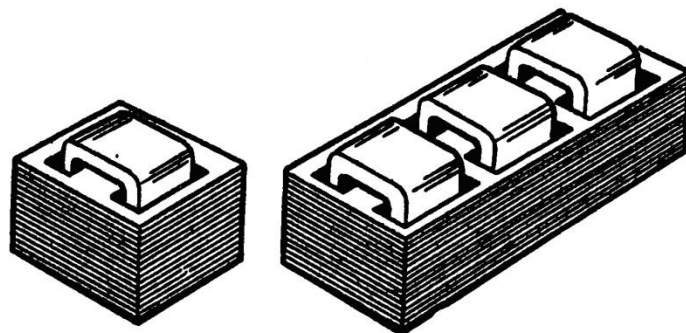


а)

б)

1 – стрижень; 2 - ярмо

Рисунок 5 – Стрижньові магнітопроводи однофазного а) і трифазного б) трансформаторів



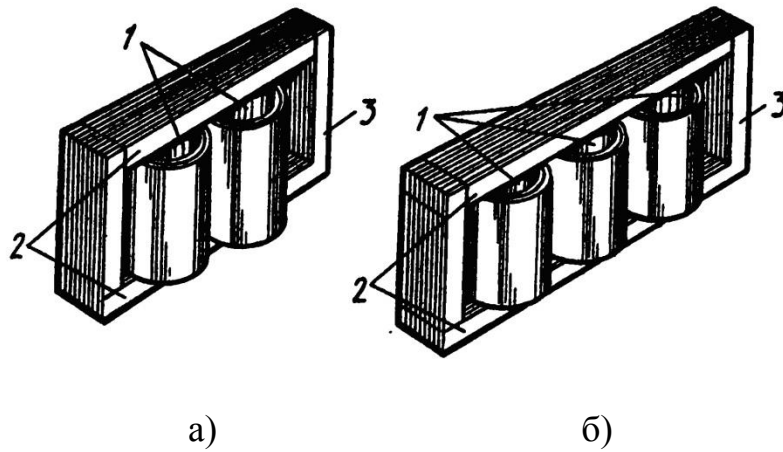
а)

б)

Рисунок 6 – Броньовий магнітопровід однофазного а) і трифазного б) трансформаторів

Магнітопроводи силових трансформаторів мають пласку стрижньову структуру. Не зважаючи на наявність магнітної несиметрії фаз, цей тип магнітопроводу отримав найбільше розповсюдження внаслідок високої технологічності.

В силових трансформаторах потужністю 100000 кВА та більше застосовують стрижньовий магнітопровід з розгалуженими ярмами (рисунок 7), що має назву бронестрижньового магнітопроводу.



1 – стрижень; 2 – торцеве ярмо; 3 – бокове ярмо
 Рисунок 7 – Бронестрижньовий магнітопровід однофазного а) і трифазного б) трансформатора

Для нього характерно те, що в однофазній конструкції кожен стрижень має одне бокове ярмо і потік ярма дорівнює половині потоку стрижня, у трифазній конструкції тільки два стрижня з трьох мають бокові ярма і потік ярма менше потоку стрижня в $\sqrt{3}$ раз. За рахунок застосування бокових ярем у бронестрижньовому магнітопроводі, в порівнянні з стрижневим, висота торцевих ярем в однофазній конструкції може бути зменшена у 2 рази, у трифазній – в $\sqrt{3}$ раз, внаслідок чого висота магнітопроводу та трансформатора в цілому істотно зменшується.

В трансформаторах потужністю до 6300 кВА достатньо широко використовується просторова структура, в якій вісі стрижнів і ярем розташовані в різних площинах. Просторова конструкція за рахунок більш рівномірного розподілення магнітного потоку дозволяє знизити масу магнітопроводу і зменшити втрати холостого ходу на 12-15%.

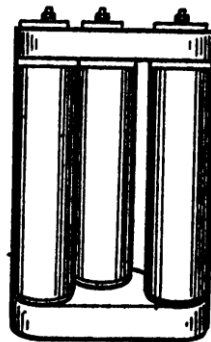


Рисунок 8 – Просторова структура магнітопроводу

За способом з'єднання стрижнів з ярмами магнітопроводи поділяють на *стикові*, *шихтовані* і *навиті*.

В *стикових* магнітопроводах стрижні і ярма збирають з пластин електротехнічної сталі окремо, а потім з'єднують по площині після насадки обмоток на стрижні. Вони відрізняються простотою збирання пластин, але наявність відносно великих немагнітних проміжків в місцях стиків викликає підвищене значення струму холостого ходу.

В *шихтованих* магнітопроводах пластини стрижнів та ярем збирають в переплетіння – шихтують, що призводить до суттєвого зменшення немагнітних

проміжків і струму холостого ходу. За формою стикування пластин стрижнів і ярем шихтовані магнітопроводи виконують з косими, прямими та комбінованими стиками. Використання в електромашинобудуванні рулонної холоднокатаної електротехнічної сталі дозволило впровадити навиті магнітопроводи, в яких окремі частини навиваються зі стрічок рулонної сталі, а потім скріплюються в єдину конструкцію.

В силових трансформаторах найбільшого поширення набула пласка стрижньова шихтована конструкція магнітопроводу. Перетин стрижнів такого магнітопроводу має вигляд симетричної ступінчастої фігури, яка вписана в коло. Це пов'язано з тим, що обмотки силових трансформаторів мають циліндричну форму і перетин стрижнів наближають до кола. Діаметр кола, в яке вписують ступінчасту фігуру (рисунок 9) перетину стрижня, називають діаметром стрижня трансформатора.

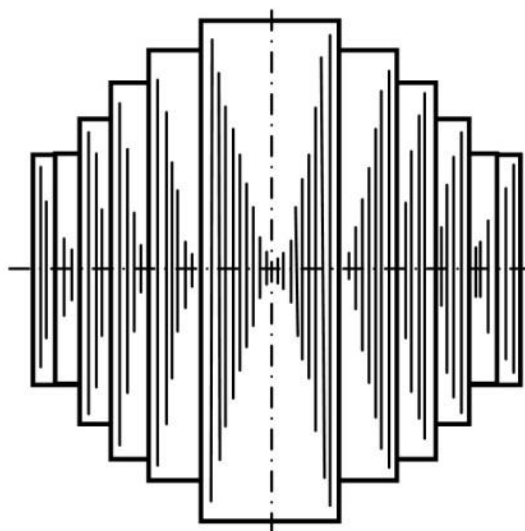


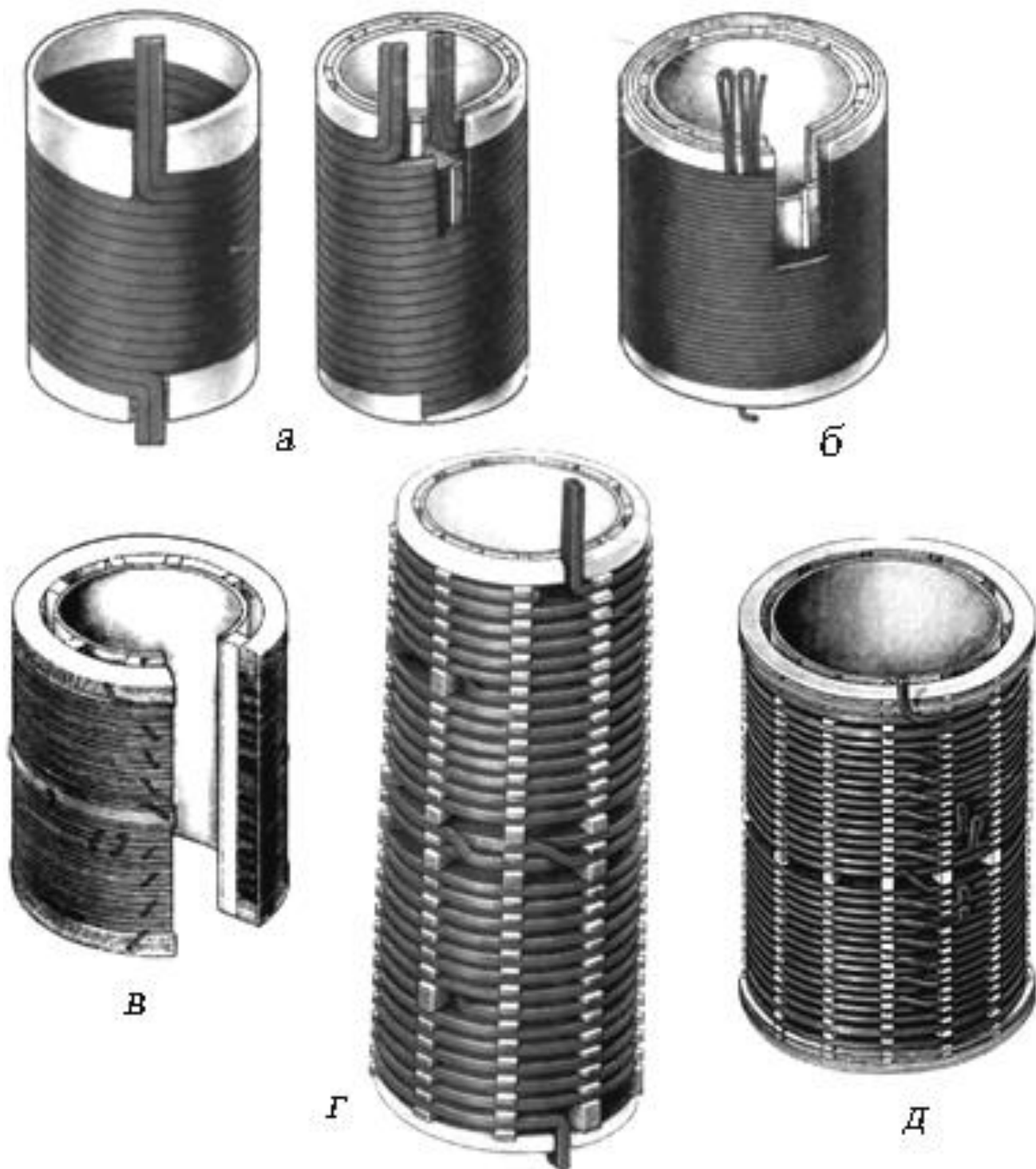
Рисунок 9 – Ступінчастий переріз стрижнів і ярма

Для виготовлення магнітних систем (магнітопроводів) трансформаторів застосовують спеціальні тонколистові електротехнічні сталі, що мають підвищений (до 5 %) змісту кремнію.

Для виготовлення магнітопроводів силових трансформаторів застосовується холоднокатана анізотропна сталь товщиною 0,27 мм, 0,3 мм та 0,35 мм, питомі втрати якої в 2-2,5 рази нижчі ніж у гарячекатаної. Холоднокатана сталь дозволяє збільшити індукцію в магнітопроводі до 1,6-1,7 Тл при одночасному зменшенні маси сталі магнітопроводу, отже, і маси металу обмоток, що істотно знижує втрати в трансформаторі.

Обмотки є найважливішим елементом трансформатора. Вартість матеріалів та їх виготовлення складає приблизно 50% вартості трансформатора. Конструкції обмоток трансформаторів можуть суттєво розрізнятися в залежності від потужності і напруги. Факторами, що визначають конструктивне виконання обмотки, є **число витків, перетин витка** і **клас напруги**.

Класом напруги обмотки трансформатора називають тривало допустиму робочу напругу. Клас збігається з номінальною напругою електричної мережі, до якої підключається обмотка. Класом напруги трансформатора вважається клас напруги обмотки ВН.

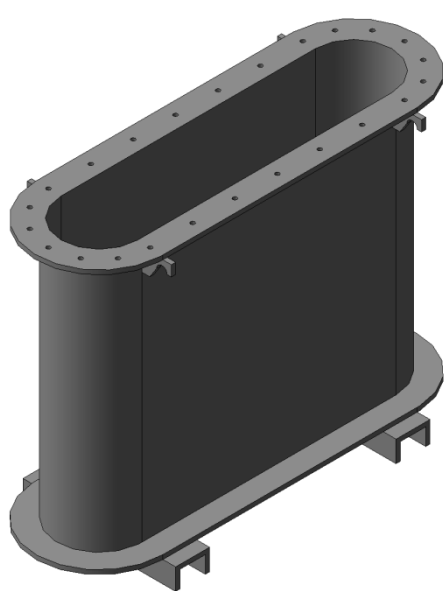


а - циліндричні обмотки; б - багат шарові циліндричні обмотки; в - котушкова циліндрична обмотка; г - гвинтова обмотка; д - безперервна обмотка.

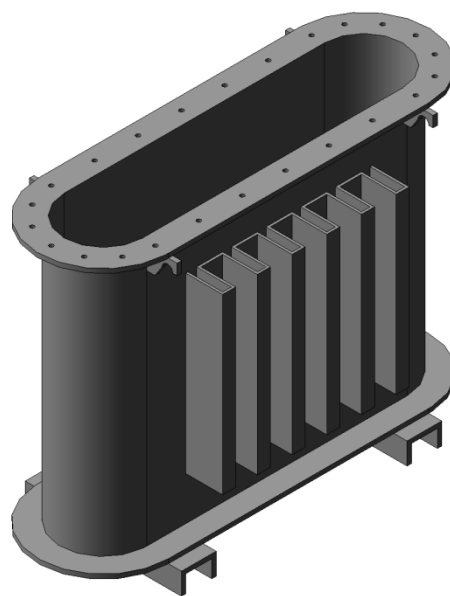
Рисунок 10 – Конструкції обмоток трансформаторів

Циліндричні одно- і двохшарові обмотки (рисунок 10, а) використовують в якості обмоток НН при номінальних струмах до 800 А, багатшарові циліндричні обмотки (рисунок 10, б) використовують в якості обмоток ВН (до 35 кВ), котушкові багатшарові циліндричні обмотки (рисунок 10, в) розділяють по висоті на окремі багатшарові обмотки, виготовлені з круглого проводу.

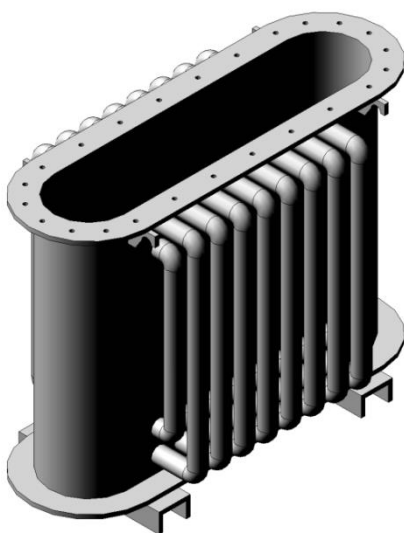
В трансформаторах з охолодженням типа СД застосовують штучне форсування руху повітря за допомогою вентиляторів. В трансформаторах з охолодженням типа М активну частину поміщають в бак, що заповнений трансформаторним маслом. В трансформаторах з охолодженням типа Д встановлюють вентилятори, за допомогою яких здійснюється примусова циркуляція повітря вздовж зовнішніх поверхонь радіаторів та бака при природній циркуляції масла в них. В трансформаторах з охолодженням типа МЦ та НМЦ на кожному радіаторі встановлюють насос для створення примусової циркуляції масла.



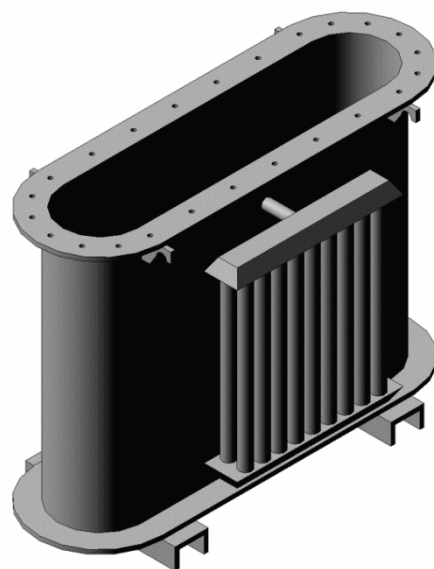
а)



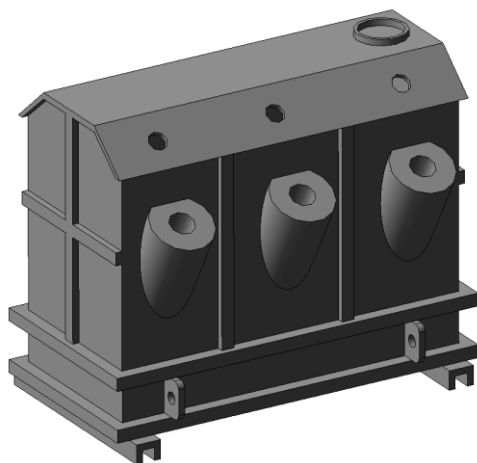
б)



в)



г)



д)

а - гладкий; б - ребристый; в - трубчатый; г - радиаторный; д - колокольный.
Рисунок 11 – Баки силових трансформаторів

В трансформаторах з охолодженням типу ДЦ та НДЦ використовується примусова циркуляція масла через спеціальні малогабаритні охолоджувачі з примусовим повітряним охолодженням (рисунок 12).

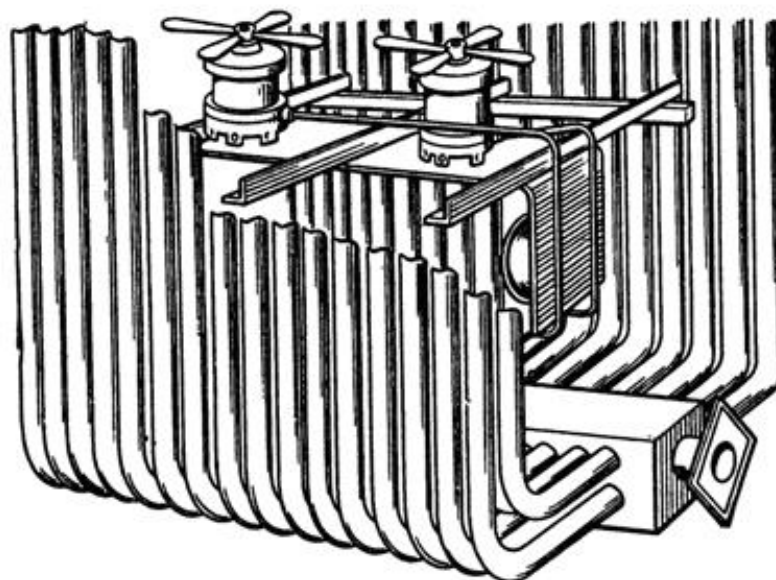
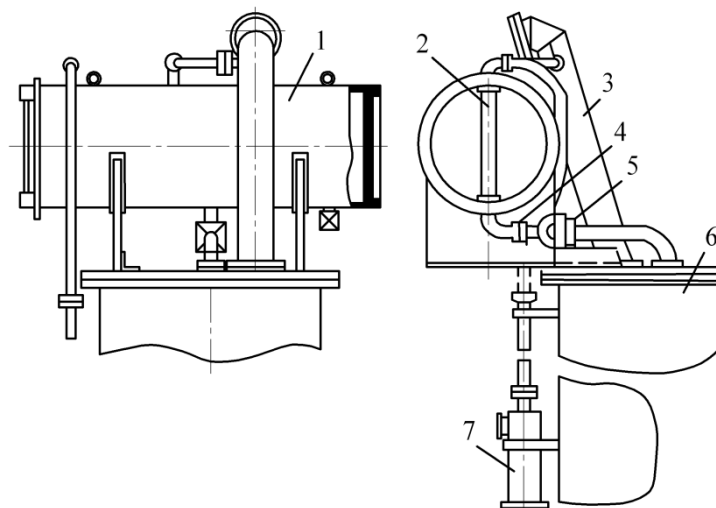


Рисунок 12 – Трубчатий вентилятор з радіаторами

В трансформаторах з охолодженням типу Ц та НЦ використовується примусова циркуляція масла через охолоджувачі з примусовим водяним охолодженням.

В трансформаторах з охолодженням типу Н, НД та ННД активну частину поміщають в бак, що заповнений синтетичної негорючою рідиною, що не окислюється – совтол, клофен, пиранол.

Розширювач (рисунок 13) призначений для компенсації коливань рівня масла в баку трансформатора при всіх можливих у експлуатації коливаннях температури та запобігає безпосередньому контакту масла з навколишнім повітрям.



1 - розширювач; 2 - маслоказівник; 3 - вихлопна труба;
4 - плоский кран; 5 - газове реле; 6 - бак; 7 - очисник повітря

Рисунок 13 – Допоміжне обладнання системи охолодження масляного трансформатора

Він встановлюється на всіх силових масляних трансформаторах класу напруги 5 кВ та потужністю 25 кВА та більше. Конструктивно розширювач представляє собою циліндричний бачок, що встановлюється горизонтально над кришкою бака трансформатора та з'єднаний з ним трубопроводом (рисунок 13).

Об'єм розширювача складає приблизно 10 % від об'єму масла в баку. Застосування розширювача дозволяє захистити масло від передчасного окислення, оскільки, по-перше, поверхня дотику (дзеркала) масла з повітрям в розширювачі значно менше ніж в баку трансформатора, по-друге, температура масла в розширювачі нижче ніж температура масла у верхньої частини трансформатора, і, по-третє, із-за відсутності циркуляції масла в розширювачі вода, що потрапляє в нього з повітря, та продукти окислення масла осаджуються у нижній частині розширювача та не потрапляють до баку трансформатора. Показчик рівня масла (масловказівник) служить для контролю рівня масла в трансформаторі та встановлюється на торцевій частині з боку НН, а у трансформаторів без розширювача – на стінці бака в верхній його частині. На розширювачі або безпосередньо на масловказівнику наносяться три контрольні межі, що відповідають рівням масла при непрацюючому трансформатору при температурах масла – 45⁰ С, + 15⁰ С, + 40⁰ С.

Термометр служить для контролю температури масла в верхніх шарах бака трансформатора та встановлюється на його кришці. В трансформаторах з потужністю до 630 кВА встановлюють ртутні скляні термометри зі шкалою від 0 до 150⁰ С. В трансформаторах з потужністю 1000 кВА та більше, а також в трансформаторах герметичного виконання потужністю 160 кВА та більше, для контролю температури масла на стінці бака встановлюють термометричні сигналізатори.

Термосифонний фільтр (рисунок 14) служить для безперервної автоматичної регенерації масла та встановлюється на силових трансформаторах потужністю 1000 кВА та більше. Термосифонний фільтр заповнюється силікагелем марки КСК.

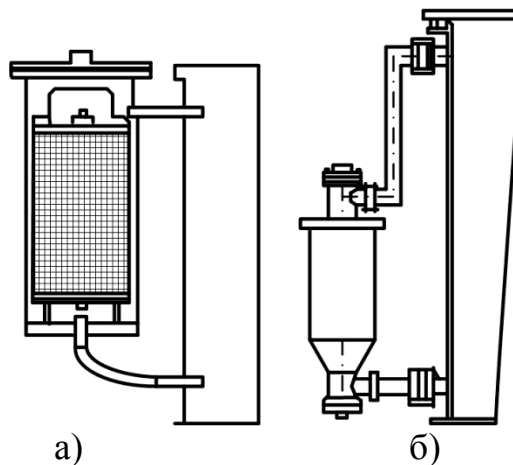


Рисунок 14 – Конструкції термосифонних фільтрів масляних трансформаторів потужністю 160-630 кВА (а) та 1000 кВА (б)

Очисник повітря служить для очистки від вологи та забруднення повітря, що потрапляє до трансформатора при температурних коливаннях рівня масла. В трансформаторах до 630 кВА включно, очисник повітря вбудовується безпосередньо у розширювач, а в трансформаторах потужністю 1000 кВА та більше встановлюється на розширювачі.

Газове реле (рисунок 13) служить для захисту трансформатора від внутрішніх пошкоджень (витковому замикання в обмотках, пробую ізоляції, «пожежі в сталі» магнітопроводу та ін.).

Вихлопна (запобіжна) труба (рисунок 13) служить для запобігання руйнування бака трансформатора при внутрішніх пошкодженнях, що супроводжуються виникненням електричної дуги, виділенням великої кількості газу та різким підвищенням тиску усередині бака. Вихлопна труба встановлюється на трансформаторах потужністю 1000 кВА та більше.

Арматура бака призначена для заливу, відбору проби, спуску та фільтрації масла. До неї відносяться крани, вентиля, засувки та пробки.

Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності представлена на рисунку 15.

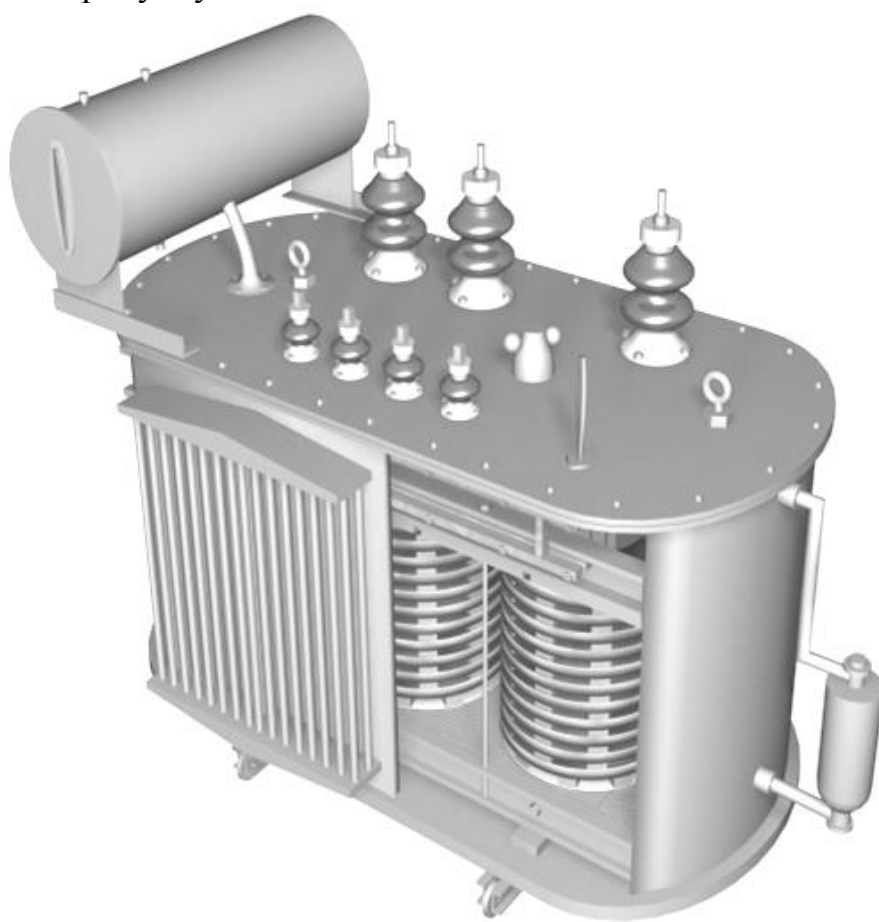


Рисунок 15 – Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності

8.3 Паспортні дані трансформатора

Основні відомості зі стандартизації трансформаторів зазвичай показують на паспортній таблиці трансформатора, яка представлена на рисунку 16

 		ТОВ «ТРАНСФОРМАТОР СЕРВІС» тип ТМГ 63/10																													
Потужність 63 кВА 50 Гц Фаз-3 Uk=4,50% Схема та група з'єднання Y/Yn-0		Маса масла 130 кг Маса активної частини 230 кг Повна маса 465 кг Ступінь захисту IP00 Перемикання відгалужень без збудження																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Сторона ВН</th> <th colspan="2">Сторона НН</th> </tr> <tr> <th>Ступ. пер.</th> <th>Напр., В</th> <th>Струм, А</th> <th>Струм, А</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>10500</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>10250</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>10000</td> <td>3.6</td> <td>400 91</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>9750</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>9500</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Сторона ВН		Сторона НН		Ступ. пер.	Напр., В	Струм, А	Струм, А	I	10500			II	10250			III	10000	3.6	400 91	IV	9750			V	9500			Зав. № 052000 ТУ У31.1-31617591-001-2005 ВИГОТОВЛЕНО В УКРАЇНІ 04.2010 р.	
Сторона ВН		Сторона НН																													
Ступ. пер.	Напр., В	Струм, А	Струм, А																												
I	10500																														
II	10250																														
III	10000	3.6	400 91																												
IV	9750																														
V	9500																														

Рисунок 16 - Паспортна табличка силового трансформатора

8.4 Принцип дії трансформатора

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листова електротехнічна сталь), і двох обмоток, розташованих на стрижнях магнітопроводу (рисунок 17, а). Одна з обмоток, що має назву первинної, приєднана до джерела змінного струму на напругу U_1 . До іншої обмотки, вторинної, підключено навантаження Z_H . Первинна і вторинна обмотки трансформатора не мають електричного зв'язку і потужність із однієї обмотки в іншу передається електромагнітним шляхом.

Магнітопровід, на якому розташовані ці обмотки, служить для посилення індуктивного зв'язку між обмотками.

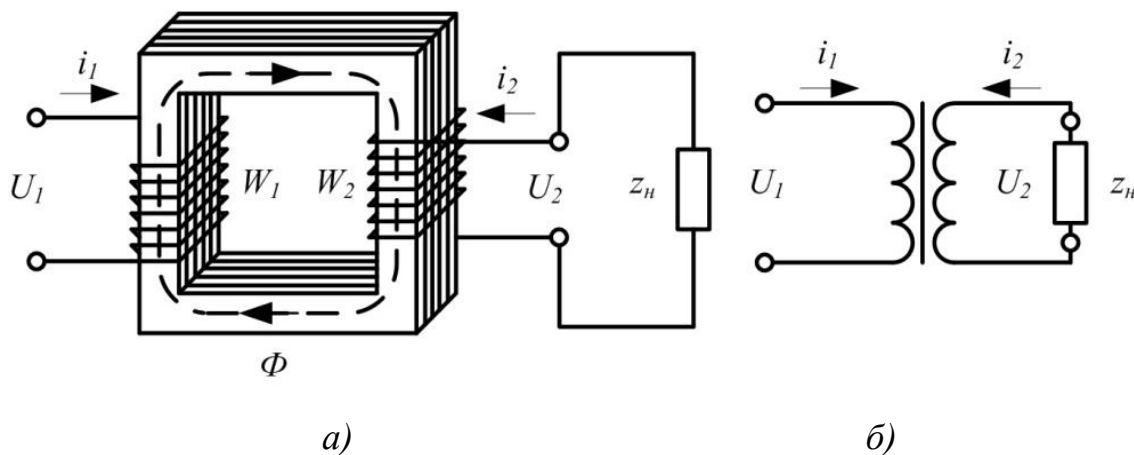


Рисунок 17 – Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми трансформатора

Робота трансформатора заснована на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму у витках цієї обмотки протікає змінний струм i_1 , що створює в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ . Замикаючись по магнітопроводу, цей потік зчіплюється з обома обмотками (первинною і вторинною) і індукуює у них ЕРС:

- у первинній обмотці ЕРС самоіндукції

$$e_1 = -W_1(d\Phi/dt), \quad (1)$$

- у вторинній обмотці ЕРС взаємоіндукції

$$e_2 = -W_2(d\Phi/dt), \quad (2)$$

де W_1 і W_2 - число витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

При підключенні навантаження Z_n до виводів вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 у колі цієї обмотки створюється струм i_2 , а на виводах вторинної обмотки встановлюється напруга U_2 . У підвищувальних трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижувальних $U_2 < U_1$.

З (1) і (2) видно, що ЕРС e_1 і e_2 , які наводяться в обмотках трансформатора, відрізняються одне від одного лише різним числом витків w_1 і w_2 в обмотках, тому, застосовуючи обмотки з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор практично на будь-яке відношення напруг.

Обмотку трансформатора, підключену до мережі з більш високою напругою називають обмоткою вищої напруги (ВН); обмотку, приєднану до мережі меншої напруги - обмоткою нижчої напруги (НН).

На рисунку 17, б показане зображення однофазного трансформатора на принципових електричних схемах.

Трансформатори мають властивість оборотності: той самий трансформатор можна використовувати в якості підвищувального і понижувального. Але звичайно трансформатор має певне призначення: або він підвищувальний, або - понижувальний.

Трансформатор, це апарат змінного струму. Якщо ж його первинну обмотку підключити до джерела постійного струму, то магнітний потік у магнітопроводі трансформатора також буде постійним як по величині, так і по напрямку $[(d\Phi/dt)=0]$, тому в обмотках трансформатора не буде наводитися ЕРС, а отже, електроенергія з первинного кола не буде передаватися у вторинне.

Властивості трансформатора визначаються його номінальними параметрами, до яких відносяться: 1) номінальна первинна лінійна напруга $U_{1ном}$, В або кВ; 2) номінальна вторинна лінійна напруга $U_{2ном}$ (напруга на виводах вторинної обмотки при відключеному навантаженні і номінальній первинній напрузі), В або кВ; 3) номінальні лінійні струми в первинній $I_{1ном}$ і вторинній $I_{2ном}$ обмотках, А; 4) номінальна повна потужність $S_{ном}$, кВ·А (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном}$, для трифазного - $S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} I_{1ном}$).

Номінальні лінійні струми обчислюють за номінальною потужністю трансформатора: для трифазного трансформатора

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{1ном}}; \quad (3)$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{2ном}} \quad (4)$$

де $S_{ном}$ — номінальна потужність трифазного трансформатора, кВА.

Кожний трансформатор розрахований для включення в мережу змінного струму певної частоти. Трансформатори загального призначення розраховані на частоту $f = 50$ Гц (у деяких країнах $f = 60$ Гц), у пристроях автоматики і зв'язку застосовують трансформатори на частоти 50, 400 або 1000 Гц.

8.5 Схеми та групи з'єднання обмоток силових трансформаторів

Схемою з'єднання обмоток називають схему, за якою з'єднують обмотки всіх фаз однієї напруги. Обмотки трифазних трансформаторів прийнято з'єднувати по наступних схемах: зірка; зірка з нульовим виводом; трикутник; зигзаг з нульовим виводом (рисунок 18). Схеми з'єднання обмоток трансформатора позначають дробом, у чисельнику якого зазначена схема з'єднання обмоток ВН, а в знаменнику - обмоток НН. Наприклад, Y/Δ означає, що обмотки ВН з'єднані в зірку, а обмотки НН - у трикутник.

