

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Електричні машини. Частина 1»
для студентів спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Покровськ - 2017

УДК 621.31
К 65

Конспект лекцій з дисципліни «Електричні машини. Частина 1» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання / [укл. Тютюнник Н.Л., Кардаш Д.О.] . – Покровськ : ДонНТУ, 2017. – 178 с.

Конспект лекцій містить відомості про конструкцію та принцип дії трансформаторів, фізичні процеси, що в них протікають, схеми заміщення та характеристики однофазних і трифазних трансформаторів, а також основні відомості про спеціальні трансформатори.

Конспект лекцій складений відповідно до вимог державних освітніх стандартів і може бути використаний для розширення знань студентів – електроенергетиків спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» і теплоенергетиків спеціальності 144 «Теплоенергетика».

Укладачі: Тютюнник Н.Л., ст. викл. кафедри «Електрична інженерія»
Кардаш Д.О., ас. кафедри «Електрична інженерія»

Рецензент: Колларов О.Ю., доц., к.т.н., зав. кафедри «Електрична інженерія»

Відповідальний за випуск: Колларов О.Ю. зав. каф. «Електрична інженерія»

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 13 від 06.06.2017 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії,
протокол № 18 від 23.05. 2017 р.

©ДонНТУ, 2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ТРАНСФОРМАТОРИ.....	5
ТЕМА 1 КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ	5
ТЕМА 2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ТРАНСФОРМАТОРІ.....	16
ТЕМА 3 СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА.....	28
ТЕМА 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА.....	38
ТЕМА 5 ТРИФАЗНІ ТА СПЕЦІАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ	48
РОЗДІЛ 2 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	84
ТЕМА 6 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ПРИНЦИП ДІЇ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	84
ТЕМА 7 МАГНІТНЕ ПОЛЕ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	111
ТЕМА 8 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	122
ТЕМА 9 ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	136
ТЕМА 10 КОМУТАЦІЯ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СПЕЦІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	164
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	178

ВСТУП

Конспект лекцій призначений для студентів другого курсу денної і заочної форм навчання спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» і 144 «Теплоенергетика».

Основні викладені розділи дисципліни: трансформатори, трифазні трансформатори, спеціальні трансформатори, колекторні машини постійного струму, генератори та двигуни постійного струму, Машини постійного струму спеціального призначення.

Електричні машини та трансформатори є невід'ємною частиною будь-яких електричних схем та приладів, які передають та перетворюють електричну енергію. За таких умов важливого значення набуває вивчення цього курсу, щоб кваліфіковано вирішувати питання експлуатації та проектування електричних систем. Все це обумовлює актуальність вивчення дисципліни "Електричні машини"..

У відповідності з навчальним планом студенти повинні прослухати лекції, засвоїти матеріал на практичних заняттях та виконати курсовий проект. Контроль знань включає поточне опитування, проміжні контрольні роботи, перевірка виконання та захист курсового проекту, екзамени з курсу в першому і другому семестрах. На практичних заняттях опрацьовується матеріал отриманий з лекцій матеріал.

РОЗДІЛ 1 ТРАНСФОРМАТОРИ

ТЕМА 1

КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ

- 1.1 Основні визначення та класифікація трансформаторів
- 1.2 Конструкція магнітної системи
- 1.3 Конструкція обмоток
- 1.4 Ізоляція силових трансформаторів
- 1.5 Вводи трансформаторів
- 1.6 Охолодження трансформаторів
- 1.7 Принцип дії силового трансформатора

1.1 Основні визначення та класифікація трансформаторів

Трансформатором (ТР) називається статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення однієї системи змінного струму (первинної) в іншу (вторинну), що відрізняється від первинної своїми показниками: у загальному випадку величиною напруги і струму, частотою, числом фаз.

Перетворення електричної енергії в ТР відбувається за допомогою електромагнітного поля, що зв'язує дві або більше обмоток.

Обмотка ТР, що приймає енергію з мережі, називається первинною, а обмотка, що віддає енергію, називається вторинною.

Обмотки ТР розраховуються для підключення до мереж із різними напругами. Обмотка, яка призначена для приєднання до мережі з більш високою напругою, називається обмоткою високої напруги (ВН), а для приєднання до мережі з меншою напругою – обмоткою низької напруги (НН).

Якщо вторинна напруга менше від первинної, то ТР називають знижувальним, а якщо більше – підвищувальним.

Класифікують ТР за декількома ознаками:

призначенням:

- **силові** – для живлення силового й освітлювального навантажень;
- **спеціальні** – для живлення струмоприймачів спеціального призначення (електропечей, зварювальних апаратів та ін.);
- **вимірювальні** – для перетворення контрольованого сигналу (напруги або струму) до стандартної величини, що підлягає вимірюванню;
- **перетворюючі** – для перетворення числа фаз змінного струму, для перетворення частоти, для випрямних установок;
- **імпульсні** – для одержання імпульсних сигналів та іншого, що виникають в установках автоматики і телемеханіки;

- **автотрансформатори** для перетворення напруги в невеликих межах;
- за числом фаз, що трансформуються:**
 - однофазні, трифазні, багатофазні;
- за формою магнітної системи:**
 - стержньові, броньові, броньостержньові;
- за числом обмоток на фазу:**
 - двообмоткові, багатообмоткові;
- за видом охолодження:**
 - із повітряним (сухі ТР), масляним (масляні ТР) та охолодженням негорючим діелектриком.

Будь-яке охолодження може бути природним (М, С) та примусовим (Д, ДЦ, Ц).

1.2 Конструкція магнітної системи

Залежно від конфігурації магнітної системи ТР підрозділяють на стержньові (рис. 1.1,а), броньові (рис. 1.1,б) і тороїдальні (рис. 1.1,в). Стержнем 2 (рис. 1.1) називають частину магнітної системи (МС), на якій розміщують обмотки. Частина МС, на котрій обмотки відсутні, називають ярмом (рис. 1.1).

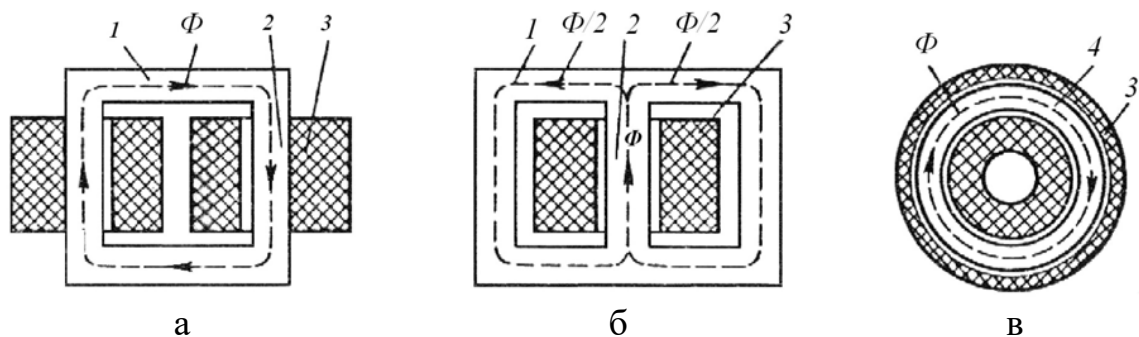


Рисунок 1.1. Основні типи однофазних трансформаторів: 1 – ярмо; 2 – стержень; 3 – обмотки; 4 – тороїдальний магнітопровід. За взаємним розташуванням стержнів та ярма магнітної системи можуть бути плоскими (рис. 1.1) та просторовими (рис. 1.2).

За взаємним розташуванням стержнів та ярм магнітні системи можуть бути плоскими (рис. 1.1) та просторовими (рис. 1.2).

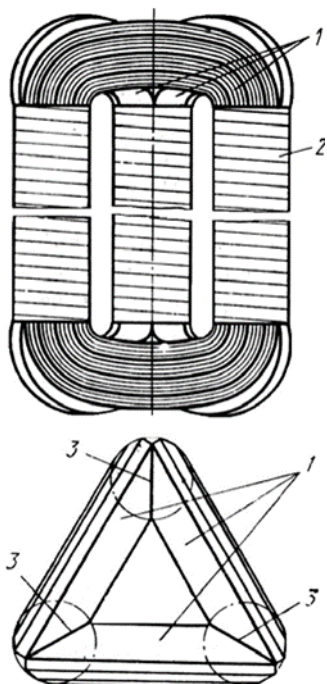


Рисунок 1.2. Просторова магнітна система: 1 – елементи витої стрічкової магнітної системи; 2 – склобандаж; 3 – ізоляційна прокладка стику двох частин складового стержня

ТР великої і середньої потужності звичайно виконують стержньовими (Рис. 1.3). Вони мають кращі умови охолодження та менші маси, ніж броньові.

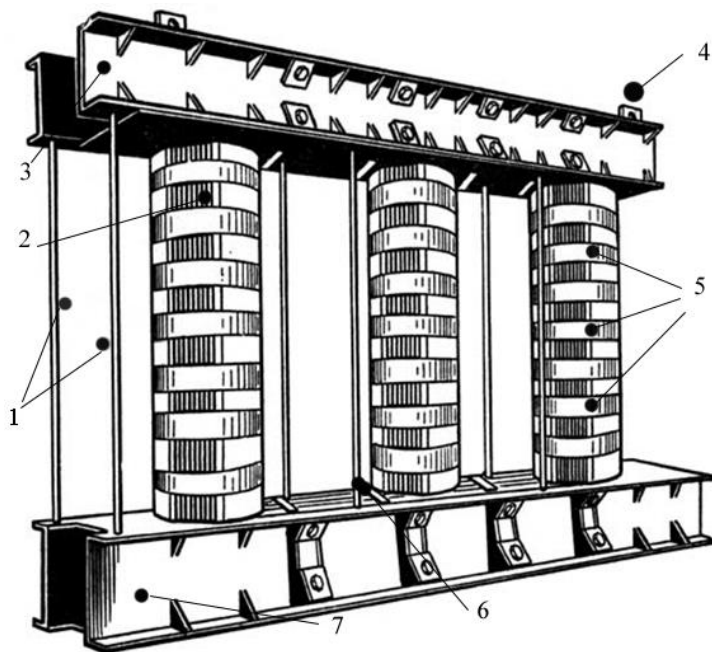


Рисунок 1.3. Магнітна система силового трифазного трансформатора: 1 – тяжні шпильки; 2 – стержень; 3, 7 – ярмові балки; 4 – підйомні планки; 5 – склобандажі; 6 – ярмо При значних потужностях (більше за $80 \div 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ на фазу) часто застосовують броньостержньові ТР.

За способом збирання розрізняють стикові і шихтовані магнітопроводи. У стикових магнітопроводах стержні та ярма збирають і скріплюють роздільно, а потім встановлюють у стик та з'єднують між собою. У місці стику, щоб уникнути замикання листів, встановлюють ізоляційні прокладки. Шихтовані магнітопроводи мають значно менший магнітний опір, ніж стикові, тому стикові застосовують зараз тільки в мікротрансформаторах.

Стержні магнітної системи у силових ТР невеликої потужності мають прямокутний або хрестоподібний перетин (рис. 1.4,а,б), а в більш потужних – східчастий, який за формою наближається до кола (рис. 1.4,в). Така форма забезпечує одержання необхідного поперечного перетину стержня при мінімальному діаметрі, що дозволяє зменшити довжину витків обмоток та витрати обмотувальних проводів.

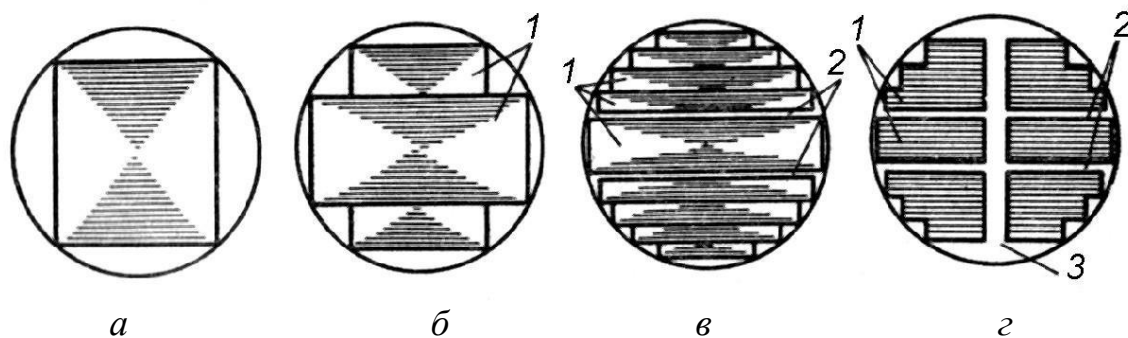


Рисунок 1.4. Форми перетину стержнів трансформаторів: 1 – пакети листів; 2 – поздовжні канали; 3 – поперечний канал

Ярма, що з'єднують стержні, виконують звичайно прямокутного, Т-подібного або східчастого перетину, які на (2÷5) % більше від перетину стержнів. Це зменшує індукцію у сталі ярма та втрати потужності в ньому.

ТР малої потужності та мікротрансформатори часто виконують броньовими, тому що вони мають більш низьку вартість порівняно зі стержневими через менше число котушок та спрощення збирання і виготовлення.

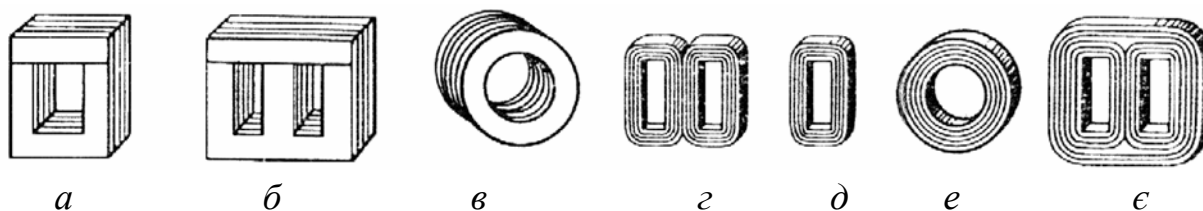


Рисунок 1.5. Магнітні системи трансформаторів малої потужності: а, д – стержньові; б, г – броньові; в, е – тороїдальні; є – трифазні

1.3 Конструкція обмоток

Для кращого магнітного зв'язку первинну і вторинну обмотки ТР прагнуть розташовувати якнайближче одну до одної. При цьому на кожному стержні МС розміщують обидві обмотки або концентрично – одну поверх іншої, або у вигляді кількох дискових котушок, що чергуються по висоті стержня. У першому випадку обмотки називають концентричними, у другому – переміжними.

У силових ТР звичайно застосовують концентричні обмотки, причому ближче до стержнів розташовують обмотку НН, що потребує меншої ізоляції відносно остова трансформатора, а зовні – обмотку ВН.

Обмотки ТР виготовляють із мідних або алюмінієвих проводів. При використанні алюмінію поперечний перетин проводу беруть приблизно на 70 % більше, ніж при використанні міді, через більший питомий електричний опір алюмінію. У зв'язку з цим габарити і маса ТР з алюмінієвими обмотками більше, ніж у ТР із мідними обмотками. При невеликих струмах обмотки виконують з ізолюваного проводу круглого перетину, при великих струмах застосовують проводи прямокутного перетину. У ряді випадків обмотки намотують із кількох паралельних проводів.

За конструкцією концентричні обмотки підрозділяють на циліндричні, безперервні та гвинтові.

Циліндричні обмотки (рис. 1.6,а), виконані з прямокутного проводу, звичайно застосовують як обмотки нижчої напруги при потужностях до $250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ на один стержень (до $630 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ для трифазного ТР) і напрузі до 6 кВ. При потужності $(10 \div 16) \text{ кВ} \cdot \text{А}$ обмотку намотують в один-два шари, а при великих потужностях – в два шари, з'єднаних послідовно (рис. 1.6,б).

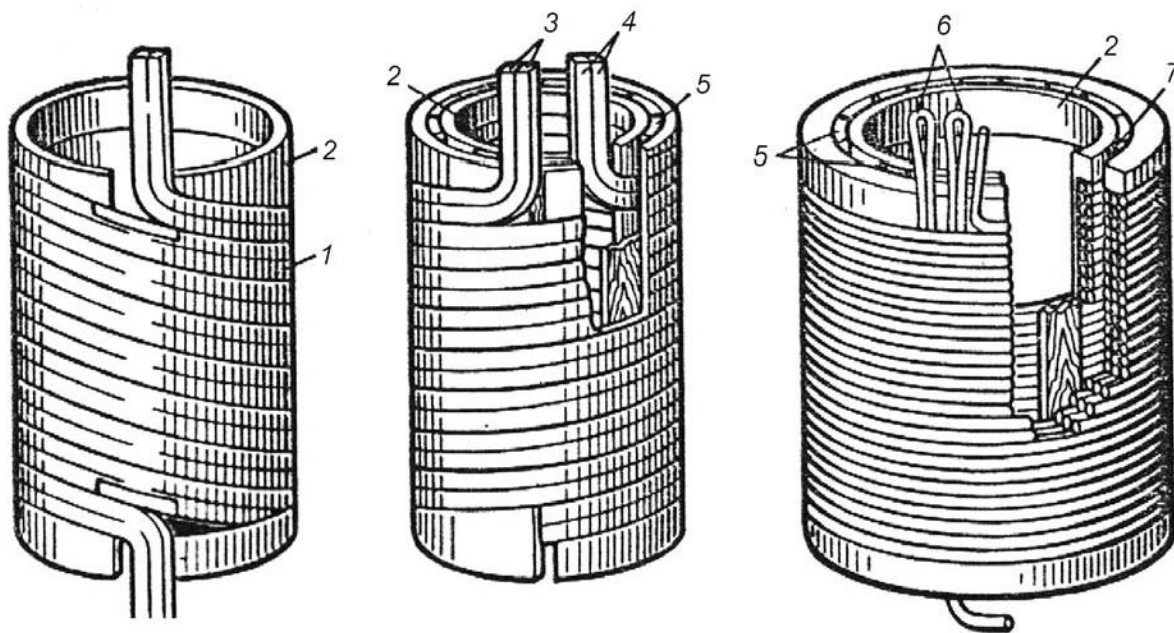


Рисунок 1.6. Циліндричні обмотки: 1 – витки з прямокутного проводу; 2 – паперово-бакелітовий циліндр; 3, 4 – вивідні кінці; 5 – вертикальні рейки; 6 – внутрішні відгалуження обмотки; 7 – аксіальний охолоджувальний канал

Залежно від сили струму кожен шар може складатися з одного або кількох паралельних проводів.

Обмотки вищої напруги ТР потужністю до $250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ на один стержень і напругою до 35 кВ, а також обмотки нижчої напруги при $3 \div 10 \text{ кВ}$ виконують циліндричними багатошаровими (рис. 1.6,в).

У ТР потужністю від 160 до $63000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ на стержень і вище при напрузі від 3 до 220 кВ як обмотки вищої напруги часто застосовують безперервні спіральні котушкові обмотки.

Гвинтові одно- та багатоходові обмотки використовують як обмотки нижчої напруги в ТР потужністю понад $250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ на стержень при напрузі до 15 кВ і струмах понад 300 А для мідних проводів і $(150 \div 200) \text{ А}$ для алюмінієвих. Гвинтову обмотку намотують по гвинтовій лінії з кількох паралельних проводів прямокутного перетину, що прилягають один до одного в радіальному напрямку. Подібно до різьби гвинта вона може бути одно-, дво- та навіть багатоходовою. Між окремими витками та рівнобіжними ходами виконують охолоджувальні канали.

У ТР малої потужності (рис. 1.7) і мікротрансформаторах використовують одношарові та багатошарові обмотки з круглого проводу з емалевою або бавовняною ізоляцією, що намотують на гільзу або на каркас із електрокартону, між шарами проводів прокладають ізоляцію з кабельного паперу або тканини.

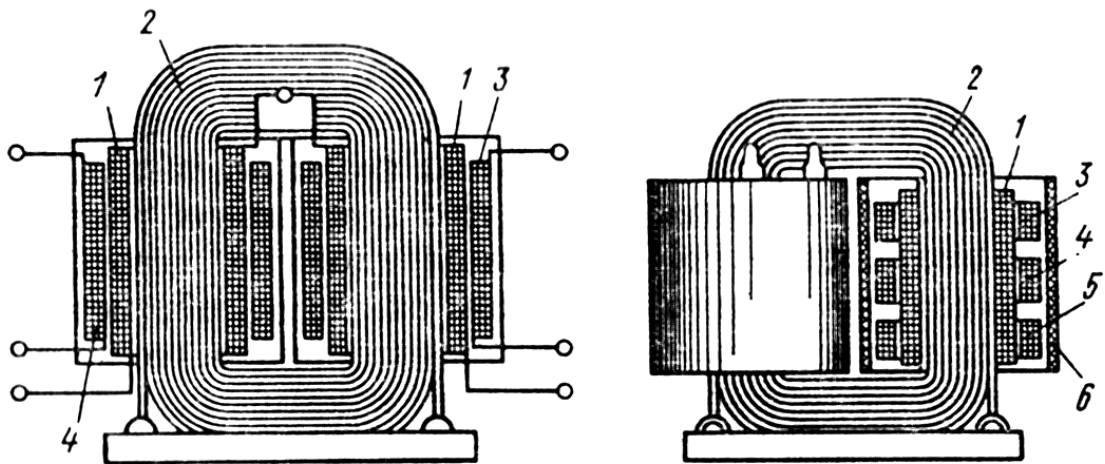


Рисунок 1.7. Будова трансформаторів малої потужності: 1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3, 4, 5 – вторинна обмотка; 6 – ізоляційна гільза У

1.4 Ізоляція силових трансформаторів

У ТР ізоляцію обмоток підрозділяють на головну – ізоляцію обмоток від магнітопроводу та між собою (обмоток НН від ВН) і поздовжню – ізоляцію між витками, шарами і котушками кожної обмотки.

Щоб запобігти пробією ізоляції при впливі на обмотку імпульсних перенапруг у високовольтних ТР, між обмотками додатково ставлять жорсткі паперово-бакелітові циліндри або м'які циліндри з електроізоляційного картону.

У ТР напругою 35 кВ для захисту від атмосферних перенапруг дві початкові і дві кінцеві котушки обмотки вищої напруги виконують з посиленою ізоляцією

У ТР напругою 110 кВ та вище для зменшення напруги на кінцевих котушках обмотки вищої напруги та вирівнювання електричного поля на кінцях обмотки застосовують ємнісну компенсацію у вигляді ємнісних кілець, що є електричними екранами.