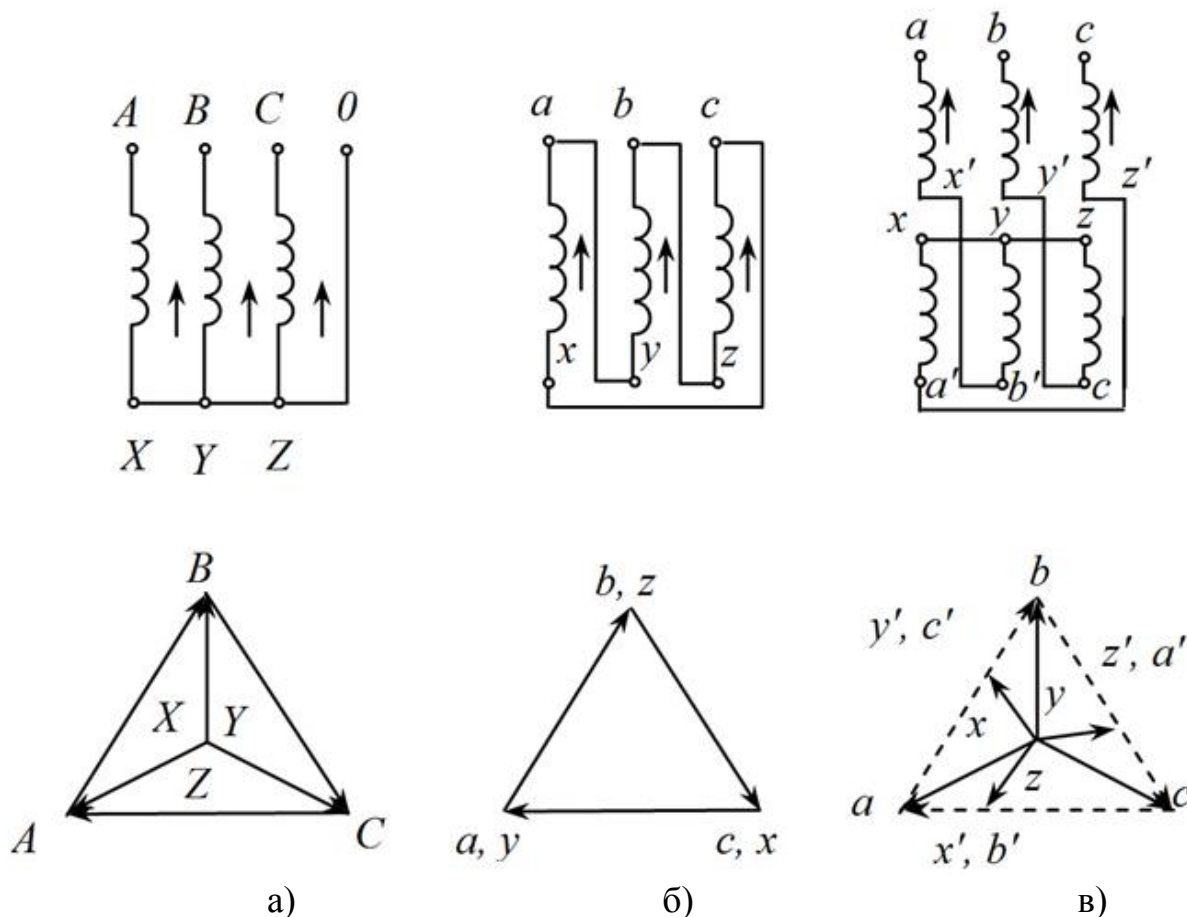


Рисунок 18 - Схеми і векторні діаграми з'єднання обмоток трифазного трансформатора: а) зірка з нульовим проводом; б) трикутник; в) зигзаг

В схемах з'єднання за позитивний напрям ЕРС прийнято приймати напрям дії ЕРС від кінця обмотки до початку, що залежить від напрямку намотування обмотувального проводу. Якщо у однієї з обмоток змінити початок і кінець обмотки, то напрям ЕРС зміниться на протилежний і це буде означати, що змінився напрям намотки обмотки. Звісно таке припущення умовне, однак при роботі трифазного трансформатора, коли кожна фазна обмотка зчіпляється з потоками від інших фаз, буде мати істотне значення.

Вибір схеми з'єднання залежить від багатьох причин. Основними при виборі схеми є: вартість активних матеріалів, вартість ізоляційних матеріалів, трудомісткість виготовлення, вид навантаження та режим роботи трансформатора. Наприклад, схему зірка з нулем вибирають при відносно високій напрузі, що призводить до зниження вартості ізоляції, оскільки фазне значення напруги буде менше лінійного; схему трикутник використовують при аналізі роботи трансформатора, спираючись на величину впливу вищих гармонійних складових напруги і струмів, а також на асиметрію навантаження; схему зигзаг, як правило використовують в спеціальних трансформаторах або при нерівномірному та несиметричному навантаженні, хоча витрати обмотувального проводу при виконанні за цією схемою збільшуються на 15%.

Під групою з'єднання розуміють кут зсуву по фазі між лінійними векторами ЕРС або напруги однойменних фаз обмотки ВН і НН трансформатора. За одиницю кута зсуву приймають кут в 30° .

В однофазному трансформаторі ЕРС первинної та вторинної обмоток можуть збігатися за фазою чи бути зсунуті на 180° . Група з'єднання залежить від напрямку намотування обмоток і позначення виводів (маркування). Якщо обмотки трансформатора намотані в один бік і мають симетричне маркування (рисунок 19, а), то індуковані в них ЕРС будуть спрямовані однаково (група 0). У разі зміни маркування виводів чи напрямку намотування однієї з обмоток (рисунок 19, б) спостерігається зсув за фазою між векторами первинної та вторинної ЕРС на 180° (група 6). Групи з'єднань позначають цілими числами від 0 до 11.

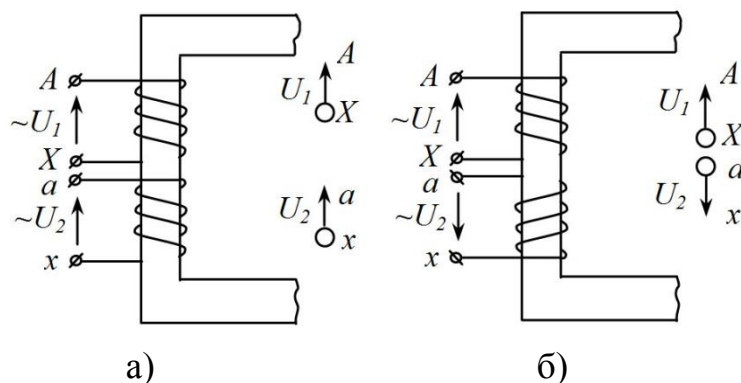
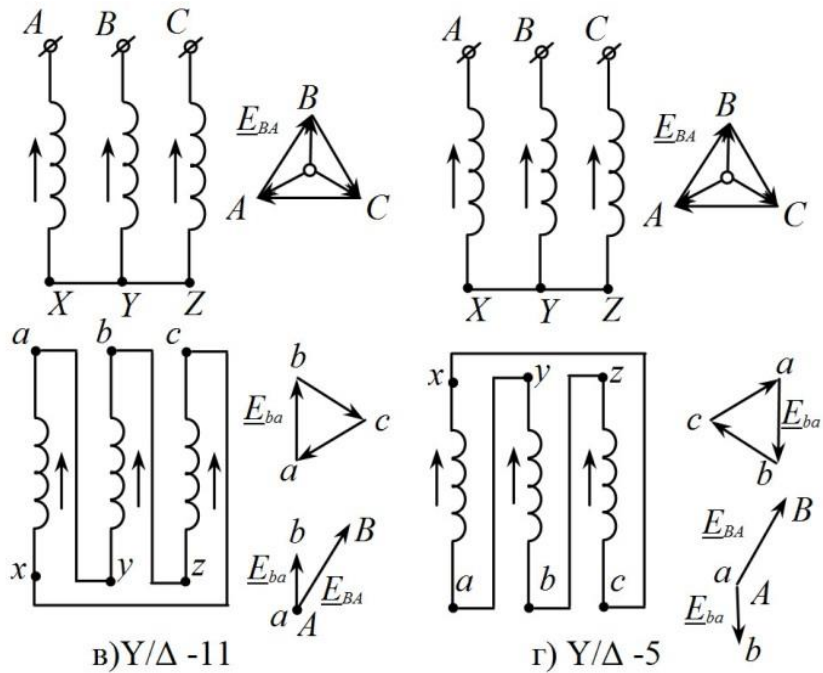
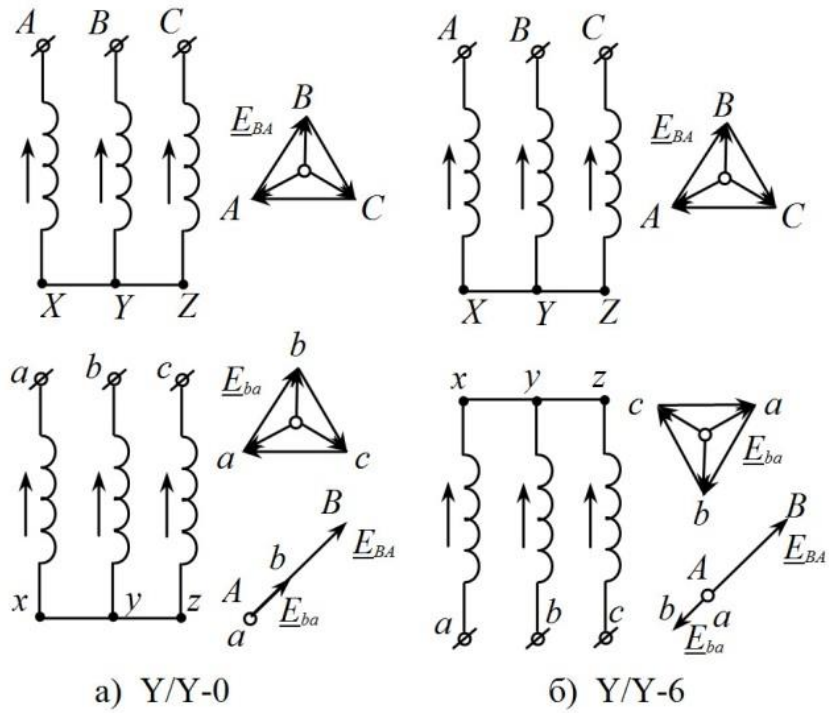


Рисунок 19 - Схеми і векторні діаграми з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Із двох можливих груп з'єднань однофазних трансформаторів — $Y/Y-0$ і $Y/I-6$ - промисловість випускає тільки $I/I-0$, в яких ЕРС первинної та вторинної обмоток збігаються за фазою.

У трифазних трансформаторах фазові ЕРС двох обмоток, розташованих на одному стрижні, можуть, як і в однофазних трансформаторах, або збігатися, або бути протилежного напрямку. Однак залежно від схеми з'єднання обмоток і порядку з'єднання їх початків і кінців можуть виходити різні кути зсуву фаз між лінійними ЕРС. На рисунку 20 показано схеми з'єднання обмоток Y/Y та відповідні векторні діаграми для нульової (рисунок 20, а) і шостої (рисунок 20, б) груп. На рисунку 20, в, г показано схеми з'єднання обмоток Y/Δ і відповідні векторні діаграми одинадцятої та п'ятої груп.



а - нульова; б - шоста; в - одинадцята; г - п'ята

Рисунок 20 - Групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Змінюючи маркування виводів обмоток, можна одержати і інші групи з'єднання: при схемах Y/Y, Δ/Δ - парні: другу, четверту, шосту і т. ін.; при схемах Δ/Y, Y/Δ і Y/Z - непарні: першу, третю, п'яту і т. ін. Відповідно до Держстандарту промисловість випускає трифазні силові трансформатори тільки двох груп - нульової та одинадцятої. Це полегшує практичне вмикання трансформаторів на паралельну роботу.

Посилання на літературу:

[1], с. 11...20, с. 241...262, с. 280...287;

[2], с. 9...14, 28...61, с. 74...79;

[4], с. 19...24, с. 40...42;

[8], с. 9...24, с. 29...30.

Контрольні питання:

1. Дайте визначення, що називається трансформатором. Назвіть види трансформаторів і поясніть їх призначення.
2. Наведіть конструктивну схему будови трифазного силового трансформатора з позначенням позицій і елементів конструкцій і вказівкою їх призначення, назви і матеріалу виготовлення.
3. Які електричні схеми з'єднання обмоток силових трансформаторів застосовуються у виробництві. З якою метою обмотки силових трансформаторів включають по схемі «зигзаг»?
4. Що розуміють під групою з'єднання обмоток силового трансформатора. Від чого залежить група з'єднання обмоток силових трансформаторів.
5. Наведіть в умовних позначеннях поєднання схем і груп з'єднання обмоток силових трансформаторів, що випускаються промисловістю.
6. Поясніть принцип дії трансформатора на прикладі однофазного трансформатора.

Тема №5. Основні теоретичні відомості і загальні питання будови і устрою силових трансформаторів

Лекція №9 «Робочий процес трансформатора»

Мета: Засвоєння і вивчення основних рівнянь трансформатора та розрахунків на їх основі з використанням схем заміщення та приведення параметрів.

Основні питання:

- 9.1 Основні рівняння трансформатора у векторній і диференційній формі.
- 9.2 Приведений силовий трансформатор.
- 9.3 Схеми заміщення силового трансформатора.
- 9.4 Методика визначення параметрів схем заміщення за паспортними даними та даними дослідів холостого ходу і короткого замикання.
- 9.5 Енергетична діаграма перетворення потужності в силовому трансформаторі.
- 9.6 Дослід холостого ходу і аналіз характеристик холостого ходу.

9.1 Основні рівняння трансформатора у векторній і диференційній формі

Основний змінний магнітний потік Φ у магнітопроводі трансформатора, зчіплюючись із витками обмоток w_1 і w_2 (див. рисунок 1), наводить у них ЕРС

$$e_1 = -W_1(d\Phi/dt); e_2 = -W_2(d\Phi/dt).$$

Припустимо, що магнітний потік Φ є синусоїдальною функцією часу, тобто

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t, \quad (1)$$

де Φ_{\max} — максимальне значення потоку.

Тоді, підставивши (1) у формулу ЕРС e_1 і провівши диференціювання, одержимо

$$e_1 = -\omega W_1 \Phi_{\max} \cos \omega t. \quad (2)$$

Але оскільки $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$, то

$$e_1 = \omega W_1 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (3)$$

За аналогією,

$$e_2 = \omega W_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (4)$$

З (3) і (4) видно, що ЕРС e_1 і e_2 відстають по фазі від потоку Φ на кут $\pi/2$. Максимальне значення ЕРС

$$E_{1\max} = \omega W_1 \Phi_{\max}. \quad (5)$$

Розділивши $E_{1\max}$ на $\sqrt{2}$ і підставивши $\omega = 2\pi f$, одержимо діюче значення первинної ЕРС (В)

$$E_1 = E_{1\max} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) W_1 f \Phi_{\max} = 4,44 W_1 f \Phi_{\max}. \quad (6)$$

Аналогічно, для вторинної ЕРС

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_{\max}. \quad (7)$$

Відношення ЕРС обмотки вищої напруги до ЕРС обмотки нижчої напруги називають коефіцієнтом трансформації

$$k = E_1 / E_2 = W_1 / W_2. \quad (8)$$

При практичних розрахунках коефіцієнт трансформації з деяким допущенням приймають рівним відношенню номінальних напруг обмоток ВН і НН

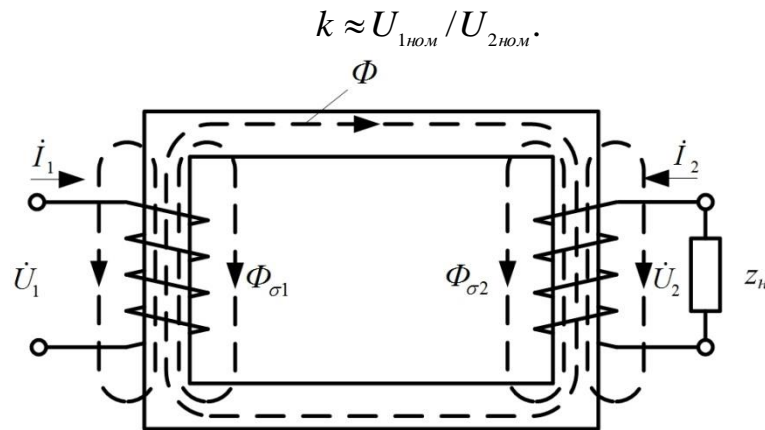


Рисунок 1 - Магнітні потоки в однофазному трансформаторі

Струми I_1 і I_2 в обмотках трансформатора крім основного магнітного потоку Φ створюють магнітні потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ та $\Phi_{\sigma 2}$ (рисунок 1), кожний з яких зчеплений з витками лише власної обмотки і індукує у ній ЕРС розсіювання. Ці ЕРС у первинній і вторинній обмотках мають такі значення

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1}(di_1 / dt); e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2}(di_2 / dt),$$

де $L_{\sigma 1}$ і $L_{\sigma 2}$ — індуктивності розсіювання.

Оскільки магнітні потоки розсіювання замикаються головним чином у немагнітному середовищі, магнітна проникність якої постійна, то і індуктивності $L_{\sigma 1}$ і $L_{\sigma 2}$ можна вважати постійними.

Діючі значення ЕРС розсіювання пропорційні струмам у відповідних обмотках:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1; \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 x_2,$$

де x_1 і x_2 — індуктивні опори розсіювання первинної і вторинної обмоток відповідно, Ом (знак мінус у цих виразах свідчить про реактивність ЕРС розсіювання).

Таким чином, у кожній з обмоток трансформатора індукуються по дві ЕРС: ЕРС від основного потоку Φ і ЕРС від потоку розсіювання ($\Phi_{\sigma 1}$ у первинній обмотці і $\Phi_{\sigma 2}$ у вторинній обмотці).

Для первинного кола трансформатора, ввімкненого в мережу на напругу U_1 , з урахуванням падіння напруги в активному опорі первинної обмотки r_1 можна записати рівняння напруг згідно другого закону Кірхгофа

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1,$$

або, після перенесення ЕРС \dot{E}_1 і $\dot{E}_{\sigma 1}$ в праву частину рівняння і виразивши ЕРС розсіювання через індуктивний опір розсіювання x_1 , одержимо рівняння напруг для первинного кола трансформатора:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \quad (9)$$

ЕРС первинної обмотки E_1 , наведена основним магнітним потоком Φ , являє собою ЕРС самоіндукції, а тому перебуває у протифазі з підведеною до первинної обмотки напругою U_1 .

Звичайно індуктивне jI_1x_1 і активне I_1r_1 падіння напруги невеликі, а тому з деяким наближенням можна вважати, що підведена до трансформатора напруга U_1 врівноважується ЕРС E_1 , тобто

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1). \quad (10)$$

Для вторинного кола трансформатора, замкнутого на навантаження з опором Z_n , рівняння напруг має вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma_2} = \dot{I}_2r_2 + \dot{I}_2Z_n, \quad (11)$$

тобто сума ЕРС, наведених у вторинній обмотці ($\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma_2}$), урівноважується сумою падінь напруг ($\dot{I}_2r_2 + \dot{I}_2Z_n$). Де r_2 - активний опір вторинної обмотки. Падіння напруги на навантаженні \dot{I}_2Z_n являє собою напругу на виводах вторинної обмотки трансформатора:

$$I_2Z_n = U_2. \quad (12)$$

Приведемо рівняння (11) до виду, аналогічному рівнянню ЕРС для первинного кола (12). При цьому врахуємо вираз (10) і (3.12) і одержимо рівняння напруг для вторинного кола трансформатора:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2x_2 - \dot{I}_2r_2 = \dot{I}_2Z_n. \quad (13)$$

Із цього рівняння видно, що напруга на виході навантаженого трансформатора відрізняється від ЕРС вторинної обмотки на величину падіння напруг у цій обмотці.

Припустимо, що трансформатор працює в режимі холостого ходу (рисунок 2, а), тобто до затискачів його первинної обмотки підведена напруга U_1 , а вторинна обмотка розімкнута ($U_2 = 0$). Струм I_0 у первинній обмотці при цих умовах називають струмом холостого ходу.

Магніторушійна сила (МРС) I_0W_1 , створена цим струмом, наводить у магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік, максимальне значення якого

$$\Phi_{max} = \frac{\sqrt{2}I_0W_1}{R_m}, \quad (14)$$

де R_m — магнітний опір магнітопроводу.

При замиканні вторинної обмотки на навантаження Z_n (рисунок 3.3, б) у ній виникає струм I_2 . При цьому струм у первинній обмотці збільшується до значення I_1 .

Тепер потік Φ_{max} створюється діями МРС I_1W_1 і I_2W_2

$$\Phi_{max} = \left(\sqrt{2}/R_m\right)(I_1W_1 + I_2W_2). \quad (15)$$

Цей потік можна визначити з (8):

$$\Phi_{max} = E_1/(4,44W_1f),$$

або, враховуючи, що $U_1 \approx (-E_1)$, одержимо

$$\Phi_{max} \approx U_1/(4,44W_1f). \quad (16)$$

З (16) видно, що значення основного магнітного потоку Φ практично не залежить від навантаження трансформатора, тому що напруга U_1 незмінна. Однак варто мати на увазі, що це положення є наближеним і відноситься до випадків навантаження, що не перевищує номінальне. Пояснюється це тим, що положення про незмінність потоку Φ прийнято на підставі рівняння $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, що не враховує спаду напруги в первинному колі [з рівняння (3.14)].

Прийняте положення $\Phi = const$ дозволяє прирівняти вирази (15) і (16):

$$(\sqrt{2}/R_m)\dot{i}_0 W_1 = (\sqrt{2}/R_m)(\dot{i}_1 W_1 + \dot{i}_2 W_2)$$

і одержати рівняння МРС трансформатора:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2. \quad (3.17)$$

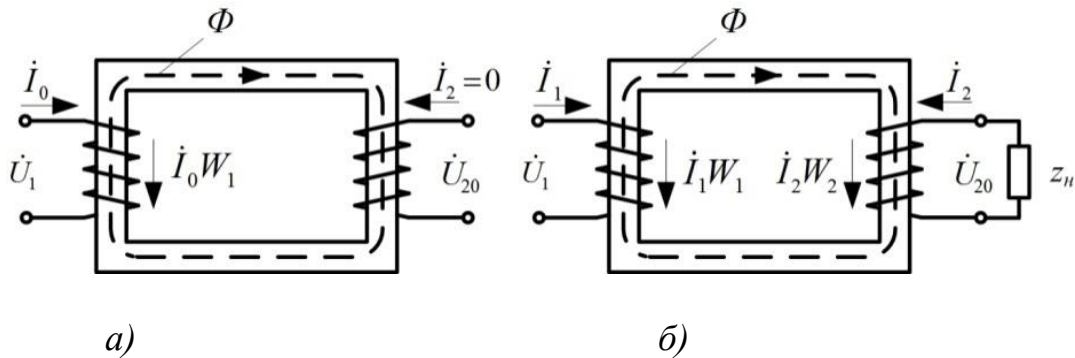


Рисунок 2 - Режими холостого ходу (а) і навантаження (б) в однофазному трансформаторі

Перетворюючи (17), можна МРС первинної обмотки $\dot{I}_1 w_1$ представити у вигляді суми двох складових:

$$\dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_0 W_1 + (-\dot{I}_2 W_2)$$

Складова $\dot{I}_0 W_1$ наводить у магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік Φ , а складова $-\dot{I}_2 W_2$ врівноважує МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$.

Вплив МРС вторинної обмотки трансформатора $\dot{I}_2 W_2$ на основний магнітний потік Φ можна пояснити за допомогою правила Ленца. Відповідно до цього правила наведена в обмотці ЕРС створює в ній такий струм, що своєю магнітною дією спрямований проти причини, що викликала появу цієї ЕРС. Причиною наведення ЕРС E_2 у вторинній обмотці трансформатора є основний магнітний потік Φ , тому струм у вторинній обмотці I_2 створює МРС $\dot{I}_2 W_2$, спрямовану зустрічно потоку Φ , тобто перебуває з ним у протифазі і прагне послабити цей потік. Якби обмотка W_2 була замкнута накоротко або на чисто індуктивний опір і при цьому не мала активний опір, то струм I_2 відставав би по фазі від ЕРС E_2 на кут $\psi_2 = 90^\circ$ і вся МРС $\dot{I}_2 W_2$ розмагнічувала магнітопровід. Але в реальних умовах вторинна обмотка замкнута на опір навантаження $Z_n = r_n \pm jx$, та ще й сама має активний опір r_2 . Тому фазовий зсув струму I_2 від ЕРС E_2 відрізняється від 90° і з основним магнітним потоком Φ взаємодіє не вся МРС $\dot{I}_2 W_2$, а лише її реактивна складова.

При активно-індуктивному навантаженні, коли $Z_n = r_n \pm jx$ і струм навантаження i_2 відстає по фазі від ЕРС вторинної обмотки E_2 на кут ψ_2 , МРС

$\dot{I}_2 W_2$ своєю реактивною (індуктивною) складовою $\dot{I}_{2p} W_2$ розмагнічує магнітопровід:

$$\dot{I}_{2p} W_2 = \dot{I}_2 W_2 \sin \Psi_2,$$

де $\dot{I}_{2p} = \dot{I}_2 \sin \Psi_2$ — реактивна складова струму навантаження.

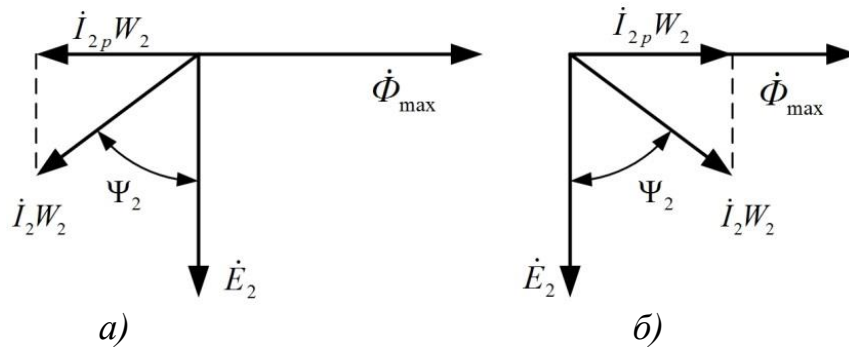


Рисунок 3 - Векторна діаграма МРС трансформатора при активно-індуктивному (а) та активно-ємнісному (б) навантаженнях

На рисунку 3, (а) представлена векторна діаграма МРС для випадку активно-індуктивного навантаження трансформатора. На діаграмі вектор ЕРС вторинної обмотки \dot{E}_2 відстає по фазі від вектора основного магнітного потоку Φ_{max} на кут 90° , а вектор МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$ відстає по фазі від ЕРС E_2 на кут Ψ_2 (рисунок 3, (а)). З виконаних на цій діаграмі побудов видно, що реактивна (індуктивна) складова МРС вторинної обмотки $\dot{I}_{2p} W_2$ перебуває в протифазі з основним магнітним потоком Φ_{max} , тобто розмагнічує магнітопровід трансформатора.

Аналізуючи роботу трансформатора, необхідно відзначити, що при навантаженні трансформатора в межах номінального значення основний магнітний потік Φ майже не змінюється і прийняте раніше положення $\Phi \approx const$ цілком припустимо. Відбувається це тому, що МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$, реактивна складова якої розмагнічує магнітопровід, компенсується складовою первинної МРС:

$$(-\dot{I}_2 W_2) = \dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_0 W_1. \quad (18)$$

При коливаннях струму навантаження трансформатора \dot{I}_2 змінюється МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$, а це викликає відповідні зміни МРС первинної обмотки $\dot{I}_1 W_1$ за рахунок її складової — $\dot{I}_2 W_2$. Що ж стосується складової МРС холостого ходу $\dot{I}_0 W_1$, то її значення залишається практично незмінним, достатнім для створення в магнітопроводі трансформатора основного магнітного потоку $\Phi \approx const$.

При активно-ємнісному навантаженні трансформатора, коли $Z_H = r_H \pm jx_H$ і струм навантаження \dot{I}_2 випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_2 на кут Ψ_2 , реактивна (ємнісна) складова МРС вторинної обмотки $\dot{I}_{2p} W_2$ співпадає по фазі з основним магнітним потоком Φ_{max} і підмагнічує магнітопровід трансформатора (рисунок 3, б). У цьому випадку, так само як і при активно-індуктивному навантаженні, складова первинної МРС $(-\dot{I}_2 W_2)$ компенсує дію вторинної МРС $\dot{I}_2 W_2$.

Розділивши рівняння МРС на число витків w_1 , одержимо

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 W_2 / W_1, \text{ або } \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (19)$$

де $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 W_2 / W_1$, — струм навантаження (вторинний струм), приведений до числа витків первинної обмотки.

Інакше кажучи, це такий струм, що в обмотці із числом витків w_1 створює таку ж МРС, що і струм I_2 у вторинній обмотці W_2 , тобто $I'_2 W_1 = I_2 (W_2 / W_1) W_1 = I_2 W_2$.

Перетворивши вираз (19), одержимо рівняння струмів трансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (20)$$

Із цього рівняння видно, що первинний струм I_1 можна розглядати як суму двох складових: складову I_0 , що створює МРС $I_0 W_1$, необхідну для наведення в магнітопроводі основного магнітного потоку Φ , і складову $-I'_2$, що створює МРС $-I'_2 W_1$ і компенсує МРС вторинної обмотки $I_2 W_2$ трансформатора. Така дія складових первинного струму приводить до того, що будь-яка зміна струму навантаження I_2 супроводжується зміною первинного струму I_1 за рахунок зміни його складової $-I'_2$, що перебуває в протифазі зі струмом навантаження I_2 .

Основний магнітний потік Φ є змінним, а тому магнітопровід трансформатора піддається систематичному перемагнічуванню. Внаслідок цього в магнітопроводі трансформатора мають місце магнітні втрати від гістерезису і вихрових струмів, що наводяться змінним магнітним потоком у пластинах електротехнічної сталі. Потужність магнітних втрат еквівалентна активній складовій струму х.х. Таким чином, струм х.х. має дві складові: реактивну I_{0p} , - представляє собою струм, що намагнічує, і активну I_{0a} , обумовлену магнітними втратами:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (21)$$

Зазвичай активна складова струму х.х. невелика і не перевищує 0,10 від I_0 , тому вона суттєво не впливає на струм х.х.

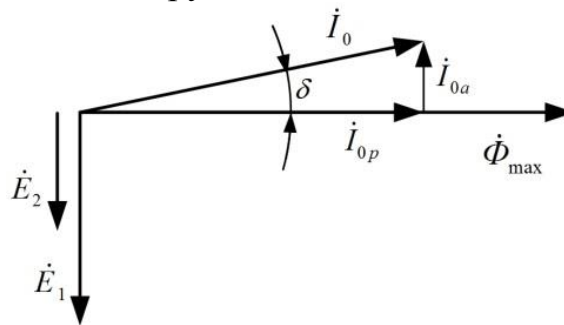


Рисунок 4. Розкладання струму х.х. на складові

На рисунку 4 представлена векторна діаграма, на якій зображені вектори струму х.х. I_0 і його складові I_{0a} і I_{0p} . Кут δ , на який вектор основного магнітного потоку Φ_{\max} відстає по фазі від струму I_0 , називають кутом магнітних втрат. Неважко помітити, що цей кут збільшується з ростом активної складової струму х.х. I_{0a} , тобто з ростом магнітних втрат у магнітопроводі трансформатора.

Сила струму х.х. у трансформаторах великої і середньої потужності відповідно становить 2-10% від номінального первинного струму. Тому при навантаженні, близькому до номінального, нехтуючи струмом I_0 і перетворюючи (16), одержимо

$$I_1 / I_2 = W_2 / W_1, \quad (22)$$

тобто. струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні числам витків цих обмоток: струм більше в обмотці з меншим числом витків і менше в обмотці з більшим числом витків. Тому обмотки НН виконують проводом більшого перетину, ніж обмотки ВН, що мають більше число витків.

9.2 Приведений силовий трансформатор

У загальному випадку параметри первинної обмотки трансформатора відрізняються від параметрів вторинної обмотки. Ця різниця найбільш відчутна при більших коефіцієнтах трансформації, що ускладнює розрахунки і побудову векторних діаграм, оскільки в цьому випадку довжина векторів електричних величин первинної обмотки значно відрізняється від довжини однойменних векторів вторинної обмотки. Зазначені труднощі можна усунути приведенням всіх параметрів трансформатора до однакового числа витків, зазвичай до числа витків первинної обмотки w_1 . З цією метою всі величини, що характеризують вторинне коло трансформатора (ЕРС, напругу, струм і опори) перераховують на число витків w_1 первинної обмотки.

Таким чином, замість реального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $k = W_1 / W_2$ одержують еквівалентний трансформатор з $k = W_1 / W'_2 = 1$, де $W'_2 = W_1$. Такий трансформатор називають приведеним. Однак приведення вторинних параметрів трансформатора не повинне відбитися на його енергетичних показниках: всі потужності і фазові зсуви у вторинній обмотці приведенного трансформатора повинні залишитися такими, як і в реальному трансформаторі.

Так, електромагнітна потужність вторинної обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ повинна дорівнювати електромагнітній потужності вторинної обмотки приведенного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2. \quad (23)$$

Підставивши значення наведеного струму вторинної обмотки $I_2 = I_2 (W_2 / W_1)$ в (23), одержимо формулу приведенної вторинної ЕРС:

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = \frac{I_2 W_1}{I_2 W_2} E_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2}. \quad (24)$$

Оскільки $U_2 I_2 \approx U'_2 I'_2$, то приведена напруга вторинної обмотки

$$U'_2 \approx U_2 (W_1 / W_2). \quad (25)$$

З умови рівності втрат в активному опорі вторинної обмотки маємо $I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2$. Визначимо приведенний активний опір:

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = r_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (26)$$

Приведений індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки визначають із умови рівності реактивних потужностей $I_2^2 x_2 = I'^2_2 x'_2$, звідки

$$x'_2 = x_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (27)$$

Приведений повний опір вторинної обмотки трансформатора

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 = (r_2 + jx_2)(W_1/W_2)^2 = Z_2(W_1/W_2)^2. \quad (28)$$

Приведений повний опір навантаження, підключеного до виводів вторинної обмотки, визначимо за аналогією з (27):

$$Z'_n = Z_n(W_1/W_2)^2. \quad (29)$$

Рівняння напруг і струмів для приведенного трансформатора мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (30)$$

Ці рівняння встановлюють аналітичний зв'язок між параметрами трансформатора у всьому діапазоні навантажень від режиму х.х. до номінального.

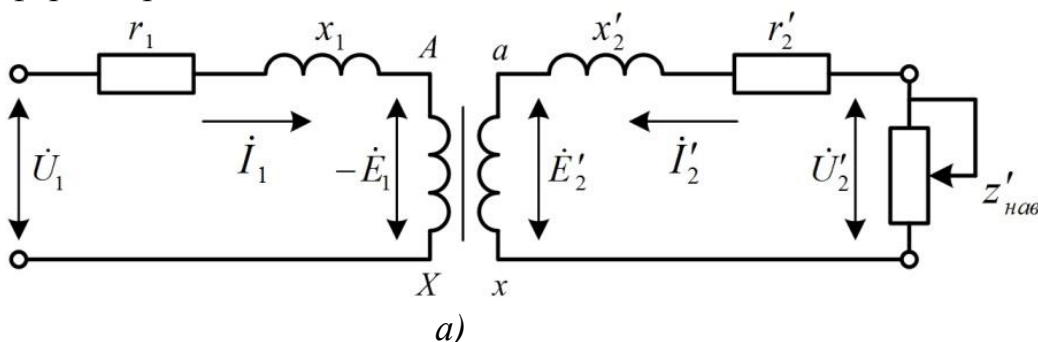
9.3 Схеми заміщення силового трансформатора

Ще одним засобом, що полегшує дослідження електромагнітних процесів і розрахунок трансформаторів, є застосування електричної схеми заміщення приведенного трансформатора. На рисунку 4, а представлена еквівалентна схема приведенного трансформатора, на якій опори r і x умовно винесені з відповідних обмоток і включені послідовно їм.

Як було встановлено раніше, у приведеному трансформаторі $k=1$, а тому $-\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. У результаті точки A і a , а також X і x на схемі мають однакові потенціали, що дозволяє електрично з'єднати зазначені точки, одержавши Т-подібну схему заміщення приведенного трансформатора (рисунок 4, б). В електричній схемі заміщення трансформатора магнітний зв'язок між колами замінено електричним.

Схема заміщення приведенного трансформатора задовольняє всім рівнянням ЕРС і струмів приведенного трансформатора (30) і являє собою сукупність трьох кіл: первинного — з опором $Z_1 = r_1 + jx_1$ і струмом \dot{I}_1 ; що намагнічує — опором $Z_0 = r_0 + jx_0$ і струмом \dot{I}_0 ; вторинного — із двома опорами: опором вторинної обмотки $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ і опором навантаження $Z'_{нав} = r'_n \pm jx'_n$ і струмом $-\dot{I}'_2$. Зміною опору навантаження $Z'_{нав}$ на схемі заміщення можуть бути відтворені всі режими роботи трансформатора.

Параметри кола намагнічування $Z_0 = r_0 + jx_0$ визначаються струмом х.х. Наявність у цьому колі активної складової r_0 обумовлено магнітними втратами в трансформаторі.



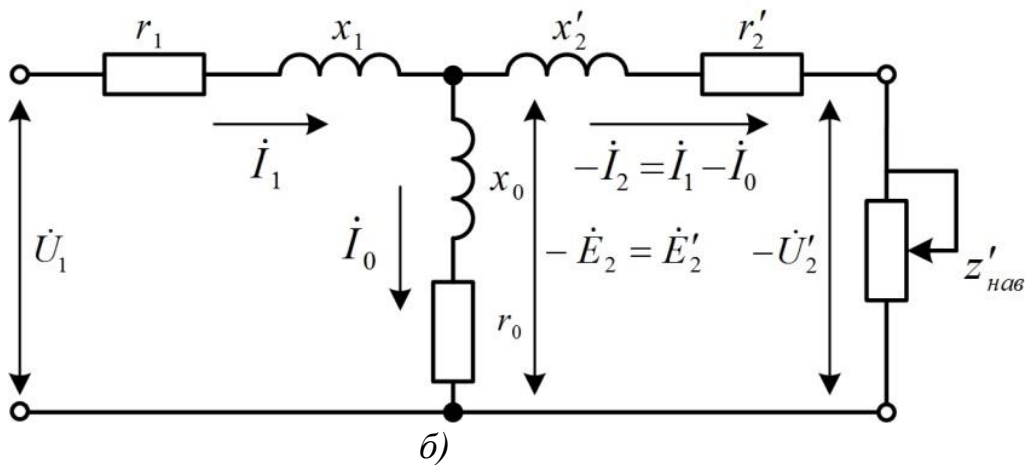


Рисунок 4 - Еквівалентна схема (а) і схема заміщення (б) приведенного трансформатора

Всі параметри схеми заміщення, за винятком $Z'_{нав}$, є постійними для даного трансформатора і можуть бути визначені з досліду х.х. і досліду к.з.

9.4 Методика визначення параметрів схем заміщення за паспортними даними та даними дослідів холостого ходу і короткого замикання

Розрахунок характеристик трансформатора в різних режимах зручно виконувати за допомогою електричної схеми заміщення, в якій електромагнітні зв'язки між первинною та вторинною обмотками замінюються на чисто електричні. Дійсно, якщо вторинну обмотку трансформатора привести до первинної, що в математичному відношенні відповідає переходу від вихідних реальних змінних U_2, I_2 до нових (приведених) змінних U'_2, I'_2 , то всі електричні величини та параметри обмоток трансформатора будуть приведені до одної (первинної) напруги та трансформатор з його двома електричне не з'єднаними, але магнітне пов'язаними обмотками може бути представлений у вигляді одного електричного кола (схема заміщення).

Існують наступні види схем заміщення: точна, спрощена, для режиму холостого ходу та короткого замикання.

На схемі заміщення (Рисунок 5) представлено:

R_1, X_1 – активний та індуктивний опір фази первинної обмотки трансформатора, Ом.

R'_2, X'_2 – приведені значення активного та індуктивного опору фази вторинної обмотки трансформатора, Ом.

R_m, X_m – активний та індуктивний опір конура намагнічування, Ом. R_m – опір конура намагнічування, що враховує магнітні втрати; X_m – індуктивний опір взаємоіндукції.

I_0 – контур зі струмом намагнічування, А.

I_1 – контур з первинним струмом заміщення, А.

I'_2 – контур з вторинним струмом заміщення, А.

Параметри холостого ходу трансформатора

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}, R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2}, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

Номинальний струм первинної обмотки трансформатора

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}$$

Силу струму холостого ходу трансформатора в амперах

$$I_0 = \frac{i_{0\%} \cdot I_{1H}}{100}$$

Параметри короткого замикання трансформатора

$$Z_k = \frac{U_{k\phi}}{I_{1H}}, R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1H}^2}, X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

Напряга короткого замикання трансформатора в вольтах

$$U_{k\phi} = \frac{u_{k\%} \cdot U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot 100}$$

Параметри точної схеми заміщення трансформатора

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}, \quad X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}. \quad (31)$$

$$R_m = R_0 - R_1, \quad X_m = X_0 - X_1. \quad (32)$$

Повні опори приведенного трансформатора

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad Z_2' = Z_1 = \sqrt{(R_2')^2 + (X_2')^2}, \quad Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}. \quad (33)$$

Дійсні (не приведені) параметри вторинної обмотки трансформатора

$$R_2' = k^2 \cdot R_2, \quad X_2' = k^2 \cdot X_2, \quad Z_2' = k^2 \cdot Z_2. \quad (34)$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2}, \quad X_2 = \frac{X_2'}{k^2}, \quad Z_2 = \frac{Z_2'}{k^2}. \quad (35)$$

Коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$$

Привести формули приведення величин та параметрів вторинної обмотки до числа витків первинної обмотки трансформатора

$$I_1 = I_2', \quad U_1 = U_2' \quad (36)$$

$$I_2' = \frac{I_2}{k}, \quad U_2' = k \cdot U_2. \quad (37)$$

$$I_2 = I_2' \cdot k, \quad U_2 = \frac{U_2'}{k}. \quad (38)$$

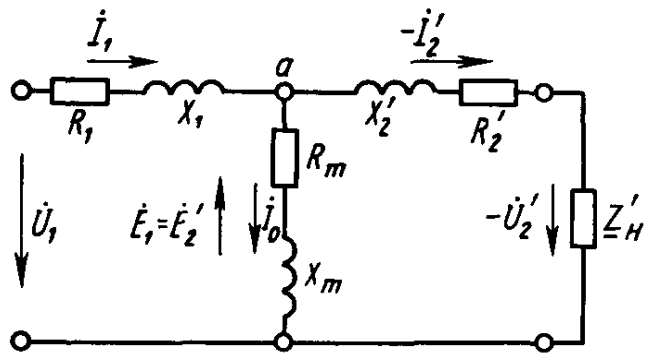


Рисунок 5 - Точна схема заміщення трансформатора

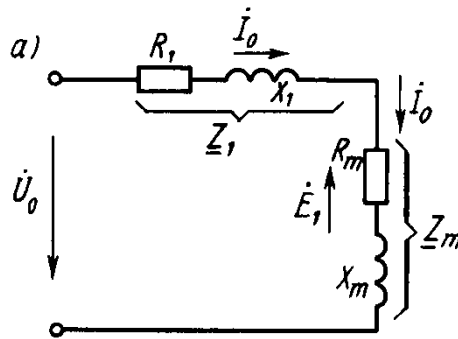


Рисунок 6 - Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

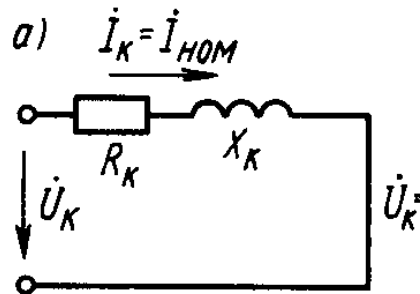


Рисунок 7 - Схема заміщення трансформатора в режимі короткого замикання

9.5 Енергетичні діаграми перетворення потужності в силовому трансформаторі

В процесі трансформування електричної енергії частина енергії затрачується в трансформаторі на покриття втрат. Втрати в трансформаторі поділяються на електричні і магнітні.

Електричні втрати. Обумовлені нагріванням обмоток трансформаторів при проходженні по цих обмотках електричного струму. Потужність електричних втрат P_e пропорційна квадрату струму і визначається сумою електричних втрат у первинній P_{e1} і вторинній P_{e2} обмотках

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2, \quad (39)$$

де m - число фаз трансформатора (для однофазного трансформатора $m = 1$, для трифазного $m = 3$).

При проектуванні трансформатора величину електричних втрат визначають по (1), а для виготовленого трансформатора ці втрати визначають дослідним шляхом, вимірявши потужність к.з. при номінальних струмах в обмотках $P_{к.ном}$

$$P_e = \beta^2 P_{к.ном}, \quad (40)$$

де β - коефіцієнт навантаження.

Електричні втрати називають змінними, тому що їх величина залежить від навантаження трансформатора (рисунок 8).

Магнітні втрати. Спостерігаються головним чином у магнітопроводі трансформатора. Причина цих втрат - систематичне перемагнічування магнітопроводу змінним магнітним полем. Це перемагнічування викликає в магнітопроводі два види магнітних втрат: втрати від гістерезису P_z , пов'язані з витратою енергії на знищення залишкового магнетизму у феромагнітному матеріалі магнітопроводу, і втрати від вихрових струмів $P_{в.с.}$, що наводяться змінним магнітним полем у пластинах магнітопроводу

$$P_m = P_z + P_{в.с.} \quad (41)$$

З метою зменшення магнітних втрат магнітопровід трансформатора виконують із магнітно-м'якого феромагнітного матеріалу - тонколистової електротехнічної сталі. При цьому магнітопровід виконують шихтованим у вигляді пакетів з тонких пластин (смуг), ізольованих із двох сторін тонкою плівкою лаку.

Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті перемагнічування магнітопроводу, тобто частоті змінного струму, а магнітні втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти. Сумарні магнітні втрати прийнято вважати пропорційними частоті струму ступеня 1,3. Величина магнітних втрат залежить також і від магнітної індукції в стрижнях і ярах магнітопроводу ($P_m \equiv B^2$). При незмінній первинній напрузі ($U_1 = const$) магнітні втрати постійні, тобто не залежать від навантаження трансформатора (рисунок 1, а).

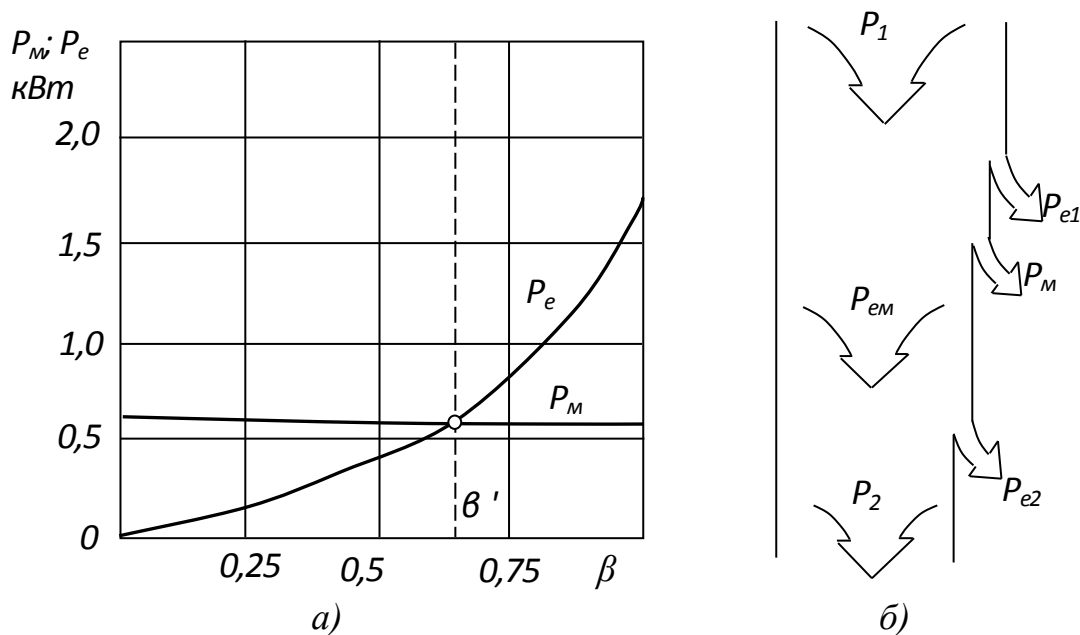


Рисунок 8 - Залежність втрат трансформатора від коефіцієнту завантаження (а) і енергетична діаграма (б) трансформатора

При проектуванні трансформатора магнітні втрати визначають за значенням питомих магнітних втрат $P_{ном}$, що спостерігаються в 1 кг тонколистової електротехнічної сталі при значеннях магнітної індукції 1,0; 1,5 або 1,7 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц

$$P_m = P_{ном} (B/B_x)^2 (f/50)^{1,3} G, \quad (42)$$

де B - фактичне значення магнітної індукції в стрижні або ярмі магнітопроводу трансформатора, Тл;

B_x - магнітна індукція, що відповідає прийнятому значенню питомих магнітних втрат, наприклад $B_x = 1,0$ або $1,5$ Тл;

G - маса стрижня або ярма магнітопроводу, кг.

Значення питомих магнітних втрат зазначені в стандарті на тонколистову електротехнічну сталь. Наприклад, для сталі марки 3411 товщиною 0,5 мм при $B=1,5$ Тл і $f=50$ Гц питомі магнітні втрати $P_{1,5/50}=2,45$ Вт/кг.

Для виготовленого трансформатора магнітні втрати визначають дослідним шляхом, вимірявши потужність х.х. при номінальній первинній напрузі $P_{0,ном}$.

Таким чином, активна потужність P_1 , що надходить із мережі в первинну обмотку трансформатора, частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e1} . Змінний магнітний потік викликає в магнітопроводі трансформатора магнітні втрати P_m . Потужність, що залишилась, називана електромагнітною потужністю $P_{em} = P_1 - P_{e1} - P_m$, передається у вторинну обмотку, де частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e2} . Активна потужність, що надходить до навантаження від трансформатора, $P_2 = P_1 - \sum P$, де $\sum P = P_{e1} + P_m + P_{e2}$ — сумарні втрати в трансформаторі. Всі види втрат, що супроводжують робочий процес трансформатора, показані на енергетичній діаграмі (рисунок 8, б).

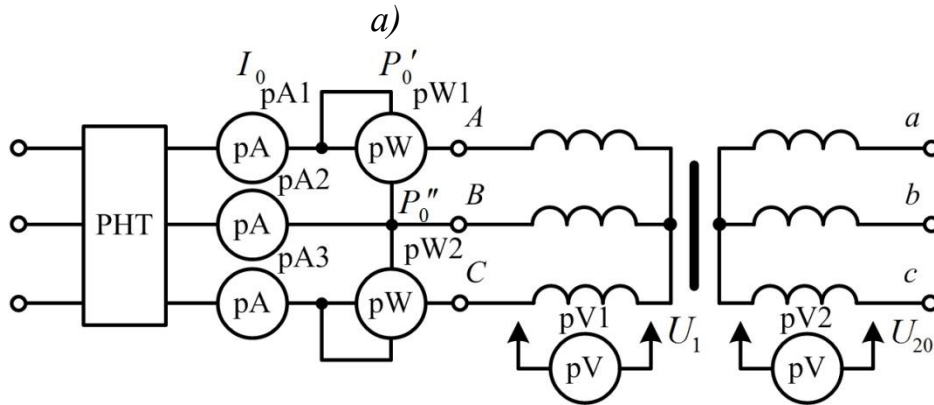
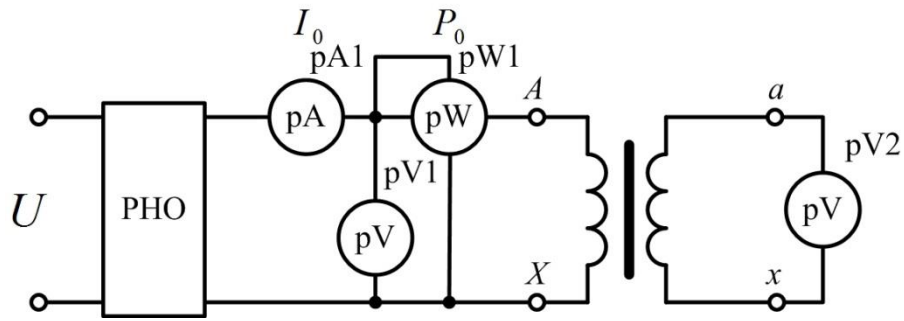
9.6 Дослід холостого ходу і аналіз характеристик холостого ходу

Холостим ходом називають режим роботи трансформатора при розімкнутій вторинній обмотці ($Z_n = \infty$, $I_2 = 0$). У цьому випадку рівняння напруг і струмів приймають вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}'_{20} &= \dot{E}'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Оскільки корисна потужність при роботі трансформатора вхолосту дорівнює нулю, то потужність на вході трансформатора в режимі х.х. P_0 витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі P_m , (втрати на перемагнічування магнітопроводу і вихрові струми) і електричні втрати в міді $I_0 r_1$, (втрати на нагрівання обмотки при проходженні по ній струму) однієї лише первинної обмотки. Однак через невелике значення струму I_0 , що звичайно не перевищує 2-10% від $I_{ном}$, електричними втратами $I_0 r_1$ можна зневажити і вважати, що вся потужність х.х. являє собою потужність магнітних втрат у сталі магнітопроводу. Тому магнітні втрати в трансформаторі прийнято називати втратами холостого ходу.

Дослід х.х. однофазного трансформатора проводять за схемою зображеною на рисунок 9, а. Комплект електровимірювальних приладів, включених у схему, дає можливість безпосереднього виміру напруги U_1 , підведеної до первинної обмотки; напруги U_{20} на виводах вторинної обмотки; потужності х.х. P_0 і струму х.х. I_0 .



б)

Рисунок 9 - Схеми досліду х.х. трансформаторів однофазного (а), трифазного (б)

Напругу до первинної обмотки, трансформатора підводять через однофазний регулятор напруги РНО, що дозволяє плавно підвищувати напругу від 0 до $1,15U_{\text{ном}}$. При цьому через приблизно однакові інтервали струму х.х. знімають показання приладів, а потім будують характеристики х.х.: залежності струму х.х. I_0 , потужності х.х. P_0 і коефіцієнта потужності х.х. $\cos\varphi_0$ від первинної напруги U_1 (рисунок 3).

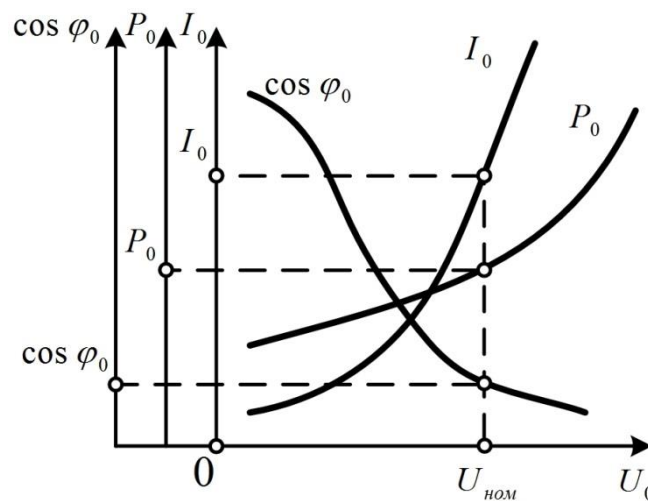


Рисунок 3 - Характеристики холостого ходу трансформатора

Криволінійність цих характеристик обумовлена станом магнітного насичення магнітопроводу, що настає при деякому значенні напруги U_1 .

У випадку досліду холостого ходу із трифазним трансформатором напругу U_1 встановлюють за допомогою трифазного регулятора напруги РНТ (рисунок

9, б). Характеристики х.х. будують по середнім фазним значенням струму і напруги для трьох фаз

$$I_0 = (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C})/3; \quad (44)$$

$$U_1 = (U_{1A} + U_{1B} + U_{1C})/3. \quad (45)$$

Коефіцієнт потужності для однофазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}; \quad (46)$$

де P_0' і P_0'' — показання однофазних ватметрів;

U_1 і I_0 — фазні значення напруги і струму.

За даними досліду х.х. можна визначити: коефіцієнт трансформації

$$k = U_1/U_2 = W_1/W_2; \quad (47)$$

струм х.х. при $U_{1ном}$ (у відсотках від номінального первинного струму)

$$i_0 = (I_{0ном} / I_{1ном}) \cdot 100. \quad (48)$$

У трифазному трансформаторі струми х.х. у фазах неоднакові і утворюють несиметричну систему, тому потужність P_0 варто вимірювати двома ватметрами за схемою, зображеною на рисунку 9, б. Падіння напруги в первинній гілці схеми заміщення в режимі х.х. $I_0(r_1 + jx_1)$ (рисунок 10) становить досить незначну величину, тому, не допускаючи помітної помилки, можна користуватися наступними виразами для розрахунку параметрів гілки намагнічування:

$$\begin{aligned} z_m &= U_1 / I_0; \\ r_m &= z_m \cos \varphi_0; \\ x_m &= \sqrt{z_m^2 - r_m^2}. \end{aligned} \quad (49)$$

Зазвичай в силових трансформаторах загального призначення середньої і великої потужності при номінальній первинній напрузі струм х.х. $i_0 = 2 \div 10\%$.

Якщо ж фактичні значення струму х.х. $I_{0ном}$ і потужності х.х. $P_{0ном}$, що відповідають номінальному значенню первинної напруги $U_{1ном}$, помітно перевищують величини цих параметрів, зазначені в каталозі на даний тип трансформатора, то це свідчить про несправність цього трансформатора: наявність короткозамкнених витків в обмотках або замикання частини пластин магнітопроводу.

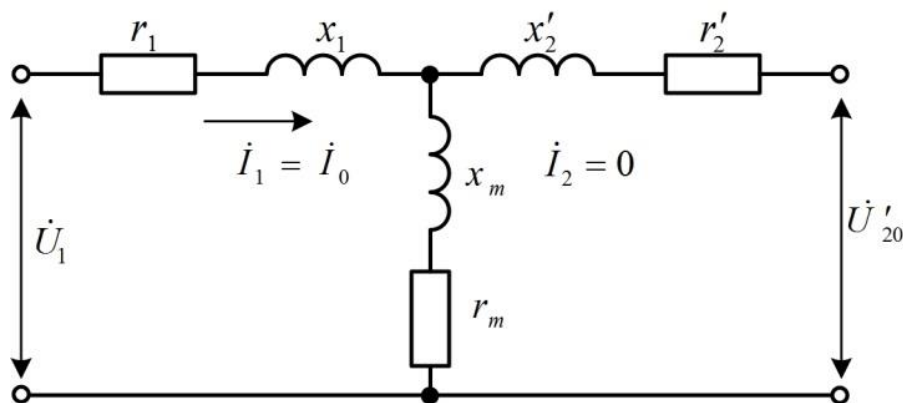


Рисунок 10 - Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Посилання на літературу:

[1], с. 292...297, с. 301...302, с. 308...311, с. 312...317;

[2], с. 76...79, 86...89, с. 101...102;
[4], с. 38...40, с. 56...57, с. 67...69;
[8], с. 34...37, с. 46...49.

Контрольні питання:

- 1 З якою метою параметри і величини вторинної обмотки ТР приводяться до кількості витків первинної обмотки?
- 2 Запишіть формули приведення параметрів і величин вторинної обмотки до кількості витків первинної обмотки і назвати умови приведення параметрів і величин.
- 3 Приведіть основні рівняння приведенного силового ТР в комплексній формі і пояснити величини, що входять в рівняння.
- 4 Приведіть точну електричну схему заміщення силового ТР з урахуванням магнітних втрат.
- 5 Поясніть призначення схеми і фізичний сенс параметрів схеми заміщення.
- 6 Приведіть наближену або спрощену схему заміщення і векторну діаграму силового ТР і назвати всі величини, приведені на схемі. При якому припущенні справедлива така схема заміщення ТР і її призначення.
- 7 Приведіть і поясніть методику розрахунку параметрів схеми заміщення силового ТР за даними досліду х.х. і к.з. або за паспортними даними.
- 8 Пояснити, що значить режим холостого ходу силового трансформатора? З якою метою проводиться дослід холостого ходу трансформатора.
- 9 Пояснити коротко методику проведення досліду х.х. трансформатора. Навести графічні залежності, що називаються характеристиками х.х. силового трансформатора.
- 10 Привести та пояснити приблизний вид характеристик х.х. трансформатора.
- 11 Привести і пояснити схеми заміщення трансформатора в досліді х.х. Пояснити, які опори називають параметрами х.х. і к.з. трансформатора? Їх фізичний сенс.
- 12 Дати визначення коефіцієнту потужності х.х. силового трансформатора. Приблизне його значення при номінальній напрузі?
- 13 Пояснити, на що витрачається активна (P_0) та реактивна (Q_0) потужності, що споживаються трансформатором в режимі х.х.? Навести і пояснити енергетичну діаграму перетворення активної потужності в силовому трансформаторі.
- 14 Пояснити, яка потужність приймається за стандартом за електричні і магнітні втрати в силовому трансформаторі.
- 15 Привести і пояснити рівняння сумарних втрат в трансформаторі при будь-якому навантаженні.
- 16 Що розуміють під коефіцієнтом завантаження трансформатора.
- 17 Наведіть методику визначення параметрів к.з. трансформатора за даними досліду к.з.
- 18 Поясніть, яка потужність за стандартом приймається за потужність електричних втрат трансформатора? З якої причини електричні втрати відносять до змінних втрат трансформатора?
- 19 Дайте визначення, що називається коефіцієнтом потужності к.з. силового трансформатора? Приблизне його значення?

- 20 Поясніть на що витрачається активна (P_k) та реактивна (Q_k) потужності, що споживаються трансформатором в режимі к.з.?
- 21 Дайте визначення, що називається напругою короткого замикання трансформатора? Як напругу к.з. можна виразити в відсотках?
- 22 Назвіть приблизну величину напруги короткого замикання в трансформаторах середньої та малої потужності.
- 23 Представте методику визначення $u_k\%$, його активної $u_{ka}\%$ і реактивної $u_{kr}\%$ складової через параметри к.з. трансформатора?

Тема №6. Енергетика силових трансформаторів

Лекція №10 «Енергетичні показники та коефіцієнт корисної дії силового трансформатора»

Мета: Засвоєння та вивчення характеристик короткого замикання трансформатора та методики визначення енергетичних показників.

Основні питання:

- 10.1 Дослід короткого замикання і аналіз характеристик короткого замикання.
- 10.2 Методика визначення енергетичних показників силового трансформатора за паспортними даними.
- 10.3 Втрати і ККД силового трансформатора.
- 10.4 Методика розрахунку і побудови графіка ККД силового трансформатора.

10.1 Дослід короткого замикання і аналіз характеристик короткого замикання

Коротке замикання трансформатора, це такий режим, коли вторинна обмотка замкнута накоротко ($z_n=0$), при цьому вторинна напруга $U_2 = 0$. В умовах експлуатації, коли до трансформатора підведена номінальна напруга $U_{ном}$, коротке замикання є аварійним режимом і являє собою велику небезпеку для трансформатора.

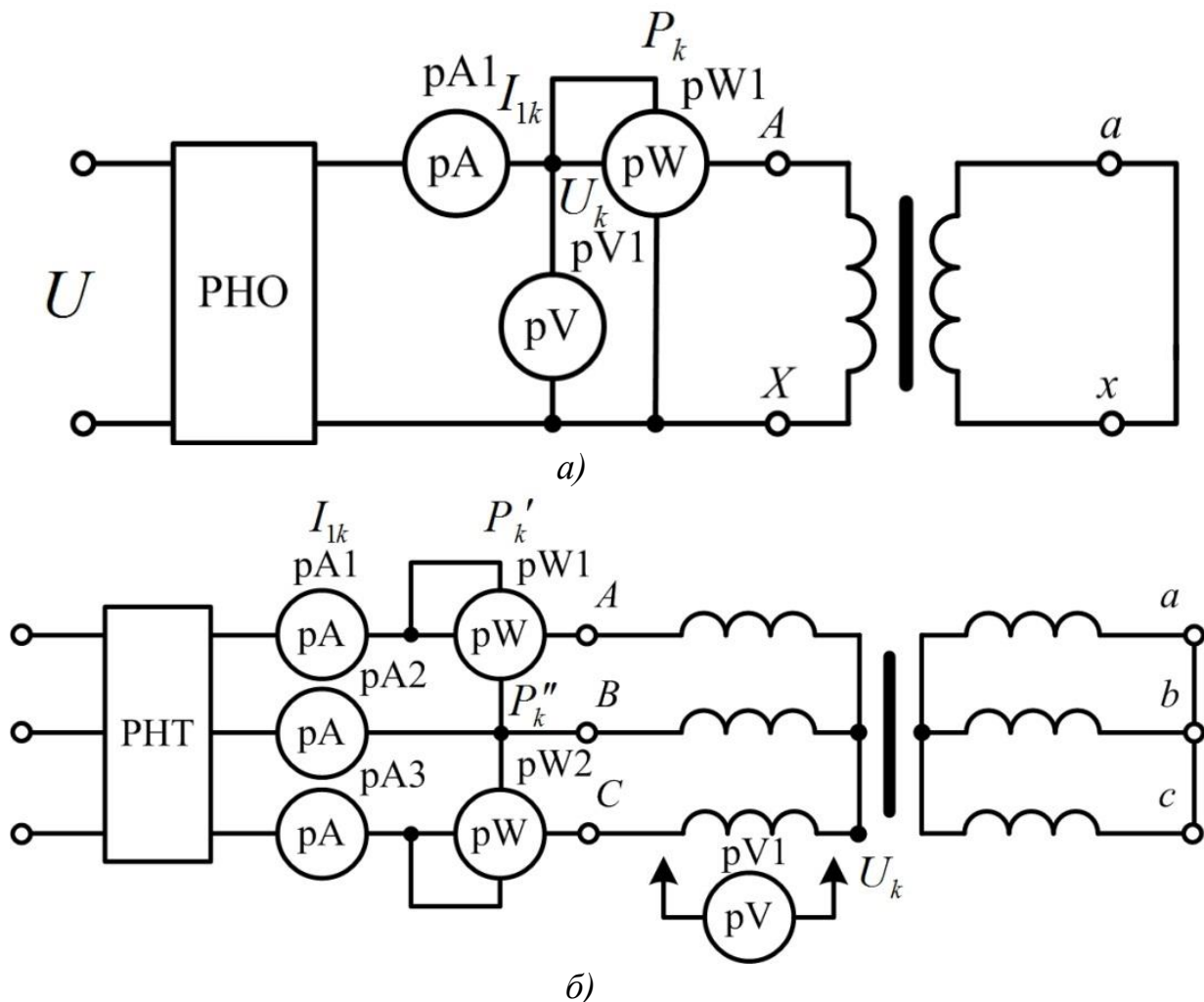


Рисунок 1 - Схеми дослідів к.з. трансформаторів однофазного (а), трифазного (б)

При досліді к.з. обмотку нижчої напруги однофазного трансформатора замикають накоротко (рисунок 1, а), а до обмотки вищої напруги підводять понижену напругу, поступово підвищуючи її регулятором напруги РНО до деякого значення $U_{к.ном}$, при якому струми к.з. в обмотках трансформатора стають рівними номінальним струмам у первинній ($I_{1к} = I_{1ном}$) і вторинній ($I_{2к} = I_{2ном}$) обмотках. При цьому знімають показання приладів і будують характеристики к.з., що представляють собою залежності струму к.з. $I_{1к}$, потужності к.з. P_k і коефіцієнта потужності $\cos \varphi_k$ від напруги к.з. U_k (рисунок 2).