Звичайно ізоляцію між котушками здійснюють радіальними масляними каналами. Як ізоляцію між шарами обмотки звичайно застосовують кілька шарів кабельного паперу, електроізоляційний картон або лакотканину.

Ізоляцію між витками забезпечують в основному власною ізоляцією обмотувального проводу.

1.5 Вводи трансформаторів

Для виведення назовні кінців від обмоток ТР, що охолоджуються маслом або негорючим рідким діелектриком, використовують прохідні порцелянові ізолятори, розташовані на кришці або на стінці бака. Прохідний ізолятор разом із струмоведучим стержнем і кріпильними деталями називають вводами (рис.1.8).

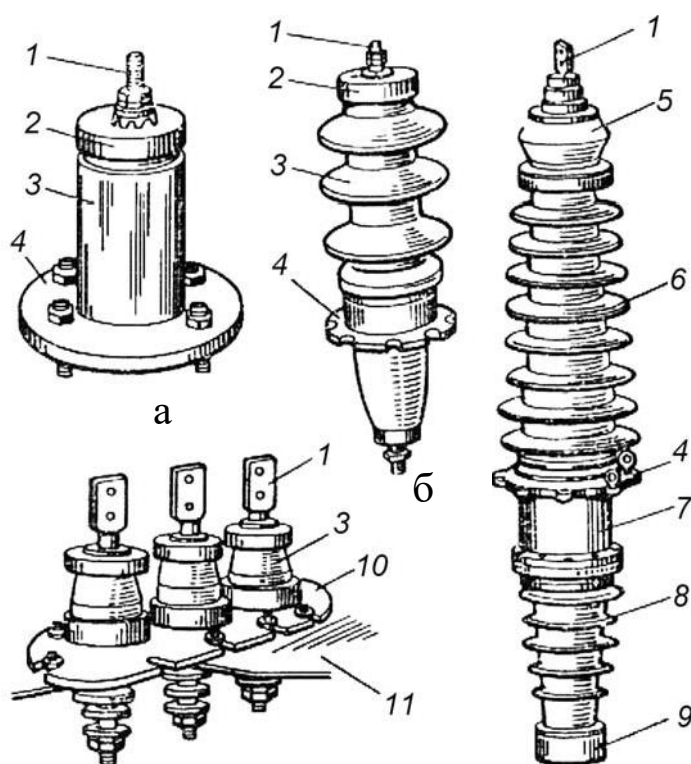


Рисунок 1.8.
Вводи трансформаторів:

а – для внутрішньої установки; *б* – для зовнішньої установки; *в* – за великих струмів; *г* – маслонаповнений для напруги 110 кВ;

1 – струмоведучий стержень; 2 – ковпак; 3 – порцеляновий циліндр; 4 – металевий фланець; 5 – маслорозширник з масляним затвором; 6 – верхня порцелянова покришка; 7 – з'єднувальна чавунна втулка; 8 – нижня порцелянова покришка; 9 – алюмінієвий екран; 10 – латунний фланець;

1.6 Охолодження трансформаторів

Конструктивне виконання ТР визначається значною мірою способом його охолодження, що залежить від номінальної потужності. При збільшенні потужності ТР необхідно збільшувати й інтенсивність його охолодження.

У силових ТР для відведення теплоти від обмоток та магнітопроводу застосовують такі способи охолодження: повітряне, масляне, газове, охолодження за допомогою рідкого негорючого або твердого діелектрика. Кожен вид охолодження має відповідне умовне позначення.

Трансформатори з повітряним охолодженням (сухі трансформатори)

При природному повітряному охолодженні МС обмотки та інші частини ТР мають безпосереднє зіткнення з навколишнім середовищем, тому охолодження їх відбувається шляхом конвекції повітря і випромінювання.

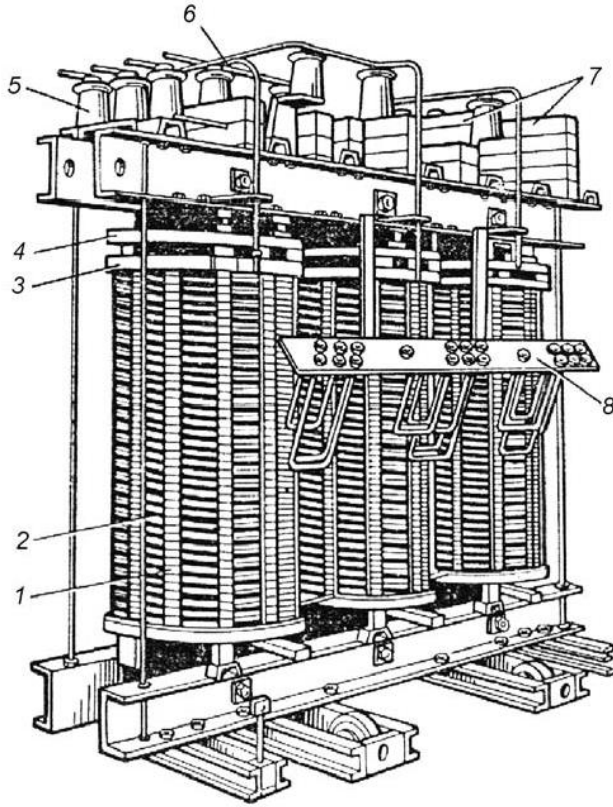


Рисунок 1.9. Сухий трансформатор потужністю 320 кВ·А без кожуха:
1 – вертикальні стяжні шпильки; 2 – обмотки ВН; 3 – порцелянові підкладки для пресування обмоток; 4 – сталеве пресуюче кільце; 5 – опорні ізолятори вводів ВН; 6 – відводи НН; 7 – порцелянові підкладки для кріплення вводів НН; 8 – дошка затискачів ВН

Сухі ТР (рис. 1.9) встановлюють усередині приміщення (у будівлях, виробничих цехах та ін.), при цьому головною вимогою є забезпечення пожежної безпеки. В експлуатації вони зручніше від масляних, тому що виключають необхідність періодичного очищення та зміни масла.

Проте повітря має меншу електричну тривкість, ніж трансформаторне масло, тому в сухих трансформаторах усі ізоляційні проміжки і вентиляційні канали роблять більшими, ніж у масляних.

Нашим часом сухі ТР мають потужності до 10 МВ·А та напругу обмотки ВН до 35 кВ. Їх установлюють тільки в сухих закритих приміщеннях із відносною вологістю повітря до 80 %, щоб уникнути надмірного зволоження обмоток.

Трансформатори з масляним охолодженням

У ТР із природним масляним охолодженням (М) магнітну систему з обмотками занурюють у бак, наповнений старанно очищеним мінеральним (трансформаторним) маслом (рис. 1.10). Трансформаторне масло має більш високу теплопровідність, ніж повітря, і добре відводить тепло від обмоток і магнітопроводу трансформатора до стінок бака, що мають більш велику площу охолодження, ніж трансформатор.

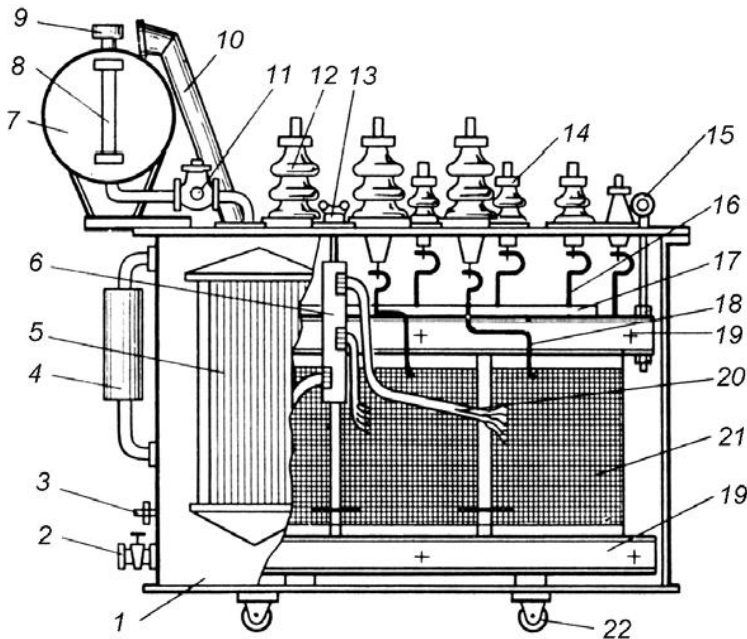


Рисунок 1.10. Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності: 1 – бак; 2 – вентиль; 3 – болт заземлення; 4 – термосифонний фільтр; 5 – радіатор; 6 – перемикач; 7 – розширник; 8 – вказівник рівня масла; 9 – повітряосушник; 10 – викидна труба; 11 – газове реле; 12 – ввід ВН; 13 – привід перемикаючого пристрою; 14 – ввід НН; 15 – під'ємний рим; 16 – вивід НН; 17 – остов; 18 – вивід ВН; 19 – ярмова балка; 20 – регульовальні відгалуження обмотки ВН; 21 – обмотка ВН; 22 – каток

Занурення ТР у бак із спеціальним маслом забезпечує також підвищення електричної міцності ізоляції його обмоток та запобігає її зволоженню і втраті ізоляційних властивостей під дією атмосферних впливів.

У ТР потужністю $(20 \div 30) \text{ кВ} \cdot \text{А}$ виділяється порівняно невелика кількість теплоти, тому їхні баки мають гладкі стінки, у більш потужних ТР $(20 \div 1800) \text{ кВ} \cdot \text{А}$ поверхню охолодження бака штучно збільшують, застосовуючи ребристі чи хвилясті стінки або приварюють до бака систему труб, у яких масло циркулює за рахунок конвекції.

Трансформатори, які охолоджуються негорючим рідким діелектриком

ТР з охолодженням типів Н та НД виконують із герметичним баком, що заповнюють негорючим рідким діелектриком. Звичайно застосовують синтетичні ізоляційні матеріали, що мають приблизно такі ж електроізоляційні властивості та теплопровідність, як трансформаторне масло.

ТР з охолодженням типів Н чи НД пожежебезпечні і можуть встановлюватися у закритих приміщеннях. Їх випускають потужністю $(160 \div 2500) \text{ кВ} \cdot \text{А}$ при напрузі 6 та 10 кВ.

1.7 Принцип дії силового трансформатора

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (сердечника), виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листова електротехнічна сталь), і двох обмоток, розташованих на стрижнях магнітопроводу (рис. 1.1, а). Одна з обмоток, яку називають первинною, приєднана до джерела змінного струму Γ на напругу U_1 . До іншої обмотці, званої вторинної, підключений споживач Z_H . Первинна і вторинна обмотки трансформатора не мають електричного зв'язку одна з одною, і потужність з однієї обмотки в іншу передається електромагнітним шляхом. Магнітопровід, на якому розташовані ці обмотки, служить для посилення індуктивного зв'язку між обмотками.

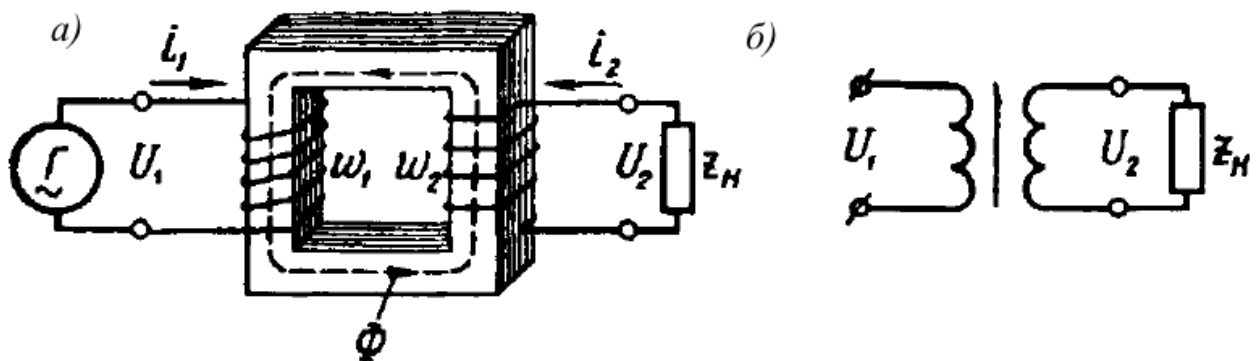


Рисунок 1.11 - Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми трансформатора

Дія трансформатора заснована на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму в витках цієї обмотки протікає змінний струм i_1 , який створює в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ . Замикаючись в магнітопроводі, цей потік зчіплюється з обома обмотками (первинної та вторинної) та індукує в них ЕРС:

У первинній обмотці ЕРС самоіндукції

$$E_1 = -w_1 (d\Phi / dt), \quad (1.1)$$

У вторинній обмотці ЕРС взаємоіндукції

$$E_2 = -w_2 (d\Phi / dt), \quad (1.2)$$

де w_1 і w_2 - число витків в первинній та вторинній обмотках трансформатора.

При підключенні навантаження Z_2 до висновків вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 в ланцюгах цієї обмотки спрацьовує ток i_2 , а на виходи вторинної обмотки встановлюється напруга U_2 . В підвищують трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижуючих $U_2 < U_1$.

З (1.1) і (1.2) видно, що ЕРС e_1 і e_2 , що наводяться в обмотках трансформатора, відрізняються один від одного лише за рахунок рознесених чисел витків w_1 і w_2 в обмотках, тому вони застосовуються з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор практично на будь-яке відношення напруг.

Обмотку трансформатора, що підключається до мережі з більш високою напругою, називають обмоткою вищої напруги (ВН); Обмотка, підключена до мережі меншої напруги, - обмоткою нижчої напруги (НН).

На рис. 1.1, б показано зображення однофазного трансформатора на принципових електричних схемах.

Трансформатори мають властивість оборотності: один і той же трансформатор може використовувати в якості підвищує і понижувального. Але зазвичай трансформатор має певне призначення: або він підвищує, або - понижуючий.

Трансформатор - це апарат змінного струму. Якщо ж його первинну обмотку підключити до джерела постійного струму, то магнітний потік в магнітопроводі трансформатора також буде постійним як за величиною, так і за напрямком $[(d\Phi / dt) = 0]$, тому в цьому випадку трансформатора не буде наводитися ЕРС, Електроенергія з первинної ланцюга нічого очікувати передаватися у вторинну.

Література:

[1],[2],[5]

ТЕМА 2

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ТРАНСФОРМАТОРІ

- 2.1 Рівняння напруги трансформатора
- 2.2 Форма намагнічуючого струму неробочого ходу однофазного трансформатора
- 2.3 Рівняння магніторушійних сил і струмів
- 2.4 Приведення вторинної обмотки трансформатора
- 2.5 Векторні діаграми трансформатора

2.1 Рівняння напруги трансформатора

Під неробочим ходом трансформатора розуміють режим роботи при розімкненій вторинній обмотці, тобто при $I_2 = 0$. Якщо до первинної обмотки з числом витків w_1 підвести змінну напругу U_{10} , то по ній буде протікати струм I_0 , що створить МРС $F_0 = I_0 w_1$ первинної обмотки і магнітний потік $\Phi_\Sigma = \Phi + \Phi_{\sigma 1}$ (рис. 2.1).

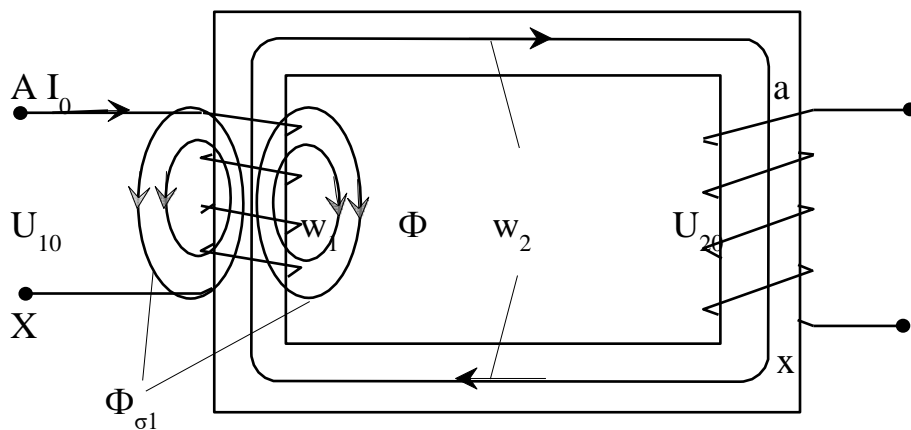


Рисунок 2.1 – Магнітні потоки в однофазном трансформаторі

Потік Φ зчеплений із витками обох обмоток трансформатора і його називають основним. Потік $\Phi_{\sigma 1}$ зчеплений тільки з витками первинної обмотки і його називають потоком розсіяння первинної обмотки.

Основний змінний магнітний потік Φ , зчіплюючись із витками первинної і вторинної обмоток, наводить у них ЕРС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.1)$$

Якщо припустити, що $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, то ЕРС обмоток

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = -w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) =$$

$$= 2\pi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right);$$

$$e_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.3)$$

Тобто ЕРС первинної і вторинної обмоток відстають від потоку на кут $\frac{\pi}{2}$.

Миттєві значення ЕРС обмоток відповідно дорівнюють

$$e_1 = E_{m1} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right); \quad e_2 = E_{m2} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.4)$$

де максимальні значення ЕРС обмоток

$$E_{m1} = 2\pi \cdot f_1 w_1 \Phi_m; \quad E_{m2} = 2\pi \cdot f_1 w_2 \Phi_m, \quad (2.5)$$

Діюче значення ЕРС первинної (E_1) і вторинної (E_2) обмоток

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m; \quad (2.6)$$

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m; \quad (2.7)$$

Відношення діючих значень ЕРС первинної та вторинної обмоток називають коефіцієнтом трансформації (k) трансформатора.

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.8)$$

Потік розсіяння первинної обмотки наводить у ній ЕРС розсіяння. Потік розсіяння замикається головним чином у немагнітному середовищі (повітря, масло), магнітна проникність якого постійна $R_\mu = \text{const}$. Отже, і індуктивність розсіяння $L_{\sigma 1} = \text{const}$

$$e_{\sigma 1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = \frac{d\psi_{\sigma 1}}{dt} = -\frac{d(L_{\sigma 1} \cdot I_0)}{dt} = -L_{\sigma 1} \frac{d(I_{m0} \cdot \sin \omega t)}{dt} =$$

$$= \omega \cdot L_{\sigma 1} \cdot L_{m0} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = x_1 \cdot I_{m0} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.9)$$

Тобто діюче значення ЕРС розсіяння первинної обмотки пропорційно струму цієї обмотки (у режимі неробочого ходу $I_1 = I_0$)

$$E_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 \cdot x_1, \quad (2.10)$$

де $x_1 = \omega \cdot L_{\sigma 1}$ - індуктивний опір розсіяння первинної обмотки, обумовлений потоком розсіяння первинної обмотки.

Для первинного кола трансформатора, включеного в мережу на напругу U_1 з урахуванням падіння напруги на активному опорі первинної обмотки r_1 можна записати рівняння електричної рівноваги

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 \cdot r_1, \quad (2.11)$$

або

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - j\dot{I}_0 \cdot x_1 + \dot{I}_0 \cdot r_1. \quad (2.12)$$

У реальному трансформаторі при протіканні струму I_0 по первинній обмотці в ній виникають електричні втрати $\Delta p_{el} = I_0^2 \cdot r_1$. Крім того, при замиканні змінного магнітного потоку по магнітній системі ТР в ньому виникає втрата в сталі Δp_{cm} , що складається з втрат на гістерезис і на вихрові струми (перемагнічування сталі).

Для компенсації втрат у сталі трансформатор споживає з мережі активну складову струму неробочого ходу

$$I_{0a} = \frac{\Delta p_{cm} + \Delta p_{el}}{U_1} \approx \frac{\Delta p_{cm}}{U_1}. \quad (2.13)$$

Результуючий струм неробочого ходу

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{\mu}^2}. \quad (2.14)$$

Струм I_{μ} називають реактивною (що намагнічує) складовою струму неробочого ходу.

Величина I_0 складає для трансформаторів великої потужності $\leq 3\% I_{1n}$; середньої потужності $\leq 10\% I_{1n}$; малої потужності $\approx 50\% I_{1n}$.

З урахуванням складових струму неробочого ходу можна записати систему рівнянь, що описують трансформатор у режимі неробочого ходу:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 \cdot x_1 + \dot{I}_1 \cdot r_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{\mu} \end{cases} \quad (2.15)$$

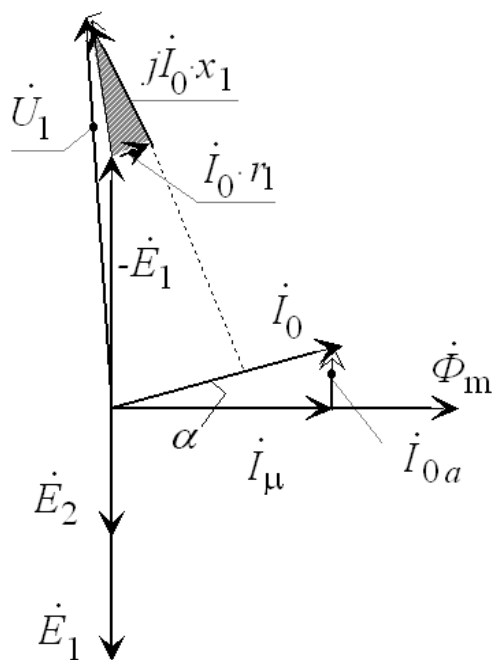


Рисунок 2.2 - Векторна діаграма трансформатора у режимі неробочого ходу

та побудувати векторну діаграму трансформатора у режимі неробочого ходу (рис. 2.2). Кут α – кут втрат (кут магнітного запізнювання) залежить від застосовуваної марки сталі і звичайно не перевищує 10° при індукції в стержні $B_m=1,6$ Тл. Для режиму неробочого ходу процеси, що протікають у трансформаторі, можна представити логічним ланцюжком у такому вигляді (рис. 2.3):

Введемо поняття «ідеального трансформатора», тобто трансформатора, у якого: усі витки первинної (w_1) і вторинної (w_2) обмоток зчеплені з одним магнітним потоком Φ , тобто потік розсіяння $\Phi_{\sigma 1} = 0$, немає втрат у первинній обмотці ($\Delta p_{e10} = 0$), немає втрат у сталі ($\Delta p_{cm} = 0, I_{0a} = 0$).