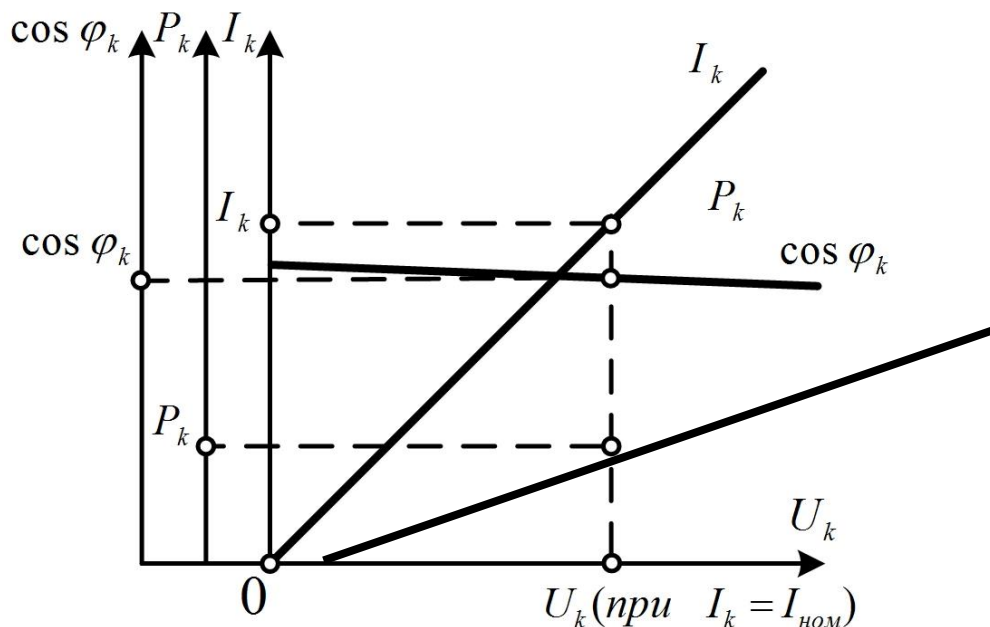


Рисунок 2 - Характеристики к.з. трансформатора

У випадку трифазного трансформатора дослід проводять за схемою, показаної на рисунок 1, б, а значення напруги к.з. і струму к.з. визначають як середні для трьох фаз

$$U_k = (U_{кА} + U_{кВ} + U_{кС}) / 3; \quad (1)$$

$$I_{1к} = (I_{кА} + I_{кВ} + I_{кС}) / 3. \quad (2)$$

Коефіцієнт потужності при досліді к.з.

$$\cos \varphi_k = P_k / (3U_k \cdot I_{1к}) \quad (3)$$

При цьому активну потужність трифазного трансформатора вимірюють методом двох ватметрів. Тоді потужність к.з.

$$P_k = P_k' + P_k'' \quad (4)$$

В (4) P_k' і P_k'' — показання однофазних ватметрів, Вт.

Напруга, при якій струми в обмотках трансформатора при досліді дорівнюють номінальним значенням, називають номінальною напругою короткого замикання і звичайно виражають у % від номінального:

$$u_k = (U_k / U_{1ном}) 100 \quad (5)$$

Для силових трансформаторів $u_k = 5-10\%$ від $U_{1ном}$.

Як впливає з (5), магнітний потік у магнітопроводі трансформатора пропорційний первинній напрузі U_1 . Оскільки ця напруга при досліді к.з. становить не більше 10% від $U_{1ном}$, то таку ж невелике значення має і магнітний

потік. Для створення такого магнітного потоку потрібно настільки малий струм намагнічування, що значенням його можна знехтувати. У цьому випадку рівняння струмів приймає вид

$$\dot{I}_{1k} = -\dot{I}'_{2k}, \quad (6)$$

а схема заміщення трансформаторів для досліду к.з. не містить гілки намагнічування (рисунок 3, а). Для цієї схеми заміщення можна записати рівняння напруг

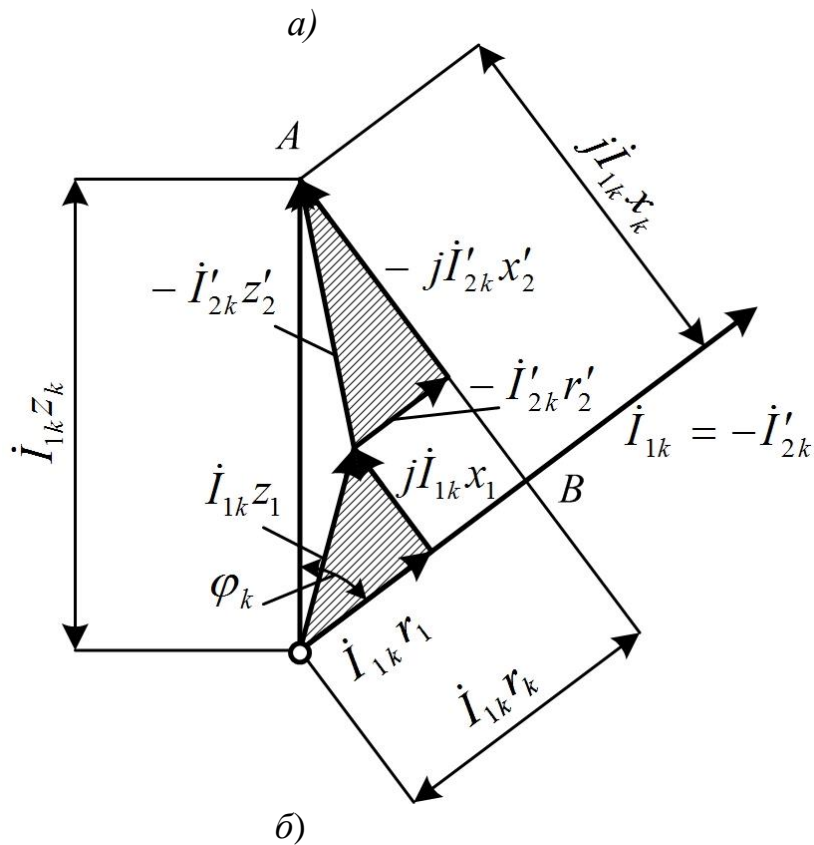
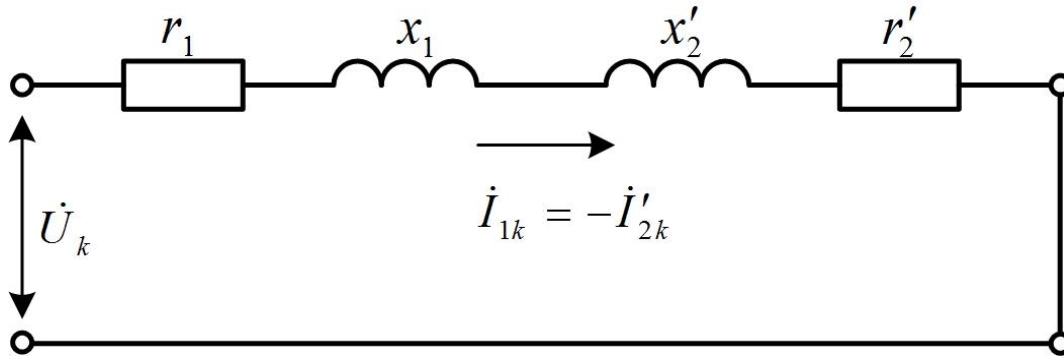


Рисунок 3 - Схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора в режимі к.з.

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{1k} (r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1k} (x_1 + x'_2), \quad (7)$$

або

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{1k} r_k + j\dot{I}_{1k} x_k = \dot{I}_{1k} Z_k. \quad (8)$$

Повний опір трансформатора при досліді к.з.

$$Z_k = r_k + jx_k, \quad (9)$$

де r_k і x_k - активна і індуктивна складова опору к.з. Z_k .

Скориставшись рівняннями струмів (6) і напруг (7), для досліду к.з. побудуємо векторну діаграму трансформатора (рисунок 2, б). Побудова цієї діаграми починають із вектора напруги к.з. $U_k = I_{1k} Z_k$. Потім під кутом φ до до вектора U_k проводять вектор струму к.з. $I_{1k} = -I_{2k}$. Побудувавши вектори падіння напруг в первинній обмотці $I_{1k} r_1$, і $j I_{1k} x_1$, і вектори падіння напруги у вторинній обмотці $-I'_{2k} r'_2$ і $-j I'_{2k} x'_2$, одержують прямокутний трикутник АОВ, що отримав назву трикутника короткого замикання. Сторони цього трикутника будуть:

$$\begin{aligned}\overline{OB} &= \dot{I}_{1k} r_1 + \dot{I}'_{2k} r'_2 = \dot{I}_{1k} r_k = \dot{U}_{k.a.}; \\ \overline{BA} &= \dot{I}_{1k} j x_1 + j \dot{I}'_{2k} x'_2 = \dot{I}_{1k} x_k = \dot{U}_{k.p.}; \\ \overline{OA} &= \dot{I}_{1k} Z_k = \dot{U}_k.\end{aligned}$$

Тут

$$U_k = \sqrt{U_{k.a.}^2 + U_{k.p.}^2}, \quad (10)$$

де $U_{k.a.}$, $U_{k.p.}$ — активна і реактивна складові напруги к.з., В.

Повний, активний і індуктивний опори схеми заміщення при досліді к.з.:

$$z_k = U_k / I_{1k}; \quad (11)$$

$$r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad (12)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (13)$$

Отримані значення опорів r_k і z_k , потужності P_k , коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ і напруги к.з. u_k варто привести до робочої температури обмоток +75 °С:

$$r_{k75} = r_k \left[1 + \alpha (75^\circ - \Theta_1) \right]; \quad (14)$$

$$z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}; \quad (15)$$

$$\cos \phi_{k75} = r_{k75} / z_{k75}; \quad (16)$$

$$u_{k75} = (I_{k75} z_{k75} / U_{1ном}) 100; \quad (17)$$

де r_k - активний опір к.з. при температурі θ_1 ;

$\alpha = 0,004$ - температурний коефіцієнт для міді і алюмінію.

Оскільки при досліді к.з. основний потік Φ_{max} становить усього лише кілька відсотків у порівнянні з його значенням при номінальній первинній напрузі, то магнітними втратами, що викликані цим потоком, можна знехтувати. Отже, можна вважати, що потужність P_k споживана трансформатором під час проведення досліду к.з., іде повністю на покриття електричних втрат в обмотках трансформатора:

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{1k}^2 r'_2 = I_{1k}^2 r_k.$$

Потужність к.з. приводять до робочої температури обмоток +75 °С:

$$P_{k75} = 3 I_{1k}^2 r_{k75}. \quad (18)$$

10.2 Методика визначення енергетичних показників силового трансформатора за паспортними даними

В таблиці 1 наведені рекомендовані значення магнітної індукції B_c в стрижнях силових трансформаторів.

Таблиця 1 – Рекомендовані значення магнітної індукції B_c в стрижнях силових ТР

Марка сталі	Потужність трансформатора S_H , кВА	
	25 – 100	160 – 630
3413, 3414	1,5 – 1,6 Тл	1,6 – 1,7 Тл

До паспортних даних силового трансформатора відносяться:

- номінальна потужність трансформатора S_H , кВА;
- номінальна лінійна напруга обмоток ВН та НН трансформатора U_{1H} та U_{2H} , кВ;
- номінальний струм обмоток ВН та НН трансформатора I_{1H} та I_{2H} , А;
- номінальна частота мережі живлення $f_{1H} = 50$ Гц;
- напруга короткого замикання $u_{k\%}$;
- струм холостого ходу $i_{0\%}$;
- схема та група з'єднання.

Номінальні струми в обмотках ВН та НН трансформатора

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} \quad (19)$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}} \quad (20)$$

Значення активної та реактивної потужності, що споживається трансформатором з мережі при номінальному навантаженні і коефіцієнту потужності

$$\cos \varphi_H = 0,8$$

$$P_{1H} = S_H \cdot \cos \varphi_H \quad (21)$$

$$Q_{1H} = S_H \cdot \sin \varphi_H \quad (22)$$

Силу струму холостого ходу трансформатора в амперах

$$I_0 = \frac{i_{1\%} \cdot I_{1H}}{100} \quad (23)$$

Напруга короткого замикання трансформатора в вольтах

$$U_k = \frac{u_{k\%} \cdot U_{1H}}{100} \quad (24)$$

Значення коефіцієнту потужності трансформатора в режимі холостого ходу та короткого замикання

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_0} \quad (25)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_{1H}} \quad (26)$$

Значення активної та реактивної складової напруги короткого замикання трансформатора у відсотках та вольтах

$$u_{ka\%} = u_{k\%} \cdot \cos \varphi_k; \quad (27)$$

$$u_{kp\%} = u_{k\%} \cdot \sin \varphi_k. \quad (28)$$

Переведення з відносних одиниць в іменовані здійснюється також за формулою

$$U_{ka} = \frac{u_{ka\%} \cdot U_{1H}}{100} \quad (29)$$

$$U_{kp} = \frac{u_{kp\%} \cdot U_{1H}}{100} \quad (30)$$

Сумарні втрати в трансформаторі при номінальному навантаженні

$$\sum p = P_0 + P_{кН} \quad (31)$$

Величина основного магнітного потоку

$$\Phi_m = B_c \cdot \Pi_c \quad (32)$$

де B_c – магнітна індукція в стрижнях силових трансформаторів, Тл.

Π_c – площа перерізу стрижня магнітопроводу, м².

$$\Pi_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 0,92 \quad (33)$$

Число витків обмоток ВН та НН трансформатора визначаємо прийнявши, що $E_{1нф} \cong U_{1нф}$ та $E_{2нф} \cong U_{2нф}$.

$$E_{1НФ} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot W_1 \quad (34)$$

звідки

$$W_1 = \frac{E_{1Н}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m} \quad (35)$$

$$W_2 = \frac{E_{2Н}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m} \quad (36)$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k = \frac{W_1}{W_2}. \quad (37)$$

10.3 Втрати і ККД силового трансформатора

У процесі трансформування електричної енергії частина енергії затрачується в трансформаторі на покриття втрат. Втрати в трансформаторі поділяються на електричні і магнітні.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як відношення активної потужності на виході вторинної обмотки P_2 (корисна потужність) до активної потужності на вході первинної обмотки P_1 (потужність, що підводиться):

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \sum P) / P_1 = 1 - \sum P / P_1 \quad (38)$$

Сумарні втрати $\sum P = P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}$.

Активна потужність на виході вторинної обмотки трифазного трансформатора (Вт)

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2, \quad (39)$$

де $S_{ном} = \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном}$ — номінальна потужність трансформатора, ВА; I_2 і U_2 — лінійні значення струму, А, і напруги В.

З огляду на те, що $P_1 = P_2 + \sum P$, одержуємо вираз для розрахунку ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (40)$$

Аналіз виразу (40) показує, що ККД трансформатора залежить як від величини (β), так і від характеру ($\cos\varphi_2$) навантаження. Ця залежність ілюструється графіками (рисунок 4). Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати рівні електричними: $P_{0ном} = \beta'^2/P_{к.ном}$, звідси значення коефіцієнта навантаження, що відповідає максимальному ККД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0ном}/P_{к.ном}} \quad (41)$$

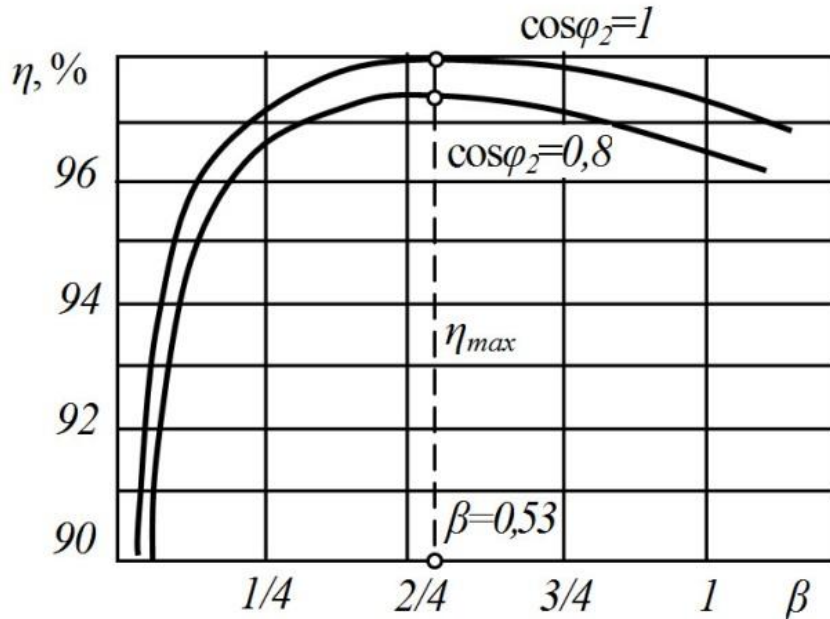


Рисунок 4 - Графік залежності ККД трансформатора від навантаження

Вираз максимального ККД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + 2P_{0ном}} \quad (42)$$

Крім розглянутого ККД по потужності іноді користуються поняттям ККД по енергії, що являє собою відношення кількості енергії, відданої трансформатором споживачеві W_2 (кВт·год) протягом року, до енергії W_1 , отриманої їм від живильної електромережі за цей же час: $\eta = W_2/W_1$. ККД трансформатора по енергії характеризує ефективність експлуатації трансформації.

10.4 Методика розрахунку і побудови графіка ККД силового трансформатора

Високі значення ККД трансформаторів не дозволяють визначити його з достатньою мірою точності шляхом безпосереднього виміру потужностей P_1 та P_2 , тому його обчислюють непрямим методом по значенню втрат потужностей.

Згідно вимогам ДСТУ, втрати потужності в трансформаторі визначають за даними дослідів холостого ходу та короткого замикання. Отриманий результат має високу точність, так як при вказаних дослідів трансформатор не віддає потужність навантаженню. Отже, вся потужність, що поступає в первинну обмотку, витрачається на компенсацію втрат, що є в трансформаторі.

ККД трансформатора має максимальне значення при такому навантаженні, при якому змінні втрати P_k дорівнюють постійним втратам P_0 .

$$P_0 = \beta^2 \cdot P_k. \quad (43)$$

Рівняння для розрахунку ККД силового трансформатора за паспортними даними має вигляд

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{kH}}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{kH}} \quad (44)$$

Коефіцієнт завантаження трансформатора при якому ККД трансформатора максимальний

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \quad (45)$$

Розрахувати та побудувати графіки ККД силового трансформатора $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 1$ (активне навантаження) та $0,8$ (індуктивне навантаження) з обов'язковим розрахунком значень номінального та максимального ККД трансформатора (η_{max} , η_n)

Дані розрахунків ККД трансформатора наводяться у таблиці 1 та 2.

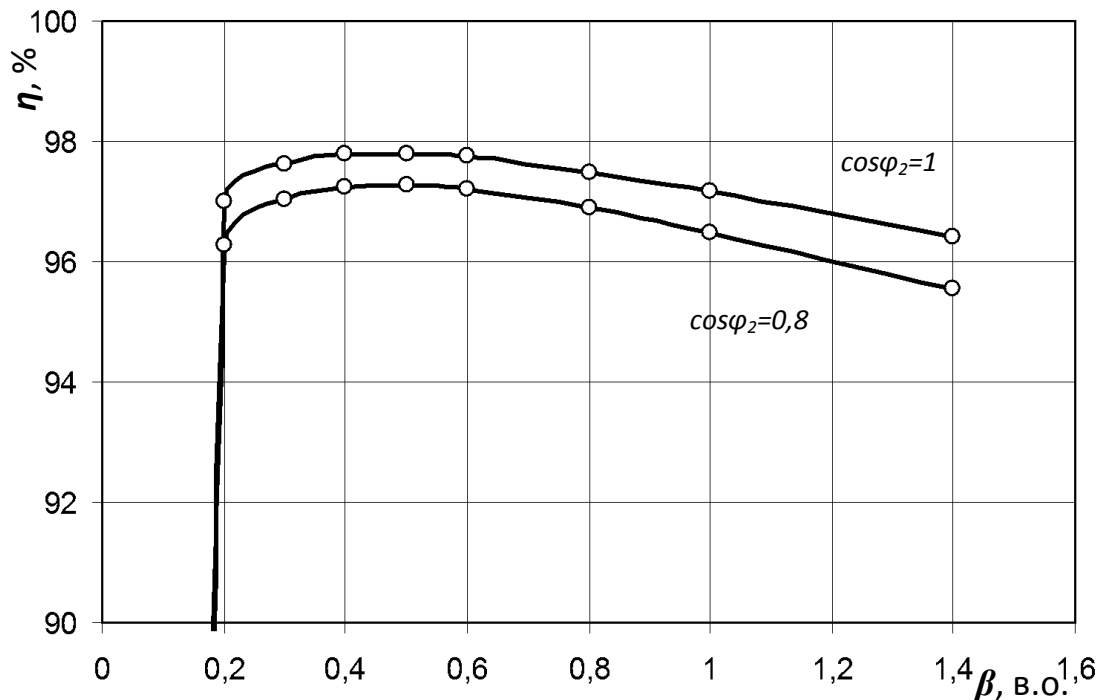


Рисунок 5 – Залежність ККД трансформатора η від навантаження β при різних $\cos \varphi_2$

Таблиця 1 – Залежність η від β при $\cos \varphi_2 = 1$

β	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,4
η									

Таблиця 2 – Залежність η від β при $\cos \varphi_2 = 0,8$

β	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,4
η									

У силових трансформаторів максимальний ККД зазвичай при навантаженні трансформатора 60-70 % від номінального. Зазначенні значення β отримані при проектуванні трансформаторів на мінімум приведених витрат (на їх придбання та експлуатацію). Найбільш вірогідне навантаження трансформатора відповідає $\beta=0,5\dots0,7$. В трансформаторах максимум ККД виражений порівняно слабо, тобто він зберігає високе значення в достатньо широкому діапазоні зміни навантаження ($0,4 < \beta < 1,5$). При зменшенні $\cos\varphi$ ККД знижується, так як зростають струми I_1 та I_2 , при яких трансформатор має задану потужність S_2 . Рівняння для визначення сумарних втрат в трансформаторі при будь-якому навантаженні

$$\sum p = P_0 + \beta^2 \cdot P_{кн} \quad (11)$$

Таблиця 2 – Залежність сумарних втрат в трансформаторі при зміні навантаження

β , в.о.	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,4
P_0 , Вт									
$P_{к} = \beta^2 \cdot P_{кн}$, Вт	0								
$\sum p$, Вт									

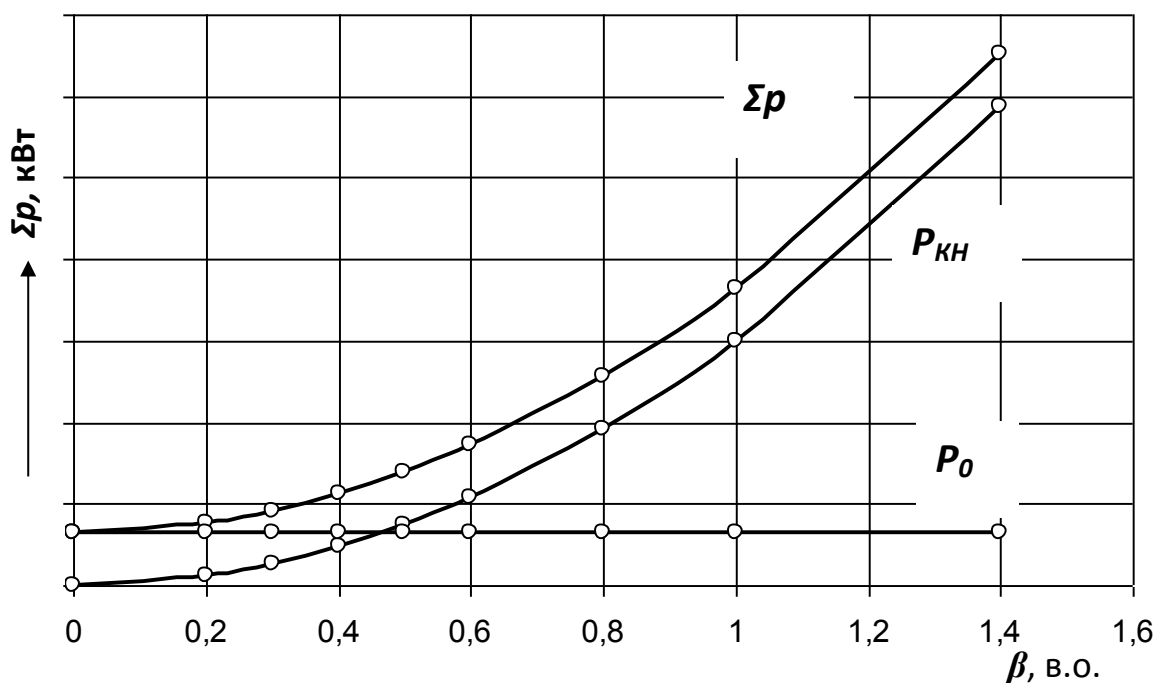


Рисунок 6 - Залежність сумарних втрат в трансформаторі при будь-якому навантаженні

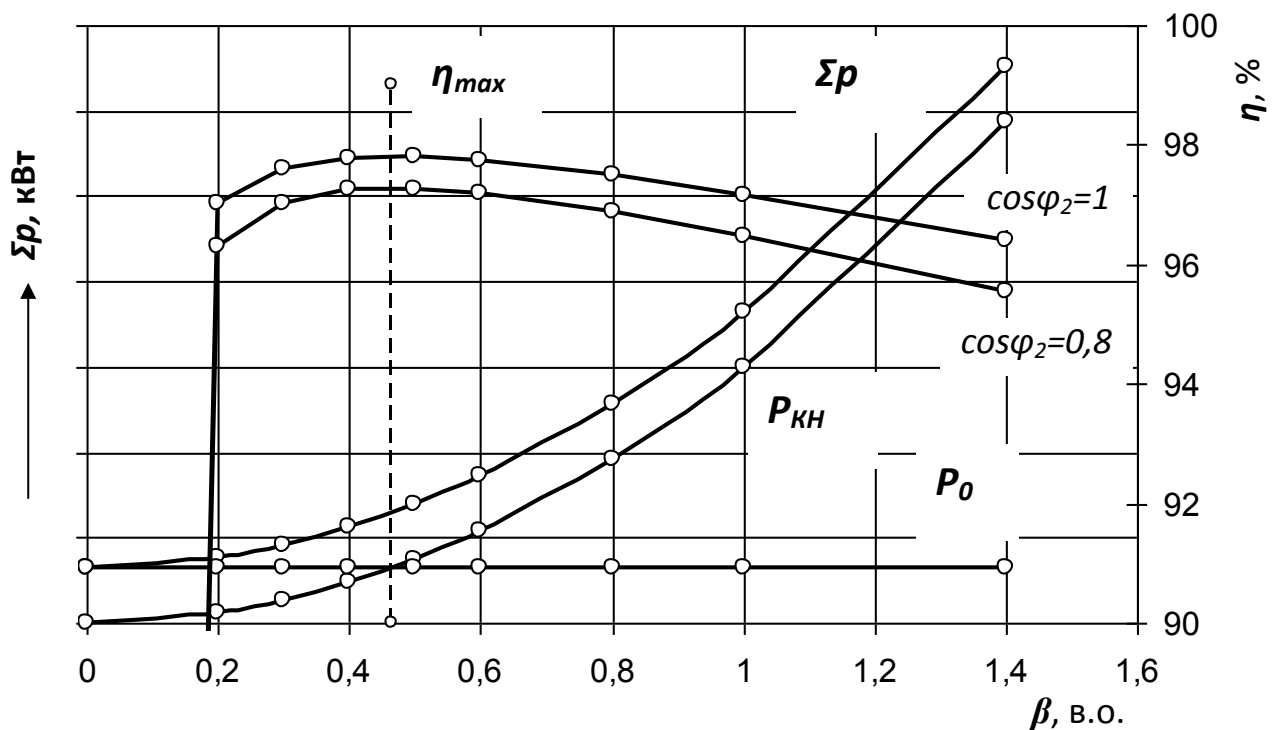


Рисунок 7 – Залежність ККД та сумарних втрат трансформатора від навантаження. Визначення максимального ККД та відповідного йому навантаження

Посилання на літературу:

- [1], с. 292...297, с. 301...302, с. 308...311, с. 312...317;
- [2], с. 76...79, 86...89, с. 101...102;
- [4], с. 38...40, с. 56...57, с. 67...69;
- [8], с. 34...37, с. 46...49.

Контрольні питання:

1. Пояснити, що означає режим навантаження силового трансформатора. Назвати особливості і властивості силового трансформатора в режимі навантаження.
2. Навести і пояснити енергетичну діаграму перетворення активної потужності в силовому трансформаторі. Назвати всі величини на діаграмі і привести рівняння для їх розрахунку.
3. Навести рівняння ККД силового трансформатора через втрати і пояснити, як розрахувати і побудувати графік ККД трансформатора за паспортними даними при заданому коефіцієнті потужності навантаження.
4. Навести і пояснити графік ККД силового трансформатора при різних коефіцієнтах потужності.
5. Назвати і записати умову отримання максимального ККД трансформатора.

Тема №7. Режими роботи силових трансформаторів

Лекція №11 «Режими роботи і робочі характеристики силового трансформатора»

Мета: Засвоєння особливостей режимів роботи силових трансформаторів.

Основні питання:

11.1 Режим холостого ходу силового трансформатора.

11.2 Режим навантаження силового трансформатора.

11.3 Робочі характеристики силового трансформатора.

11.1 Режим холостого ходу силового трансформатора.

Припустимо, що до первинної обмотки трансформатора підведена синусоїдальна напруга. При цьому потік у магнітопроводі також буде синусоїдальним: $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$. Однак внаслідок насичення магнітний потік трансформатора не пропорційний струму, що намагнічує. Тому при синусоїдальному потоці Φ струм, що намагнічує є несинусоїдальним. Для визначення форми кривої цього струму $i_{0p} = f(t)$ скористаємося кривою намагнічування магнітопроводу $\Phi = f(i_{0p})$ і графіком зміни потоку $\Phi = f(t)$.

На рисунку 1, а приведено побудову графіка струму що намагнічує $i_0 = f(t)$. Тут у лівому верхньому квадранті показана синусоїдальна крива $\Phi = f(t)$, а у верхньому правому квадранті - крива намагнічування $\Phi = f(i_{0p})$ матеріалу магнітопроводу. Побудову графіку струму що намагнічує $i_0 = f(t)$, розташованого в правому нижньому квадранті, виконують наступним чином. На графіку $\Phi = f(t)$ вибирають ряд точок 1, 2, 3, проєктують їх на криву намагнічування і визначають величину струму, що намагнічує, який відповідає обраним значенням магнітного потоку. Потім проводять вертикальні лінії через точки 1, 2, 3 на вісі i_{0p} у правий нижній квадрант до перетину з горизонтальними лініями, проведеними із точок 1, 2, 3 на вісі часу цього квадранта, і одержують геометричне місце точок кривої струму, що намагнічує, $i_0 = f(t)$. Із зроблених побудов видно, що при синусоїдальній формі кривої $\Phi = f(t)$ струм що намагнічує має шпильясту форму. З метою спрощення побудов в даному випадку скористалися кривою намагнічування $\Phi = f(i_{0p})$, побудованої без врахування впливу гістерезису.

Після розкладання несинусоїдальної кривої струму i_{0p} на синусоїдальні складові (рисунок 1, б) видно, що в цьому струмі крім основної (першої) гармоніки i_{0p1} яскраво виражена третя гармоніка i_{0p3} .

Так, у трансформаторі з магнітопроводом з високолегованої сталі при індукції $B = 1,4 \text{ Тл}$ амплітуда третьої гармоніки складає приблизно 30% амплітуди основної гармоніки струму що намагнічує. Вище викладене відноситься лише до реактивної складової струму х.х., оскільки активна складова i_{0a} є синусоїдальною. Зазвичай i_{0a} не перевищує 10% від I_0 , тому з деяким наближенням можна прийняти, що крива струму х.х. $i_0 = f(t)$ не відрізняється від кривої $i_{0p} = f(t)$.

З рівнянь струмів третьої гармоніки в трифазній системі

$$\left. \begin{aligned} i_{A3} &= I_{3max} \sin 3\omega t; \\ i_{B3} &= I_{3max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3max} \sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3max} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{3max} \sin 3\omega t; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

видно, що ці струми в будь-який момент часу збігаються по фазі, тобто мають однаковий напрямок. Цей же висновок поширюється на всі вищі гармоніки струму кратні трьом, - 3, 9, 15 і т.д. Ця обставина впливає на процеси, що супроводжують намагнічування осердя при трансформуванні трифазного струму.

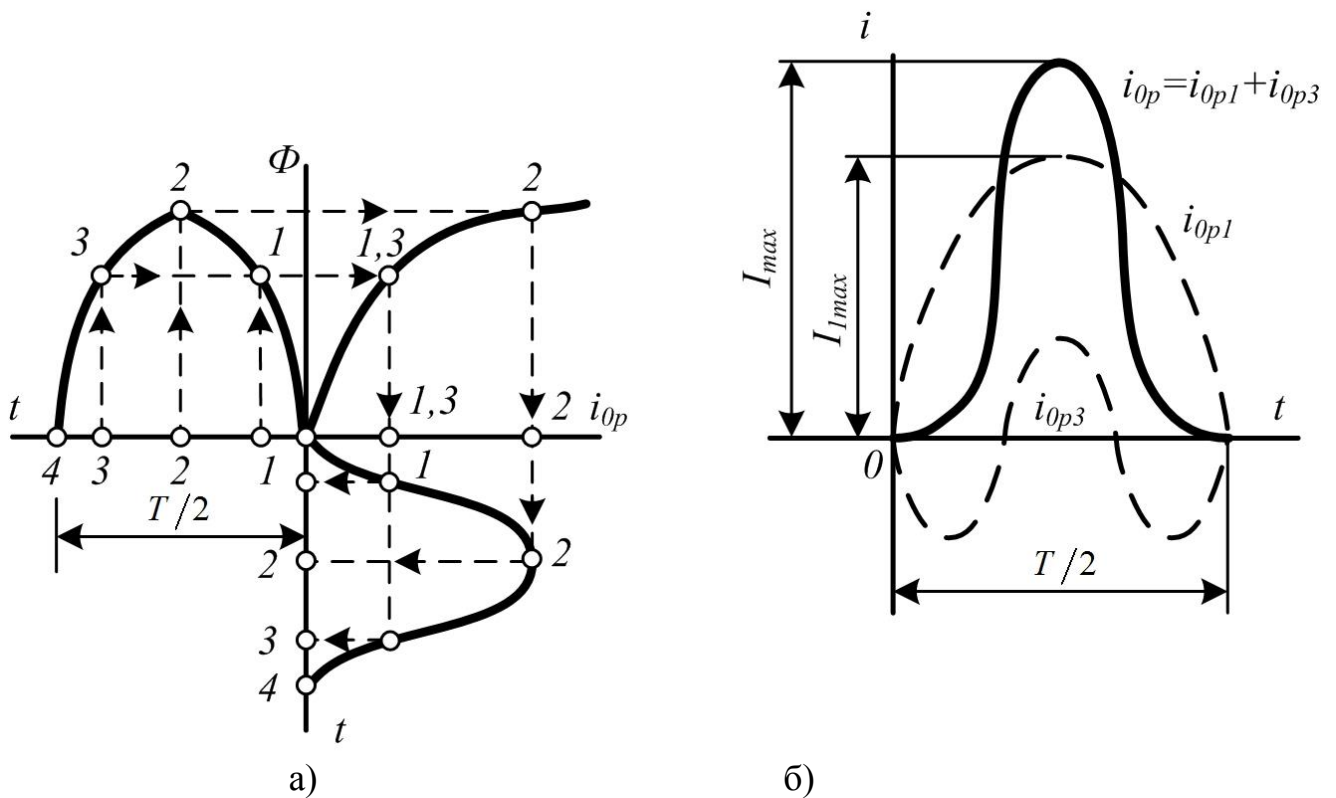
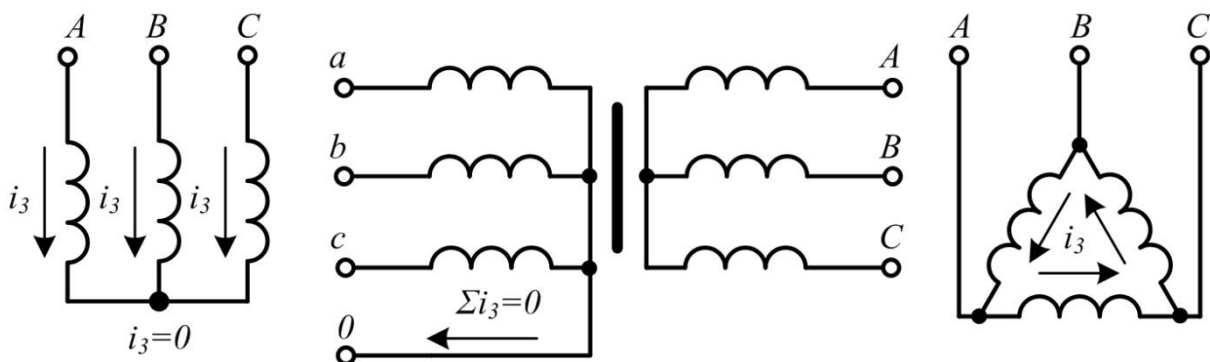


Рисунок 1 - Побудова графіка струму що намагнічує (а) і розкладання його на складові (б)

Розглянемо особливості режиму холостого ходу трифазних трансформаторів для деяких схем з'єднання обмоток.

З'єднання Y/Y-0. Якщо напругу підводить із боку обмоток, з'єднаних зіркою без нульового виводу (рисунок 2, а), то струми третьої гармоніки (і кратні трьом - 9, 15 і т.д.), збігаються по фазі у всіх трьох фазах і дорівнюють нулю.



а)

б)

в)

Рисунок 2 - Напрямок струмів третьої гармоніки для різних схем з'єднання обмоток

Пояснюється це відсутністю нульового проводу, а отже, відсутністю виходу з нульової точки. В результаті струми третьої і кратні третій гармоніки будуть взаємно компенсуватися і струм, що намагнічує, трансформатора виявиться синусоїдальним, але магнітний потік у магнітопроводі буде несинусоїдальним (сплющеним) з явно вираженим потоком третьої гармоніки Φ_3 (рисунок 3). Потоки третьої гармоніки не можуть замкнутися в тристрижневому магнітопроводі, оскільки збігаються по фазі, тобто спрямовані зустрічно. Ці потоки замикаються через повітря (масло) і металеві стінки бака (рисунок 4). Великий магнітний опір потоку Φ_3 послаблює його величину, тому наведена потоками Φ_3 у фазних обмотках ЕРС третьої гармоніки невелика і звичайно їх амплітуда не перевищує 5-7% від амплітуди основної гармоніки. На практиці потік Φ_3 враховують лише з погляду втрат від вихрових струмів, що індукуються цим потоком у стінках бака. Наприклад, при індукції в стрижні магнітопроводу порядку 1,4 Тл втрати від вихрових струмів у баку становлять близько 10% від втрат у магнітопроводі, а при індукції 1,6 Тл ці втрати зростають до 50-65%.

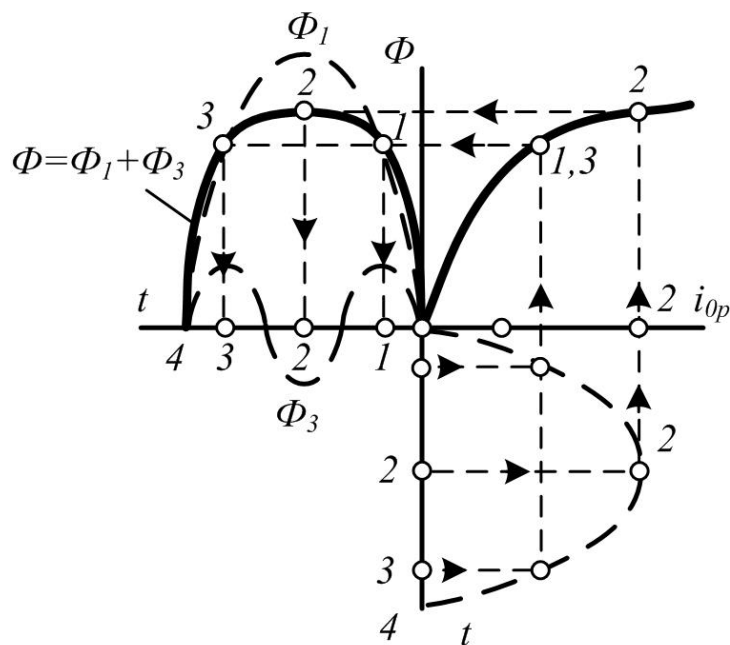


Рисунок 3 - Побудова графіка магнітного потоку при синусоїдальній формі струму, що намагнічує

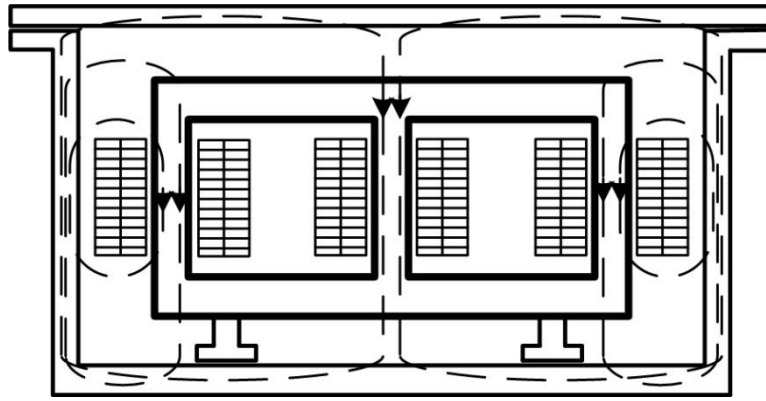


Рисунок 4 - Шляхи замикання магнітних потоків третьої гармоніки в трьохстрижневому магнітопроводі

У випадку трансформаторної групи, що складається із *трьох однофазних трансформаторів*, магнітопроводи окремих фаз магнітно не зв'язані, тому магнітні потоки третьої гармоніки всіх трьох фаз без перешкод замикаються (потік кожної фази замикається у своєму магнітопроводі). При цьому значення потоку Φ_3 може досягати 15-20% від Φ_1 . Несинусоїдальний магнітний потік Φ , що містить крім основної гармоніки Φ_1 ще і третю Φ_3 ,

$$\Phi = \Phi_1 \sin \omega t + \Phi_3 \sin 3\omega t \quad (2)$$

наводить у фазних обмотках несинусоїдальну ЕРС

$$e = -w d\Phi / dt = \omega w \Phi_1 \sin(\omega t - \pi / 2) + 3\omega w \Phi_3 \sin(3\omega t - \pi / 2) = e_1 + e_3. \quad (3)$$

Підвищена частота 3ω магнітного потоку Φ_3 приводить до появи значної ЕРС e_3 , що різко збільшує амплітудне значення фазної ЕРС обмотки при тому ж діючому її значенні (рисунок 4), що створює несприятливі умови для електричної ізоляції обмоток.

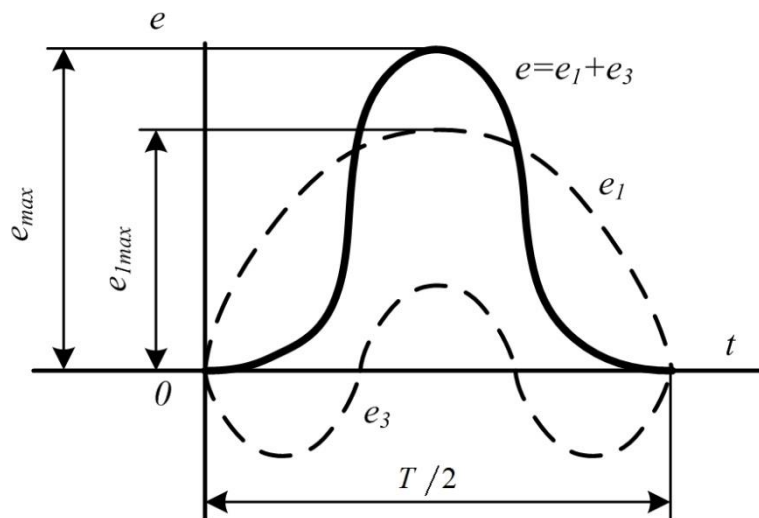


Рисунок 5 - Форма графіка фазної ЕРС трансформаторної групи при з'єднанні обмоток Y/Y

Амплітуда ЕРС третьої гармоніки в трансформаторній групі може досягати 45-65% від амплітуди основної гармоніки. Однак слід зазначити, що лінійні ЕРС (напруги) залишаються синусоїдальними і не містять третьої гармоніки,

тому що при з'єднанні обмоток зіркою фазні ЕРС e_{3A} , e_{3B} і e_{3C} , збігаючись по фазі, не створюють лінійної ЕРС. Пояснюється це тим, що лінійна ЕРС при з'єднанні обмоток зіркою визначається різницею фазних ЕРС. Так, для основної гармоніки (рисунок 5, а) лінійна ЕРС

$$\dot{E}_{1AB} = -\dot{E}_{1A} + \dot{E}_{1B} = \sqrt{3}\dot{E}_{1A}.$$

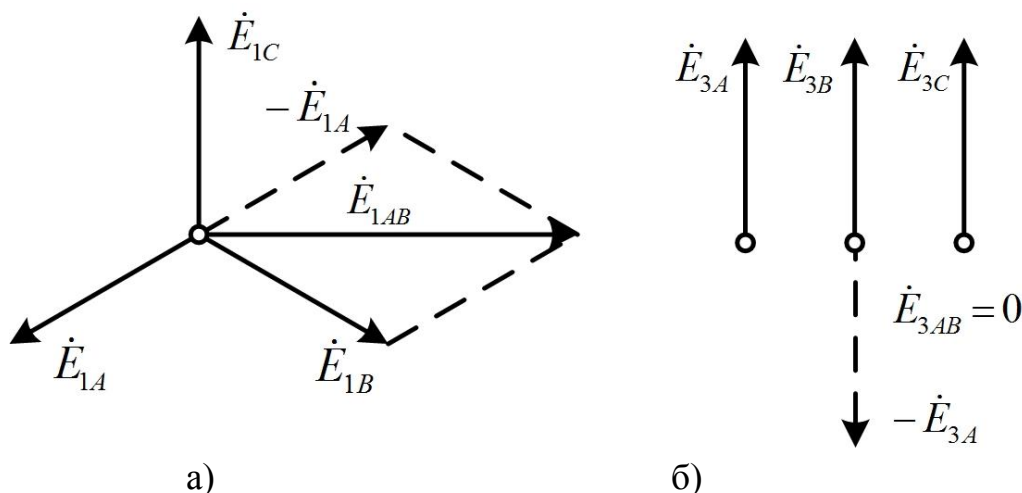


Рисунок 6 - Векторні діаграми ЕРС основної (а) і третьої (б) гармонік трифазного трансформатора

Що ж стосується лінійної ЕРС третьої і кратних трьом гармонік, то через збіг по фазі фазних ЕРС цих гармонік (рисунок 5, б) одержимо

$$\dot{E}_{3AB} = \dot{E}_{3B} - \dot{E}_{3A} = 0.$$

Якщо **первинна обмотка трансформатора є обмоткою НН і її нульовий вивід приєднаний до нульового виводу генератора**, то струми, що намагнічують містять треті гармоніки. Ці струми збігаються по фазі, а тому всі вони спрямовані або від трансформатора до генератора, або навпаки. У нульовому проводі буде протікати струм, рівний $3i_3$, при цьому магнітний потік трансформатора, а отже, і ЕРС у фазах будуть синусоїдальні.

З'єднання, при яких обмотки будь-якої сторони трансформатора (НН або ВН) з'єднані в трикутник є найбільш бажаними, тому що вони позбавлені недоліків розглянутих вище схем.

Допустимо, що **в трикутник з'єднані первинні обмотки трансформатора**. Тоді струм третьої гармоніки безперешкодно замикається в замкнутому контурі фазних обмоток, з'єднаних у трикутник (див. рисунок 3, в). Але якщо струм, що намагнічує, містить третю гармоніку, то магнітні потоки в стрижнях, а отже, і ЕРС у фазах практично синусоїдальні.

Якщо ж **вторинні обмотки трансформатора з'єднані в трикутник, а первинні у зірку**, то ЕРС третьої гармоніки, наведені у вторинних обмотках, створюють в замкнутому контурі трикутника струм третьої гармоніки. Цей струм створює в магнітопроводі магнітні потоки третьої гармоніки Φ_{23} , спрямовані зустрічно потокам третьої гармоніки від струму, що намагнічує, Φ_{13} (за правилом Ленца). У підсумку результуючий потік третьої гармоніки $\dot{\Phi}_{рез3} = \dot{\Phi}_{13} - \dot{\Phi}_{23}$ значно послаблюється і практично не впливає на властивості трансформаторів.

Основний магнітний потік Φ є змінним, а тому магнітопровід трансформатора піддається систематичному перемагнічуванню. Внаслідок цього в магнітопроводі трансформатора мають місце магнітні втрати від гістерезису і вихрових струмів, що наводяться змінним магнітним потоком у пластинах електротехнічної сталі. Потужність магнітних втрат еквівалентна активній складовій струму х.х. Таким чином, струм х.х. має дві складові: реактивну I_{0p} , - представляє собою струм, що намагнічує, і активну I_{0a} , обумовлену магнітними втратами

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (4)$$

Зазвичай активна складова струму х.х. невелика і не перевищує 0,10 від I_0 , тому вона суттєво не впливає на струм х.х.

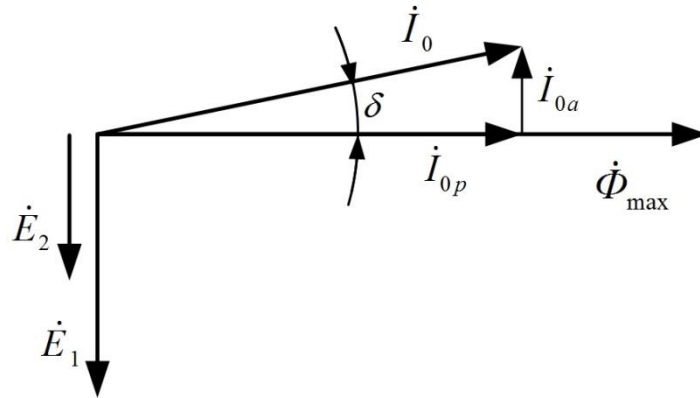


Рисунок 7 - Розкладання струму х.х. трансформатора на складові

На рисунку 7 представлена векторна діаграма, на якій зображені вектори струму х.х. I_0 і його складові I_{0a} і I_{0p} . Кут δ , на який вектор основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\max}$ відстає по фазі від струму \dot{I}_0 , називають **кутом магнітних втрат**. Неважко помітити, що цей кут збільшується з ростом активної складової струму х.х. \dot{I}_{0a} , тобто з ростом магнітних втрат у магнітопроводі трансформатора.

Сила струму х.х. у трансформаторах великої і середньої потужності відповідно становить 2-10% від номінального первинного струму.

11.2 Режим навантаження силового трансформатора

Скориставшись схемою заміщення приведенного трансформатора і основними рівняннями напруг і струмів, побудуємо векторну діаграму трансформатора, що наочно показує співвідношення і фазові зсуви між струмами, ЕРС і напругами трансформатора. Векторна діаграма - графічне вираження основних рівнянь приведенного трансформатора.

Побудову діаграми (рисунок 7, а) варто починати з вектора максимального значення основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\max} = E_1 / (4,44 f w_1)$.

Вектор струму \dot{I}_0 випереджає по фазі вектор потоку $\dot{\Phi}_{\max}$ на кут δ , а вектори ЕРС \dot{E}_1 , і \dot{E}_2' відстають від цього вектора на кут 90° . Далі будуємо вектор \dot{I}_2' . Для визначення кута зсуву фаз між \dot{E}_2' і \dot{I}_2' треба знати характер навантаження. Припустимо, що навантаження трансформатора активно-

індуктивне. Тоді вектор \dot{I}'_2 відстає по фазі від \dot{E}'_2 на кут, обумовлений як характером зовнішнього навантаження, так і власними опорами вторинної обмотки

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_n}{r'_2 + r'_n}. \quad (5)$$

Для побудови вектора вторинної напруги \dot{U}'_2 необхідно з вектора ЕРС \dot{E}'_2 відняти вектори спадань напруги $j\dot{I}'_2 x'_2$ і $\dot{I}'_2 r'_2$. Із цією метою з кінця вектора \dot{E}'_2 опускаємо перпендикуляр на напрямок вектора струму \dot{I}'_2 і відкладаємо на ньому вектор $-j\dot{I}'_2 x'_2$. Потім проводимо пряму, паралельну \dot{I}'_2 , і на ній відкладаємо вектор $-\dot{I}'_2 r'_2$. Побудувавши вектор $-\dot{I}'_2 Z'_2$, одержимо трикутник внутрішніх спадань напруги у вторинному колі. Потім із цієї точки проводимо вектор $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$, що випереджає по фазі струм \dot{I}'_2 на кут $\varphi_2 = \arctg(x'_n/r'_n)$.

Вектор первинного струму будуюмо як векторну суму: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$. Вектор $-\dot{I}'_2$ проводимо з кінця вектора \dot{I}_0 протилежно вектору \dot{I}'_2 .

Побудуємо вектор $\dot{U}_1 = -\dot{E}'_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$, для чого до вектора $-\dot{E}'_1$, що випереджає по фазі вектор потоку Φ_{max} на 90° , додаємо вектори внутрішніх спадань напруги первинної обмотки: вектор $\dot{I}_1 r_1$, паралельний струму \dot{I}_1 , і вектор $j\dot{I}_1 x_1$, що випереджає вектор струму \dot{I}_1 на кут 90° . З'єднавши точку О з кінцем вектора $\dot{I}_1 Z_1$, одержимо вектор \dot{U}_1 , що випереджає по фазі вектор струму \dot{I}_1 , на кут φ_1 .

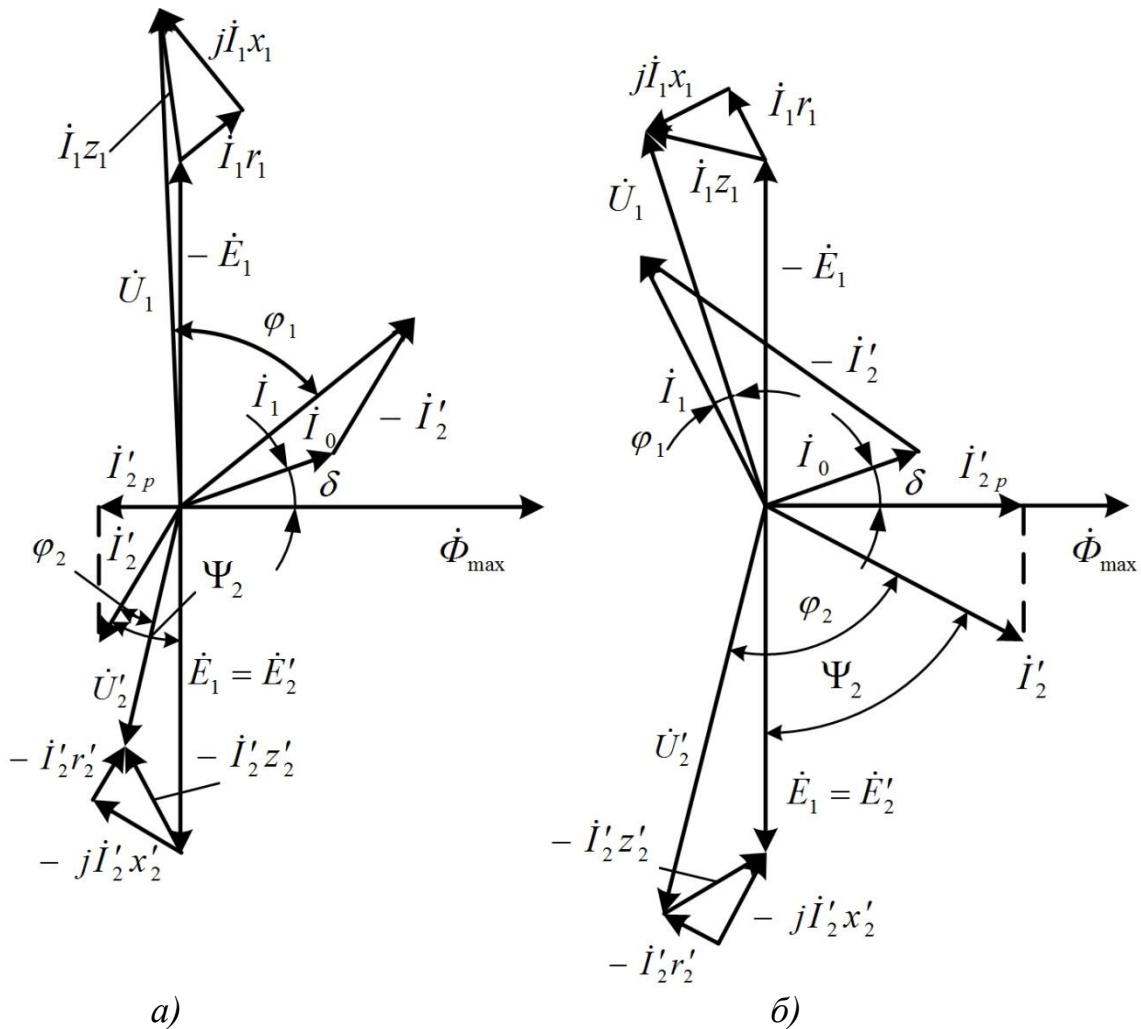


Рисунок 8 - Векторні діаграми трансформатора при активно індуктивному (а) і активно-ємнісному (б) навантаженнях

Іноді векторну діаграму трансформатора будують із метою визначення ЕРС обмоток. У цьому випадку заданими є параметри вторинної обмотки: U_2 , I_2 і $\cos\varphi_2$. Знаючи w_1/w_2 , визначають \dot{U}'_2 і \dot{I}'_2 а потім будують вектори цих величин під фазовим кутом φ_2 одне від одного. Вектор ЕРС $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ одержують геометричним додаванням вектора напруги \dot{U}'_2 із падіннями напруги у вторинній обмотці

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2.$$

У випадку активно-ємнісного навантаження векторна діаграма трансформатора має вигляд, показаний на рисунку 7, б. Порядок побудови діаграми залишається таким же, але вид її дещо змінюється. Струм \dot{I}'_2 у цьому випадку випереджає по фазі ЕРС \dot{E}'_2 на кут

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 - x'_n}{r'_2 + r'_n}. \quad (8)$$

При значній ємнісній складовій навантаження падіння напруги в ємнісних складових опору навантаження і індуктивне падіння напруги розсіювання у вторинній обмотці частково компенсують одне одного. У результаті напруга \dot{U}'_2 може виявитися більше, ніж ЕРС \dot{E}'_2 . Крім того, реактивна

(випереджувальна) складова вторинного струму $\dot{I}'_{2p} = \dot{I}'_2 \sin \psi_2$ збігається по фазі з реактивною складовою струму х.х. \dot{I}_{0p} , тобто підмагнічує магнітопровід трансформатора.

Це веде до зменшення первинного струму \dot{I}_1 , у порівнянні з його значенням при активно-індуктивному навантаженні, коли впливає складова \dot{I}'_{2p} (рисунок 7, а).

Векторна діаграма навантаженого трансформатора (див. рисунок 7) наочно показує співвідношення між параметрами трансформатора. Через складність ця діаграма не може бути використана для практичних розрахунків. Для спрощення діаграми і надання їй практичного значення в силових трансформаторах, що працюють із навантаженням, близьким до номінального, зневажають струмом х.х. і вважають, що $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$. Отримана в цьому випадку помилка цілком припустима, тому що струм I_0 у порівнянні зі струмами I_1 і I_2 невеликий. При зробленому допущенні схема заміщення трансформатора набуває спрощеного виду, так як не має гілки намагнічування і складається тільки з послідовних ділянок $r_k = r_1 + r'_2$ і $x_k = x_1 + x'_2$ (рисунок 8, а).

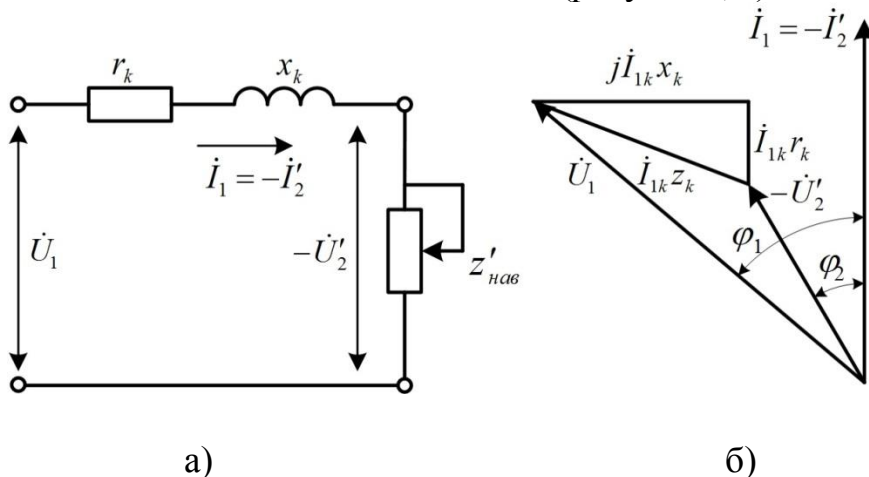


Рисунок 9 - Спрощена схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора

Відповідно до спрощеної схеми заміщення побудована і спрощена векторна діаграма (рисунок 8, б), у якій прямокутний трикутник ABC являє собою трикутник к.з., сторони якого відповідно рівні:

$$BC = I_1 r_k; CA = I_1 Z_k; AB = I_1 x_k$$

Спрощену векторну діаграму трансформатора будують за заданим значенням напруги $U_{1ном}$, струму $I_{1ном}$, коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{2ном}$ і параметрам трикутника к.з. U_k , $U_{кА}$ і $U_{кР}$.

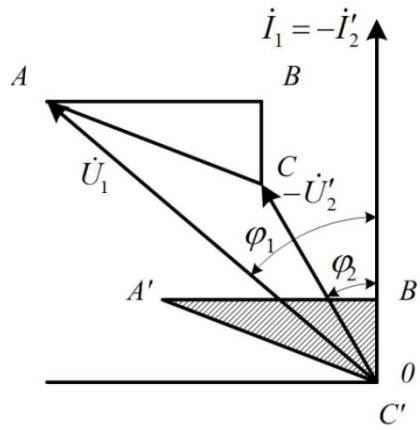


Рисунок 10 - Побудова спрощеної векторної діаграми

Порядок побудови спрощеної векторної діаграми наступний (рисунок 10). На осі ординат будують вектор струму $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$, потім під кутом φ_2 будують вектор напруги $-\dot{U}'_2$. Трикутник к.з. $A'B'C'$ будують таким чином, щоб точка C' співпала із точкою початку координат, а катет $C'B'$ - з віссю ординат. Потім цей трикутник переносять, сполучаючи точку C з кінцем вектора $-\dot{U}'_2$, залишаючи сторони паралельними вихідному трикутнику $A'B'C'$. Одержують трикутник ABC . Після цих побудов з початку вісі координат (точка 0) проводять вектор первинної (фазної) напруги \dot{U}_1 і визначають кут фазового зсуву φ_1 між первинним струмом \dot{I}_1 , і первинною напругою \dot{U}_1 .

10.3 Робочі характеристики силового трансформатора

При коливаннях навантаження трансформатора його вторинна напруга U'_2 міняється. У цьому можна переконається, скориставшись спрощеною схемою заміщення трансформатора (див. рисунок 9), з якої видно, що $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1ном} - \dot{I}_1 Z_k$.

Зміна вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження від х.х. до номінальної є найважливішою характеристикою трансформатора і визначається виразом

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{1ном} - U'_2}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (9)$$

Для визначення $\Delta U_{ном}$ скористаємося спрощеною векторною діаграмою трансформатора, зробивши на ній наступні додаткові побудови (рисунок 10.). Із точки А опустимо перпендикуляр на продовження вектора $-\dot{U}'_2$, одержимо точку D. З деяким допущенням будемо вважати, що відрізок \overline{BD} являє собою різницю

$$\dot{U}_{1ном} - \dot{U}'_2 = \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD},$$

де $\overline{BF} = U_{k.a.} \cos \varphi_2$; $\overline{FD} = U_{k.p.} \sin \varphi_2$, тоді

$$U_{1ном} - U'_2 = U_{k.a.} \cos \varphi_2 + U_{k.p.} \sin \varphi_2. \quad (10)$$

Вимір вторинної напруги прийме вид

$$\Delta U_{ном} = (U_{k.a.} \cos \varphi_2 + U_{k.p.} \sin \varphi_2) 100 / U_{1ном}. \quad (11)$$

Позначимо $(U_{ka}/U_{1ном})100=U_{ka}$; $(U_{kp}/U_{1ном})100=U_{kp}$, тоді вираз зміни вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження прийме вид

$$\Delta U_{ном} = u_{k.a.} \cos \varphi_2 + u_{k.p.} \sin \varphi_2. \quad (12)$$

Вираз (12) дає можливість визначити зміну вторинної напруги лише при номінальному навантаженні трансформатора. При необхідності розрахунку значення вторинної напруги для будь-якого навантаження у вираз (12) варто ввести коефіцієнт завантаження, що представляє собою відносне значення струму навантаження $\beta=I_2/I_{2ном}$

$$\Delta U = \beta(u_{k.a.} \cos \varphi_2 + u_{k.p.} \sin \varphi_2). \quad (13)$$

З виразу (13) видно, що зміна вторинної напруги ΔU залежить не тільки від величини навантаження трансформатора (β), але і від характеру цього навантаження (φ_2).