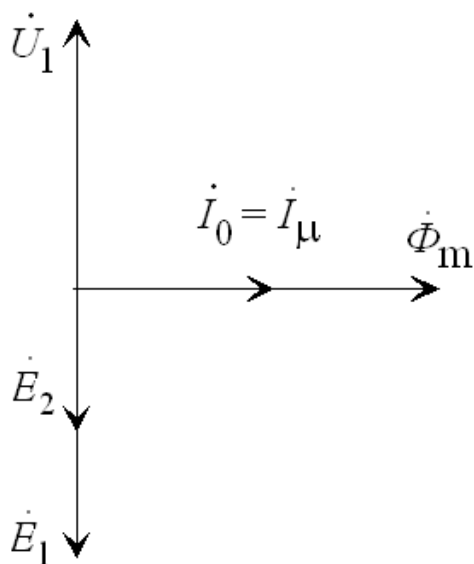


Рисунок 2.4 – Векторна діаграма неробочого ходу ідеального трансформатора

Рисунок 2.3 – Графічне представлення процесів, що протікають у трансформаторі

Таким чином, для ідеального трансформатора можна записати систему рівнянь

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_\mu \end{cases} \quad (2.16)$$

та побудувати векторну діаграму неробочого ходу для ідеального трансформатора (рис.2.4).

2.2 Форма намагнічуючого струму неробочого ходу однофазного трансформатора

Для створення магнітного поля трансформатор споживає з мережі намагнічуючий струм I_μ , величину якого можна визначити за законом повного струму

$$\oint H_0 \cdot dl = \sum H_i \cdot dl_i = H_{cm} \cdot l_{cm} + H_y \cdot l_y + H_\delta \cdot l_\delta = I_\mu \cdot w_1, \quad (2.17)$$

де H_{cm}, H_y, H_δ – напруженість магнітного поля;

l_{cm}, l_y, l_δ – довжини силових ліній у стержні, ярмі і стику магнітної системи трансформатора.

Визначимо форму струму I_μ за умови синусоїдальності напруги для двох значень синусоїдального потоку $\Phi_1(t)$ і $\Phi_2(t)$, використовуючи для побудови криву намагнічування магнітної системи $\Phi_1 = f(I_\mu)$ (рис. 2.5).

При значенні потоку $\Phi_2(t)$ магнітна система трансформатора не насичена і струм $I'_\mu(t)$ є синусоїдальним.

При значенні потоку $\Phi_1(t)$ магнітна система трансформатора насичена і магнітний потік трансформатора не пропорційний струму I_μ , тобто при синусоїдальному потоку $\Phi_1(t)$ намагнічуючий струм $I_\mu(t)$ є несинусоїдальним. Несинусоїдальна крива намагнічуючого струму $I_\mu(t)$ (рис. 2.5) містить, крім основної першої $I_{\mu 1}(t)$, тільки непарні гармоніки з найбільш сильною третьою $I_{\mu 3}(t)$ (рис. 2.6)

$$I_\mu(t) = I_{\mu 1m} \sin \omega t + \sum_v I_{\mu vm} \sin v \omega t, \quad (2.18)$$

де $v = 3, 5, 7, 9$ – порядок гармоніки.

Вищі гармоніки струму мають частоту в v разів більшу, ніж перша. Амплітуда гармонік залежить від насичення магнітопроводу: чим сильніше насичення, тим більшу амплітуду мають вищі гармоніки. При аналізі

трансформатора несинусоїдальний струм $I_\mu(t)$ замінять синусоїдальним струмом, еквівалентним за споживаною реактивною потужністю.

Еквівалентний синусоїдальний струм має діюче значення

$$I_\mu = \sqrt{I_{\mu 1}^2 + I_{\mu 3}^2 + I_{\mu 5}^2 + \dots} \quad (2.19)$$

При індукціях $B_m = (1,6 \div 1,65) Tл$, застосовуваних у магнітопроводах із холоднокатаних сталей, можна прийняти $I_\mu \approx I_{\mu 1}$, тобто вважати діюче значення намагнічуючого струму, що дорівнює діючому значенню його першої гармоніки. Це дозволяє зображувати вектором намагнічуючий струм \dot{I}_μ на діаграмах ТР.

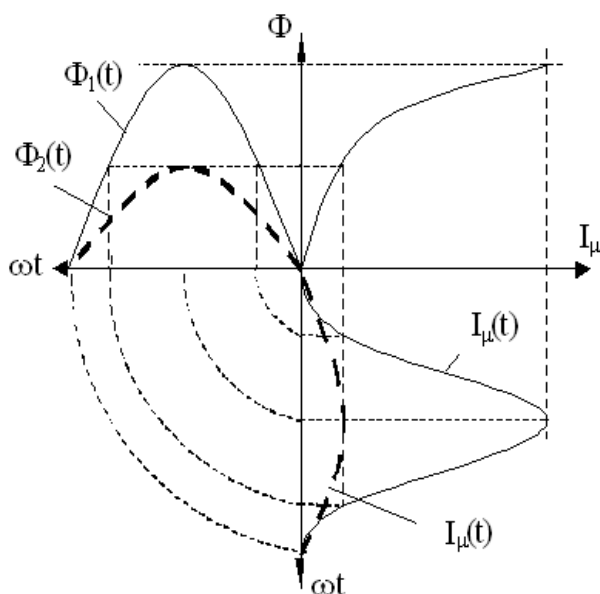


Рисунок 2.5 - Вигляд кривої намагнічуючого струму

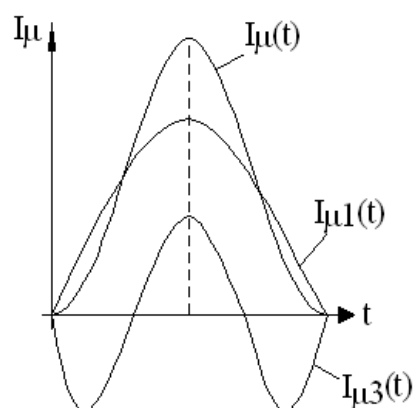


Рисунок 2.6 – Вигляд непарних гармонік намагнічуючого струму

Активна складова струму неробочого ходу $I_{0a}(t)$ має синусоїдальний характер (рис. 2.7).

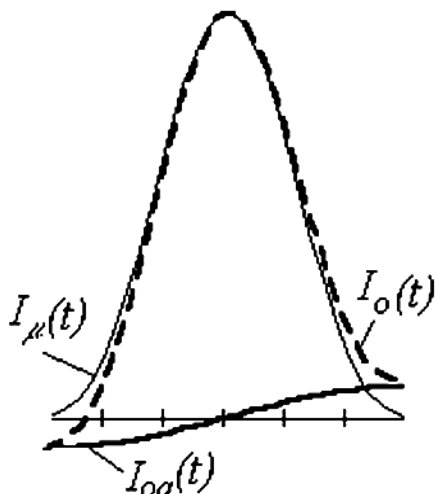


Рисунок 2.7 – Активна складова струму неробочого ходу

При додаванні миттєвих значень активної $I_{0a}(t)$ та намагнічуючої $I_\mu(t)$ складових крива результуючого струму $I_0(t)$ виявляється несиметричною.

Активна складова має дуже малий вплив на значення струму неробочого ходу. Тому форма кривої струму неробочого ходу визначається в основному кривою намагнічуючого струму $I_\mu(t)$.

2.3 Рівняння магніторухливих сил і струмів

При роботі трансформатора під навантаженням його вторинна обмотка замкнена на зовнішній опір Z_H та по колу проходить струм I_2 (рис. 2.8).

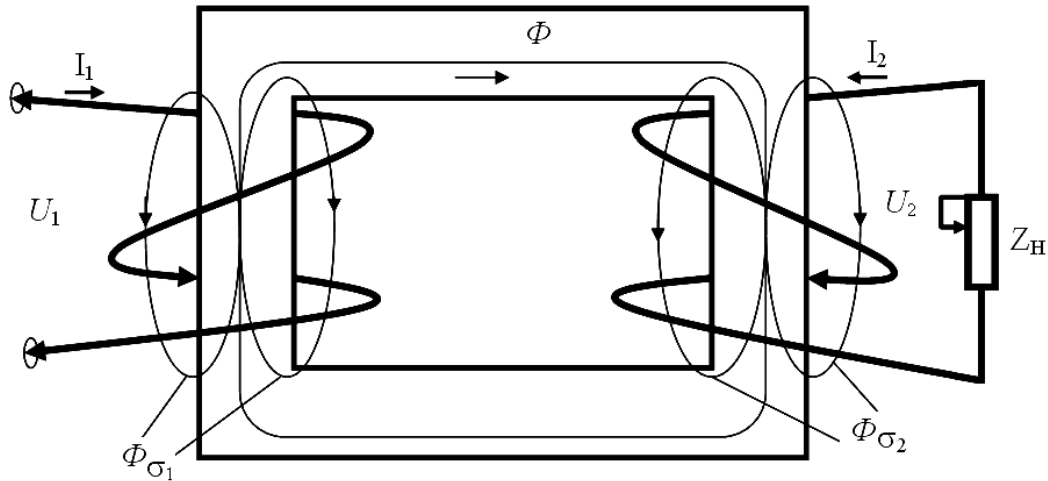


Рисунок 2.8 – Схема роботи трансформатора під навантаженням

За законом повного струму магнітний потік буде створюватися сукупною дією МРС первинної і вторинної обмоток F_Σ

$$\Phi = \frac{F_\Sigma}{R_\mu}. \quad (2.20)$$

Якщо припустити, що струми I_1 та I_2 змінюються за синусоїдним законом, то МРС

$$F_\Sigma = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2. \quad (2.21)$$

У режимі неробочого ходу, коли $I_2 = 0$ і $I_1 = I_0$, магнітний потік створюється МРС первинної обмотки

$$\Phi = \frac{F_0}{R_\mu} = \frac{I_0 \cdot w_1}{R_\mu}. \quad (2.22)$$

При припущенні, що $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, амплітудне значення основного магнітного потоку

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1}, \quad (2.23)$$

тобто значення основного магнітного потоку практично не залежить від навантаження трансформатора, тому що напруга U_1 незмінна. Проте треба мати на увазі, що це становище являється наближенням та відноситься до випадків навантаження, яке не перевищує номінальне. Прийняте положення $\Phi = \text{const}$

дозволяє дорівняти формули (2.20) та (2.22) і одержати рівняння МРС трансформатора

$$\dot{I}_0 \cdot w_1 = \dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2 \quad (2.24)$$

та рівняння струмів трансформатора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right). \quad (2.25)$$

Увівши у рівняння (2.25) позначення $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$, дістаємо

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (2.26)$$

Рівняння (2.26) описує принцип саморегулювання магнітного потоку. Будь-яка зміна вторинного навантаження трансформатора супроводжується зміною первинного струму I_1 за рахунок зміни його складової I'_2 , що знаходиться у протифазі зі струмом навантаження I'_2 таким чином, щоб магнітний потік, створюваний струмом I_0 , залишився постійним ($\Phi = \text{const}$).

Для вторинного кола трансформатора, замкненого на навантаження, рівняння напруг має вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \cdot r_2, \quad (2.27)$$

де $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot z_n$ - напруга на виводах вторинної обмотки.

З урахуванням рівняння (2.25) для струмів і (2.11) для первинного кола дістаємо систему рівнянь електричної рівноваги трансформатора

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 \cdot r_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - \dot{I}_2 \cdot r_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1 \end{cases} \quad (2.28)$$

Діюче значення ЕРС розсіяння первинної і вторинної обмоток пропорційні струмам відповідних обмоток

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 \cdot x_1 \text{ і } \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 \cdot x_2 \quad (2.29)$$

де x_1 та x_2 - індуктивні опори розсіяння первинної і вторинної обмоток.

Система рівнянь (2.9) з урахуванням (2.10) приймає вигляд

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 \cdot x_1 + \dot{I}_1 \cdot r_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 \cdot x_2 - \dot{I}_2 \cdot r_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1 \end{cases} \quad (2.30)$$

2.4 Приведення вторинної обмотки трансформатора

Рівняння (2.30) можуть бути подані або у вигляді векторної діаграми, або у вигляді схеми заміщення. Проте в трансформаторах з великим коефіцієнтом

трансформації $k = w_1 / w_2$ струми, напруги і параметри обмоток значно відрізняються за величиною. Це дуже незручно, особливо при графічному представленні рівнянь (2.30). Для усунення цього недоліку всі параметри вторинної обмотки приводяться до числа витків первинної обмотки.

При цьому всі фізичні процеси у приведеному трансформаторі повинні залишатися такими ж, як у реальному:

- рівність МРС вторинної обмотки $I_2 \cdot w_2 = I'_2 \cdot w_1$, звідки приведені значення струму вторинної обмотки

$$I'_2 = I_2 \cdot w_2 / w_1 = I_2 / k;$$

- рівність потужності вторинної обмотки $U'_2 \cdot I'_2 = U_2 \cdot I_2$, звідки приведені значення вторинної напруги

$$U'_2 = U_2 (I_2 / I'_2) = U_2 \cdot k;$$

- рівність електромагнітної потужності $E'_2 \cdot I'_2 = E_2 \cdot I_2$, звідки приведені значення вторинної ЕРС $E'_2 = E_2 (I_2 / I'_2) = E_2 \cdot k$;

але внаслідок того, що $k = E_1 / E_2$, то $E_1 = k \cdot E_2$ та $E'_2 = E_1$;

- постійність електричних втрат у вторинній обмотці $(I'_2)^2 \cdot r'_2 = I_2^2 \cdot r_2$; звідки приведені значення активного опору вторинної обмотки

$$r'_2 = r_2 \cdot (I_2 / I'_2)^2 = r_2 \cdot k^2;$$

- виходячи з постійності $\cos \varphi_2$ відношення параметрів вторинної обмотки $\frac{x_2}{r_2} = \frac{x'_2}{r'_2}$, звідки приведені значення індуктивного опору вторинної обмотки

$$x'_2 = x_2 \cdot (r'_2 / r_2) = x_2 \cdot k^2$$

Помножимо обидві частини другого рівняння системи (2.30) на $k = w_1 / w_2$, тоді

$$\dot{U}_2 \frac{w_1}{w_2} = \dot{E}_2 \frac{w_1}{w_2} - j \dot{I}_2 \cdot x_2 \frac{w_1}{w_2} - \dot{I}_2 \cdot r_2 \frac{w_1}{w_2},$$

або з урахуванням виконаних приведення параметрів

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \dot{E}'_2 - j \dot{I}'_2 \cdot x'_2 - \dot{I}'_2 \cdot r'_2; \\ \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_1 \cdot x_1 + \dot{I}_1 \cdot r_1; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{cases} \quad (2.31)$$

2.5 Векторні діаграми трансформатора

Основні рівняння (2.31) можуть бути подані графічно, що наочно показує співвідношення між струмами, ЕРС і напругами обмоток. Процес побудови діаграми (рис. 2.10, 2.11) можна описати логічною схемою (рис. 2.9).

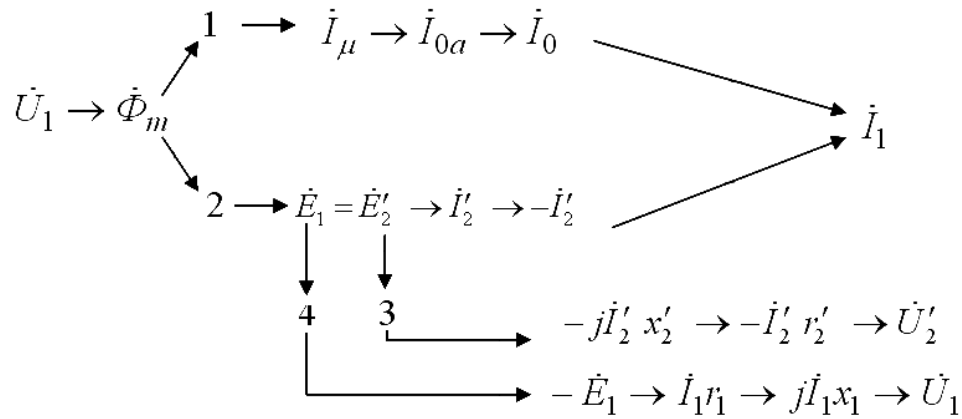


Рисунок 2.9 – Логічна схема побудови діаграм

На векторній діаграмі кут між вектором ЕРС E'_2 і струмом I'_2 дорівнює

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_n}{r'_2 + r'_n}.$$

Аналіз векторних діаграм показує, що при активно-індуктивному навантаженні ($Z_n = r_n + jx_L$) напруга $U'_2 < E'_2$. При активно-ємнісному ($Z_n = r_n + jx_C$) напруга $U'_2 > E'_2$. Це пов'язано з дією потоку розсіяння $\Phi_{\sigma 2}$. Оскільки цей потік створюється вторинним струмом і більшу частину шляху проходить повітрям, то він збігається за фазою зі струмом I'_2 .

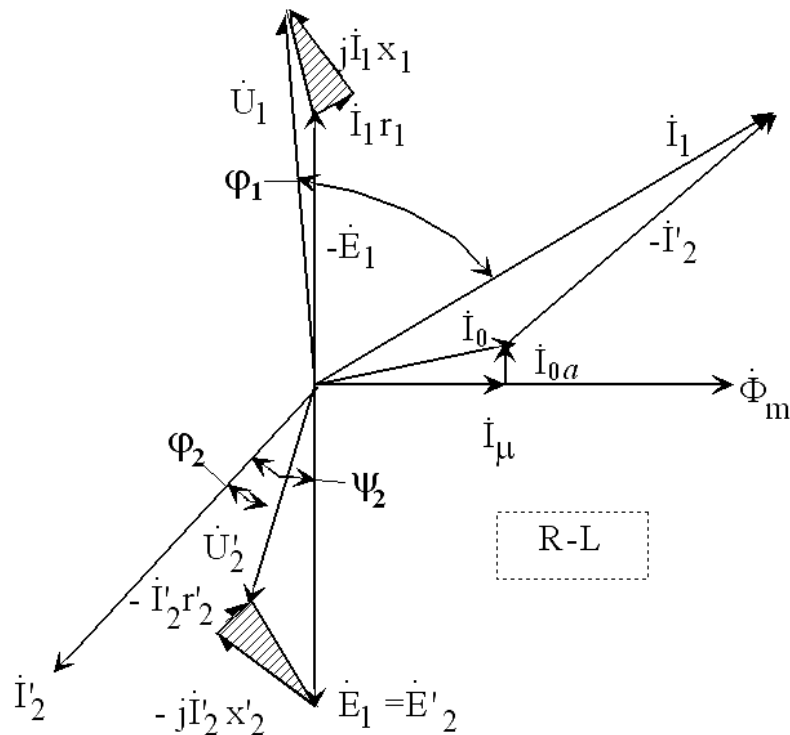


Рисунок 2.10 - Векторна діаграма трансформатора при R-L навантаженні

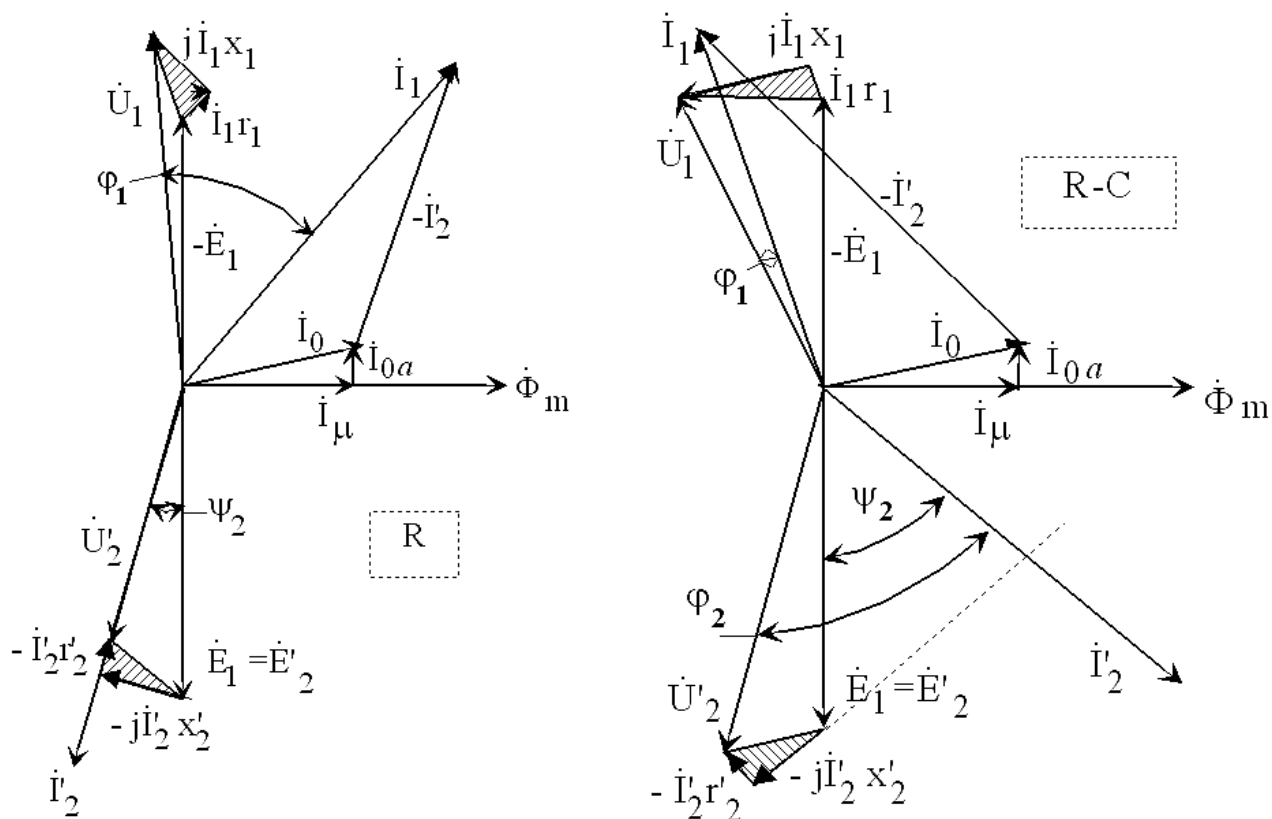


Рисунок 2.11. Векторні діаграми трансформатора:
а – при R навантаженні; б – при R - C навантаженні

У випадку R - C навантаження реактивна складова потоку розсіювання вторинної обмотки $\Phi_{\sigma 2p}$ знаходиться у фазі з основним магнітним потоком Φ_m і надає дію, що підмагнічує магнітопровід (рис. 2.12, а). У цьому разі реактивна складова ЕРС розсіювання вторинної обмотки $E'_{\sigma 2p}$ додається до ЕРС E'_2 від потоку взаємодукції і напруга U_2' на виході трансформатора збільшується із зростанням струму навантаження.

При R - L навантаженні потік $\Phi_{\sigma 2p}$ знаходиться в протифазі з основним магнітним потоком Φ_m , тобто надає на магнітопровід трансформатора дію, що розмагнічує його, і напруга U_2' зменшується (рис. 2.12, б) з ростом струму навантаження.

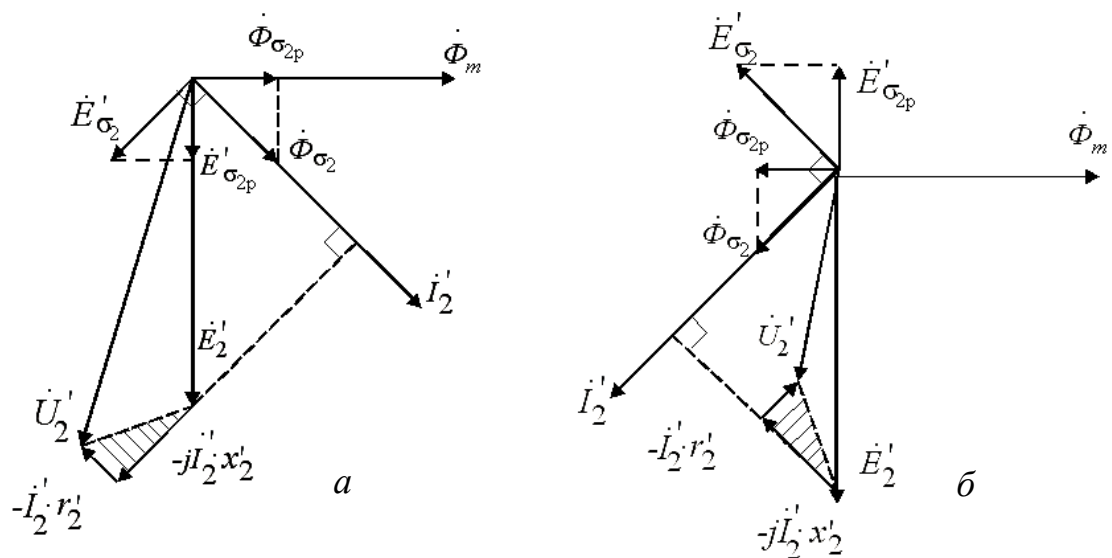


Рисунок 2.12 - Векторні діаграми для вторинної обмотки трансформатора: а – при R-C навантаженні; б – при R-L навантаженні

Література:

[1],[2],[5]

ТЕМА 3

СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

- 3.1 Схема заміщення
- 3.2 Дослід неробочого ходу
- 3.3 Дослід короткого замикання

3.1 Схема заміщення

Ще одним засобом, полегшуючим дослідження електромагнітних процесів і розрахунків трансформаторів, є застосування електричної схеми заміщення приведенного трансформатора. Приведення вторинної обмотки до первинної дозволяє не тільки полегшити і спростити розрахунки, але й побудувати просту електричну модель трансформатора, в якій магнітний зв'язок між первинною і вторинною частинами замінений легко досліджуваним і розрахунковим електричним зв'язком.

Приведений трансформатор - це такий еквівалентний трансформатор, у якого коефіцієнт трансформації $\frac{w_1}{w_2'} = 1$, оскільки $w_2' = w_1$.

Введемо такі позначення

$$\dot{E}_1 = E_2' = -\dot{I}_0' \cdot Z_m, \quad U_2' = Z_n' \cdot I_2',$$

де $Z_n' = Z_n \cdot k^2$ – приведений опір навантаження;

$Z_m = r_m + jx_m$ - повний опір гілки намагнічування.

З урахуванням прийнятих позначень система рівнянь електричної рівноваги приведенного трансформатора (2.31) має вигляд

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_0 \cdot Z_m + \dot{U}_1 \cdot Z_1; \\ \dot{U}_2' = -\dot{I}_0 \cdot Z_m - \dot{I}_2' \cdot Z_2' = I_2' \cdot Z_n'; \\ \dot{I}_2' = \dot{I}_0 - \dot{I}_1, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $Z_1 = r_1 + jx_1$ – повний опір первинної обмотки;

$Z_2' = r_2' + jx_2'$ – – приведений повний опір вторинної обмотки.

З урахуванням виразу для вторинного струму $\dot{I}_2' = \dot{I}_0 - \dot{I}_1$ рівняння електричної рівноваги вторинного контуру приймає вигляд

$$-\dot{I}_0 \cdot Z_m - \dot{I}_0 \cdot Z_2' + \dot{I}_1 \cdot Z_2' = I_0' \cdot Z_n - \dot{I}_1 \cdot Z_n'$$

звідки

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{Z_2' + Z_n'}{Z_m + Z_2' + Z_n'}. \quad (3.2)$$

При підстановці рівняння (3.2) для струму \dot{I}_0 в рівняння рівноваги первинного контуру воно приймає вигляд

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[Z_1 + \frac{Z_m (Z'_2 + Z'_n)}{Z_m + Z'_2 + Z'_n} \right] = \dot{I}_1 \cdot Z_e \quad (3.3)$$

І йому відповідає схема заміщення, подана на рис. 3.1.

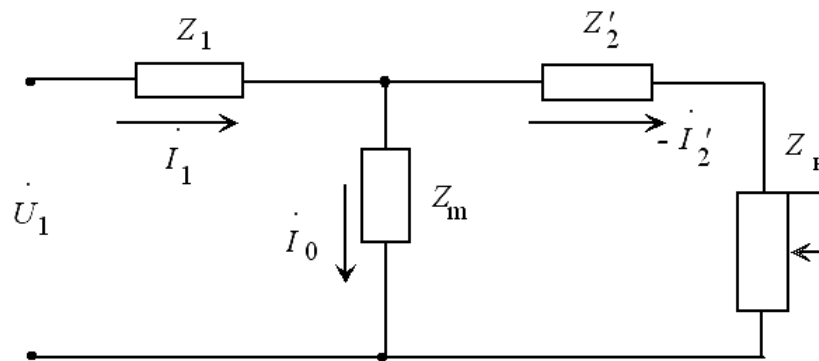


Рисунок 3.1 - Схема заміщення трансформатора

Оскільки струм неробочого ходу \dot{I}_0 розподіляється на дві складові \dot{I}_{0a} та \dot{I}_μ , то такому розподілу відповідає схема заміщення гілки намагнічування з паралельно ввімкненими опорами r_{12} і x_{12} (рис. 3.2), де r_{12} активний опір, обумовлений втратами у сталі, а x_{12} індуктивний опір, обумовлений основним магнітним потоком. Така схема заміщення добре узгоджується з реальними фізичними процесами, проте розрахунки зручно робити за схемою, у котрій паралельні гілки об'єднані (рис. 3.3).

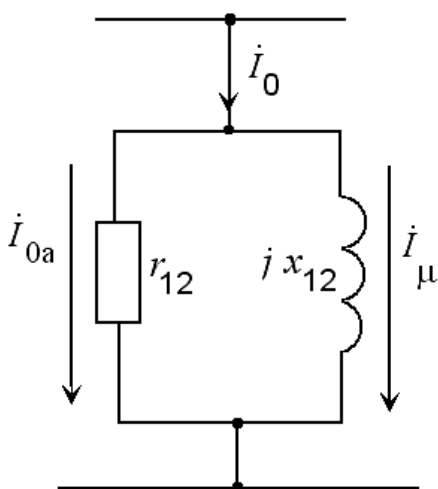


Рисунок 3.2 – Схема заміщення гілки намагнічування з паралельно ввімкненими опорами r_{12} і x_{12}

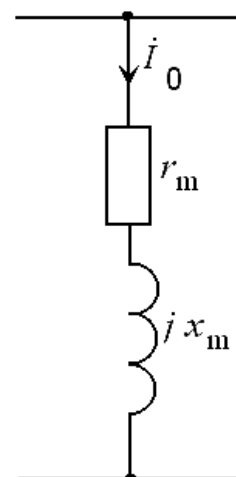


Рисунок 3.3 - Схема заміщення гілки намагнічування з об'єднаними паралельними опорами

З рис. 3.2

$$Z_m = \frac{r_{12} \cdot x_{12}}{r_{12} + jx_{12}} = \frac{r_{12} \cdot x_{12}^2}{r_{12}^2 + x_{12}^2} + j \frac{r_{12}^2 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = r_m + jx_m. \quad (3.4)$$

Оскільки активна складова струму неробочого ходу \dot{I}_{0a} значно менше від реактивної \dot{I}_μ , то $r_{12} \ll x_{12}$ і параметри намагнічуючої гілки (рис. 3.3) відповідно такі

$$r_m \approx x_{12}^2 / r_{12}, \quad x_m \approx x_{12}$$

Схема заміщення приведенного трансформатора, надана на рис. 3.4, задовольняє всі рівняння ЕРС і струмів (3.1) і являє собою сукупність трьох гілок:

- первинної – з опором $Z_1 = r_1 + jx_1$ і струмом \dot{I}_1 ;
- намагнічуючої – з опором $Z_m = r_m + jx_m$ і струмом \dot{I}_0 ;
- вторинної – із двома опорами: опором вторинної гілки $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ й опором навантаження $Z'_n = r'_n \pm jx'_n$ і струмом \dot{I}'_2 .

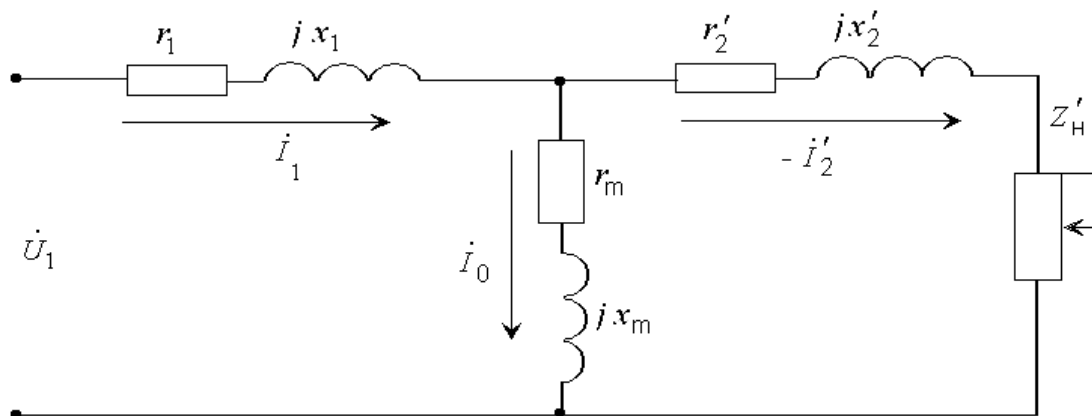


Рисунок 3.4 - Схема заміщення приведенного трансформатора

Усі параметри схеми заміщення, за винятком Z'_n , є постійними для даного трансформатора і можуть бути визначені з дослідів неробочого ходу та короткого замикання.

3.2 Дослід неробочого ходу

Для проведення дослід неробочого ходу збирається схема (рис. 3.5).

Напругу до первинної обмотки підводять через

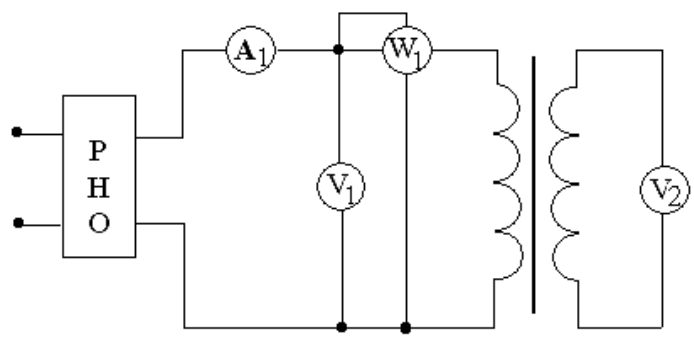


Рисунок 3.5 - Схема дослід неробочого ходу ТР

однофазний регулятор напруги РНО, що дозволяє плавно підвищувати напругу в діапазоні

$$U_{12} = (0 \div 1,15) U_{1н}.$$

При цьому для $5 \div 6$ точок фіксують показання приладів U_{10} , I_0 , P_0 , U_{20} . За даними вимірів будують характеристики неробочого ходу ТР $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{10})$, подані на рис. 3.6.

Залежність $I_0 = f(U_0)$ на рис. 3.6,а повторює характеристику намагнічування сталі $H = f(B)$. При малих значеннях U_{10} залежність $I_0 = f(U_{10})$ носить прямолінійний характер, внаслідок незмінності магнітної провідності сталі сердечника. Починаючи приблизно з $0,8U_{10}$, спостерігається значне збільшення струму I_0 , тому що магнітна провідність зменшується.

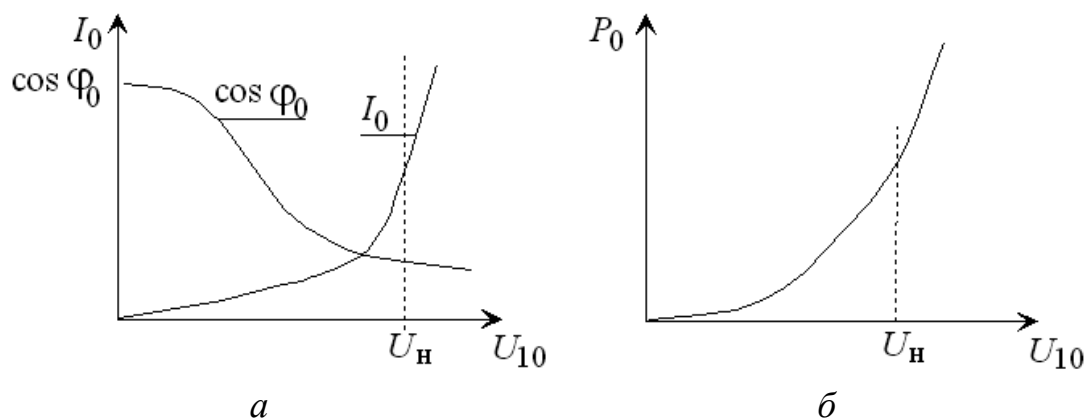


Рисунок 3.6 - Характеристики неробочого ходу трансформатора

Залежність $P_0 = f(U_0)$ (рис. 3.6,б) має параболічний характер. Потужність неробочого ходу $P_0 = \Delta p_{cm} + \Delta p_{e10}$. Оскільки струм неробочого ходу I_0 малий, то електричними втратами в первинній обмотці $\Delta p_{e10} = I_0^2 \cdot r_1 = 0$ можна зневажити та вважати, що вся потужність неробочого ходу йде на покриття втрат у сталі

$$P_0 = \Delta p_{cm},$$

$$\text{де } \Delta p_{cm} \equiv B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_1^2 \equiv U_{10}^2.$$

Вираз для коефіцієнта потужності неробочого ходу можна представити так:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{(U_{10} \cdot I_0)} \equiv \frac{U_{10}^2}{(U_{10} \cdot I_0)} \equiv \frac{U_{10}}{I_0}$$

Зі збільшенням напруги U_{10} струм неробочого ходу зростає швидше від напруги і $\cos \varphi_0$ зменшується (рис. 3.6,а).

За даними неробочого ходу при $U_{10} = U_{1н}$ розраховують такі величини:

– коефіцієнт трансформації $k = \frac{U_{1H}}{U_{20}}$;

– відсоткове значення струму неробочого ходу

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\%, (I_{0\%} = 4 \div 10\%);$$

– втрати в сталі - $\Delta p_{cm} = P_0$;

– параметри гілки намагнічування схеми заміщення ТР - x_m, r_m, z_m .

Схема заміщення для режиму неробочого ходу подана на рис. 3.7. Виконуються такі розрахунки:

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_1 + Z_m \frac{U_{10}}{I_0}; \\ r_0 &= r_1 + r_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \\ x_0 &= x_1 + x_m = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Нехтуючи значеннями параметрів первинного контуру r_1 та x_1 , можна вважати, що

$$Z_m = Z_0; \quad r_m = r_0; \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}.$$

Векторна діаграма ТР для режиму неробочого ходу наведена на рис. 3.8.

Активна складова струму неробочого ходу $I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0$ не перевищує 10 % від I_0 .

Дослід неробочого ходу трансформатора дозволяє зробити висновок про ступінь насичення трансформатора і про якість збирання його магнітної системи.

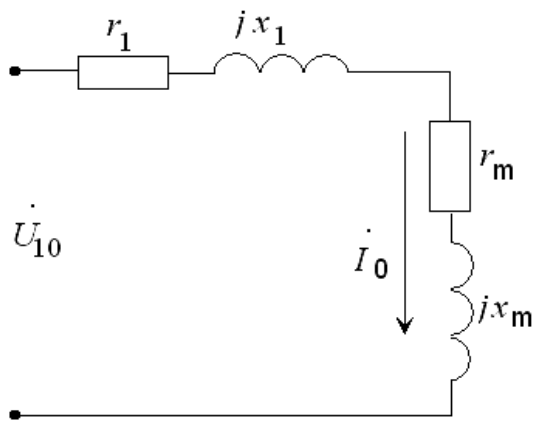


Рисунок 3.7 - Схема заміщення
ТР у досліді неробочого ходу

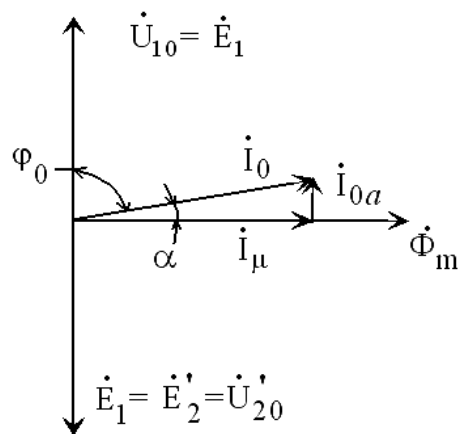


Рисунок 3.8 - Векторна
діаграма ТР

3.3 Дослід короткого замикання

При досліді короткого замикання (КЗ) вторинну обмотку трансформатора замикають накоротко (рис. 3.9), при цьому вторинна напруга $U_2 = 0$.

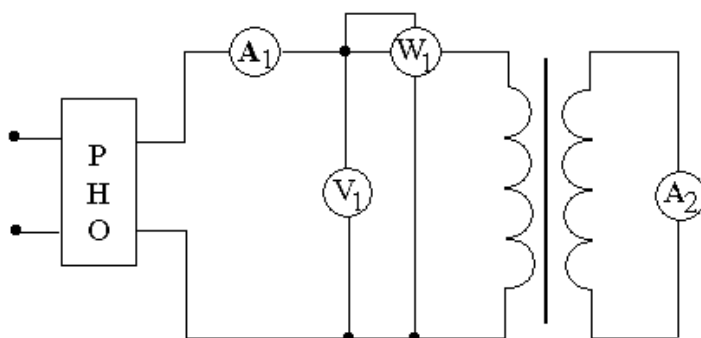


Рисунок 3.9 -
Схема досліді КЗ

На первинну обмотку подають знижену напругу, поступово підвищуючи її регулятором напруги РНО до деякого U_k при якому по обмотках протікають струми короткого замикання, що не перевищують номінальні на $(10 \div 20) \%$, тобто $I_{1k} \leq 1,2 I_{1n}$.

При цьому записують показання приладів U_k, I_k, P_k , розраховують коефіцієнт потужності короткого замикання $\cos \varphi_k = P_k / (U_k / I_k)$ та будують характеристики короткого замикання $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$, подані на рис. 3.10.

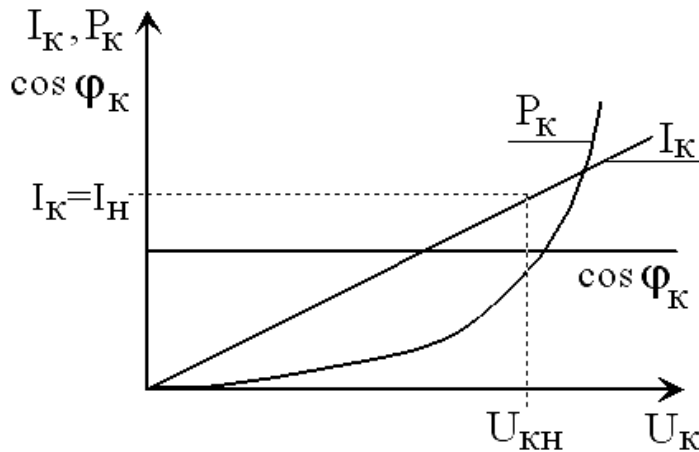


Рисунок 3.10 – Характеристики КЗ

(5÷10) % від номінальної первинної напруги.

Оскільки магнітний потік Φ пропорційний величині напруги U_1 , а у режимі короткого замикання $U_1 = U_K = (0,05 \div 0,1)U_H$, отже магнітний потік настільки малий, що струмом намагнічування можна знехтувати, тобто покласти $I_0 = 0$. У цьому випадку рівняння для струмів приймає вигляд

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = \dot{I}_K. \quad (3.7)$$

Тому схема заміщення для режиму короткого замикання не містить гілки намагнічування і має вигляд, поданий на рис. 3.11.

Для цієї схеми заміщення можна записати рівняння напруги

$$\begin{aligned} U_K &= -\dot{I}'_2 \cdot r'_2 - j\dot{I}'_2 \cdot x'_2 + \dot{I}_1 \cdot r_1 + j\dot{I}_1 \cdot x_1 = \\ &= \dot{I}_K \cdot (r_1 + r_2) + j\dot{I}_K \cdot (x_1 + x'_2) = \\ &= \dot{I}_K \cdot r_K + j\dot{I}_K \cdot x_K = \dot{I}_K \cdot z_K. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Оскільки магнітна система трансформатора в досліді короткого замикання не насичена, то залежність $I_K = f(U_K)$ являє собою пряму лінію (див. рис. 3.10).

Втратами в сталі при малому магнітному потоці можна знехтувати. Отже, можна вважати, що потужність P_K , споживана трансформатором при досліді КЗ, йде на покриття втрат в обмотках трансформатора

$$P_K = I_K^2 \cdot r_1 + I_K^2 \cdot r_2 = I_K^2 \cdot r_K = r_K \cdot U_K^2 / z_K^2 \equiv U_K^2 \quad (3.9)$$

Характеристика $P_K = f(U_K)$ має параболічний характер.