На рисунку 12, а представлений графік залежності $\Delta U = f(\varphi_2)$ при $\cos \varphi_2 = const$, а на рисунку 11, б – графік $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = const$. На цих графіках значення ΔU при роботі трансформатора з ємнісним навантаженням відповідають підвищенню напруги при переході від режиму х.х. до навантаження. Маючи на увазі, що $u_{k.a.} = u_k \cos \varphi_k$, $u_{k.p.} = u_k \sin \varphi_k$, одержимо ще один вираз для розрахунку зміни вторинної напруги при будь-якому навантаженні:

$$\Delta U = \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (14)$$

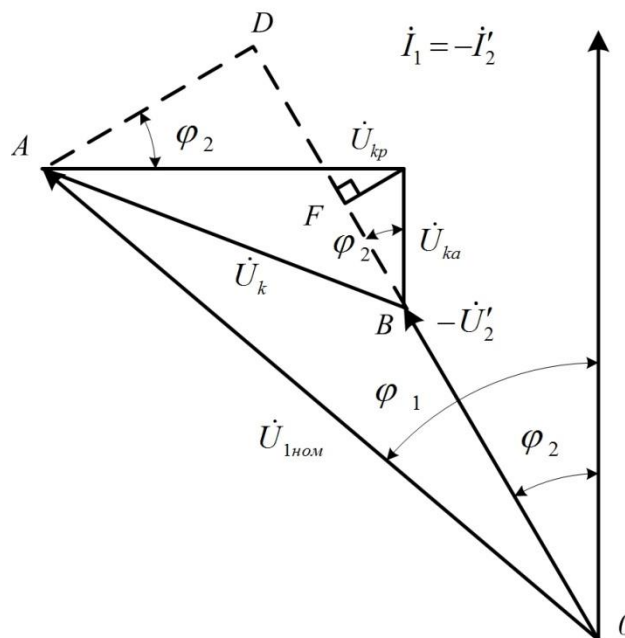


Рисунок 11 - До виводу формули $\Delta U_{ном}$

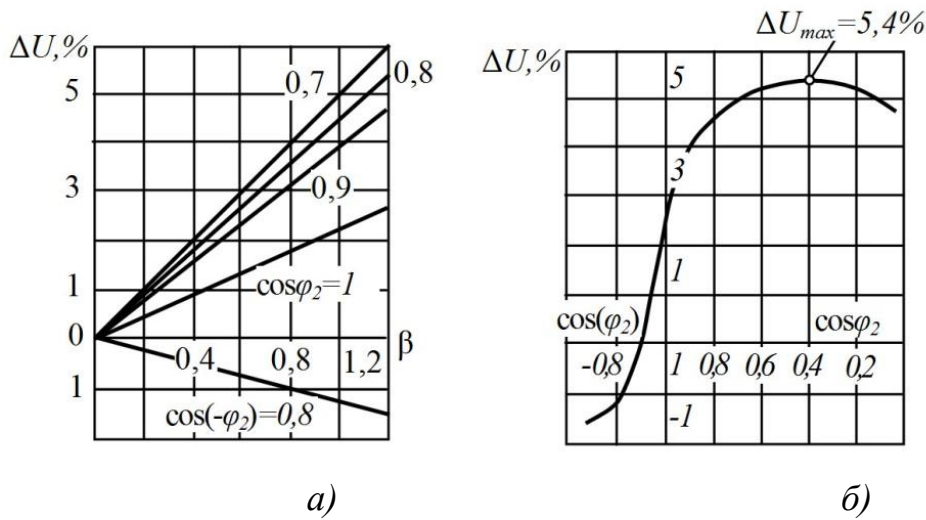


Рисунок 12 - Залежність ΔU від величини навантаження (а) і коефіцієнта потужності навантаження (б) трифазного трансформатора (100 кВ·А, 6,3/0,22 кВТ, $u_k=5,4\%$, $\cos\varphi_k=0,4$)

З (14) видно, що найбільше значення зміни напруги $\Delta U = u_k$ має місце при рівності кутів фазового зсуву $\varphi_2 = \varphi_k$, тоді $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 1$.

Залежність вторинної напруги U_2 трансформатора від навантаження I_2 називають зовнішньою характеристикою. Нагадаємо, що в силових трансформаторах за номінальну напругу на затискачах вторинної обмотки в режимі х.х. при номінальній первинній напрузі.

Вид зовнішньої характеристики (рисунок 12) залежить від характеру навантаження трансформатора ($\cos\varphi_2$). Зовнішню характеристику трансформатора можна побудувати по (13) шляхом розрахунку ΔU для різних значень β і $\cos\varphi_2$.

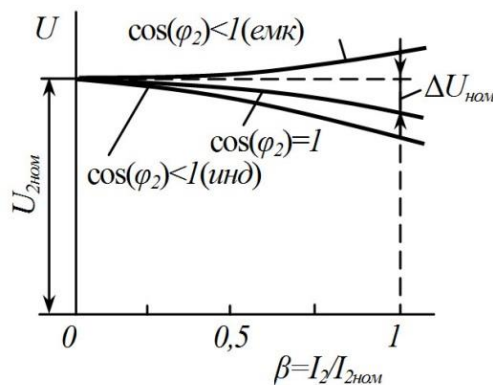


Рисунок 13 - Зовнішні характеристики трансформатора

Посилання на літературу:

- [1], с. 303...308, с. 311...317;
- [2], с. 79...84, с. 99...102, с. 110...119;
- [4], с. 38...40, с. 53...57, с. 67...69, с. 280...316;
- [8], с. 34...37, с. 46...49.

Контрольні питання:

1. Наведіть особливості режиму холостого ходу силового трансформатора. Які схеми з'єднання обмоток силового трансформатора на використовують з урахуванням процесів, що відбуваються на холостому ході?
2. Наведіть характеристики трансформатора в режимі холостого ходу та поясніть їх.
3. Наведіть особливості режиму навантаження силового трансформатора.
4. Представте векторні діаграми трансформатора при різному характері навантаження, поясніть їх.
5. Наведіть характеристики трансформатора в режимі навантаження та поясніть їх.

Тема №7. Режими роботи силових трансформаторів

Лекція №12 «Паралельна робота силових трансформаторів»

Мета: Засвоєння особливостей паралельної роботи та принципів і способів регулювання напруги силових трансформаторів.

Основні питання:

12.1 Паралельна робота силових трансформаторів різними групами з'єднань.

12.2 Паралельна робота силових трансформаторів різними коефіцієнтами трансформації.

12.1 Паралельна робота силових трансформаторів з різними групами з'єднань

Паралельна робота трансформаторів необхідна:

а) для забезпечення резервування в енергопостачанні споживачів у випадках аварії, проведення ремонтів, планового профілактичного обслуговування трансформаторів і сполученого з ними устаткування;

б) для зменшення втрат енергії в періоди малих навантажень підстанції шляхом відключення такої частини паралельно працюючих трансформаторів, щоб ККД інших був максимальним.

Для досягнення оптимальних умов паралельної роботи трансформаторів необхідно, щоб загальне навантаження підстанції розподілялось між паралельно працюючими трансформаторами пропорційно їх номінальних потужностей. Такий розподіл навантаження досягається, якщо у трансформаторів **однакові**:

а) групи з'єднань обмоток;

б) первинні і вторинні номінальні напруги чи, що практично те саме, коефіцієнти трансформації;

в) напруги короткого замикання.

Якщо перші дві умови виконані, то вторинні напруги відповідних фаз трансформаторів на холостому ході будуть однакові за амплітудою і фазою. У протилежному випадку, на холостому ході виникають зрівнювальні струми, що будуть циркулювати по замкнених контурах, утворених вторинними обмотками, і трансформуватися в первинні обмотки, викликаючи нерівномірне навантаження, а також зайві втрати і нагрівання трансформаторів.

Дотримання третьої умови забезпечує розподіл навантаження між трансформаторами відповідно до їх номінальних потужностей, що підвищує ККД підстанції та її навантажувальну здатність.

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток при дотриманні інших умов. При паралельній роботі трансформаторів з «0» і «11» групами з'єднання, ЕРС вторинних обмоток відповідних фаз трансформаторів будуть мати однакову амплітуду, але зсунуті за фазою на 30° (рисунок 1).

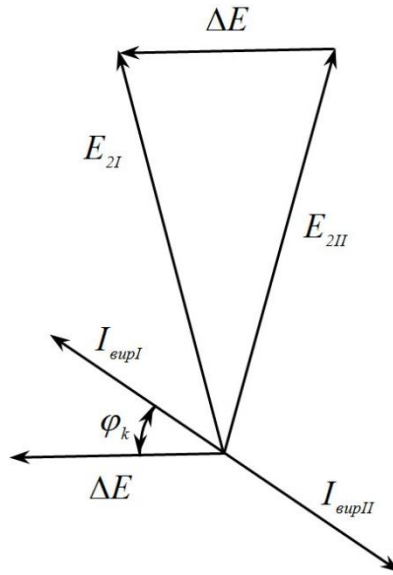


Рисунок 1- Спрощена векторна діаграма ЕРС вторинних обмоток трансформаторів

В замкненому контурі вторинних обмоток виникне різниця ЕРС

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15^\circ = 0,518E_2. \quad (1)$$

Відповідно до величини різниці ЕРС ΔE в обмотках протікатиме зрівнювальний струм

$$I_{зр} = \frac{\Delta E}{Z_{kI} + Z_{kII}}, \quad (2)$$

де Z_{kI} і Z_{kII} - опори короткого замикання відповідно першого і другого трансформатора

Якщо величини ΔE , Z_{kI} , Z_{kII} представити у відносних одиницях, то відносне значення зрівнювального струму при умові $Z_k^* = u_k^*$ буде дорівнювати

$$\frac{I_{зр}}{I_n} = \frac{\Delta E^*}{Z_{kI}^* + Z_{kII}^*} = \frac{\Delta E^*}{u_{kI}^* + u_{kII}^*} = \frac{0,518}{0,05 + 0,05} = 5,18. \quad (3)$$

Тобто, зрівнювальний струм буде в 5,18 разів більше номінального. Таким чином, паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання **неприпустима**. Такий висновок відноситься щодо паралельної роботи трансформаторів з парними і непарними групами з'єднання обмоток. Якщо ж обидва трансформатора мають парну або непарну групу з'єднання, то практично змінивши маркування кінців фазних обмоток, групи можна зробити однаковими і виконати умову підключення трансформаторів на паралельну роботу.

12.2 Паралельна робота силових трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації: $k_I < k_{II}$ і, відповідно, $E_{2I} > E_{2II}$. В даному випадку в контурі вторинних обмоток трансформаторів різниця ЕРС буде відрізнятись від нуля

$\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$. Під дією ΔE в обмотках буде протікати зрівнювальний струм. Зрівнювальний струм у вторинних обмотках трансформаторів буде мати різні напрямки (рисунок 2): якщо в першому трансформаторі він протікає від початку обмотки до кінця; то в другому - від кінця до початку. Зрівнювальний струм $I_{вир}$ для першого трансформатора I є індуктивним, для другого трансформатора II - ємнісним.

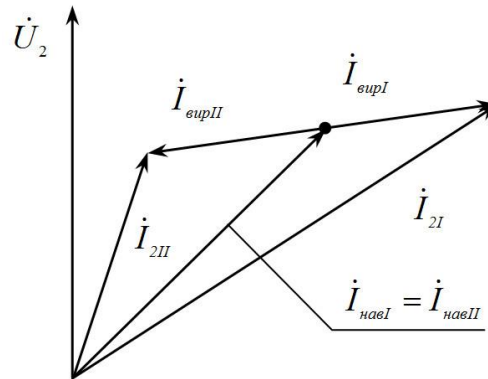


Рисунок 2- Спрощена векторні діаграма струмів вторинних обмоток трансформаторів при паралельній роботі

Зрівнювальні струми змінюють напруги вторинних обмоток за рахунок падіння напруги таким чином, що встановлюється деяка напруга $E_{2I} > U_2 > E_{2II}$. При підключенні навантаження, струми навантаження $I_{навлI}$ і $I_{навлII}$ сумуються з зрівнювальними струмами, що викликає нерівність результуючих струмів і нерівномірне навантаження трансформаторів. Значення зрівнювального струму залежить від різниці коефіцієнтів трансформації. При паралельній роботі трансформаторів припустимою є відмінність коефіцієнтів трансформації на 0,5%, для трансформаторів з $k < 3$ і трансформаторів власних потреб електростанцій - на 1,0%.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання. Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними напругами короткого замикання при дотриманні інших умов включення.

Нехтуючи намагнічуючими струмами і використовуючи спрощену схему заміщення трансформатора, схему паралельної роботи трансформаторів можна представити у вигляді, представленому на рисунку 3

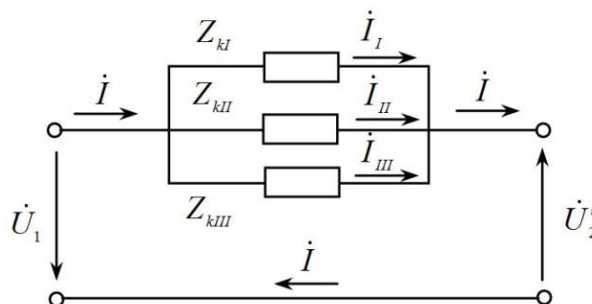


Рисунок 3 - Спрощена схема паралельної роботи трансформаторів

Зі схеми видно, що падіння напруги у всіх трансформаторів однакові і дорівнюють

$$\Delta U = U'_{20} - U'_2 = IZ, \quad (4)$$

де I - загальний струм навантаження;

Z - еквівалентний повний опір обмоток трансформаторів.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}$$

Струми окремих трансформаторів

$$I_I = \frac{\Delta U}{Z_{kI}} = \frac{1}{Z_{kI} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}; I_{II} = \frac{\Delta U}{Z_{kII}} = \frac{1}{Z_{kII} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}; I_{III} = \frac{\Delta U}{Z_{kIII}} = \frac{1}{Z_{kIII} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}$$

В загальному випадку ці струми не співпадають за фазою, однак на практиці ці зсуви за фазою незначні і можна прийняти

$$I = I_I + I_{II} + I_{III}$$

Таким чином підставивши відповідні значення Z_k і змінивши струми на відповідні їм повні потужності, отримуємо

$$S_i = \frac{S}{\frac{u_{ki\%}}{S_{ni}} \sum_n \frac{S_{in}}{u_{kn\%}}}$$

Після визначення повних потужностей для кожного трансформатора і їх порівняння маємо співвідношення потужностей трансформатора при паралельній роботі

$$S_I : S_{II} : S_{III} = \frac{1}{u_{kI\%}} : \frac{1}{u_{kII\%}} : \frac{1}{u_{kIII\%}} \quad (5)$$

Зі співвідношення видно, що відносні потужності (навантаження) паралельно працюючих трансформаторів обернено пропорційні їх напругам к.з. Інакше кажучи, при нерівності напруг к.з. паралельно працюючих трансформаторів більше навантажується трансформатор з меншою напругою к.з. В результаті це веде до перевантаження одного трансформатора (з меншим $u_{k\%}$) і недовантаження іншого (з більшим $u_{k\%}$). Щоб не допустити перевантаження трансформатора, необхідно знизити загальне навантаження. Таким чином, нерівність напруг к.з. не допускає повного використання по потужності паралельно працюючих трансформаторів.

З огляду на те, що практично не завжди можна підібрати трансформатори з однаковими напругами к.з., ДСТУ допускає включення трансформаторів на паралельну роботу при різниці напруг к.з. не більш ніж 10% від їх середнього арифметичного значення. Різниця в напругах к.з. трансформаторів тим більше, чим більше ці трансформатори відрізняються одне від одного по потужності. Тому ДСТУ рекомендує, щоб відношення номінальних потужностей трансформаторів, включених паралельно, було не більш ніж 3:1.

Тема №7. Режими роботи силових трансформаторів

Лекція №13 «Регулювання напруги та перехідні процеси в силових трансформаторах»

Мета: Засвоєння особливостей, принципів і способів регулювання напруги силових а також засвоєння основних положень та особливостей проходження перехідних процесів при вмиканні трансформатора до мережі та при раптовому короткому замиканні.

Основні питання:

- 13.1 Змінення вторинної напруги силового трансформатора.
- 13.2 Принципи і способи регулювання напруги силового трансформатора.
- 13.3 Перехідні процеси в трансформаторі при вмиканні до мережі.
- 13.4 Раптове коротке замикання в силових трансформаторах.
- 13.5 Ударний струм короткого замикання.

13.1 Змінення вторинної напруги силового трансформатора

При коливаннях навантаження трансформатора його вторинна напруга U'_2 міняється. У цьому можна переконається, скориставшись спрощеною схемою заміщення трансформатора (рис. 1), з якої видно, що $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1ном} - \dot{I}_1 Z_k$.

Зміна вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження від х.х. до номінальної є найважливішою характеристикою трансформатора і визначається виразом

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{1ном} - U'_2}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (1)$$

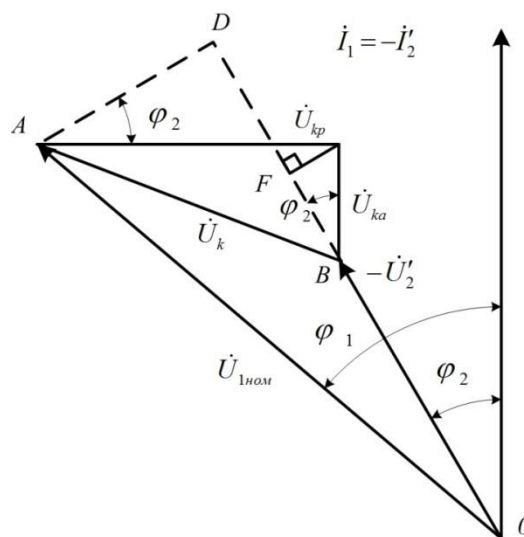


Рисунок 1 - До виводу формули $\Delta U_{ном}$

Для визначення $\Delta U_{ном}$ скористаємося спрощеною векторною діаграмою трансформатора, зробивши на ній наступні додаткові побудови (рисунок 4). Із точки А опустимо перпендикуляр на продовження вектора $-U'_2$, одержимо

точку D. З деяким допущенням будемо вважати, що відрізок \overline{BD} являє собою різницю

$$\dot{U}_{1\text{НОМ}} - \dot{U}'_2 = \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD},$$

де $\overline{BF} = U_{k.a.} \cos \varphi_2$; $\overline{FD} = U_{k.p.} \sin \varphi_2$, тоді

$$U_{1\text{НОМ}} - U'_2 = U_{k.a.} \cos \varphi_2 + U_{k.p.} \sin \varphi_2.$$

Вимір вторинної напруги прийме вид

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = (U_{k.a.} \cos \varphi_2 + U_{k.p.} \sin \varphi_2) 100 / U_{1\text{НОМ}}.$$

Позначимо $(U_{ka}/U_{1\text{НОМ}})100=U_{ka.}$; $(U_{kp}/U_{1\text{НОМ}})100=U_{kp.}$, тоді вираз зміни вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження прийме вид

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = u_{k.a.} \cos \varphi_2 + u_{k.p.} \sin \varphi_2. \quad (2)$$

Вираз (9) дає можливість визначити зміну вторинної напруги лише при номінальному навантаженні трансформатора. При необхідності розрахунку значення вторинної напруги для будь-якого навантаження у вираз (9) варто ввести коефіцієнт навантаження, що представляє собою відносне значення струму навантаження $\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}}$

$$\Delta U = \beta (u_{k.a.} \cos \varphi_2 + u_{k.p.} \sin \varphi_2). \quad (3)$$

З виразу (3) видно, що зміна вторинної напруги ΔU залежить не тільки від величини навантаження трансформатора (β), але і від характеру цього навантаження (φ_2).

На рисунку 2, а представлений графік залежності $\Delta U = f(\varphi_2)$ при $\cos \varphi_2 = \text{const}$, а на рисунок 2, б – графік $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = \text{const}$. На цих графіках відємні значення ΔU при роботі трансформатора з ємнісним навантаженням відповідають підвищенню напруги при переході від режиму х.х. до навантаження. Маючи на увазі, що $u_{k.a.} = u_k \cos \varphi_k$, $u_{k.p.} \sin \varphi_k$, одержимо ще один вираз для розрахунку зміни вторинної напруги при будь-якому навантаженні:

$$\Delta U = \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (4)$$

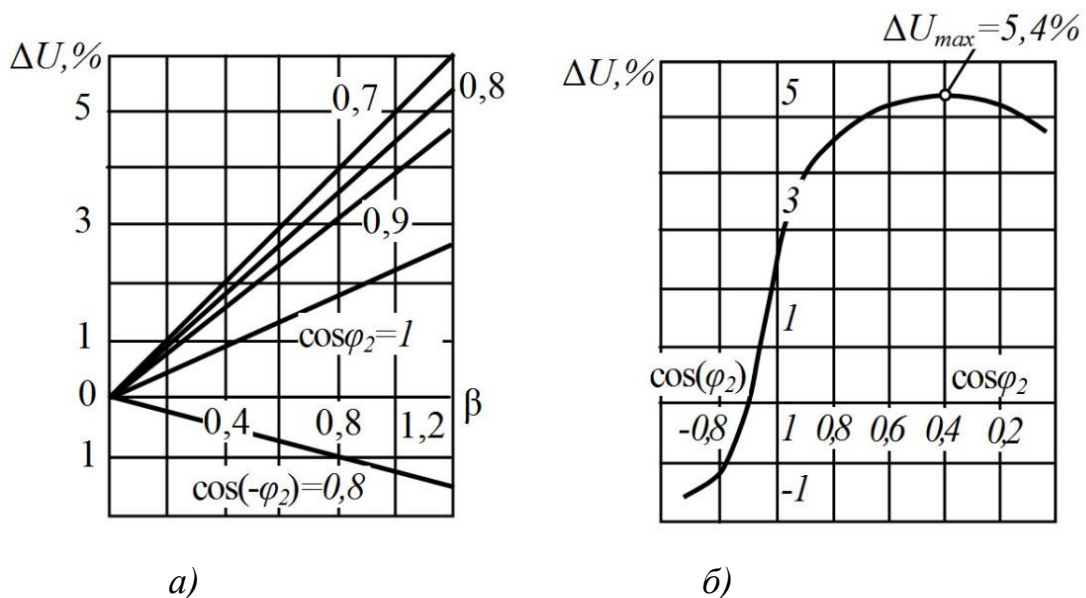


Рисунок 2 - Залежність ΔU від величини навантаження (а) і коефіцієнта потужності навантаження (б) трифазного трансформатора (100 кВ·А, 6,3/0,22 кВТ, $u_k=5,4\%$, $\cos\varphi_k=0,4$)

Найбільше значення зміни напруги $\Delta U = u_k$ має місце при рівності кутів фазового зсуву $\varphi_2 = \varphi_k$, тоді $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 1$.

Залежність вторинної напруги U_2 трансформатора від навантаження I_2 називають зовнішньою характеристикою. Нагадаємо, що в силових трансформаторах за номінальну напругу на затискачах вторинної обмотки в режимі х.х. при номінальній первинній напрузі.

13.2 Принципи і способи регулювання напруги силового трансформатора

Обмотки ВН понижувальних трансформаторів виконують із регулювальними відгалуженнями, за допомогою яких можна одержати коефіцієнт трансформації, що трохи відрізняється від номінального, відповідній номінальній вторинній напрузі при номінальному первинному. Необхідність у цьому пояснюється тим, що напруги в різних точках лінії електропередачі, куди можуть бути включені понижувальні трансформатори, відрізняються одне від одного і, як правило, від номінальної первинної напруги. Крім того, напруга в будь-якому місці лінії може змінюватися через коливання навантаження. Але оскільки напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора у всіх випадках повинна дорівнювати номінальному або незначно відрізнятися від нього, то можливість зміни коефіцієнта трансформації стає необхідною. Регулювальні відгалуження роблять у кожній фазі або поблизу нульової точки, або посередині обмотки. У першому випадку на кожній фазі роблять по три відгалуження (рисунок 3, а), при цьому середнє відгалуження відповідає номінальному коефіцієнту трансформації, а два інших — коефіцієнтам трансформації, що відрізняється від номінального на $\pm 5\%$. У другому випадку обмотку розділяють на дві частини і роблять шість відгалужень (рисунок 3, б). Це дає можливість крім номінального коефіцієнта трансформації одержати ще чотири додаткових значення, що відрізняються від номінального на $\pm 2,5$ і $\pm 5\%$.

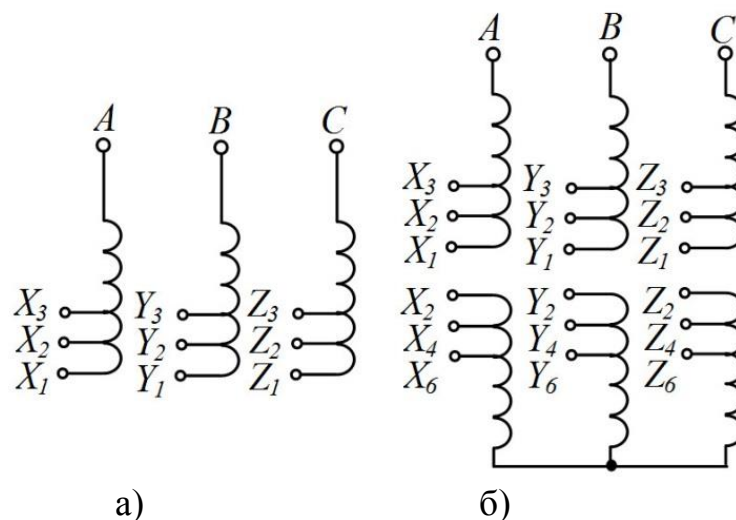


Рисунок 3 - Схеми обмоток трифазних трансформаторів з регулювальними відгалуженнями

Перемикачі відгалуження обмоток можна при відключеному від мережі трансформаторі (перемикання без збудження - ПБВ) або ж без відключення трансформатора (регулювання під навантаженням - РПН). Для ПБВ застосовують перемикачі відгалужень (рисунок 3). На кожну фазу встановлюють по одному перемикачу, при цьому вал, що обертає контактні кільця перемикачів по всіх фазах одночасно, зв'язаний за допомогою штанги з рукояткою на кришці бака трансформатора (рисунок 7).

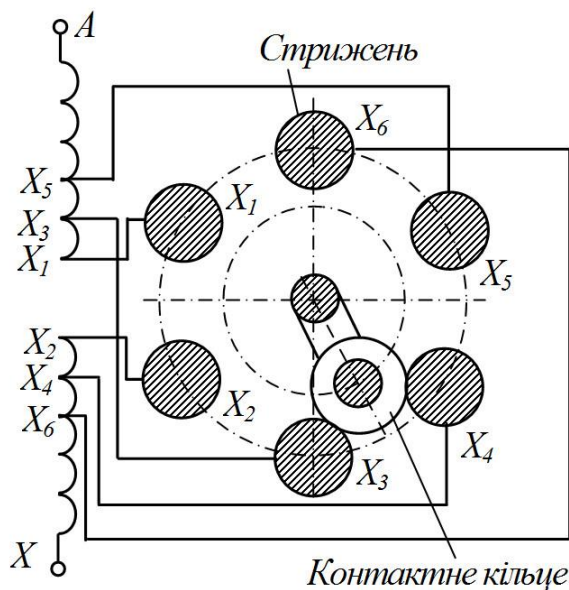


Рисунок 4 - Перемикач відгалужень ПБВ

Принцип РПН заснований на зміні коефіцієнта трансформації за допомогою регулювальних відгалужень. Однак перемикання з одного відгалуження на інше здійснюють без розриву кола робочого струму. Із цією метою обмотку кожної фази забезпечують спеціальним перемикаючим пристроєм, що складається з реактора P двох контакторів з контактами $K1$ і $K2$ і перемикача із двома рухливими контактами $\Pi1$ і $\Pi2$ (рисунок 5, а).

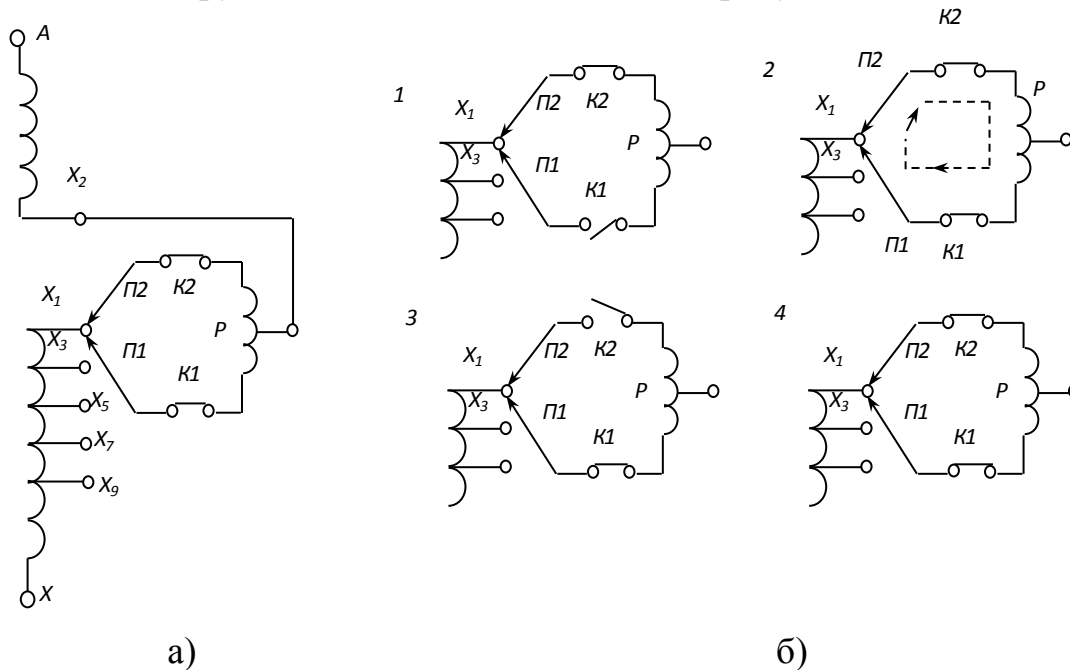


Рисунок 5 - Послідовність перемикання контактів під навантаженням

У робочому положенні обидва рухливих контакти перемикача перебувають на одному відгалуженні, контакти К1 і К2 замкнуті і робочий струм спрямований паралельно по двох половинах обмотки реактора. Якщо виникла необхідність перемикачання з одного відгалуження на інше, наприклад з Х1 на Х3, то розімкнуться контакти контактора К1 (положення 1 на рисунку 5, б), рухливий контакт П1 перемикача знеструмленої гілки переводиться на інше відгалуження і контакти контактора К1 знову замикаються (положення 2). У цьому положенні частина обмотки між відгалуженнями Х1 і Х3 виявляється замкнутою. Однак струм у колі перемикаючого пристрою не досягає великого значення, тому що він обмежується опором реактора Р. У такому ж порядку здійснюється перемикачання рухливого контакту К2 з відгалуження Х1 на відгалуження Х3 (положення 3 і 4). після чого процес перемикачання закінчується. Апаратура РПН розташовується в одному баку із трансформатором, а її перемикачання автоматизовано або здійснюється дистанційно (із щита керування). Трансформатори із РПН звичайно розраховані для регулювання напруги в межах 6-10%.

При досить значних потужностях трансформатора апаратура РПН стає занадто громіздкою. У цьому випадку застосовують регулювання напруги за допомогою вольтдобавочного трансформатора, що складається із трансформатора ПТ, включеного послідовно, і регулювального автотрансформатора РА з перемикаючим пристроєм ПУ (рисунок 6).

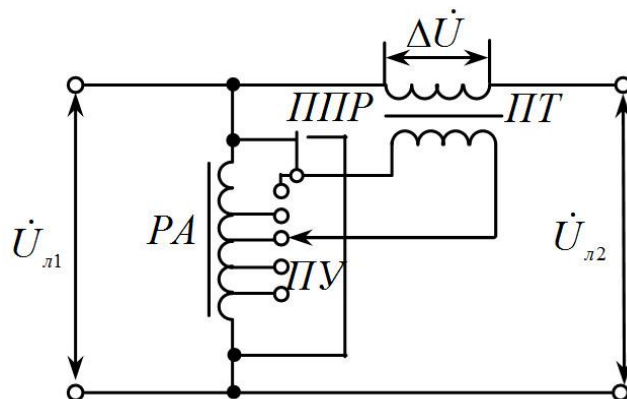


Рисунок 6 - Схеми включення вольтдобавочного трансформатора

Напруга вторинної обмотки ΔU трансформатора ПТ сумується з напругою лінії $U_{л1}$ і змінює її до значення $U_{л2} = U_{л1} + \Delta U$. Величина ΔU може змінюватися за допомогою РА. При цьому перемикачем поздовжнього регулювання (ППР) можна змінювати фазу ΔU на $\pm 180^\circ$, так що одне положення ППР буде відповідати збільшенню напруги $U_{л2} = U_{л1} + \Delta U$, а інше — зменшенню напруги $U_{л2} = U_{л1} - \Delta U$. Крім того, можливі і інші способи фазового впливу на ΔU , наприклад комбінація різних схем з'єднання трифазних обмоток (зірка, трикутник) у вольтдобавочном трансформаторі, що створює фазові зсуви ΔU відносно $U_{л1}$ на кути $60, 120$ і 90° (поперечне регулювання). У цих випадках зміна ΔU впливає не тільки на значення, але і на фазу напруги $U_{л2}$.

13.3 Перехідні процеси в трансформаторі при вмиканні до мережі

Перехідні процеси у трансформаторах і електричних машинах виникають при різкій зміні режиму їх роботи. Найбільш характерними перехідними

режимами у трансформаторах є підключення до мережі, різка зміна навантаження, раптове коротке замикання.

Підключення трансформатора до мережі. Приймаємо, що до мережі з синусоїдальною напругою $U_1 = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)$, підключається однофазний трансформатор, вторинна обмотка якого розімкнена. У загальному випадку перехідний процес в трансформаторі описуватиметься рівнянням

$$U_1 = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) = i_1 \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

У реальному трансформаторі відбувається насичення магнітопроводу, тому індуктивність первинної обмотки $L_1 \neq const$. Замість змінної i_1 доцільно оперувати зміною потоку Φ , у такому випадку рівняння (1) приймає вигляд

$$\frac{U_{1m}}{W_1} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) = \Phi \cdot \frac{R_1}{L_1} + \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

Інтегрування даного виразу ускладнюється тим, що індуктивність первинної обмотки є змінною $L_1 \neq const$ і визначається складним нелінійним зв'язком $i_1 = f(\Phi)$, який виражається і залежить від магнітних якостей магнітопроводу трансформатора, тому приймаємо, що $L_1 = const$. У такому випадку розв'язання рівняння (6) можна представити у вигляді суми двох складових

$$\Phi = \Phi_{\Pi} + \Phi_a,$$

де Φ_{Π} – миттєве значення магнітного потоку для усталеного режиму (періодична складова);

Φ_a – миттєве значення вільного магнітного потоку (аперіодична складова).