Коефіцієнт потужності не залежить від напруги

Напругу, при якій струми в обмотках трансформатора при досліді короткого замикання дорівнюють їхнім номінальним значенням, називають **номінальною напругою короткого замикання**.

Її прийнято виражати у відсотках від номінальної

$$u_K = \frac{U_{KH}}{U_H} \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

Звичайно $u_{K\%}$ складає

$$\cos \varphi_K = P_K / I_K \cdot U_K = I_K^2 \cdot r_K / I_K \cdot U_K = r_K / Z_K = \text{const} \quad (3.10)$$

Дані дослідів короткого замикання трансформатора при $I_K = I_{1H}$ дозволяють визначити:

– параметри схеми заміщення (рис. 3.11)

$$\begin{aligned} Z_K &= U_K / I_K; \\ r_1 + r'_2 &= r_K = P / I_K^2; \\ x_1 + x'_2 &= x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де опори первинної і вторинної обмоток приймаються рівними

$$r_1 = r'_2 = r_K / 2; \quad x_1 = x'_2 = x_K / 2;$$

– електричні втрати в обмотках при номінальному навантаженні

$$\Delta p_{el} = P_{KH} = I_{1H}^2 \cdot r_K;$$

– електричні втрати в обмотках при номінальному навантаженні

$$u_{K\%} = \frac{I_1 \cdot Z_K}{U_1} \cdot 100\%; \quad (3.12)$$

– активну ($u_{Ka\%}$) та реактивну ($u_{Kp\%}$) складові напруги КЗ

$$u_{Ka\%} = \frac{I_{1H} \cdot r_K}{U_{1H}} \cdot 100\%, \quad (3.13)$$

$$u_{Kp\%} = \frac{I_{1H} \cdot x_K}{U_{1H}} \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

Відповідно до Держстандарту при визначенні $u_{K\%}$, $u_{Ka\%}$ опори r_K , Z_K повинні бути наведені до середньої розрахункової температури 75 °С для трансформаторів з ізоляцією класів нагрівостійкості А, Е, В и 115 °С з ізоляцією класів F, H.

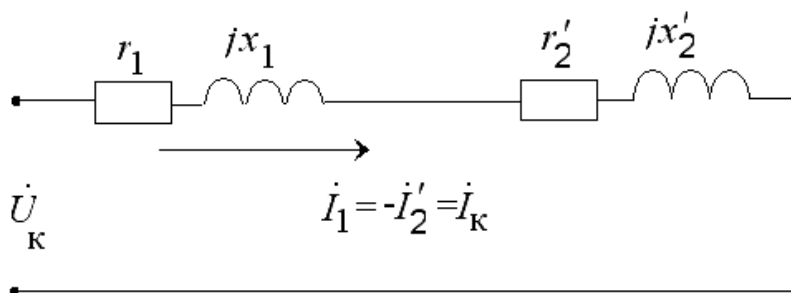


Рисунок 3.11 - Схема заміщення трансформатора в досліді КЗ

Індуктивні опори короткого замикання – це опори розсіяння, але так як магнітна система не насичена ($\mu_{cm} = \infty$), можна вважати, що

$$L_\sigma = \frac{\Psi_\sigma}{I} = \frac{w \cdot \Phi_\sigma}{I} = \frac{w \cdot F}{R_\mu \cdot I} = \frac{w^2}{R_{\mu 0}} = \text{const},$$

тобто індуктивний опір x_k від температури не залежить ($x_k = const$).

Оскільки дослід короткого замикання відбувається при постійній робочій температурі обмоток, то $r_k = const$, отже і $Z_k = const$.

Наприклад, для температури 75 °C

$$\begin{aligned} r_{k75} &= r_k \cdot [1 + \alpha(75 - \theta_1)]; \\ Z_{k75} &= \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}; \\ \cos \varphi_{k75} &= r_{k75} / Z_{k75}; \\ u_{k\%75} &= 100 \cdot (I_k \cdot Z_{k75} / U_{1H}), \end{aligned} \quad (3.15)$$

де r_k - активний опір КЗ при температурі θ_1 ;

$\alpha = 0,004$ - температурний коефіцієнт для міді й алюмінію.

Напругу короткого замикання та її складові також можна визначити у відносних одиницях. При цьому вони будуть дорівнювати відповідним опорам у відносних одиницях:

$$\begin{aligned} u_k^* &= U_k / U_{1H} = I_{1H} \cdot Z_k / U_{1H} = Z_k / Z_\phi = Z_k^*; \\ u_{ka}^* &= r_k / Z_\phi = r_k^*; \quad u_{kp}^* = x_k / Z_\phi = x_k^*; \end{aligned} \quad (3.16)$$

де $Z_\phi = U_{1H} / U_{1H}$

Таким чином, напруга короткого замикання характеризує внутрішній опір трансформатора.

Від значення напруги короткого замикання залежать падіння напруги в трансформаторі, зовнішні характеристики і струм короткого замикання трансформатора.

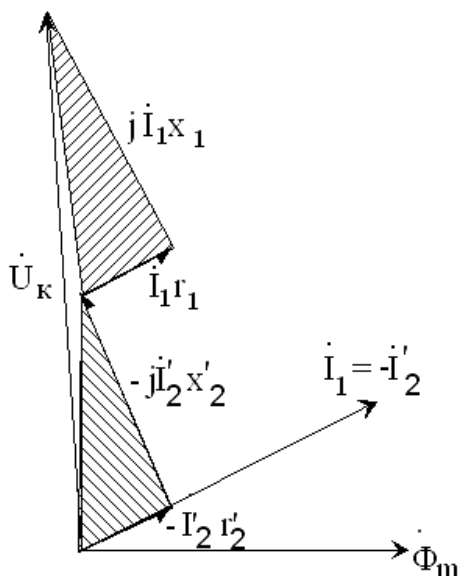


Рисунок 3.12 - Векторна діаграма TP

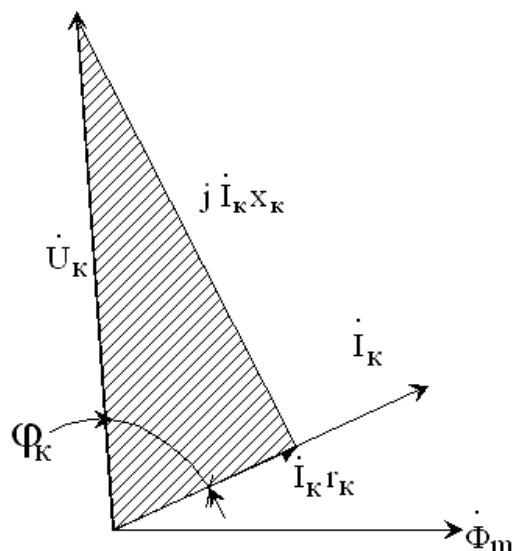


Рисунок 3.13 - Трикутник КЗ

Величина сталого струму короткого замикання при номінальній напрузі може бути визначена

$$I_{\kappa} = \frac{U_{\text{н}}}{Z_{\kappa}} = \frac{U_{\text{н}}}{\frac{U_{\kappa}}{I_{\text{н}}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot \frac{100}{100} = \frac{100}{u_{\kappa\%}} \cdot I_{\text{н}}. \quad (3.17)$$

Якщо прийняти, що $u_{\kappa\%} = (5 \div 10)\%$, то струм короткого замикання при $U_{\kappa} = U_{\text{н}}$ може досягати $I_{\kappa} = (20 \div 10)I_{\text{н}}$.

За рівнянням напруги (3.8) можна побудувати векторну діаграму трансформатора у режимі КЗ, показану на рис. 3.12. Рівняння (3.8) дає також можливість побудувати трикутник короткого замикання (рис. 3.13). Складові напруги короткого замикання з векторної діаграми можна визначити, використовуючи значення кута φ_{κ}

$$\begin{aligned} u_{\kappa a} &= U_{\kappa} \cdot \cos \varphi_{\kappa}, u_{\kappa p} = U_{\kappa} \cdot \sin \varphi_{\kappa}, \\ u_{\kappa} &= \sqrt{u_{\kappa a}^2 + u_{\kappa p}^2}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Література:

[1],[2],[5]

ТЕМА 4

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА

- 4.1 Спрощена векторна діаграма трансформатора
- 4.2 Зміна вторинної напруги
- 4.3 Зовнішні характеристики трансформатора
- 4.4 Втрати і ККД трансформатора
- 4.5 Регулювання напруги трансформатора

4.1 Спрощена векторна діаграма трансформатора

При аналізі властивостей трансформаторів часто зневажають струмом неробочого ходу (I_0), що для потужних трансформаторів складає $(0,02...0,1)I_{1н}$.

Основні рівняння в цьому випадку приймають вигляд

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1; \\ \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' \cdot Z_2'; \\ \dot{I}_1 = -\dot{I}_2'. \end{cases} \quad (4.1)$$

Оскільки $\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' \cdot Z_2'$, $\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' - \dot{I}_2' \cdot Z_2' + \dot{I}_1 \cdot Z_1$,
але $-\dot{I}_2' = \dot{I}_1$, $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z_2' = r_2' + jx_2'$,
отже

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1(r_1 + r_2') + j\dot{I}_1(x_1 + x_2') = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 r_k + j\dot{I}_1 x_k. \quad (4.2)$$

З урахуванням того, що

$$-\dot{U}_2' = -\dot{I}_2' \cdot Z_2' = \dot{I}_1 \cdot Z_2'.$$

рівнянню (4.2) відповідає спрощена схема заміщення на рис. 4.1.

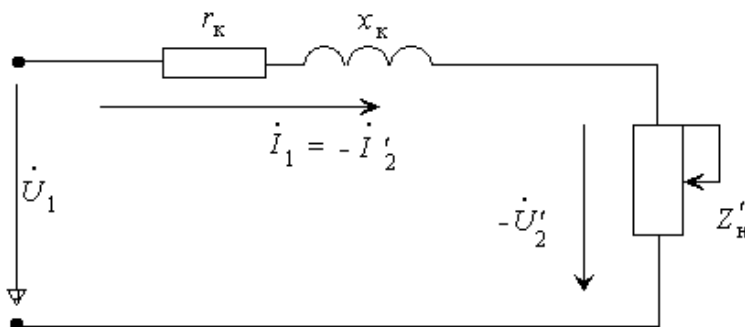


Рисунок 4.1 -
Спрощена схема
заміщення
трансформатора

За рівнянням (4.2) на рис. 4.2,а збудована спрощена векторна діаграма трансформатора, у котрої прямокутний трикутник ADC являє собою трикутник короткого замикання, сторони котрого відповідно дорівнюють

$$CD = I \cdot r_k = u_{ka}, \quad AD = I_1 \cdot x_k = u_{kp}, \quad AC = I_1 \cdot Z_k = u_k.$$

Спрощена векторна діаграма трансформатора використовується для практичних розрахунків. Її будують за заданими номінальними значеннями напруги $U_{1н}$, струму $I_{1н}$, коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{2н}$ і параметрами трикутника КЗ - u_k, u_{ka}, u_{kp} .

4.2 Зміна вторинної напруги

Вторинна напруга трансформатора при навантаженні U'_2 відрізняється від напруги U'_{20} при неробочому ході. Цю зміну прийнято представляти у відсотках від номінальної первинної напруги

$$\Delta U_{\%} = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100 = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100. \quad (4.3)$$

Величина $\Delta U_{\%}$ називається відсотковою зміною напруги трансформатора і може бути визначена за допомогою спрощеної векторної діаграми (рис. 4.2).

Для потужних трансформаторів кут $\gamma \approx 4^\circ$, тому за модуль вектора $\dot{U}_{1н}$ приблизно можна прийняти його проекцію на напрямок вектора $-\dot{U}'_2$, тобто відрізок OA (рис. 4.2, б). Тоді

$$\Delta U = U_{1н} - U'_2 \approx \overline{OA} - \overline{OC} = \overline{CA}.$$

Спроектувавши аналогічно вектори $\dot{I}_1 r_k$ і $j \dot{I}_1 x_k$ на напрямок вектора $-\dot{U}'_2$, дістаємо

$$\overline{CA} = \overline{CB} + \overline{BA}, \quad \overline{CB} = I_1 \cdot r_k \cdot \cos \varphi_2, \quad \overline{BA} = I_1 \cdot x_k \cdot \sin \varphi_2.$$

Таким чином, зміна напруги (%)

$$\Delta U_{\%} = (I_1 \cdot r_k \cdot \cos \varphi_2 + I_1 \cdot x_k \cdot \sin \varphi_2) \frac{100}{U_{1н}}.$$

Позначимо через $\beta = I_1 / I_{1н}$ коефіцієнт навантаження трансформатора, тоді $I_1 = \beta \cdot I_{1н}$, і вираз для $\Delta U_{\%}$ приймає вигляд

$$\Delta U_{\%} = \beta \left(\frac{I_{1н}}{U_{1н}} \cdot r_k \cdot \cos \varphi_2 + \frac{I_{1н}}{U_{1н}} \cdot x_k \cdot \sin \varphi_2 \right) \cdot 100\%,$$

але $\frac{I_{1H} \cdot r_K}{U_{1H}} \cdot 100 = u_{Ka\%}, \quad \frac{I_{1H} \cdot x_K}{U_{1H}} \cdot 100 = u_{Kp\%},$
тому остаточно

$$\Delta U_{\%} = \beta(u_{Ka\%} \cdot \cos \varphi_2 + u_{Kp\%} \cdot \sin \varphi_2) = \beta \cdot u_{K\%} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_K) \quad (4.4)$$

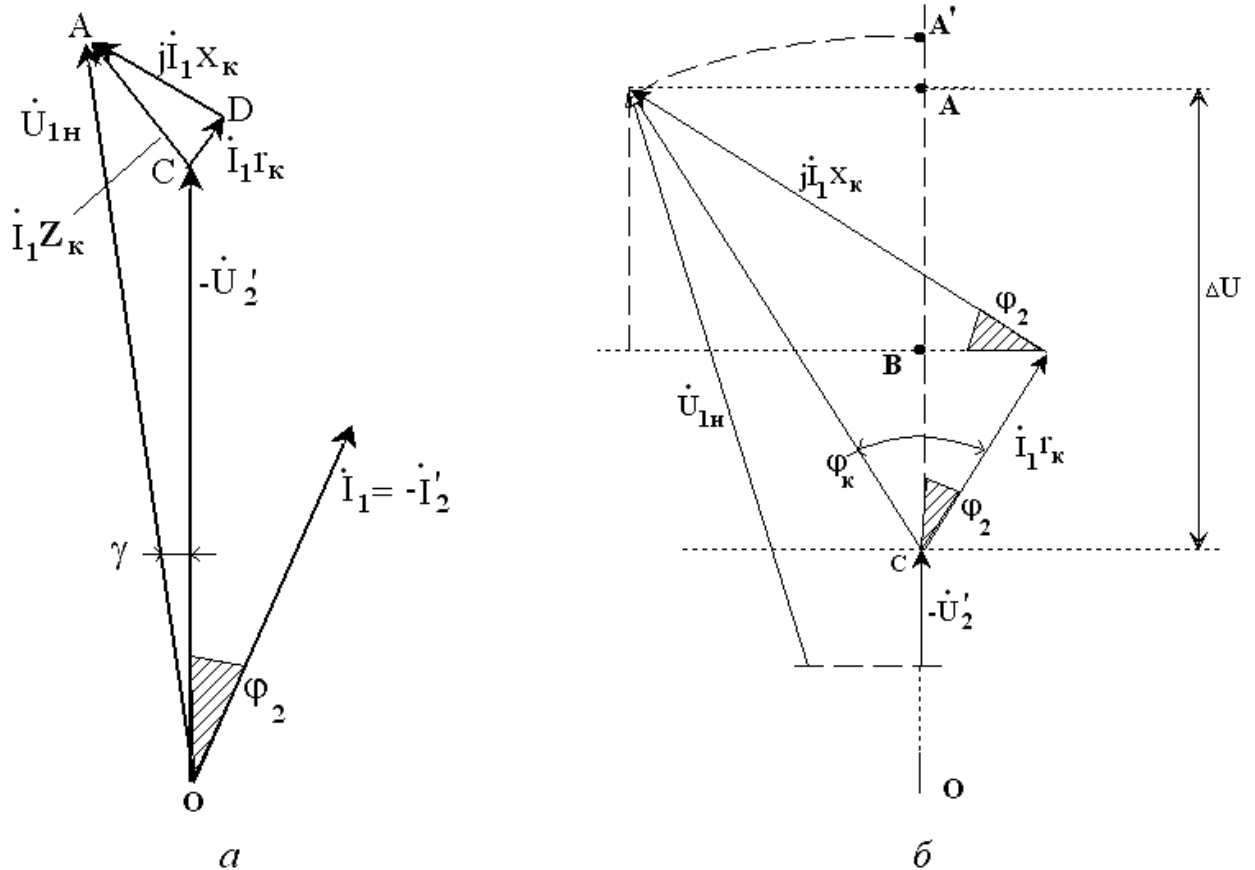


Рисунок 4.2 - Спрощена векторна діаграма TP

Найбільше значення ΔU_{\max} має при $\varphi_2 = \varphi_K$, тобто коли точка A (рис. 4.2,б) займає положення A'.

При $\varphi_2 = 0$ (чисто активне навантаження, рис. 4.3, б) $\Delta U = I_1 \cdot r_K$.

При чисто індуктивному навантаженні при $\varphi_2 = 90^\circ$ величина $\Delta U = I_1 \cdot x_K$ (рис. 4.3,а).

При $\varphi_2 < 0$, тобто коли струм I_2' випереджає напругу U_2' (активно-ємнісне навантаження), величина ΔU змінює знак. При певному активно-ємнісному навантаженні ΔU може дорівнювати нулю (рис. 4.4). При чисто ємнісному навантаженні $\varphi_2 = -90^\circ$ та $\Delta U = -I_1 \cdot x_K$ (рис. 4.3,в).

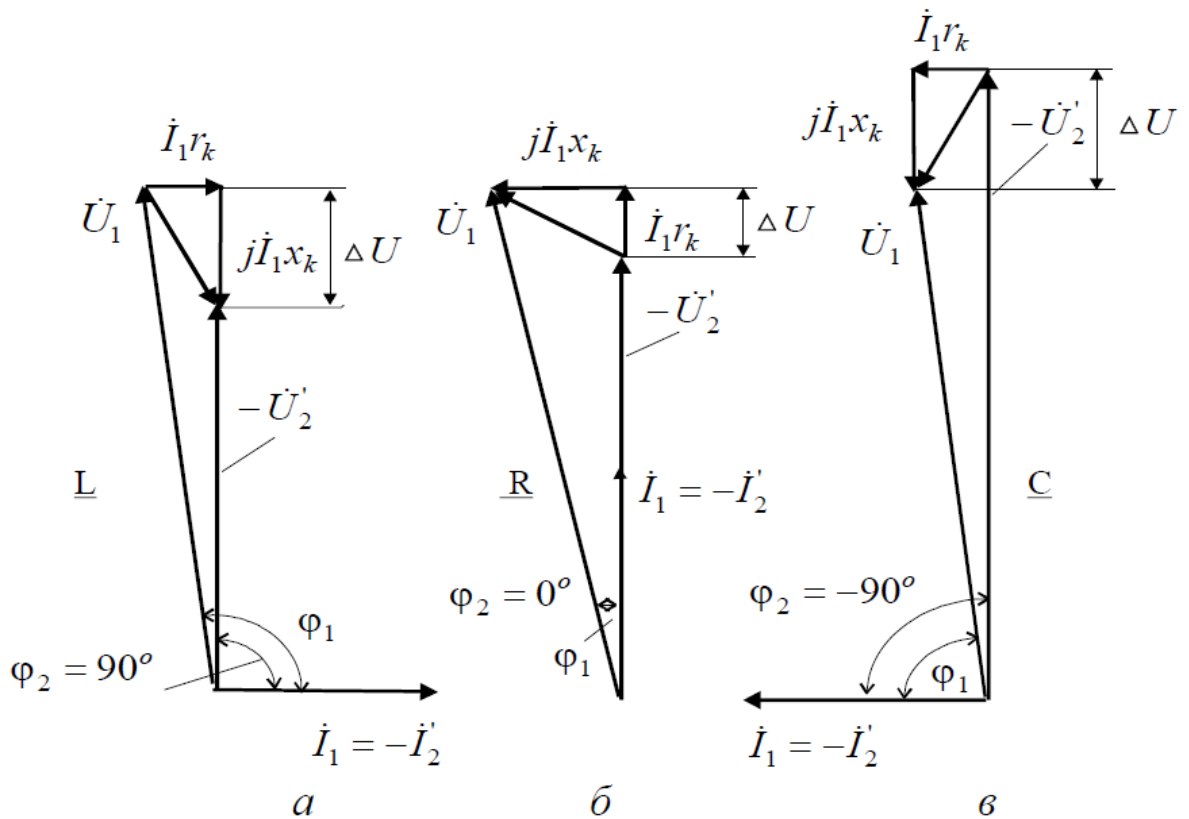


Рисунок 4.3 - Спрощені векторні діаграми трансформатора при різноманітних характерах навантаження

Якщо побудувати векторні діаграми ТР (рис. 4.3) за умови

$$U_{1н} = const;$$

$$I_1 = I'_2 = const$$

при різноманітних характерах навантаження ($\varphi_2 = \text{var}$), то можна визначити залежність $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$ (рис. 4.4).

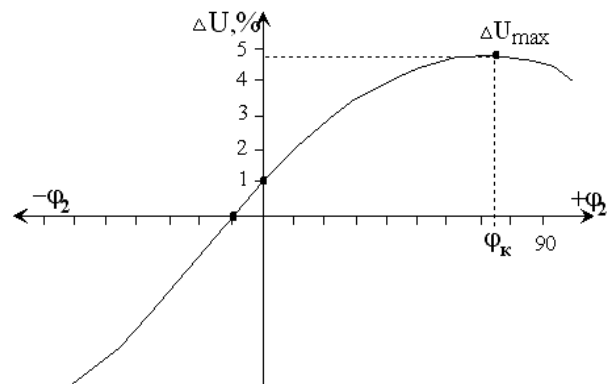


Рисунок 4.4 - Залежність

4.3 Зовнішні характеристики трансформатора

Залежність вторинної напруги U_2 трансформатора від струму навантаження I_2 називають **зовнішньою характеристикою**. Вигляд зовнішньої характеристики залежить від характеру навантаження трансформатора ($\cos \varphi_2$). Використовуючи рівняння (4.4) або виконуючи побудову спрощеної векторної діаграми при заданому характері навантаження для різноманітних значень струму можна

зобразити зовнішні характеристики трансформатора $U_2 = f(I_2)$ при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ (рис. 4.5).