Часткове розв'язання рівняння (6) дозволить визначити миттєве значення періодичної складової магнітного потоку

$$\begin{aligned} \Phi_{\Pi} &= \Phi_m \sin(\omega t + \psi - \varphi_0), \\ \Phi_m &= \frac{L_1 U_{1m}}{W_1 \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}}, \\ \varphi &= \arctg \frac{\omega L_1}{R_1} \approx \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

Аперіодична складова миттєвого значення потоку визначається рівнянням

$$0 = \frac{R_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}$$

і дорівнює $\Phi_a = C e^{-\frac{R_1}{L_1} t}$.

де C – стала інтегрування, яка визначається початковими умовами.

В момент включення трансформатора магнітопровід може мати певний магнітний потік $\pm \Phi_{\text{зал}}$ залишкового магнетизму, тому, приймаючи $\varphi = \frac{\pi}{2}$ для моменту часу $t = 0$ отримаємо

$$[\Phi]_{t=0} = [\Phi_{\Pi} + \Phi_a]_{t=0} = -\Phi_m \cos\psi + C = \pm \Phi_{\text{зал}}$$

Звідси $C = \Phi_m \cos\psi \pm \Phi_{\text{зал}}$ і, відповідно

$$\Phi_a = (\Phi_m \cos\psi \pm \Phi_{\text{зал}}) e^{-\frac{R_1}{L_1} t}$$

Таким чином, магнітний потік Φ визначається

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \varphi) + (\Phi_m \cos\psi \pm \Phi_{\text{зал}}) e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}$$

Найбільш сприятливим є випадок вмикання, коли $\psi = \pm \frac{\pi}{2}$ (коли в момент вмикання напруга проходить через максимум) і магнітний потік залишкового магнетизму $\Phi_{\text{зал}} = 0$.

Тоді

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right) = \pm \Phi_m \sin\omega t,$$

тобто, відразу встановлюється нормальний режим роботи із синусоїдальним магнітним потоком і перехідний режим відсутній.

Найменш сприятливим є випадок, коли $\psi = 0$ або 180° (напруга у момент вмикання проходить через нуль). При цьому магнітний потік $\Phi_{\text{зал}}$ у момент часу $t = 0$ направлений зустрічно періодичній складовій магнітного потоку. У випадку, коли $\psi = 0$

$$\Phi = -\Phi_m \cos\omega t + (\Phi_m + \Phi_{\text{зал}}) e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}$$

Вигляд кривої $\Phi = f(t)$ для даного випадку наведено на рисунку 7. Максимального значення потік досягає приблизно через на півперіод після включення, тобто коли $\omega t \approx \pi$

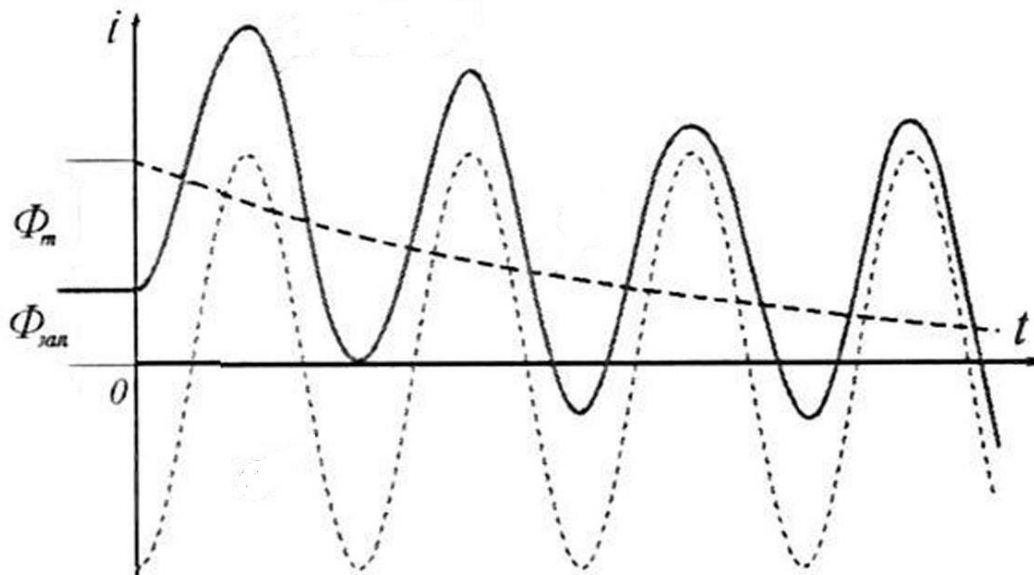


Рисунок 7 – Зміна магнітного потоку за несприятливих умов включення Трансформатора

Таким чином, максимальне значення потоку більше ніж у два рази перевищує нормальне значення робочого потоку, що призводить до сильного насичення магнітопроводу та виникнення великих струмів намагнічування.

Слід відмітити, що затухання аперіодичної складової струму визначається не лише значенням активного опору обмотки, але й станом магнітопроводу внаслідок наявності втрат від вихрових струмів.

13.4 Раптове коротке замикання в силових трансформаторах

В умовах експлуатації коротке замикання виникає раптово в результаті різноманітних несправностей або помилкових дій персоналу. При цьому в трансформаторі виникає перехідний процес, який супроводжується великими струмами, що може призвести до пошкодження трансформатора. Режим короткого замикання розглянемо на прикладі однофазного трансформатора. Особливості даного процесу є характерними і для короткого замикання для трифазного трансформатора.

Під час усталеного короткого замикання струм намагнічування є досить малим порівняно із повним струмом обмотки. Внаслідок великого значення струму короткого замикання спадання напруги на активному опорі R_1 та індуктивному опорі розсіювання X_1 первинної обмотки є відносно великим. Зазвичай $Z_1 \approx Z_2$ і, відповідно до спрощеної схеми заміщення трансформатора при короткому замиканні $I_1 \cdot Z_1 \approx 0,5 \cdot E_1$. Тому, значення ЕРС та магнітного потоку є майже в два рази меншими за свої нормальні значення і магнітопровід може вважатися ненасиченим. З огляду на ці причини при раптовому короткому замиканні можна вважати, що струм намагнічування $\dot{I}_0 \approx 0$ і параметри схеми заміщення трансформатора можуть бути визначені за рівняннями і можуть вважатися постійними

$$R_k = R_1 + R'_2; L_k = \frac{X_k}{\omega} = \frac{(X_1 + X'_2)}{\omega}$$

Відповідно до прийнятих припущень, процес короткого замикання на вторинних затискачах трансформатора описується рівнянням

$$U_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) = i_{1k} \cdot R_k + L_k \cdot \frac{di_{1k}}{dt} \quad (8)$$

Струм короткого замикання складається з двох складових: періодичної та аперіодичної

$$i_{1k} = i_{1kп} + i_{1ka}$$

При цьому усталений струм, або періодична складова дорівнює

$$i_{1kп} = I_{1km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k);$$

$$I_{1km} = \frac{U_{1km}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}; \varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}$$

Аперіодична складова струму визначається розв'язанням рівняння

$$0 = i_{1k} R_k + L_k \frac{di_{1k}}{dt},$$

з якого може бути знайдено

$$i_{1ka} = i_{1ka0} e^{-\frac{R_k t}{L_k}},$$

де i_{1ka0} – значення аперіодичної складової струму при $t = 0$.

У загальному випадку, коли перед коротким замиканням трансформатор працював під навантаженням

$$[i_{1k}]_{t=0} = [i_{1kп} + i_{1ka}]_{t=0} = i_{1нав} = I_{1навм} \sin(\psi - \varphi_{нав})$$

Повний струм короткого замикання дорівнює

$$i_{1k} = I_{1km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - [I_{1km} \sin(\psi - \varphi_k) - I_{1навм} \sin(\psi - \varphi_{нав})] e^{-\frac{R_k t}{L_k}}$$

Струм навантаження при індуктивному навантаженні трансформатора призводить до зменшення аперіодичної складової струму. Тому, найбільш несприятливими умовами короткого замикання трансформатора є замикання на холостому ході.

При короткому замиканні на холостому ході ($I_{1навм} = 0$) рівняння струму короткого замикання має вигляд

$$i_{1k} = I_{1km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - [I_{1km} \sin(\psi - \varphi_k)] e^{-\frac{R_k t}{L_k}}$$

Залежно від значення кута $(\psi - \varphi_k)$ крива $i_{1k} = f(t)$ має різний характер. При $(\psi - \varphi_k) = \pm \frac{\pi}{2}$ аперіодична складова струму має найбільше значення. Приймаючи, що $(\psi - \varphi_k) = -\frac{\pi}{2}$, значення струму короткого замикання має вигляд

$$i_{1k} = -I_{1km} \cos \omega t - I_{1km} e^{-\frac{R_k t}{L_k}}$$

Максимальне значення струму спостерігається при $\omega t = \pi$ після початку короткого замикання. Вигляд кривої $i_k = f(t)$ наведений на рисунку 8.

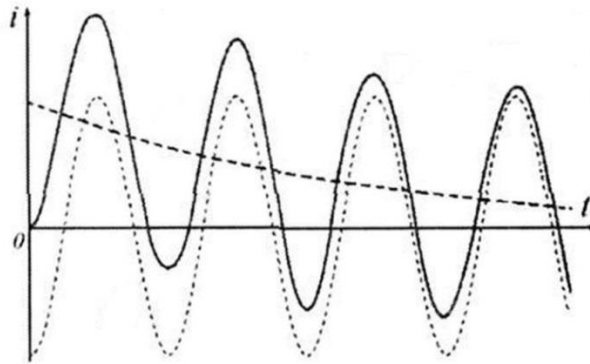


Рисунок 8 – Зміна струму у первинній обмотці трансформатора при короткому замиканні

Перехідний процес у трансформаторах малої потужності триває не більше одного періоду, а у трансформаторів великої потужності – 6-7 періодів. Потім трансформатор переходить в режим усталеного короткого замикання, при якому в обмотках протікають струми, що приблизно дорівнюють значенню періодичної складової струмів короткого замикання, що в багато разів перебільшують номінальні значення.

13.5 Ударний струм короткого замикання

Максимальне значення струму короткого замикання, що спостерігається при $t = \frac{\pi}{\omega}$ початку короткого замикання називається ударним струмом і визначається за виразом

$$i_{1куд} = I_{1km} \left(1 + e^{-\frac{\pi R_k}{X_k}} \right).$$

Коефіцієнт, що характеризує перехідні процеси називається ударним коефіцієнтом

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi R_k}{X_k}}.$$

Ударний коефіцієнт показує у скільки разів ударний струм короткого замикання більший за амплітуду усталеного значення струму короткого замикання. Залежно від значення $\frac{R_k}{X_k}$ даний коефіцієнт може змінюватися в межах $k_{уд} = 1 \dots 2$. Для трансформаторів великої і середньої потужності $k_{уд} = 1,7 \dots 1,8$, для трансформаторів малої потужності - $k_{уд} = 1,2 \dots 1,3$. Наприклад, у трансформатора потужністю 1000 кВА напруга короткого замикання та її складові дорівнюють: $u_{k\%} = 6,5\%$, $u_{ka\%} = 1,5\%$, $u_{kp\%} = 6,32\%$. При цьому

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi R_k}{X_k}} = 1 + e^{-\frac{\pi u_{ka\%}}{u_{kp\%}}} = 1 + e^{-\frac{\pi \cdot 1,5}{6,32}} = 1,475$$

ударний струм буде у $\frac{100}{u_{кр\%}} k_{уд} = \frac{100}{6,5} \cdot 1,475 = 22,7$ разів більшим за амплітуду номінального струму.

У випадку внутрішніх коротких замикань у трансформаторі, коли внаслідок пошкодження ізоляції накоротко замикається частина витків обмотки, кратність струму у пошкодженій частині є ще більшою, оскільки напруга або ЕРС цієї частини обмотки зменшуються пропорційно кількості витків, а індуктивний опір зменшується пропорційно квадрату кількості витків.

Дія струмів короткого замикання виражається у посиленому нагріванні обмоток трансформатора та у виникненні значних електромагнітних сил, що діють на обмотки. У сучасних електричних системах та мережах застосовується швидкодіючий релейний захист, і пошкоджені ділянки мереж та пошкоджене обладнання відключається від мережі протягом десятих часток секунди після початку короткого замикання. Тому у випадку зовнішніх коротких замикань обмотки трансформаторів не встигають нагрітись до небезпечної температури.

Посилання на літературу:

- [1], с. 303...308, с. 311...317;
- [2], с. 79...84, с. 99...102, с. 110...119;
- [4], с. 38...40, с. 53...57, с. 67...69, с. 280...316;
- [8], с. 34...37, с. 46...49.

Контрольні питання:

1. Що розуміють під зміною напруги силового трансформатора? Як визначається зміна напруги?
2. Як здійснюється регулювання напруги в силових трансформаторах?
3. Поясніть відмінності у способах регулювання напруги силових трансформаторів.
4. Які припущення приймаються при аналізі перехідних процесів у трансформаторі? Якими складовими струму характеризується протікання перехідних процесів?
5. Наведіть найбільш сприятливі і несприятливі умови проходження перехідних процесів при підключенні трансформаторів до мережі?
6. Наведіть найбільш сприятливі і несприятливі умови проходження перехідних процесів при раптовому короткому замиканні?
7. Як розрізняється за часом перехідний процес у трансформаторах малої і великої потужності? Чим визначається час проходження перехідного процесу?
8. Поясніть визначення ударного коефіцієнта, наведіть його приблизне значення для трансформаторів малої і середньої потужності.

Тема №8. Спеціальні трансформатори

Лекція №14 «Автотрансформатори і багатообмоткові трансформатори»

Мета: Засвоєння особливостей будови і роботи автотрансформаторів і багатообмоткових трансформаторів.

Основні питання:

14.1 Призначення, особливості конструкції і властивості автотрансформаторів.

14.2 Призначення, особливості конструкції і властивості багатообмоточних трансформаторів.

14.1 Призначення, особливості конструкції і властивості автотрансформаторів

Автотрансформатором називається такий трансформатор, у якого обмотка нижчої напруги електрично (гальванічно) зв'язана з обмоткою вищої напруги. Автотрансформатори використовуються в тих випадках, коли за умовами експлуатації необхідно здійснити передачу енергії з незначною зміною напруги і струму.

Автотрансформатор, як і звичайний трансформатор, може бути підвищувальним (рисунок 1,б) і понижувальним (рисунок 1,а).

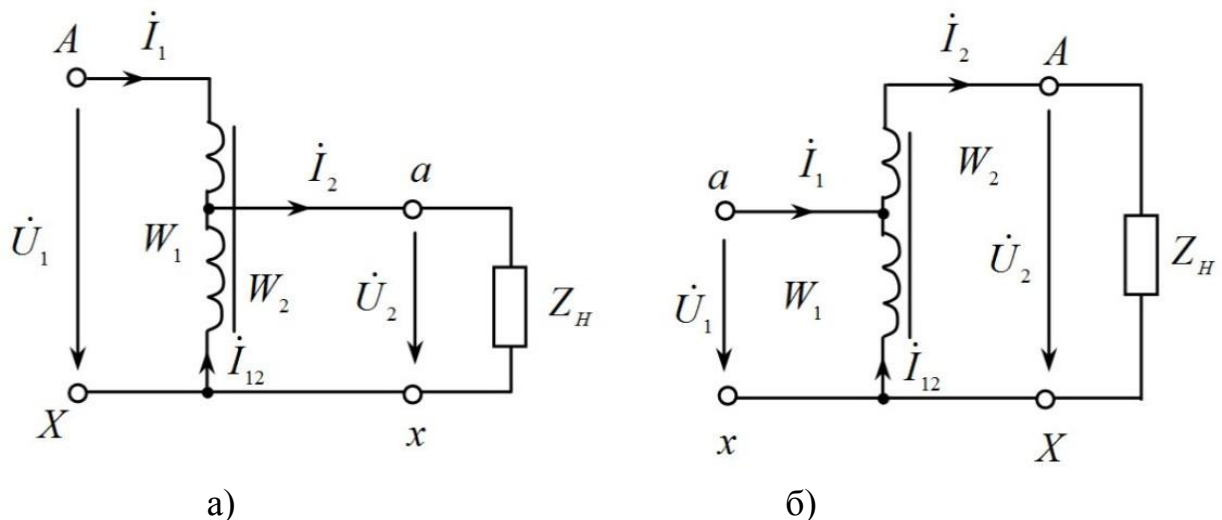


Рисунок 1 - Однофазний понижувальний (а) і підвищувальний (б) автотрансформатори

Якщо кількість витків між затискачами А і Х (рисунок 1) позначити W_1 , кількість витків між затискачами а і х - W_2 , то в автотрансформаторі співвідношення між напругами і струмами первинної і вторинної обмотки набувають вигляду, як у звичайному двообмотковому трансформаторі:

$$U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1 \approx W_1 / W_2 = k.$$

Однак, автотрансформатор в порівнянні з трансформатором має низку особливостей.

Струм I_{12} , що протікає обмоткою а-х, дорівнює геометричній сумі первинного і вторинного струмів $I_{12} = -I_1 + I_2$.

Нехтуючи струмом холостого ходу ($\dot{I}_0 = 0$), можна вважати, що струми \dot{I}_1 і \dot{I}_2 знаходяться у протифазі і їх геометрична сума дорівнює арифметичній різниці. У понижувальному автотрансформаторі $\dot{I}_1 \leq \dot{I}_2$ та

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (1)$$

У підвищувальному автотрансформаторі $\dot{I}_1 \geq \dot{I}_2$ та

$$I_{12} = I_1 - I_2. \quad (2)$$

Враховуючи припущення $\dot{I}_0 = 0$, $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1}$, для знижувального автотрансформатора отримаємо

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2(1 - W_2/W_1) = \dot{I}_2(1 - 1/k), \quad (3)$$

для підвищувального автотрансформатора

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1(1 - W_1/W_2) = \dot{I}_1(1 - 1/k). \quad (4)$$

В автотрансформаторі обмотки А-а і а-х магнітно врівноважені, тобто МРС обмоток рівні і протилежно направлені:

для знижувального автотрансформатора

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2(1 - W_2/W_1)W_2 = -\dot{I}_2(W_1 - W_2), \quad (5)$$

для підвищувального автотрансформатора

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1(1 - W_1/W_2)W_1 = -\dot{I}_1(W_1 - W_2). \quad (6)$$

Вирішуючи відносно \dot{I}_2 і помножуючи отриманий вираз на \dot{U}_2 , отримаємо

$$I_2 U_2 = I_1 U_2 + I_{12} U_2 = I_1 U_2 + I_2 U_2 (1 - 1/k) \quad (7)$$

або

$$S_2 = S_{el} + S_{em}. \quad (8)$$

Повна (номінальна) потужність S_2 автотрансформатора, яка називається прохідною потужністю, за виразом (8) складається з електричної потужності S_{el} , яка передається з первинної мережі до вторинної електричним шляхом, та електромагнітної потужності S_{em} , яка передається з первинної мережі до вторинної електромагнітним шляхом і називається розрахунковою потужністю.

Враховуючи, що в двохобмотковому трансформаторі $S_{el} = 0$ і $S_2 = S_{em}$, можна зробити висновок, що розрахункова потужність автотрансформатора менше, ніж потужність двохобмоткового трансформатора при такій самій прохідній потужності, що передається з первинної мережі до вторинної. Таким чином, автотрансформатор можна виконати меншої маси і габаритів. Відношення цих потужностей визначає коефіцієнт вигідності

$$k_{виг} = S_{em} / S_2 = 1 - 1/k \quad (9)$$

Чим ближче значення коефіцієнта трансформації k до одиниці, тим менше розрахункова потужність автотрансформатора і тим вигідніше використовувати його з точки зору маси, габаритних розмірів і втрат потужності. Наприклад, при $k = 1,1$ розрахункова потужність автотрансформатора зменшується в 10 разів, а при $k = 10$ - майже така сама, як і в двохобмотковому трансформаторі. Електричні втрати в обмотках автотрансформатора за тих самих причин можуть бути суттєво зменшені, порівняно з двохобмотковим трансформатором.

Практично зниження розрахункової потужності в автотрансформаторі відбувається за рахунок того, що в понижувальному автотрансформаторі обмотку, по якій протікає струм первинної мережі, а в підвищувальному - обмотку, по якій протікає струм вторинної мережі, розраховують на різницю напруги первинної і вторинної мережі, а не на повну напругу, як у двохобмотковому трансформаторі. Відповідно, обмоткою, до якої прикладається вхідна і вихідна напруга, протікає струм, який дорівнює різниці струмів первинної і вторинної мережі, а не повному струму. Завдяки цьому, автотрансформатори знайшли широке розповсюдження при з'єднанні високовольтних електричних мереж, для пуску двигунів змінного струму великої потужності, в схемах автоматики і т.д.

В автотрансформаторі за рахунок зменшення маси активних матеріалів порівняно з двохобмотковим трансформатором такої самої номінальної потужності втрати і зміна напруги менші, а ККД вище.

В той же час, автотрансформатор має низку недоліків, які обмежують його використання:

- оскільки напруга короткого замикання автотрансформатора в $\frac{1}{k_{\text{виг}}}$ разів менше напруги короткого замикання трансформатора, струм короткого замикання автотрансформатора у стільки ж разів перебільшує струм короткого замикання двохобмоткового трансформатора;

- можливість появи високої напруги на стороні низької напруги внаслідок електричного зв'язку між обмотками, що небезпечно для обладнання і обслуговуючого персоналу;

- необхідність додаткової ізоляції мережі низької напруги автотрансформатора, яка повинна бути такою самою як і ізоляція мережі високої напруги.

Внаслідок вказаних недоліків, автотрансформатори використовуються при необхідності порівняно невеликої зміни напруги і струмів (при $k \leq 2,5 \dots 3$), коли удорожчання ізоляції мережі низької напруги окупається зменшенням втрат і маси активних матеріалів автотрансформатора.

В трифазних установках обмотки автотрансформаторів зазвичай з'єднують за схемою «зірка». При цьому для усунення впливу третіх гармонійних складових магнітного потоку і ЕРС фаз використовується спеціальна обмотка малої потужності, яка з'єднується за схемою «трикутник». При з'єднанні обмотки за схемою «трикутник», коефіцієнт трансформації може змінюватися в межах $k = 1 \dots 2$, тому таке з'єднання обмоток використовується рідко.

В енергетичних системах використовуються триобмоткові автотрансформатори, в яких обмотки вищої і середньої напруги з'єднуються за схемою «зірка», а обмотка нижчої напруги має з іншими обмотками трансформаторний зв'язок і з'єднується за схемою «трикутник».

14.2 Призначення, особливості конструкції і властивості багатообмоткових трансформаторів

Окрім двохобмоткових силових трансформаторів промисловість випускає велику кількість трансформаторів, що мають три обмотки. Такі

трансформатори використовуються, наприклад, на електричних станціях і підстанціях для живлення розподільних мереж з різною номінальною напругою з метою економії капітальних витрат за рахунок меншої кількості трансформаторів. Крім того, випускається багато малопотужних трансформаторів, що мають декілька обмоток, розрахованих на різну напругу. У таких трансформаторів всі обмотки розташовуються на одному магнітопроводі, за рахунок чого і досягається економія витрат. В таких трансформаторах електромагнітні процеси можуть протікати трохи інакше, ніж в двохобмоткових трансформаторах, через магнітний зв'язок всіх обмоток. Розглянемо ці відмінності і методику аналізу електромагнітних процесів на прикладі трьохобмоткового трансформатора. Конструктивна структура такого трансформатора показана на рисунку 2.

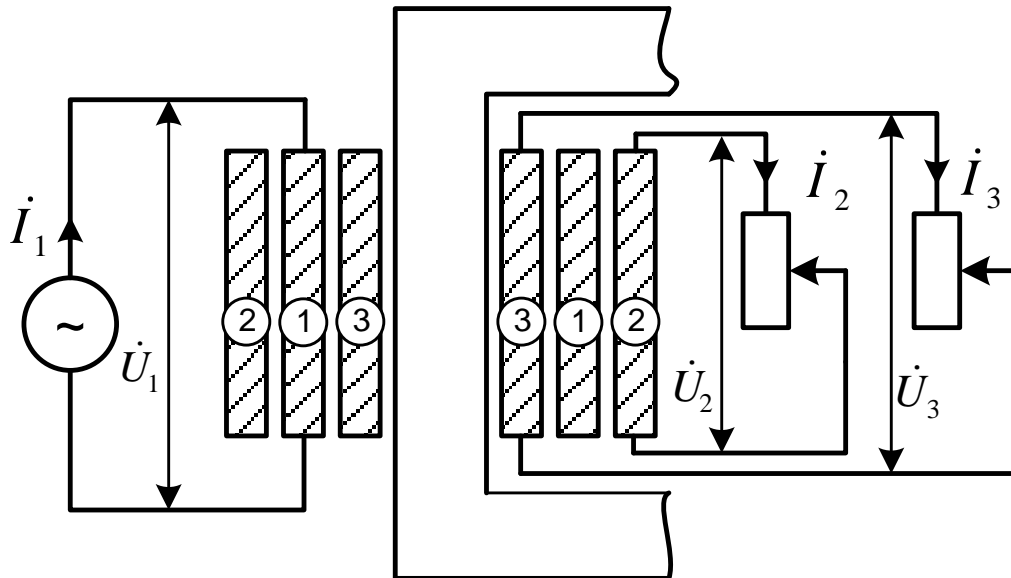


Рисунок 2 - Трьохобмотковий трансформатор

На кожному стрижні трансформатора розташовуються три обмотки, причому ближче до стрижня розташовується обмотка нижчої напруги. Трьохобмоткові трансформатори, як і двохобмоткові, в більшості випадків виконуються як трифазні.

Розглянемо електромагнітні процеси в трифазному трансформаторі, вважаючи режим його роботи симетричним і сталим. Виконаємо приведення другої і третьої обмотки до первинної подібно до того, як це виконувалось для двохобмоткового трансформатора, тобто через коефіцієнти трансформації.

Відповідно,

$$k_{12} = \frac{W_1}{W_2} \text{ і } k_{13} = \frac{W_1}{W_3}$$

Рівняння напруги для однойменних фазних обмоток будуть мати вигляд (індекси 1, 2, 3 визначають номер обмотки)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2; \\ \dot{U}'_3 = \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 Z'_3 \end{cases} \quad (10)$$

ЕРС, які індукуються магнітним потоком в осерді магнітопроводу, у всіх приведених обмотках однакові і дорівнюють

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = \dot{E}'_3 = -Z_m \dot{I}_0. \quad (11)$$

де

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3. \quad (12)$$

Намагнічуючий струм \dot{I}_0 , визначається як результат взаємодії МРС всіх трьох обмоток трансформатора.

Грунтуючись на наведених рівняннях (10-12), отримуємо точну схему заміщення для трьохобмоткового трансформатора, яка наведена на рисунку 3.

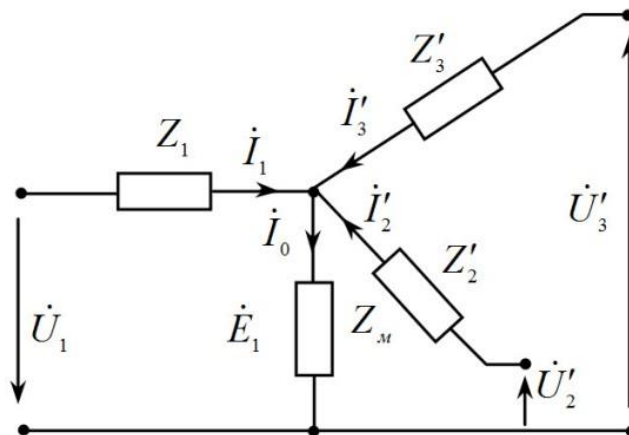


Рисунок 3 - Точна схема заміщення трьохобмоткового трансформатора

Для спрощення аналізу схеми заміщення можемо прийняти $\dot{I}_0 = 0$, отримана спрощена схема заміщення наведена на рисунку 4.

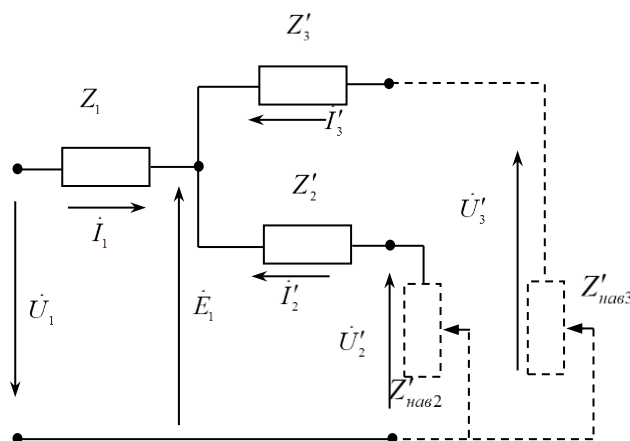


Рисунок 4 - Спрощена схема заміщення трьохобмоткового трансформатора

Представлені схеми заміщення, на відміну від схем заміщення двохобмоткового трансформатора, мають дві паралельно включені вторинні

обмотки, які утворюють відповідні електричні кола. Тому зміна навантаження однієї вторинної обмотки впливає на напругу іншої вторинної обмотки, оскільки при цьому змінюється падіння напруги первинної обмотки $I_1 Z_1$. Векторні діаграми трьохобмоткового трансформатора можна скласти на основі схем заміщення, вони мають вигляд, показаний на рисунку 5.

Параметри схеми заміщення розраховують або визначають експериментально, так само як і в двохобмотковому трансформаторі.

При дослідному визначенні Z_1, Z_2', Z_3' проводять три досліди короткого замикання:

1) при замкнутій накоротко обмотці 2 і розімкненій обмотці 3 знижена напруга підводиться до обмотки 1 і визначається як

$$Z_{k12} = r_{k12} + jx_{k12} = Z_1 + Z_2' = r_1 + r_2' + j(x_1 + x_2')$$

2) при замкнутій накоротко обмотці 3 і розімкненій обмотці 2 знижена напруга підводиться до обмотки 1 і визначається як

$$Z_{k13} = r_{k13} + jx_{k13} = Z_1 + Z_3' = r_1 + r_3' + j(x_1 + x_3')$$

3) при замкнутій накоротко обмотці 3 і розімкненій обмотці 1 знижена напруга підводиться до обмотки 2 і визначається як

$$Z_{k23} = r_{k23} + jx_{k23} = Z_2' + Z_3' = r_2' + r_3' + j(x_2' + x_3')$$

Сумісне вирішення наведених раніше рівнянь дозволяє визначити Z_1, Z_2', Z_3' і їх складові

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{Z_{k12} + Z_{k13} - Z'_{k23}}{2}, \\ Z_2' = \frac{Z_{k12} - Z_{k13} + Z'_{k23}}{2}, \\ Z_3' = \frac{Z_{k13} - Z'_{k23} + Z_{k23}}{2}. \end{cases} \quad (13)$$

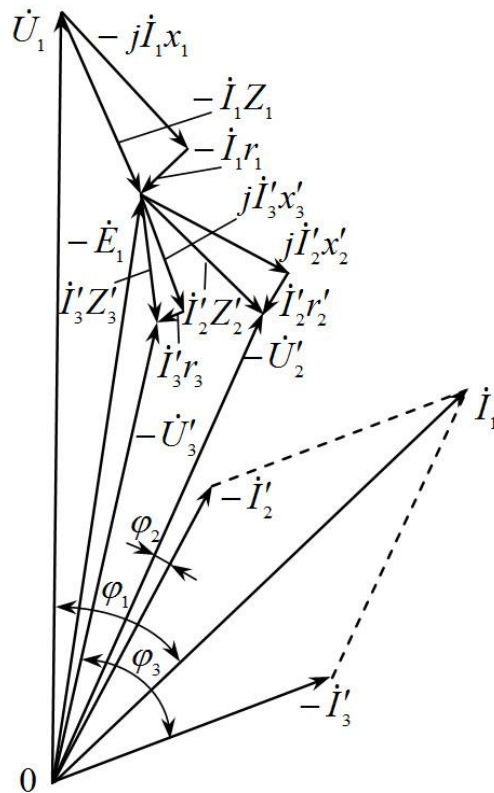


Рисунок 5 - Векторна діаграма трьохобмоткового трансформатора

Слід зазначити, що x_1, x'_2, x'_3 не є дійсними індуктивними опорами відповідних обмоток, а є еквівалентними індуктивними опорами, обумовленими індуктивностями обмоток і взаємними індуктивностями всіх трьох пар обмоток, і можуть мати від'ємні значення. Це пояснюється, тим що індуктивний опір розсіювання обмотки, розташованої між двома іншими, близький до нуля або має невелике від'ємне значення, що формально еквівалентно ємнісному опору, а фізично обумовлено особливостями розподілу магнітних полів розсіювання.

Потужності обмоток трьохобмоткового трансформатора дорівнюють $S_1 = mU_1I_1; S_2 = mU_2I_2; S_3 = mU_3I_3$.

У випадку, коли обмотка I є первинною, то потужності знаходяться у співвідношенні $S_1 \leq S_2 + S_3$, оскільки коефіцієнти потужності вторинних обмоток зазвичай різні, струми I_2 та I_3 зсунуті по фазі, тому $I_1 \leq I_2 + I_3$.

Сьогодні трьохобмоткові трансформатори випускаються з обмотками, що мають рівні номінальні потужності по 100% кожна. При цьому трансформатор може віддавати 100% потужностей в одну з вторинних обмоток або сумарну потужність, рівну 100%, в обидві вторинні обмотки. Раніше випускалися також трансформатори з наступними співвідношеннями номінальних потужностей обмоток:

100%	100%	67%
100%	67%	100%
100%	67%	67%

Трифазні трьохобмоткові трансформатори мають схеми з'єднання Y/Y-н/Δ- 0-11 або Y-н/Δ/Δ - 11-11, а однофазні - Y/Y/Y - 0 - 0.

Трьохобмоткові трансформатори з двома первинними і однією вторинною обмоткою (рисунок б) виготовляються для експлуатації на потужних електростанціях.