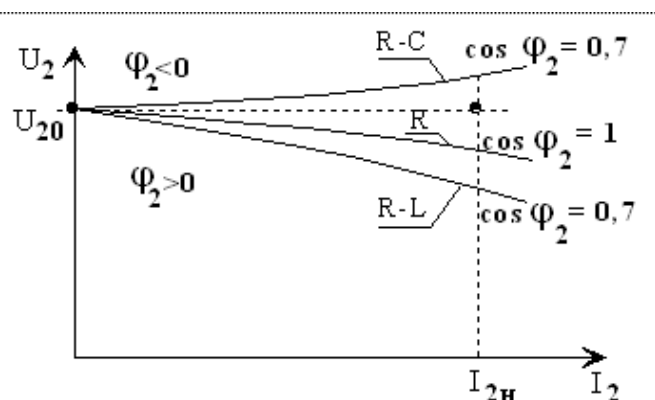


Рисунок 4.5 - Зовнішні характеристики ТР

З рівняння (4.4) очевидно, що ΔU залежить від активної ($u_{ка}$) і реактивної ($u_{кр}$) складових напруги короткого замикання.

Оскільки $u_{кр} \ll u_{ка}$, то реактивна складова ($u_{кр}$) надає значно більший вплив на зміну вторинної напруги при навантаженні.

4.4 Втрати і ККД трансформатора

При роботі трансформатора в ньому відбуваються втрати енергії, що поділяються на електричні і магнітні.

Електричні втрати Δp_e пропорційні квадрату струму і визначаються сумою електричних втрат у первинній Δp_{e1} і вторинній обмотках Δp_{e2} трансформатора

$$\Delta p_e = \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} = I_1^2 \cdot r_1 + I_2'^2 \cdot r_2' = I_1^2 (r_1 + r_2') = I_1^2 \cdot r_k. \quad (4.5)$$

Втрати в обмотках трансформатора визначаються дослідним шляхом, виміром потужності короткого замикання $P_{кн}$, при номінальних струмах в обмотках $I_k = I_{1н}$

$$\Delta p_e = P_k = (\beta \cdot I_{1н})^2 \cdot r_k = \beta^2 \cdot I_{1н}^2 \cdot r_k = \beta^2 \cdot P_{кн}. \quad (4.6)$$

Електричні втрати називають змінними, тому що їхня величина залежить від навантаження трансформатора.

Магнітні втрати (втрати в сталі) відбуваються головним чином у магнітній системі трансформатора внаслідок перемагнічування його змінним магнітним полем. Ці втрати складаються з втрат на гістерезис та втрат на вихрові струми.

Втрати на гістерезис пов'язані з витратою енергії на знищення залишкового магнетизму у феромагнітному матеріалі магнітної системи

$$\begin{aligned} \Delta p_{\Gamma} &= \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_{10} \cdot \frac{H \cdot l}{w_1} dt = \\ &= f_1 \int_0^T w_1 \cdot S_{cm} \cdot \frac{dB_m}{dt} \cdot \frac{H \cdot l}{w_1} dt = f_1 \cdot V_{cm} \int_0^T H \cdot dB_m. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Втрати на гістерезис пропорційні частоті перемагнічування f_1 в першому ступені. Для зменшення втрат на гістерезис магнітну систему трансформатора виконують із магнітною сталлю з вузькою петлею гістерезиса.

Втрати від вихрових струмів наводяться змінним магнітним полем в пластинах магнітної системи.

Якщо припустити, що магнітний потік замикається перпендикулярно листу сталі (рис. 4.6), і вважаючи, що розмір $b \ll d$, можна визначити ЕРС, індуковану потоком у витку, завширшки $2x$ і завтовшки dx

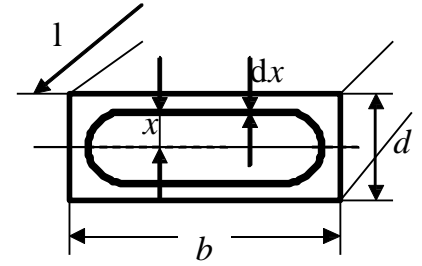


Рисунок 4.6 – До визначення ЕРС у витку

$$E_x = 4 \cdot k_\beta \cdot f_1 \cdot B_m \cdot b \cdot 2x. \quad (4.8)$$

Активний опір контуру (рис. 4.6)

$$r_x = \rho \cdot \frac{1}{S} = \rho \cdot \frac{2b}{l \cdot dx} \quad (4.9)$$

і втрати від наведених струмів в розглянутому контурі

$$d\Delta p_{em} = \frac{E_x^2}{r_x} = \frac{16 \cdot k_\beta^2 \cdot f_1^2 \cdot B_m^2 \cdot b^2 \cdot 2^2 \cdot x^2 \cdot l}{\rho \cdot 2 \cdot b} dx. \quad (4.10)$$

Втрати від вихрових струмів по усьому перетину листа сталі

$$\begin{aligned} \Delta p_{em} &= \int_0^{d/2} d\Delta p_{em} = \int_0^{d/2} \frac{16 \cdot k_\beta^2 \cdot f_1^2 \cdot B_m^2 \cdot b \cdot 2 \cdot l}{\rho} x^2 dx = \\ &= \frac{32 \cdot k_\beta^2 \cdot f_1^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 \cdot b \cdot l \cdot d}{8 \cdot \rho \cdot 3} = \frac{4}{3\rho} \cdot k_\beta^2 \cdot f_1^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 \cdot V_{cm}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Таким чином, із точки зору зменшення втрат на вихрові струми магнітну систему необхідно набрати з окремих листів (шихтувати) якомога меншої товщини (d). Втрати від вихрових струмів пропорційні частоті напруги живлення у другому ступені f_1^2 . Тому із збільшенням частоти перемагнічування f_1 товщину листа необхідно зменшувати.

При $f_1 = 50 \text{ Гц}$ – $d = 0,35 \text{ мм}$, при $f_1 = 200 \text{ Гц}$ – $d = 0,15 \div 0,2 \text{ мм}$, при $f_1 = 400 \text{ Гц}$ – $d = 0,08 \div 0,1 \text{ мм}$.

Втрати в сталі розраховують за виразом

$$\Delta p_{cm} = \kappa_{\partial} \cdot \Delta p_{1/50} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{\alpha} \cdot B_m^{\beta} \cdot G_{cm}, \quad (4.12)$$

де κ_{∂} - коефіцієнт збільшення втрат;

$\Delta p_{1/50}$ - питомі втрати в сталі при навантаженні 1 Тл і частоті перемagnetичування 50 Гц, Вт/кг;

B_m - значення магнітної індукції в стержні або ярмі магнітної системи трансформатора, Тл;

α, β - коефіцієнти, обумовлені маркою використовуваної сталі $\alpha = 1,3 \div 1,5$; $\beta = 1,8 \div 2$;

G_{cm} - маса стержня або ярма магнітної системи, кг.

Втрати в сталі приймаються рівними потужності неробочого ходу при номінальній первинній напрузі $U_0 = U_{1н}$

$$\Delta p_{cm} = P_0. \quad (4.13)$$

При незмінній первинній напрузі магнітні втрати постійні і не залежать від навантаження трансформатора.

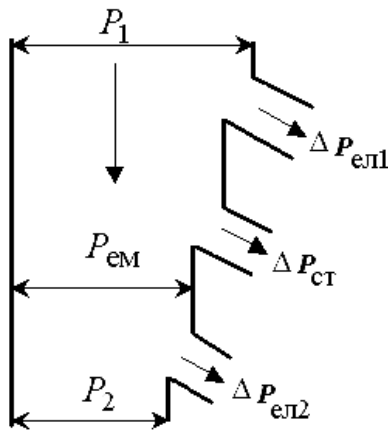


Рисунок 4.7 – Енергетична діаграма ТР

Активна потужність P_1 , що поступає із мережі в первинну обмотку трансформатора (рис. 4.7), частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці $\Delta p_{ел1}$.

Змінний магнітний потік викликає в магнітній системі трансформатора втрати в сталі Δp_{cm} .

Потужність, що залишилася після цього, називається електромагнітною

$$P_{ем} = P_1 - (\Delta p_{ел1} + \Delta p_{cm})$$

та передається у вторинну обмотку.

У вторинній обмотці мають місце електричні втрати $\Delta p_{ел2}$. Активна потужність, що поступає у навантаження трансформатора,

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta p,$$

де $\sum \Delta p = \Delta p_{ел1} + \Delta p_{ел2} + \Delta p_{cm}$ - сумарні втрати у трансформаторі.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора визначають як відношення активної потужності на виході вторинної обмотки P_2 (корисна потужність) до активної потужності на вході первинної обмотки P_1 (споживана потужність)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta p} = \frac{P_1 - \sum \Delta p}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta p}{P_2 + \sum \Delta p} \quad (4.14)$$

Якщо прийняти, що сумарні втрати

$$\sum \Delta p = \Delta p_{ct} + \Delta p_{ел} = P_0 + \beta^2 \cdot P_{кн}, \quad (4.15)$$

а корисна потужність $P_2 = \beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2$, то дістаємо вираз для розрахунку ККД трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{кн}}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{кн}} \quad (4.16)$$

Для того щоб визначити залежність $\eta = f(\beta)$ (рис. 4.8), необхідно взяти похідну $\frac{\partial \eta}{\partial \beta} = 0$. При цьому максимальне значення ККД – η_{\max} відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати дорівнюють електричним, тобто при $P_0 = \beta_{\text{опт}}^2 \cdot P_{кн}$. Значення коефіцієнта навантаження, що відповідає максимальному ККД:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_0 / P_{кн}}. \quad (4.17)$$

Звичайно $P_0 / P_{кн} = 0,25 \div 0,5$, отже, максимум ККД буде мати місце при завантаженні трансформатора $\beta_{\text{опт}} = 0,5 \div 0,7$, тобто при навантаженнях, що складають 50÷70 % від номінального.

При $\beta < \beta_{\text{опт}}$ опт ККД збільшується (рис. 4.8), тому що зменшується величина втрат у балансі потужностей.

При $\beta > \beta_{\text{опт}}$ опт зменшення ККД обумовлено зростанням електричних втрат, пропорційних β^2 , а навантаження тільки в першому степені β .

ККД трансформаторів досягає значень 92÷99 %, а ККД трансформаторів малої потужності – (60÷90) %.

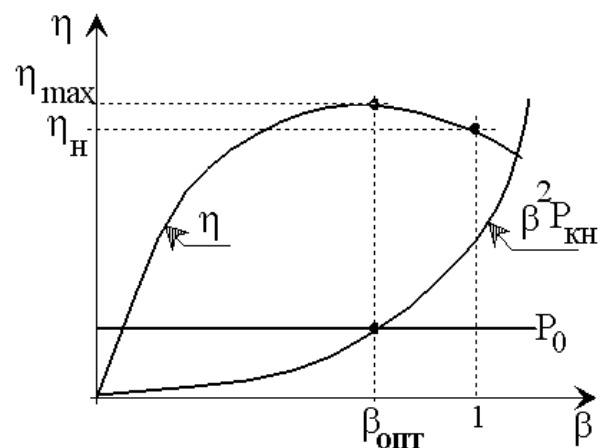


Рисунок 4.8 - Залежність $\eta = f(\beta)$

4.5 Регулювання напруги трансформатора

У процесі експлуатації трансформаторів іноді виникає необхідність у підтримці на визначеному рівні вторинної напруги при її зміні внаслідок великих падінь напруги в мережі та у самому трансформаторі.

Співвідношення між первинною і вторинною напругами залежить від коефіцієнта трансформації

$$U_1 / U_2 \approx w_1 / w_2 \quad U_2 \approx U_1 \cdot w_2 / w_1$$

Звідки витікає, що для регулювання вторинної напруги потрібно змінювати число витків в одній з обмоток. З цією метою така обмотка виконується з рядом відгалужень.

У силових трансформаторах напруга регулюється на $\pm 2,5\%$ або $\pm 5\%$ від номінальної. Звичайно відгалуження виконуються в обмотці ВН. Струм в її колі менше, тому відводи та перемикач виходять більш компактними. Крім того, оскільки число витків в обмотці ВН більше, ніж в обмотці НН, то зміну числа витків на $\pm 2,5\%$ або на $\pm 5\%$ можна виконати більш точно.

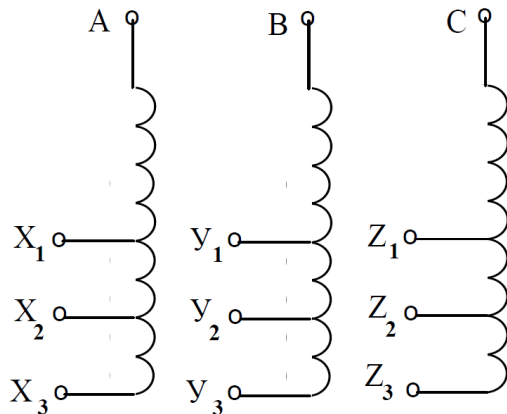


Рисунок 4.9 - Схеми обмоток ТР із регульовальними відгалуженнями

частині, тому що в цьому випадку в меншій мірі порушується рівномірність розподілу магнітного поля розсіяння.

Якщо на кожній фазі зробити по три відгалуження (рис. 4.9), то при цьому середнє відгалуження (X_2, Y_2, Z_2) відповідає номінальному коефіцієнту трансформації, а два інших коефіцієнти відрізняються від номінального на -5% (X_1, Y_1, Z_1) та $+5\%$ (X_3, Y_3, Z_3). У іншому випадку від обмотки роблять 5 відводів (рис. 4.10).

Це дає можливість одержати, крім номінального, чотири рівні трансформації $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$. Відгалуження по висоті обмотки доцільно виконувати в середній її

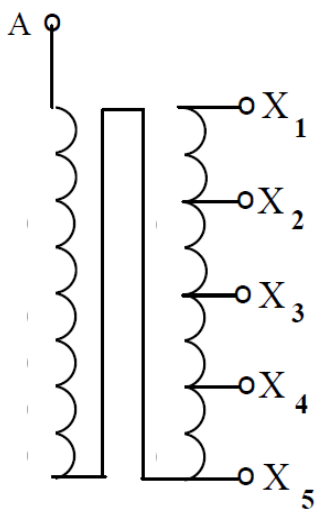


Рисунок 4.10 - Схеми обмоток ТР із п'ятьма регульовальними відгалуженнями

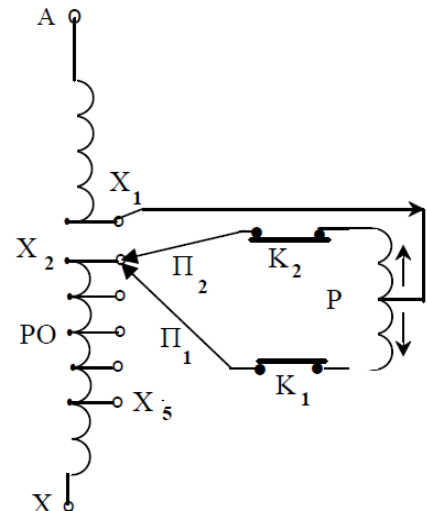
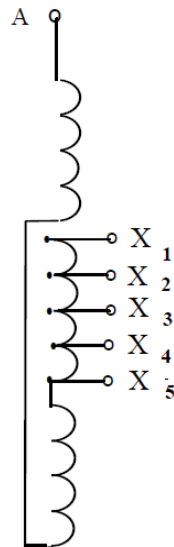


Рисунок 4.11 – Схеми РПН

Зміна числа витків обмотки здійснюється за допомогою спеціального перемикача. Існує два засоби переключення відгалужень: при відключенні трансформатора від мережі (переключення без збудження – ПБЗ), або без відключення від мережі (регулювання під навантаженням – РПН).

Для ПБЗ застосовують барабанні перемикачі відгалужень по одному на кожну фазу. При РПН переключення з одного відгалуження на інше здійснюється без розриву кола струму. З цією метою обмотку кожної фази оснащують спеціальним перемикаючим пристроєм, що складається з реактора P , двох контакторів K_1 і K_2 та перемикача із двома рухливими контактами Π_1 і Π_2 (рис. 4.11).

На рис. 4.11 показане положення перемикаючого пристрою при роботі трансформатора на відгалуженні. У робочому положенні обидва рухливі контакти Π_1 і Π_2 знаходяться на одному відгалуженні X_2 , контакти K_1 і K_2 замкнені та робочий струм направлений по двох половинах обмотки реактора у різних напрямках. Тому магнітний потік реактора і його індуктивний опір практично дорівнюють нулю.

Послідовність операцій при переключенні контактів з відгалуження X_2 на X_3 показана на рис. 4.12. Положенню пристрою при роботі трансформатора на другому відгалуженні X_3 відповідає рис. 4.13,г. Інші позиції є проміжними (рис. 4.12,а-в).

Струм, що виникає при замиканні частини обмоток ТР в процесі переходу на інше відгалуження, обмежується індуктивним опором реактора, тому що в обох половинах обмотки реактора струм має однаковий напрямок (рис. 4.12,б). Апаратура РПН розташовується в спільному баку з ТР, а її робота автоматизується або здійснюється дистанційно.

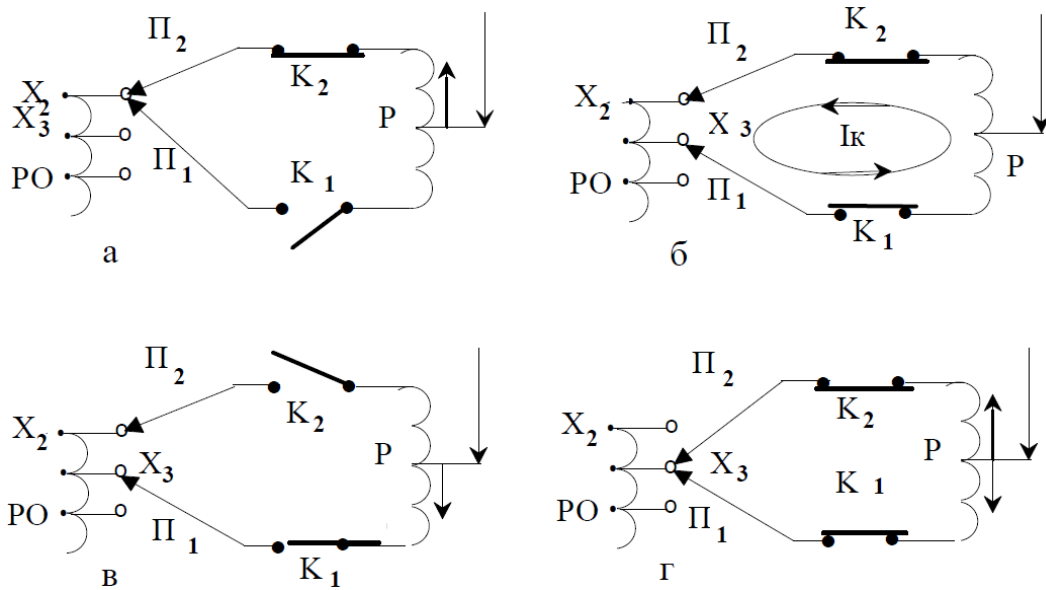


Рисунок 4.12 - Послідовність переключення контактів під навантаженням

Трансформатор із РПН, крім первинної і вторинної, має регульовальну обмотку (РО), включену послідовно в коло первинної або вторинної обмотки.

Література

[1],[2]

ТЕМА 5

ТРИФАЗНІ ТА СПЕЦІАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

- 5.1 Схеми та групи з'єднання трифазних трансформаторів
- 5.2 Особливості неробочого ходу трифазних трансформаторів
- 5.3 Паралельна робота трансформаторів
- 5.4 Несиметричне навантаження трансформаторів
- 5.5 З'єднання обмоток за схемою Y_0/Y
- 5.6 З'єднання обмоток Y/Δ

5.1 Схеми та групи з'єднання трифазних трансформаторів

5.1.1 Схеми з'єднання трифазних трансформаторів

Трифазний струм звичайно трансформується за допомогою трифазних ТР, що за конструкцією магнітної системи можуть бути тристержньовими, броньостержньовими, броньовими. Магнітні системи ТР можуть бути планарними і просторовими. Тільки при великих потужностях застосовують три однофазних ТР, що складають трифазну групу.

Обмотки ТР можуть з'єднуватися в зірку (рис. 5.1), трикутник (рис. 5.2), зигзаг (рис. 5.3).

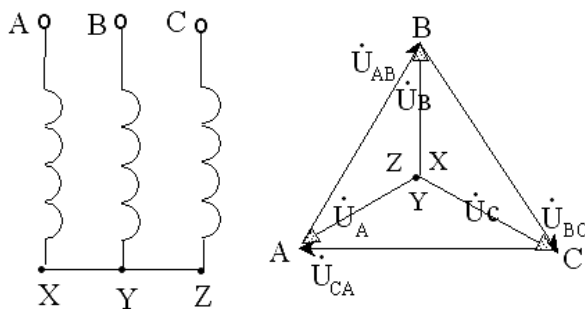


Рисунок 5.1 - З'єднання обмотки зіркою

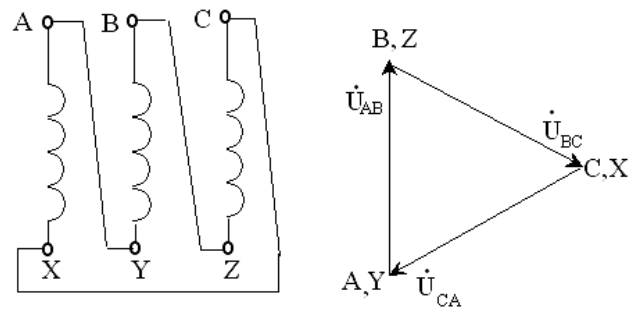


Рисунок 5.2 - З'єднання обмотки трикутником

Схему з'єднання «зірка» позначають українською буквою У або латинською Y, схему з'єднання «трикутник» – українською буквою Д або грецькою Δ , схему «зигзаг» – латинською буквою Z.

Початки та кінці обмоток ВН позначають A, B, C та X, Y, Z , для обмоток НН – a, b, c та x, y, z , вивід нульової точки – O (для ВН) і o (для НН).

Схеми з'єднання обмоток ТР позначають дробом, у чисельнику якого зазначена схема з'єднання обмоток ВН, а в знаменнику – обмоток НН. Наприклад, Y/Δ означає, що обмотка ВН з'єднана в зірку, а обмотка НН – у трикутник.

З'єднання зигзагом застосовують тільки в ТР спеціального призначення, наприклад у ТР для випрямлячів. Для здійснення цього з'єднання кожен фазу обмотки НН поділяють на дві частини, розташовуючи їх на різних стержнях. Зазначені частини обмоток з'єднують так, щоб кінець однієї частини був приєднаний до кінця другої частини цієї ж обмотки, розташованої на іншому

стержні (рис. 5.3). При цьому напруги частин обмоток додаються векторно, а не алгебраїчно, як при з'єднанні «зіркою».

«Зигзаг» називають рівноплечовим, якщо частини обмоток, що розташовуються на різних стержнях і з'єднуються послідовно, однакові.

Тому при з'єднанні обмоток за схемою «зигзаг» напруга на фазу в $2/\sqrt{3}$ раз менше, ніж при з'єднанні зіркою.

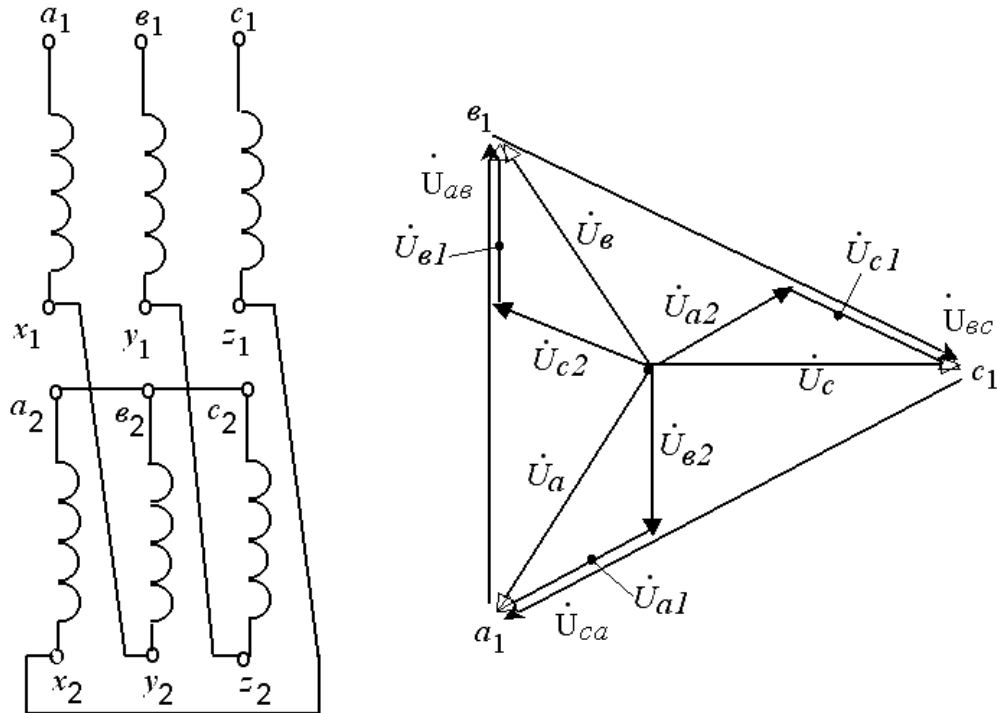


Рисунок 5.3 - З'єднання обмотки зигзагом

Позначимо напругу на половині обмотки, наприклад,

$$U_{e1} = U_{e2} = U_{c1} = U_{c2} = U_{\phi}$$

Тоді співвідношення напруги на фазу при з'єднанні обмоток за схемами «зірка» та «зигзаг» складає

$$U_{\phi Y} = 2U_{\phi};$$

$$U_{\phi Z} = \sqrt{3}U_{\phi};$$

$$U_{\phi Y} / U_{\phi Z} = 2 / \sqrt{3} = 1,16;$$

5.1.2 Групи з'єднання трансформаторів

Трансформатори поділяють на 12 груп залежно від кута зсуву між лінійними напругами, вимірюваними на однойменних затискачах.

Група з'єднань залежить від схеми з'єднання обмоток ВН та НН Y, Δ, Z, напрямку намотки обмоток, маркірування затискачів.

Розглянемо одну фазу ТР (рис. 5.4). ЕРС вважають позитивною, якщо вона направлена від кінця обмотки до її початку. На рис. 5.4,а обмотки НН та ВН намотані в одну сторону, розташовані на одному стержні, перетинаються тим самим магнітним потоком, отже, ЕРС, що наводяться в них, мають у будь-який момент часу однакові щодо затискачів напрямки від кінця (X, x) до початку (A, a). Тому вектори ЕРС \dot{E}_{XA} та \dot{E}_{xa} збігаються за фазою.

Якщо змінити маркірування затискачів вторинної обмотки на протилежне (рис. 5.4,б), то вектори \dot{E}_{XA} і \dot{E}_{xa} а будуть мати зсув 180° . Такий самий напрямок векторів буде мати місце при однаковому маркіруванні затискачів і різному напрямку намотки обмоток. Надалі будуть розглядатися трансформатори, у яких обмотки ВН та НН намотані в один бік.

Таким чином, при розташуванні обмоток на одному стержні вектори фазних ЕРС завжди будуть у фазі або в протифазі:

- при однаковому маркіруванні затискачів вектори фазних ЕРС НН та ВН збігаються за фазою (рис. 5.4,а);
- при протилежному маркіруванні затискачів вектори фазних ЕРС обмоток ВН і НН мають зсув 180° (рис. 5.4,б).

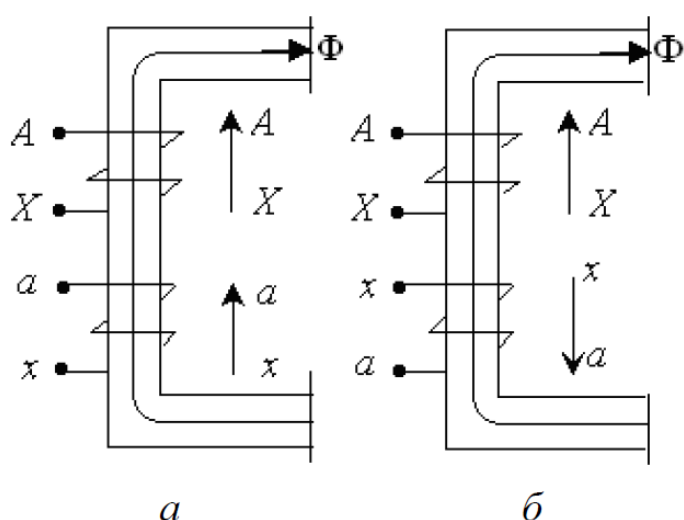


Рисунок 5.4 – До визначення маркірування затискачів

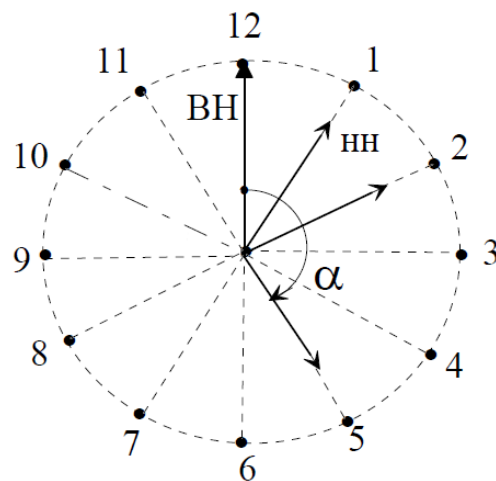


Рисунок 5.5 – До визначення кута зсуву між лінійними ЕРС обмоток

Кут зсуву лінійних ЕРС буде залежати ще й від способу з'єднання фазних обмоток.

Для визначення кута зсуву між лінійними ЕРС обмоток застосовують стрілки годинників (рис. 5.5). При цьому вектор лінійної ЕРС первинної обмотки (ВН) приймають за хвилину стрілку і вважають, що вона завжди розташована на цифрі 12, а вектори ЕРС обмотки НН приймають за годинникову стрілку. Мінімальний кут зсуву векторів може бути $\alpha = 30^\circ$.

Номер групи визначається за кутом зсуву вектора лінійної ЕРС обмотки НН відносно вектора лінійної ЕРС обмотки ВН, відліченим проти годинникової стрілки і віднесеним до мінімального кута 30° . У розглянутому випадку були

нульова на рис. 5.4,а ($0/30^\circ = 0$) і шоста на рис. 5.4,б ($180^\circ/30^\circ = 6$) групи з'єднань обмоток.

На практиці доводиться розв'язувати дві задачі:

- визначення номера групи ТР за заданою схемою з'єднання обмоток;
- визначення маркірування затискачів та побудова схеми з'єднання обмоток за заданим номером групи ТР.

5.2 Особливості неробочого ходу трифазних трансформаторів

З теорії однофазних ТР відомо, що при синусоїдному магнітному потоці струм намагнічування містить ряд вищих непарних гармонік через нелінійність характеристики намагнічування, тобто

$$i_0 = I_{01m} \cdot \sin \omega t + I_{03m} \cdot \sin 3\omega t + \dots \quad (5.1)$$

У трифазних трансформаторах ефекти, пов'язані з нелінійністю характеристики намагнічування, помітно ускладнюються, а характер їхніх виявлень залежить **від схем з'єднання обмоток і конструкції магнітної системи**. При трансформації трифазних струмів може відбуватися викривлення синусоїдальності не тільки струму, що намагнічує, але і магнітних потоків і фазних напруг. У симетричній трифазній системі несинусоїдальні фазні величини (струми, напруги, потоки) у всіх фазах змінюються однаково, але зсунуті в часі на третину періоду. Для струмів неробочого ходу трифазного ТР можна записати

$$\begin{aligned} i_{0A} &= I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots \\ i_{0B} &= I_{01m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{03m} \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \\ i_{0C} &= I_{01m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + I_{03m} \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \end{aligned} \quad (5.2)$$

Перші гармонійні фазних величин (у даному випадку струмів) зсунуті на третину періоду і утворюють симетричну систему прямої послідовності фаз — А, В, С. Сума фазних величин такої послідовності завжди дорівнює нулю

$$i_{0A1} + i_{0B1} + i_{0C1} = I_{01m} \cdot \sin \omega t + I_{01m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{01m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = 0$$

Така ж система прямої послідовності фаз утворюється усіма гармонійними складовими, порядок яких дорівнює

$$\nu_{np} = 6k + 1 = 1, 7, 13, \dots, \text{ де } k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5.3)$$

Гармоніки порядків

$$\nu_{звор} = 6k - 1 = 5, 11, \dots \quad (5.4)$$

утворюють систему зворотної послідовності фаз А, С, В.

Гармонійні фазних величин, порядок яких кратний трьом,

$$\nu_0 = 6k + 3 = 3, 9, 15, \dots \quad (5.5)$$

утворюють систему нульової послідовності, у котрій величини всіх фаз збігаються у часі.

Струми третіх гармонійних у всіх фазах збігаються за величиною і напрямком, тобто

$$i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = i_{03m} \sin 3\omega t. \quad (5.6)$$

У випадку з'єднання обмотки в зірку з нульовим проводом струми третьої гармоніки протікають по фазах обмотки, а по нульовому проводу проходить струм, що дорівнює потроєному фазному (рис. 5.6,а)

$$i_{03A} + i_{03B} + i_{03C} = 3i_{03}. \quad (5.7)$$

Треті гармонійні струмів не можуть існувати при з'єднанні обмотки у зірку без нульового проводу (рис. 5.6,б), тому що в будь-який момент часу вони рівні між собою і направлені до нульової точки або від неї.

При з'єднанні у трикутник (рис. 5.6,в) треті гармонійні фазних струмів замикаються в межах контуру і відсутні в лінійних проводах.

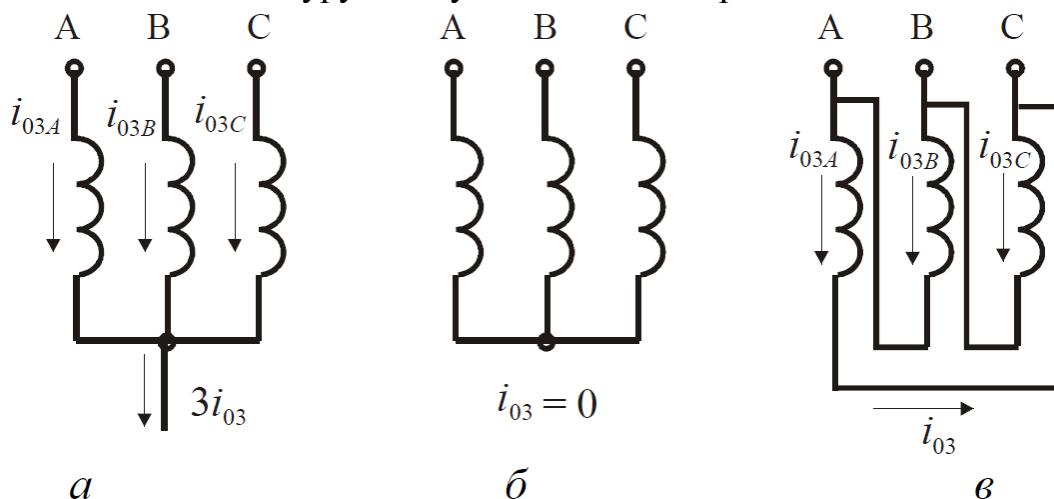


Рисунок 5.6 - Схеми з'єднання обмоток трансформатора

Гармонійні складові струмів прямої та зворотної послідовностей можуть вільно протікати по фазах у будь-якій схемі з'єднання. У нульовому проводі струми таких гармонік не протікають, тому що їхня сума завжди дорівнює нулю.

Розглянемо особливості режиму неробочого ходу трифазних трансформаторів для деяких схем з'єднання обмоток.

5.2.1 З'єднання обмоток за схемою Y/Y

При з'єднанні обмотки у зірку для третіх гармонійних струму неробочого ходу не існує шляхів, якими вони могли б замикатися. Отже струми, що намагнічують в схемі Y без нульового проводу, можуть містити всі гармоніки, крім третьої.

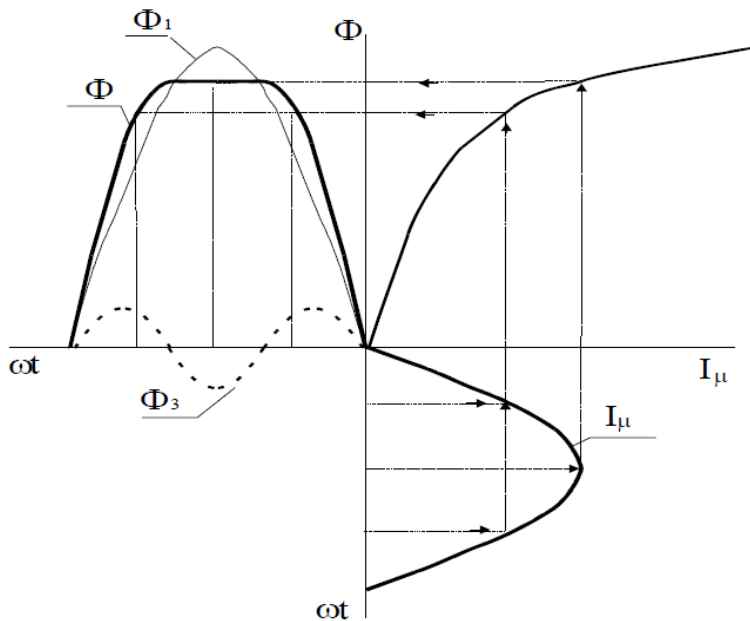


Рисунок 5.7 - Побудова графіка магнітного потоку

відповідного потоку на чверть періоду. Ці ЕРС додаються (рис. 5.8)

$$e = \omega \cdot w \cdot \Phi_{1\max} \sin(\omega t - \pi / 2) + 3\omega \cdot w \cdot \Phi_{3\max} \sin(3\omega t - \pi / 2) = e_1 + e_3$$

Це призводить до викривлення синусоїдальності фазних ЕРС і напруг (рис. 5.8).

Амплітуда ЕРС третьої гармоніки залежить від конструктивних виконань магнітопроводу ТР.

У груповому ТР, що складається з трьох одно фазних ТР, треті гармоніки потоків фаз замикаються тим самим шляхом, що і перші гармоніки, тобто шляхом з малим магнітним опором.

При цьому значення потоку Φ_3 може досягати 15÷20 % від Φ_1 .

Амплітуда ЕРС третьої гармоніки у груповому ТР може досягати 45÷60 % від амплітуди основної гармоніки.

Це підвищує на ті ж 45÷60 % найбільше значення фазної ЕРС і на 11÷17% її діюче значення – $\left(\sqrt{1^2 + (0,45 \div 0,6)^2} = 1,1 \div 1,17\right)$.

Таке підвищення ЕРС небажано й у ряді випадків небезпечно. Крім того, ізоляцію доводиться розраховувати за амплітудою ЕРС шпильастої форми E_{\max} , що призводить до подорожчання ТР.

Якщо зневажити всіма гармонійними, крім першої, то можна вважати намагнічуючий струм I_μ синусоїдальним.

При цьому форма кривої магнітного потоку, визначена за допомогою кривої намагнічування $\Phi = f(I_\mu)$ при синусоїдальному I_μ , буде сплюснена (рис. 5.7).

Крива магнітного потоку містить, крім першої Φ_1 , явно виражену третю гармоніку Φ_3 (рис. 5.7).

Кожна із складових потоку створює ЕРС, що відстають від

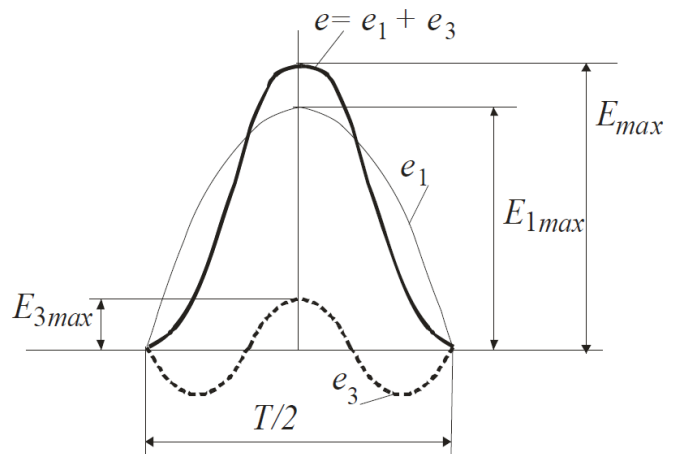


Рисунок 5.8 - Форма фазної ЕРС при схемі Y / Y

Незважаючи на різке викривлення форми фазних ЕРС, лінійні ЕРС залишаються синусоїдальними, тому що при з'єднанні обмотки у Y треті гармонійні не з'являються в лінійній ЕРС.

Пояснюється це тим, що лінійна ЕРС при з'єднанні обмотки зіркою визначається різницею фазних ЕРС.

Так, для першої гармоніки (рис. 5.9,а) лінійна ЕРС визначається

$$\dot{E}_{1AB} = \dot{E}_{1B} - \dot{E}_{1A} = \sqrt{3}\dot{E}_{1A}.$$

Лінійні ЕРС третьої і кратних трьом гармонік дорівнюють нулю унаслідок збігу за фазою фазних ЕРС цих гармонік (рис. 5.9,б)

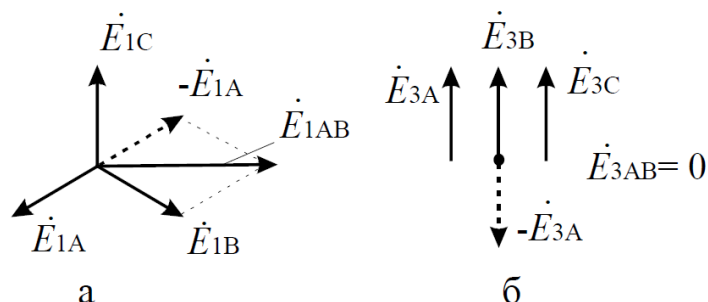


Рисунок 5.9 - Векторні діаграми ЕРС

$$\dot{E}_{3AB} = \dot{E}_{3B} - \dot{E}_{3A} = 0.$$

Отже, за умов експлуатації ТР (особливо високовольтних) **слід уникати наявності третьої гармонійної у фазній ЕРС**, тому що при цьому підвищується амплітудне значення фазної ЕРС і зростає напруженість електричного поля в ізоляції обмоток. Інакше це відбувається у тристержневому ТР, у якому магнітні кола являють собою зв'язану систему. Потoki третіх гармонійних у фазах збігаються в часі. Це значить, що потоки третіх гармонійних фаз у кожен момент часу дорівнюють одна одній за величиною та у стержнях трансформатора направлені всі в один бік (рис. 5.10).

Отже, ці потоки не можуть замикатися через стержні, а повинні проходити від ярма до ярма за межами стержнів. Шлях цей проходить по маслу, повітря, стінках бака, стяжних болтах та має малу магнітну провідність, унаслідок чого третя гармонійна потоку виражена слабо.

Тому ЕРС третьої гармонійної, що наводяться потоками Φ_3 , невеликі і практично не спотворюють форму фазної ЕРС.

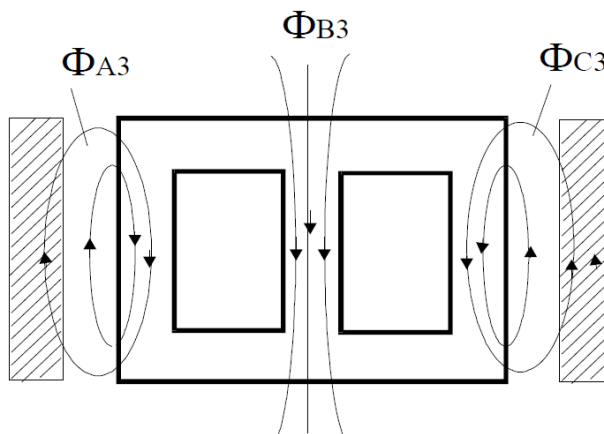


Рисунок 5.10 - Шляхи замикання потоків третьої гармонійної

$$\Phi_{3\text{трест}} \square \Phi_{3\text{груп}}.$$

В усіх металевих частинах, по яких проходить потік третьої гармоніки, виникають вихрові струми, що може призвести до надмірного нагрівання цих частин.

Поява додаткових втрат у сталі призводить до зниження ККД трансформатора. Дослід показує, що при індукції у стержні $1,4 \div 1,45 \text{ Тл}$ ці

додаткові втрати складають 10 % від основних, але при збільшенні індукції швидко зростають.