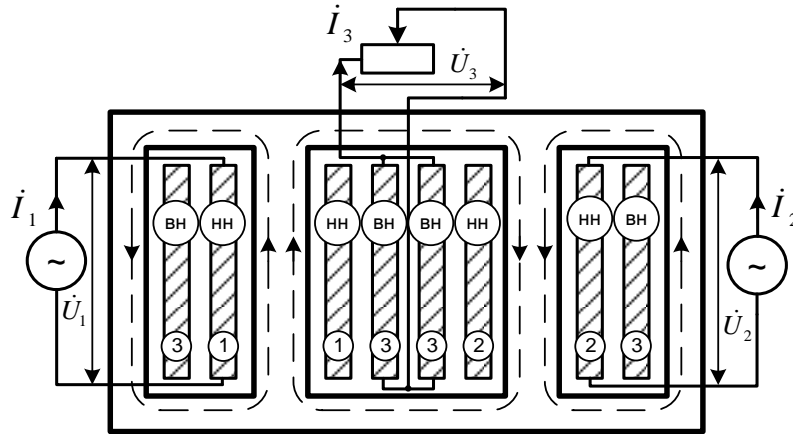


Рисунок б - Однофазний трьохобмотковий трансформатор з двома первинними обмотками

При цьому первинні обмотки мають однакову номінальну напругу і до них приєднується по одному потужному генератору, а вторинна обмотка, яка має дві паралельні гілки, з'єднується через підстанцію з лініями електропередачі. Трансформатори виконуються однофазними і з'єднуються в трифазну групу.

При такому конструктивному рішенні трансформатора полегшується виготовлення первинних обмоток, які мають великі струми, і у разі короткого замикання на затискачах одного генератора між двома генераторами діють активні і індуктивні опори двох первинних обмоток трансформатора, що призводить до зменшення струму короткого замикання.

Посилання на літературу:

- [1], с. 348...357;
- [2], с. 84...92, 117...137; [8], с. 57...63;
- [10], с. 139...145.

Контрольні питання:

1. Наведіть особливості будови і принципу дії автотрансформатора. Що називається коефіцієнтом вигідності автотрансформатора?
2. Наведіть переваги і недоліки автотрансформаторів порівняно з двообмотковими силовими трансформаторами.
3. Наведіть особливості будови і принципу дії багатообмоткових трансформаторів.
4. Наведіть переваги і недоліки багатообмоткових трансформаторів порівняно з двообмотковими силовими трансформаторами.

Тема №8. Спеціальні трансформатори

Лекція №15 «Вимірювальні трансформатори. Зварювальні трансформатори»

Мета: Засвоєння особливостей будови і принципів дії вимірювальних та зварювальних трансформаторів

Основні питання:

15.1 Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів струму.

15.2 Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів напруги.

15.3 Призначення, особливості конструкції зварювальних трансформаторів.

15.4 Схеми вмикання і принцип дії зварювальних трансформаторів.

15.1 Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів струму

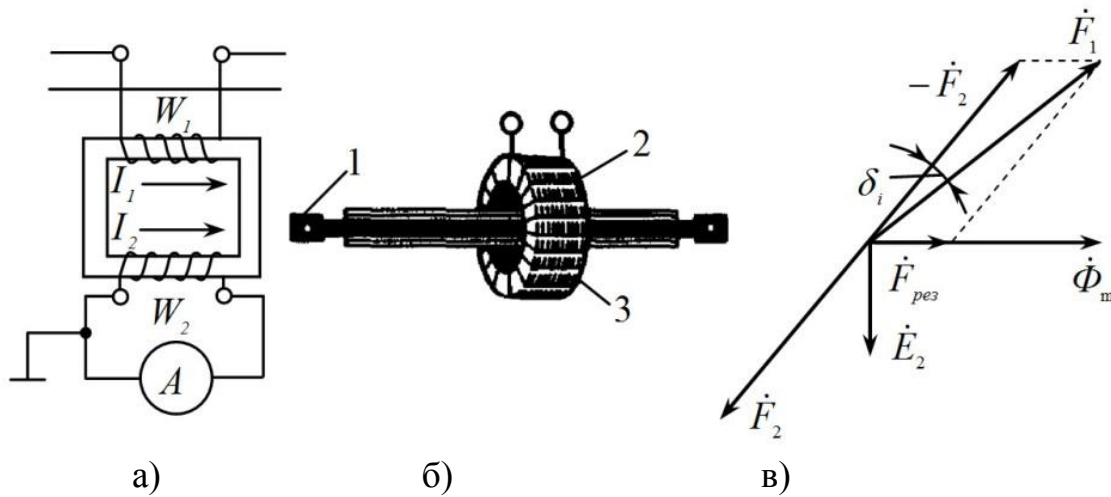
Вимірювальні трансформатори використовують головним чином для підключення електровимірювальних приладів в кола змінного струму високої напруги. При цьому електровимірювальні прилади виявляються ізольованими від кіл високої напруги, що забезпечує безпечну роботу обслуговуючого персоналу. Крім того, вимірювальні трансформатори дозволяють розширювати межі вимірювання приладів, тобто вимірювати великі струми і напругу за допомогою порівняно нескладних приладів, розрахованих для вимірювання малих струмів і напруг. У ряді випадків вимірювальні трансформатори служать для підключення до кіл високої напруги обмоток реле, що забезпечують захист електричних установок від аварійних режимів.

Вимірювальні трансформатори поділяють на два типи — трансформатори напруги і трансформатори струму. Перші використовуються для включення вольтметрів і інших приладів, що реагують на значення напруги (наприклад, котушок напруги ватметрів, лічильників, фазометрів і різних реле). Інші - для включення амперметрів і струмових котушок вказаних приладів.

Вимірювальні трансформатори виготовляють потужністю від п'яти до декількох сотень вольтампер; вони розраховані для спільної роботи із стандартними приладами (амперметрами на 1; 2; 2,5 і 5 А, вольтметрами на 100 і $100\sqrt{3}$ В).

Трансформатор струму виконують у вигляді двообмоткового підвищувального трансформатора (рисунок 1) або у вигляді прохідного трансформатора, у якого первинною обмоткою служить провід, що проходить через вікно магнітопровода.

У деяких конструкціях магнітопровід і вторинна обмотка змонтовані на прохідному ізоляторі, що служить для введення високої напруги в силовий трансформатор або іншу електричну установку. Первинною обмоткою трансформатора служить мідний стрижень, що проходить усередині ізолятора (рисунок 1,б).



1-мідний стрижень (первинна обмотка); 2 - вторинна обмотка;
3 - магнітопровід

Рисунок 1 - Схема включення вимірювального трансформатора струму (а), загальний вигляд прохідного ізолятора (б) і векторна діаграма (в)

Опори обмоток амперметрів і інших приладів, що підключаються до трансформатора струму, зазвичай малі. Тому він практично працює в режимі короткого замикання, при якому струми I_1 і I_2' у багато разів більше струму I_0 , і з достатнім ступенем точності можна вважати, що $I_1 = I_2' = I_2/k$.

Насправді через наявність струму холостого ходу в даному трансформаторі між векторами цих струмів є деякий кут, відмінний від 180° (рисунок 1, в). Це створює відносну струмову похибку

$$\gamma_i = \left[(I_2 k - I_1) / I_1 \right] 100\% \quad (1)$$

і кутову похибку, вимірювану кутом δ_i , між векторами \dot{I}_1 і $-\dot{I}_2'$.

Похибка δ_i , вважається позитивною, якщо вектор $-\dot{I}_2'$ випереджає вектор \dot{I}_1 .

Залежно від значення похибок, що допускаються, трансформатори струму поділяють на п'ять класів точності: стаціонарні — 0,2; 0,5; 1; 3; 10 і лабораторні - 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Приведені цифри відповідають припустимій для даного класу струмовій похибці при номінальному значенні струму. Кутова похибка складає 10... 120 кут. хв.

Для зменшення струмової і кутової похибки магнітопровід трансформатора струму виготовляють з високоякісної сталі достатньо великого перерізу, щоб в робочому режимі він був не насичений ($B = 0,06... 0,1$ Тл). За цих умов струм, що намагнічує, буде малий.

Слід зазначити, що розмикання кола вторинної обмотки трансформатора струму неприпустимо. Трансформатор переходить в режим холостого ходу і його результуюча МРС, в робочому режимі рівна $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_1 - \dot{F}_2$ (рисунок 1, в),

стає $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_1$. В результаті різко (у десятки і сотні разів) зростає магнітний потік в магнітопроводі, а індукція в ньому досягає значення $B > 2$ Тл, що приводить до сильного зростання магнітних втрат в сталі; при цьому трансформатор може згоріти. Ще більшу небезпеку становить різке підвищення напруги на затискачах вторинної обмотки до декількох сотень і навіть тисяч вольт. Для запобігання режиму холостого ходу при відключенні приладів слід замикати вторинну обмотку трансформатора струму накоротко.

15.2 Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів напруги

Трансформатор напруги виконують у вигляді двохобмоткового знижувального трансформатора (рисунок 2, а). Для забезпечення безпечної роботи обслуговуючого персоналу вторинну обмотку ретельно ізолюють від первинної і заземлюють. Умовне позначення трансформатора напруги таке ж, як двохобмоткового трансформатора.

Оскільки опори обмоток вольтметрів і інших приладів, що підключаються до трансформатора напруги, великі, то він практично працює в режимі холостого ходу. У цьому режимі можна з достатнім ступенем точності вважати, що $U_1 = U'_2 = U_2 k$.

Насправді струм холостого ходу I_0 (а також невеликий струм навантаження) створює в трансформаторі падіння напруги, тому, як видно з векторної діаграми (рис 2,б), $U'_2 \neq U_1$ і між векторами цієї напруги є деякий зсув по фазі δ_u . В результаті при вимірюваннях утворюються деякі похибки.

У вимірювальних трансформаторах напруги розрізняють два види похибок:

а) відносну похибку напруги

$$\gamma_u = [(U_2 k - U_1) / U_1] 100\%. \quad (2)$$

б) кутову погрішність δ_u , за її значення приймають кут між векторами \dot{U}_1 і $-\dot{U}'_2$.

Вона впливає на результати вимірювань, виконаних за допомогою вольтметрів, лічильників, фазометрів і інших приладів, показання яких залежать не тільки від сили струму і напруги, але і від кута зсуву фаз між ними. Кутова погрішність вважається позитивною, якщо вектор \dot{U}'_2 випереджає вектор \dot{U}_1 .

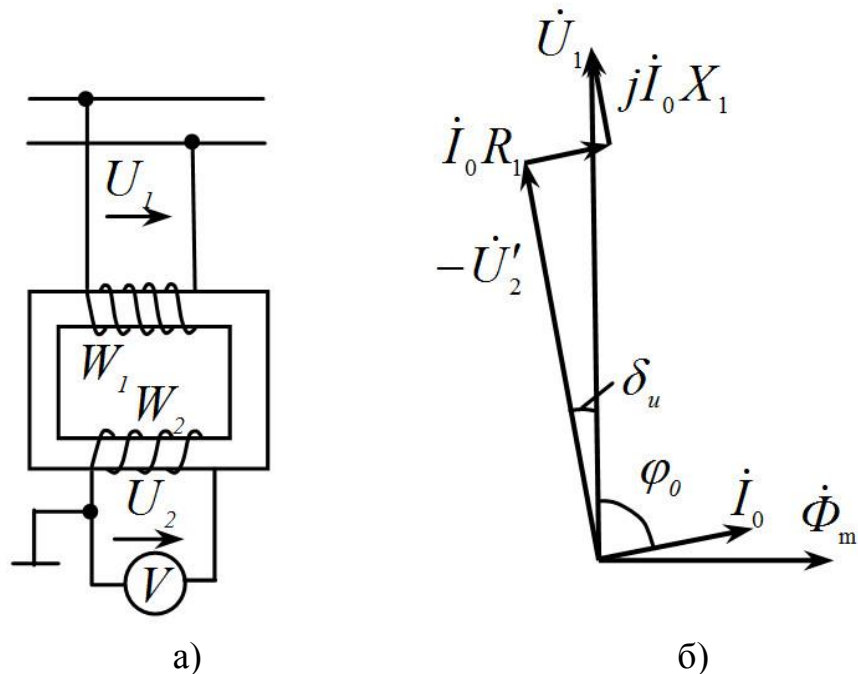


Рисунок 2 - Схема включення (а) і векторна діаграма вимірювального трансформатора напруги (б)

Залежно від значення похибок, що припускаються, стаціонарні трансформатори напруги поділяють на три класи точності: 0,5; 1 і 3, а лабораторні - на чотири: 0,05; 0,1; 0,2 і 0,5. Позначення класу відповідає значенню відносної похибки γ_u при номінальній напрузі $U_{1ном}$. Кутлова похибка їх складає 20... 40 кут. хв.

Трансформатори напруги, що випускаються промисловістю, зберігають клас точності при зміні первинної напруги від 80 до 120% від номінальної.

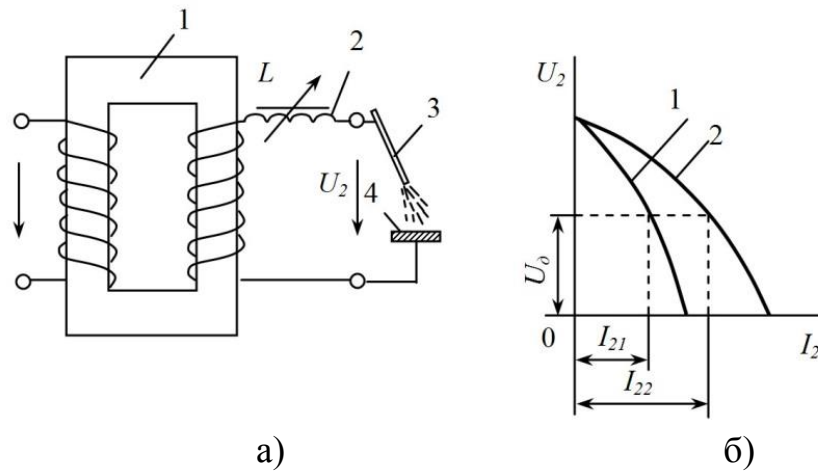
Для зменшення похибок γ_u і δ_u опори обмоток трансформатора Z_1 і Z_2 виконують по можливості малими, а магнітопровід виконують з високоякісної сталі достатньо великого поперечного перерізу, щоб в робочому режимі він не був насичений. Завдяки цьому забезпечується значне зменшення струму холостого ходу.

15.3 Призначення, особливості конструкції зварювальних трансформаторів

Зварювальними трансформаторами - понижувальні однофазні сухі трансформатори із вторинною напругою при холостому ході 60...75 В. Така напруга необхідна для надійного запалювання електричної дуги. При номінальному навантаженні вторинна напруга зменшується до 30 В.

При роботі зварювальних трансформаторів коротке замикання є нормальним експлуатаційним режимом. Тому, для обмеження струму короткого замикання і стійкого горіння дуги такий трансформатор повинен мати крутопадаючу зовнішню характеристику, а коло зварювального струму повинно мати значну індуктивність. Для цього в зварювальних трансформаторах первинну і вторинну обмотки розміщують на різних стрижнях магнітопроводу, внаслідок чого значення опору короткого замикання Z_k і напруги u_k у таких трансформаторів в декілька разів більше, ніж у звичайних силових трансформаторів.

Зазвичай в зварювальних трансформаторах послідовно із вторинною обмоткою включають реактор L із змінною індуктивністю (рисунок 3, а). Регулюючи індуктивність реактора (змінюючи повітряний зазор в його магнітопроводі), змінюють форму зовнішньої характеристики 1 або 2 трансформатора (рисунок 3, б) і струм дуги I_{21} або I_{22} , що відповідає напрузі горіння дуги U_0 .



1 - трансформатор; 2 - реактор із змінною індуктивністю;
3 - електрод; 4 - деталь

Рисунок 3 - Електрична схема (а) і зовнішні характеристики (б) зварювального трансформатора

У деяких конструкціях реактор безпосередньо вбудовують в зварювальний трансформатор. Такий трансформатор має три обмотки: первинну 1 (рисунок 2), вторинну 3 і обмотку реактора 4, які розташовані на загальному магнітопроводі.

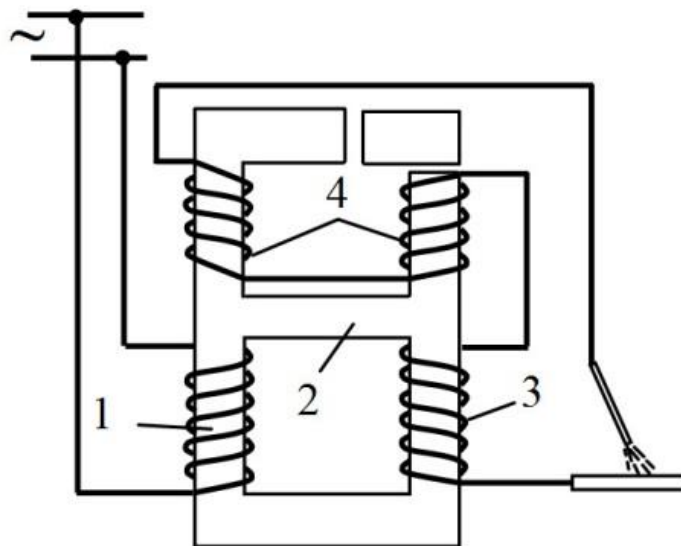


Рисунок 4 - Електромагнітна схема зварювального трансформатора з вбудованим реактором

Середнє ярмо 2 є загальним для кіл трансформатора і реактора. Обмотки 3 і 4 включені таким чином, що магнітний потік, який утворюється обмоткою реактора 4 в ярмі 2, направлений зустрічно основному потоку, створюваному первинною обмоткою 1. Завдяки цьому істотно зростає магнітне розсіяння в

трансформаторі при порівняно невеликому поперечному перерізі ярма 2. Внаслідок наявності в колі навантаження великої індуктивності, зварювальні трансформатори працюють з низьким $\cos\varphi=0,4\dots0,5$.

15.4 Схеми вмикання і принцип дії зварювальних трансформаторів

Регулювання струму зварювання в зварювальних трансформаторах здійснюється двома методами: збільшення індуктивного опору вторинного кола з нормальним потоком розсіювання; збільшення потоку розсіювання трансформатора.

Зміна індуктивного опору вторинного кола зварювального трансформатора здійснюється за допомогою зміни падіння напруги у вторинному колі $I_2 Z_2$ при підключенні додаткових регулюємих індуктивних опорів X_L . При цьому значення вторинної напруги має вигляд

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2 + jX_L)$$

До зварювальних трансформаторів із змінним значенням індуктивного опору X_L з нормальним потоком розсіювання відносяться зварювальні трансформатори типів СТЕ, СТН, ТС, ТСД. Схеми вмикання таких трансформаторів наведені на рисунках 5, 6, 7. Зварювальні трансформатори типу СТЕ мають класичну конструкцію, в якості індуктивного опору X_L використовується окремий дросель зі змінним повітряним проміжком δ для регулювання індуктивного опору.

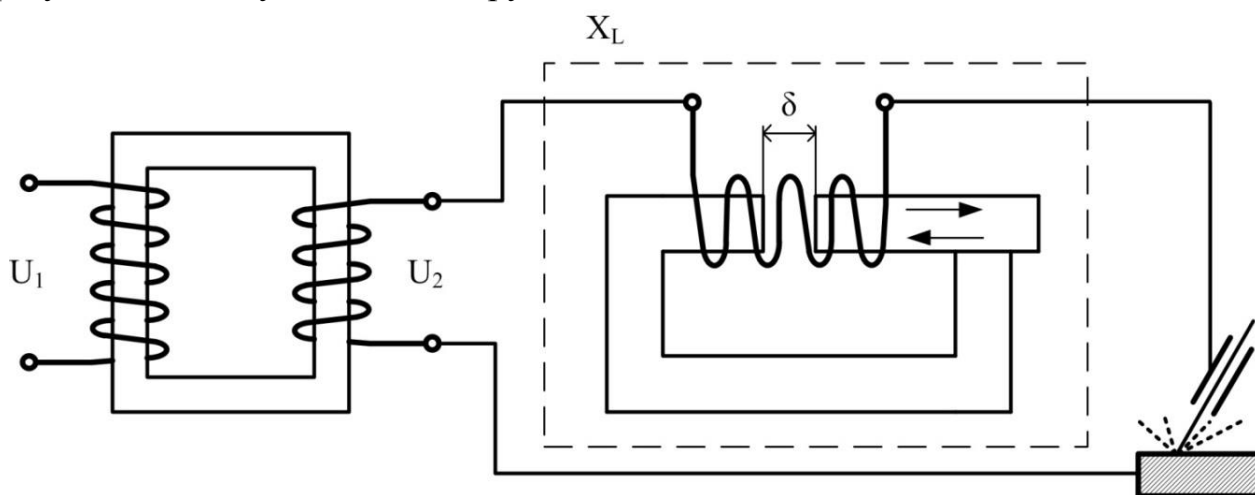


Рисунок 5 – Схема вмикання зварювального трансформатора типу СТЕ

Зварювальні трансформатори типу СТН, ТС та ТСД мають об'єднану конструкцію з метою покращення масогабаритних показників. Головною особливістю таких трансформаторів є наявність середнього ярма.

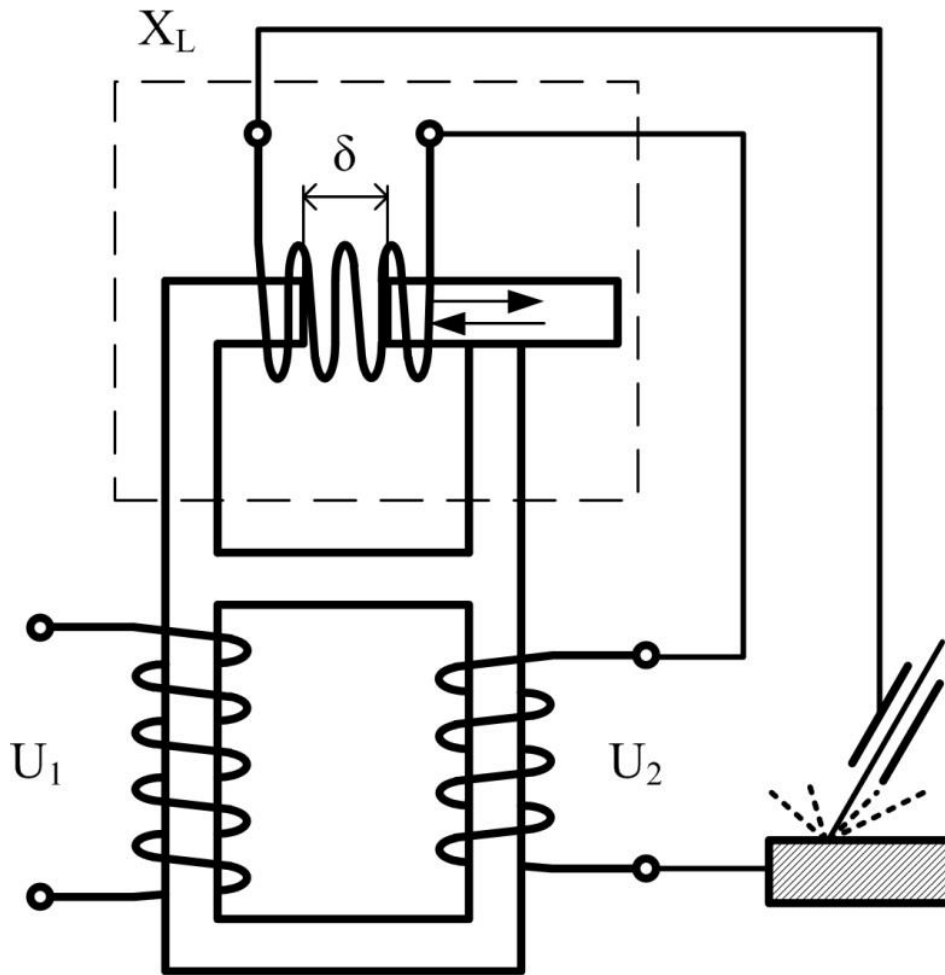


Рисунок 6- Схема вмикання зварювального трансформатора типу СТН

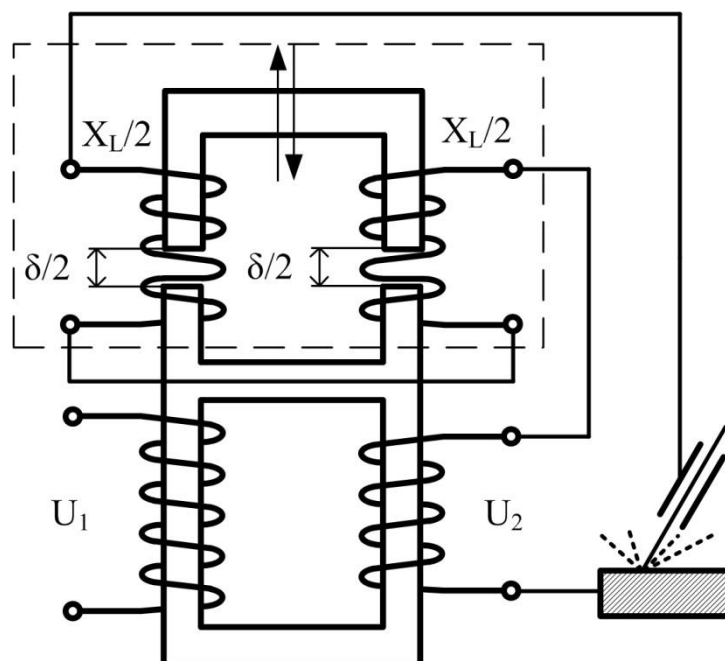


Рисунок 7 - Схема вмикання зварювального трансформатора типу ТС (ТСД)

Зварювальні трансформатори типів ТД, ТДМ і СТШ відносяться до трансформаторів із змінним потоком розсіювання. Схеми таких зварювальних трансформаторів наведені на рисунках 8,9.

Зміна індуктивного опору i , як наслідок, зміна і регулювання зварювального струму в трансформаторах типу ТД і ТДМ здійснюється за рахунок взаємного пересування обмоток. При наближенні обмоток потоки розсіювання зменшуються, струм зварювального кола збільшується і навпаки. Регулювання може здійснюватися ступінчасто або плавно.

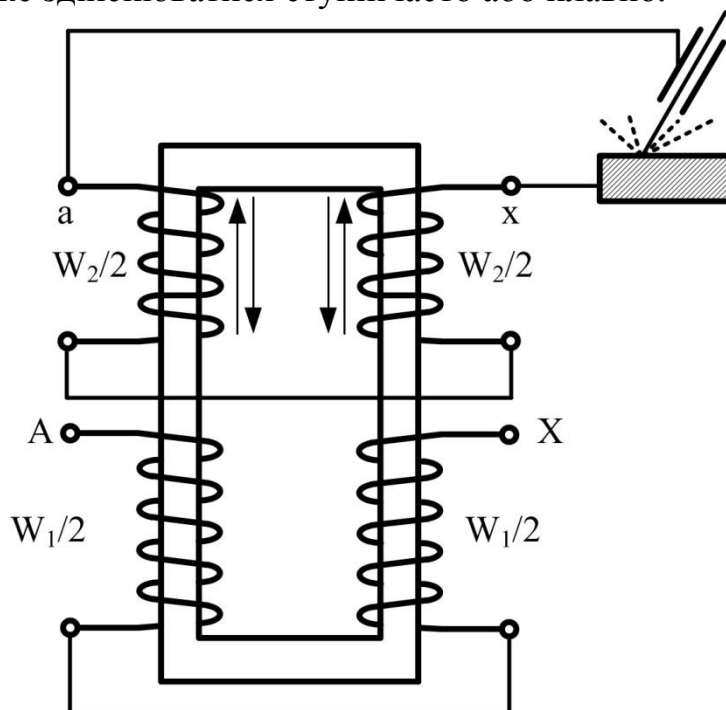


Рисунок 8 - Схема вмикання зварювального трансформатора типу ТД (ТДМ)

В зварювальних трансформаторах типу СТШ регулювання потоків розсіювання здійснюється за допомогою магнітного шунта, пересуваючи який можна змінювати зварювальний струм

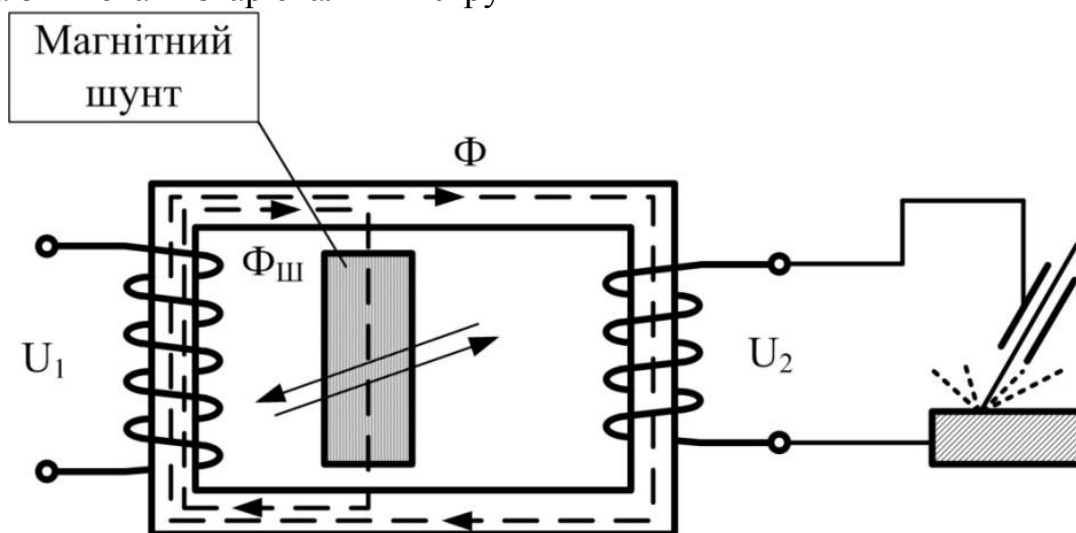


Рисунок 9 - Схема вмикання зварювального трансформатора типу СТШ

Посилання на літературу:

- [1], с. 348...357;
- [2], с. 84...92, 117...137; [8], с. 57...63;
- [10], с. 139...145.

Контрольні питання:

1. Назвіть основне призначення вимірювальних трансформаторів струму і напруги.
2. В якому режимі працюють вимірювальні трансформатори струму?
3. Які основні похибки розрізняють у вимірювальних трансформаторах струму і напруги?
4. В якому режимі працюють вимірювальні трансформатори напруги?
5. На які класи точності поділяють вимірювальні трансформатори?
6. Наведіть призначення і особливості будови зварювальних трансформаторів. За рахунок чого забезпечується підтримання горіння дуги?
7. Які заходи використовують у зварювальних трансформаторах для обмеження струмів короткого замикання?
8. Якими методами і як здійснюється регулювання струмів зварювання в різних типах зварювальних трансформаторів?
9. Які типи зварювальних трансформаторів використовуються?
10. Наведіть схеми включення трансформаторів різних марок.

Список літератури

1. Вольдек А. И. Электрические машины./А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Брускин Д. Э. Электрические машины: В 2-х ч. Ч. 1./ Д.Э. Брускин , А.Е. Захарович , В.С. Хвостов – М.: Высш. шк., 1987. – 319 с.
3. Брускин Д. Э. Электрические машины: В 2-х ч. Ч. 2./ Д.Э. Брускин , А.Е. Захарович , В.С. Хвостов – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
4. Радин В. И. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. пособие для электромех. спец. вузов/ В.И. Радин , Д.Э. Брускин , А.Е. Зорохович , Под ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. Шк., 1988. – 328 с.:ил.
5. Хвостов В. С. Электрические машины: Машины постоянного тока /Под ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 336 с.
6. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики./ В.В. Хрущев – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.
7. Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины./ Д.Э. Брускин , А.Е. Захарович , В.С. Хвостов – М.: Высш. шк. 1990. – 528 с.
8. Андрианов В. Н. Электрические машины и аппараты./ В.Н. Андрианов – М.: Колос, 1971. – 448 с.
9. Справочник по электрическим машинам /Подред И. П. Копылова и Б. К. Клокотова, т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
- 10.Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов./ И.П. Копылов – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.: ил.
- 11.Кислицын А. Л. Синхронные машины: Учебное пособие по курсу «Электромеханика»./ А.Л. Кислицын – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 108 с.
- 12.Штёлтинг Г. Электрические микромашины: Пер. с нем./ Г. Штёлтинг, А. Байсе.- М.: Энергоатомиздат, 1991. – 229 с.: ил.
- 13.Смуригін В.М., Галько С.В., Бородин Є.В., Ковальов О.В. Методичні вказівки до лабораторно-практичних робіт з дисципліни «Електричні машини». Частина 1: трансформатори і машини постійного струму/[Смуригін В.М., Галько С.В., Бородин Є.В., Ковальов О.В.]. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – 149 с.
- 14.Антонов М. В. Технология производства электрических машин. Учебное пособие для вузов./ М.В. Антонов, Л.С. Герасимова – М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.: ил.
- 15.Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
- 16.Кацман М. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие для электротехнических специальностей техникумов./ М.М. Кацман.– М.: ФОРУМ, ИНФРА – М, 2002. – 264 с. – (Серия «Профессиональное образование»).
- 17.Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин: Учебное пособие для техникумов./ М.М. Кацман.– М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с., ил.

18. Китаев В. Е., Корхов Ю. М., Свирин В. К. Электрические машины. Ч. II. Машины переменного тока: Учеб. пособие для техникумов/ Под ред. В. Е. Китаева. – М.: Высш. школа, 1978. – 184 с., ил.
19. Кокорев А. С. Справочник молодого обмотчика электрических машин./ А.С. Кокорев – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 207 с., ил. – (Профессионально – техническое образование)
20. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф., В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с., ил.
21. Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини): Лабораторний практикум з дисципліни «Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини) для студентів спеціальності 6.091901 – «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/Укл.: М.О. Чуєнко, Р.М. Чуєнко Ю, А.Г. Кушніренко. – Ніжин, 2009. – 276 с.
22. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.