5.2.2 З'єднання обмоток за схемою Y_0/Y

Треті гармонійні струму намагнічування замикаються по нульовому проводу (рис. 5.8,а), при цьому струм неробочого ходу несинусоїдальний. Отже, магнітний потік трансформатора та ЕРС у фазах будуть синусоїдальні.

5.2.3 З'єднання обмоток Y/Δ

При з'єднанні первинної обмотки в Y зі струму намагнічування випадає третя гармонійна. Струм намагнічування стає практично синусоїдним, а магнітний потік набуває сплющеної форми (рис. 5.9). При цьому поряд із першою Φ_1 виникає третя Φ_3 складова магнітного потоку.

Третя гармонійна потоку Φ_3 на-водить у кожній із фаз вторинної обмотки третю гармонійну ЕРС – E_{23} , що відстає від потоку на 90° (рис. 5.11).

У свою чергу ЕРС E_{23} створює струм третьої гармоніки I_{23} , що замикається у контурі вторинного трикутника.

Контур вторинної обмотки має значний індуктивний опір, тому струм I_{23} відстає від E_{23} майже на 90° .

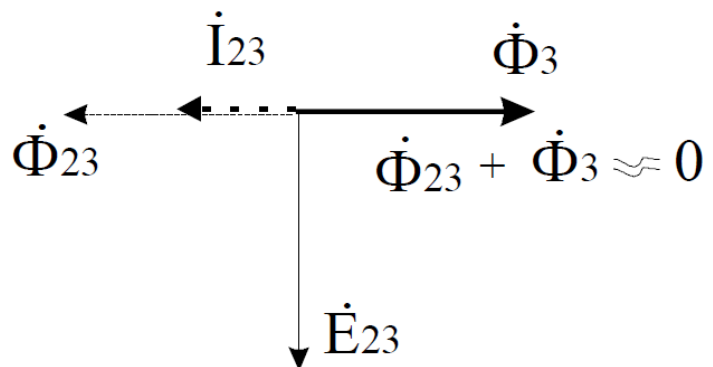


Рисунок 5.11 – Векторна діаграма складових магнітних потоків

Струм I_{23} створює потік третьої гармонійної Φ_{23} , що направлений назустріч потоку третьої гармонійної Φ_3 від намагнічуючого струму і компенсує його майже цілком (за законом Ленца).

Внаслідок цього результуючий магнітний потік практично синусоїдальний. Синусоїдальні і вторинні фазні ЕРС.

Спосіб з'єднання Y/Δ захищає ТР від шкідливих впливів третіх гармонійних потоку і ЕРС.

5.3 Паралельна робота трансформаторів

5.3.1 Умови паралельної роботи

Під паралельною роботою двох або декількох трансформаторів розуміють таку роботу, коли первинні обмотки ввімкнені в спільну первинну мережу, а до їхніх вторинних обмоток підключено спільне навантаження (рис. 5.12).

При значній потужності установки доцільно вмикати не один, а кілька трансформаторів меншої потужності. Таке дроблення загальної трансформаторної

потужності дозволяє краще вирішувати питання енергопостачання, вимикати частину трансформаторів при зменшенні навантаження, проводити профілактичний ремонт.

При паралельній роботі ТР слід прагнути того, щоб при неробочому ході в їхніх обмотках не виникали зрівняльні струми і щоб навантаження розподілялося між всіма трансформаторами пропорційно їхнім номінальним потужностям.

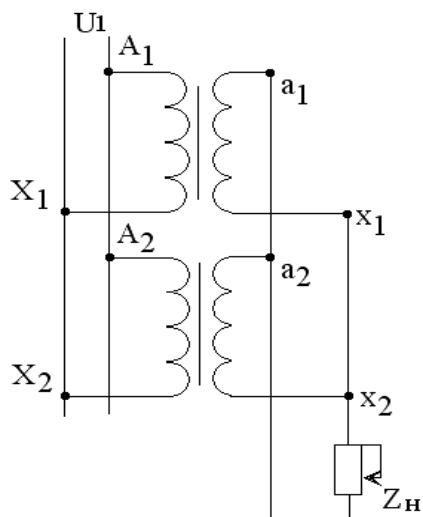


Рисунок 5.12 – Схема роботи трансформаторів на спільне навантаження

Для цього необхідно, щоб трансформатори, що вмикаються на паралельну роботу, мали:

– рівні первинні і вторинні номінальні напруги, а отже, однакові коефіцієнти трансформації

$$U_{1In} = U_{1IIIn} = U_{1IIIIn} = \dots = U_{1nIn};$$

$$U_{2In} = U_{2IIIn} = U_{2IIIIn} = \dots = U_{2nIn};$$

$$k_I = k_{II} = k_{III} = \dots = k_n;$$

– однакові групи з'єднання обмоток;

– однакові напруги короткого замикання і його складові:

$$u_{к\%I} = u_{к\%II} = u_{к\%III} = \dots = u_{к\%n};$$

$$u_{ка\%I} = u_{ка\%II} = u_{ка\%III} = \dots = u_{ка\%n};$$

$$u_{кр\%I} = u_{кр\%II} = u_{кр\%III} = \dots = u_{кр\%n}.$$

При виконанні цих умов загальне вторинне навантаження розподіляється рівномірно між трансформаторами. ТР навантажуються пропорційно їхнім номінальним потужностям, а навантажувальні струми додаються арифметично.

На практиці повинна бути виконана точно тільки друга умова. Перша та третя умови виконуються з відступами, для яких установлені практичні допуски.

5.3.2 Паралельна робота трансформаторів з неоднаковими коефіцієнтами трансформації

Припустимо, що два паралельно ввімкнених трансформатори I та II задовольняють другу і третю умови, але не задовольняють першу умову. Тобто коефіцієнти трансформації паралельно ввімкнених ТР не рівні $k_I \neq k_{II}$ та $k_I < k_{II}$.

Так як первинні обмотки приєднані до спільної мережі, то $U_{1I} = U_{1II} = U_{1n}$. ЕРС вторинних обмоток рівні $E_{2I} = U_{1n} / k_I$ і $E_{2II} = U_{1n} / k_{II}$. Але $k_I < k_{II}$, тому $E_{2I} > E_{2II}$.

У замкненому контурі вторинних обмоток буде діяти арифметична різниця цих ЕРС $\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$. Під дією ΔE виникає зрівняльний струм, що протікає по вторинних обмотках трансформаторів у протилежних напрямках (рис. 5.13). Цей струм трансформується й у первинне коло.

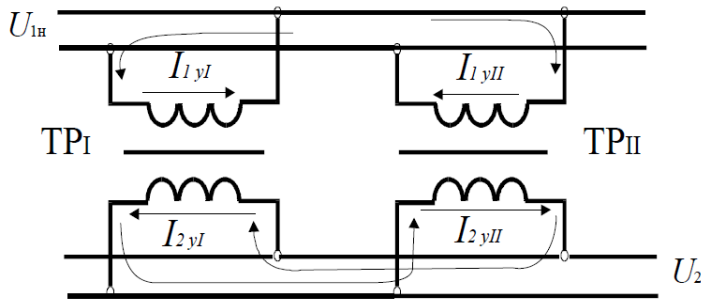


Рисунок 5.13 - Зрівняльні струми в ТР
при $k_I \neq k_{II}$

Зрівняльний струм протікає по колу, утвореному тільки обмотками обох трансформаторів. Отже, усе відбувається так, ніби відносно ΔE обидва ТР знаходилися в умовах короткого замикання.

Тому значення зрівняльного струму буде обмежуватися опорами КЗ трансформаторів

$$I_y = \frac{\Delta E}{Z_{кII} + Z_{кI}}. \quad (5.8)$$

Зсув за фазою

$$\varphi_k = \arctg \frac{x_{кI} + x_{кII}}{r_{кI} + r_{кII}} \quad (5.9)$$

Струми I_{yI} і I_{yII} створюють у ТР падіння напруги, і на затискачах ТР встановлюється напруга

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2I} - j\dot{I}_{yI} \cdot x_{кI} - \dot{I}_{yI} \cdot r_{кI} = \dot{E}_{2II} - j\dot{I}_{yII} \cdot x_{кII} - \dot{I}_{yII} \cdot r_{кII}$$

Якщо номінальні потужності ТР рівні, то при $u_{кI}\% = u_{кII}\%$ маємо $Z_{кI} = Z_{кII}$ і трикутники КЗ A_1B_1C і A_2B_2C рівні за величиною на векторній діаграмі на рис. 5.14. Відрізок $\overline{A_2A_2}$ поділяється в точці С навпіл. Таким чином, зрівняльний струм I_{yI} знижує ЕРС E_{2I} до спільної на шинах напруги U_2 , а струм I_{yII} підвищує ЕРС E_{2II} до тієї ж напруги.

Якщо трансформатори різної потужності, наприклад $S_{нI} < S_{нII}$, то при однакових $u_{кI}\% = u_{кII}\%$ опори КЗ обернено пропорційні потужностям, тобто $r_{кI} > r_{кII}, x_{кI} > x_{кII}$ і $\Delta A_1B_1C > \Delta A_2B_2C$. Отже, точка С переміщується по відрітку $\overline{A_1A_2}$ вниз. Коли $S_{нI} \square S_{нII}$, точка С збігатиметься з A_2 .

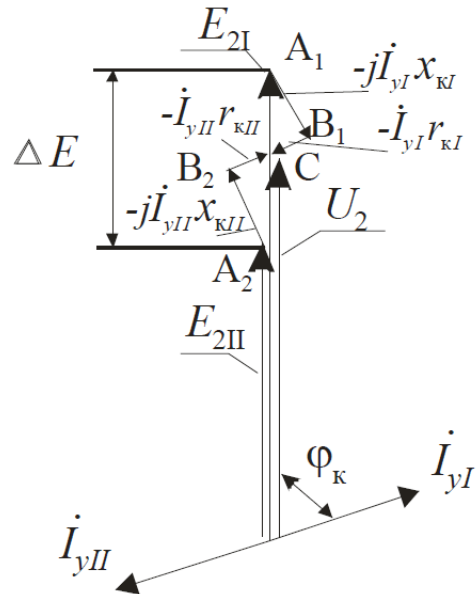


Рисунок 5.14 – Векторна
діаграма трансформаторів з
різними коефіцієнтами
трансформації

Таким чином, при нерівності коефіцієнтів трансформації вже у режимі неробочого ходу по обмотках ТР протікають зрівняльні струми. Ці струми створюють додаткові втрати.

Наявність зрівняльного струму забезпечує рівність вторинних напруг обох ТР.

Величину зрівняльного струму зручно виразити через напругу короткого замикання $u_{\kappa\%}$, що завжди наводиться у каталогах ТР.

Для цього зробимо деякі перетворення у формулі (5.8)

$$I_y = \frac{\Delta E}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}} = \frac{U_{1H}(1/k_I - 1/k_{II})}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}} = \frac{U_{1H} \cdot \Delta k}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}}.$$

де $\Delta k = \left| \frac{k_I - k_{II}}{k_I \cdot k_{II}} \right|$ - різниця коефіцієнтів трансформації,

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{U_{1H} \cdot \Delta k \cdot 100}{Z_{\kappa I} \frac{I_{1HI}}{I_{1HI}} 100 + Z_{\kappa II} \frac{I_{1HII}}{I_{1HII}} 100} = \frac{\Delta k \cdot 100}{\frac{Z_{\kappa I} \cdot I_{1HI}}{U_{1H}} 100 \frac{1}{I_{1HI}} + \frac{Z_{\kappa II} \cdot I_{1HII}}{U_{1H}} 100 \frac{1}{I_{1HII}}} = \\ &= \frac{\Delta k \%}{u_{\kappa I \%} \cdot \frac{1}{I_{1HI}} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{1}{I_{1HII}}}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

де $\Delta k \% = \Delta k \cdot 100$.

Відсоткове значення зрівняльного струму відносно номінального

$$I_{y\%} = \frac{I_y}{I_{1HI}} 100 = \frac{\Delta k \% \cdot 100}{u_{\kappa I \%} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{I_{1HI}}{I_{1HII}}} = \frac{\Delta k \% \cdot 100}{u_{\kappa I \%} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{S_{HI}}{S_{HII}}}. \quad (5.11)$$

Якщо припустити, що то $\Delta k \% = 1\%$, $u_{\kappa I \%} = u_{\kappa II \%} = 5\%$, а $S_{HI} = S_{HII}$, то відсоткове значення зрівняльного струму

$$I_{y\%} = \frac{1 \cdot 100}{5 + 5} = 10\%.$$

$$\text{При } S_{HI} = 0,5 S_{HII} \quad - \quad I_{y\%} = \frac{1 \cdot 100}{5 + 5 \frac{1}{2}} = 13\%;$$

$$S_{HI} \square S_{HII} \quad - \quad I_{y\%} = \frac{1 \cdot 100}{5 + 5 \frac{1}{\infty}} \approx 20\%.$$

при

Допускається різниця у коефіцієнтах трансформації не більше, ніж $\Delta k \% \leq 0,5\%$, а для ТР із коефіцієнтом трансформації $k > 3 - \Delta k \% \leq 1\%$.

У цьому випадку зрівняльний струм, що протікає в режимі неробочого ходу, буде невеликий.

Коли з'являється зовнішнє навантаження, зовнішній навантажувальний струм $I_{нав}$ розподіляється між трансформаторами пропорційно їхнім номінальним

потужностям. У кожному з ТР існує два струми – зрівняльний і навантажувальний.

При однаковій потужності $S_{нI} = S_{нII}$ навантажувальні струми обох ТР рівні $I_{нI} = I_{нII} = I_{нав} / 2$.

Результуючий вторинний струм трансформаторів являє собою геометричну суму цих струмів (рис. 5.15)

$$\dot{I}_{2I} = \dot{I}_{нI} + \dot{I}_{yI}, \quad \dot{I}_{2II} = \dot{I}_{нII} + \dot{I}_{yII}. \quad (5.12)$$

При цьому трансформатор із меншим коефіцієнтом трансформації ($k_I < k_{II}$) буде перевантажений, тобто $I_{2I} > I_{2II}$.

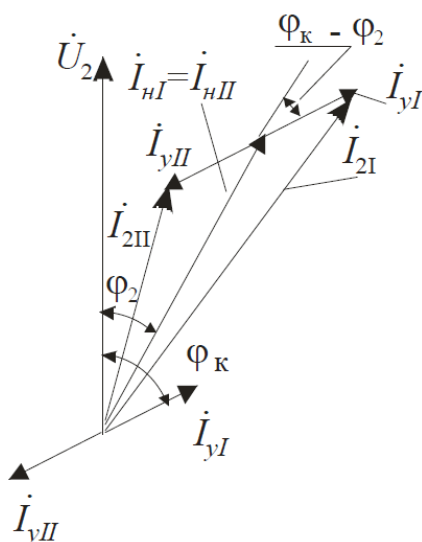


Рисунок 5.15 – Розподіл навантаження при $k_I < k_{II}$

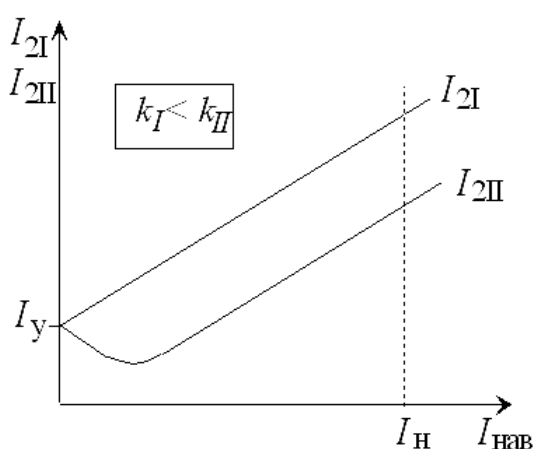


Рисунок 5.16 – Залежність $I_{2I}, I_{2II} = f(I_{нав})$

При $k_I > k_{II}$ вектори зрівняльних струмів на рис. 5.15 помінялися б місцями, і був би перевантажений другий ТР, а недовантажений перший. Залежність вторинних струмів паралельно ввімкнених трансформаторів від струму навантаження можна представити у вигляді, зображеному на рис. 5.16.

Вирази для результуючих вторинних струмів

$$I_{2I} = \sqrt{I_{yI}^2 + I_{нI}^2 + 2I_{yI} \cdot I_{нI} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)}; \quad (5.13)$$

$$I_{2II} = \sqrt{I_{yII}^2 + I_{нII}^2 - 2I_{yII} \cdot I_{нII} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)};$$

Мірою навантаження трансформаторів можуть бути відношення

$$\frac{I_{2I}}{I_{нI}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{yI}}{I_{нI}}\right)^2 + 2\frac{I_{yI}}{I_{нI}} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)};$$

$$\frac{I_{2II}}{I_{нII}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{yII}}{I_{нII}}\right)^2 - 2\frac{I_{yII}}{I_{нII}} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)}; \quad (5.14)$$

Ступінь недовантаження і перевантаження ТР залежить від величин I_y та φ_k , а також від кута φ_2 , обумовленого параметрами зовнішньої мережі. Наприклад, при чисто індуктивному навантаженні $\varphi_2 = \varphi_k = \pi / 2$ і $k_I < k_{II}$

$$\frac{I_{2I}}{I_{нI}} = 1 + \frac{I_{yI}}{I_{нI}}, \quad \frac{I_{2II}}{I_{нII}} = 1 - \frac{I_{yII}}{I_{нII}}, \quad (5.15)$$

тобто перевантажений перший ТР, недовантажений – другий.

При активно-ємнісному навантаженні і $\varphi_2 = -\pi / 2 + \varphi_k$ перевантажені обидва трансформатори (рис. 5.17)

$$\frac{I_{2I}}{I_{нI}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{yI}}{I_{нI}} \right)^2}, \quad \frac{I_{2II}}{I_{нII}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{yII}}{I_{нII}} \right)^2}. \quad (5.16)$$

Оскільки трансформатор не можна перевантажувати, щоб уникнути перегріву, то необхідно знижувати зовнішнє навантаження так, щоб перевантажений ТР знаходився за нормальних умов, при цьому другий ТР ще більш розвантажується.

Загальна потужність, передана трансформаторами, менше від встановленої потужності, яка дорівнює сумі їхніх номінальних потужностей.

Тому при нерівності коефіцієнтів трансформації бажано, щоб ТР меншої потужності мав більший коефіцієнт трансформації, тому що сумарна передана потужність у цьому випадку буде більшою.

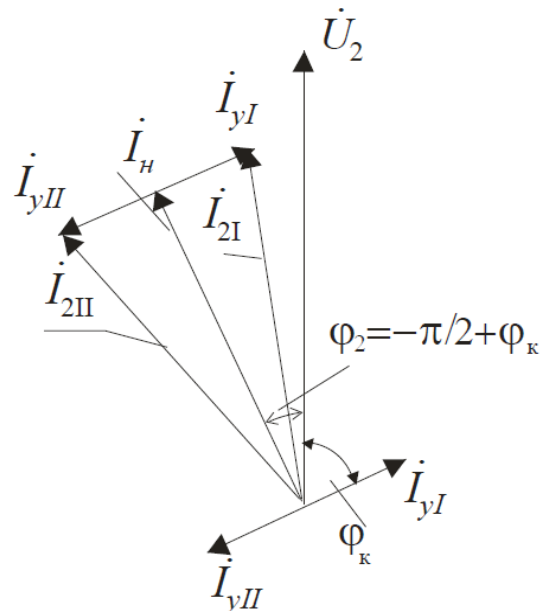


Рисунок 5.17 - Векторна діаграма вторинних струмів при R–С навантаженні

5.3.3 Паралельна робота трансформаторів із різними групами з'єднання

При паралельному вмиканні двох трифазних ТР, що мають однакові коефіцієнти трансформації, але належать до різних груп з'єднань, між за- тискачами $a_I - a_{II}, b_I - b_{II}, c_I - c_{II}$ завжди буде діяти напруга, обумов- лена зсувом за фазою між вторинними ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$. При рівності вторинних ЕРС величина ΔE визначається з рівнобедреного трикутника (рис. 5.18)

$$\Delta E = 2 \cdot E_2 \cdot \sin(\alpha / 2). \quad (5.17)$$

Під дією ΔE буде протікати зрівняльний струм, відносне значення якого визначається за виразом

$$\frac{I_y}{I_{1H}} = 100 \frac{\Delta E^*}{u_{\kappa I \%} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{S_{HI}}{S_{HII}}} = 100 \frac{2 \sin(\alpha / 2)}{u_{\kappa I \%} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{S_{HI}}{S_{HII}}}. \quad (5.18)$$

Припустимо, що паралельно ввімкнені трансформатори двох сусідніх груп, наприклад Y/Y-0 та Y/ Δ -11. При цьому вектори вторинних ЕРС зрушені на мінімальний кут 30° (рис. 5.18).

Відносне значення зрівняльного струму при рівності номінальних потужностей ТР і при $u_{\kappa I \%} = u_{\kappa II \%} = 5\%$ зросте до

$$\frac{I_y}{I_{1H}} = \frac{2 \sin 15^\circ \cdot 100}{u_{\kappa I \%} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{S_{HI}}{S_{HII}}} = \frac{0,52 \cdot 100}{5 + 5} = 5,2.$$

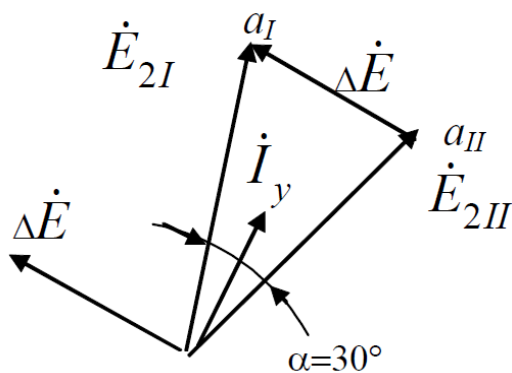


Рисунок 5.18 - Векторна діаграма ЕРС ТР при Y/Y-0 та Y/ Δ -11

Якщо ТР будуть належати до 0-ї і 6-ї груп,

то

$$\frac{I_y}{I_{1H}} = \frac{2 \sin 90^\circ \cdot 100}{u_{\kappa I \%} + u_{\kappa II \%} \cdot \frac{S_{HI}}{S_{HII}}} = \frac{2 \cdot 100}{5 + 5} = 4.$$

Зрівняльний струм у багато разів перевищує номінальний вже в режимі неробочого ходу. **Тому неприпустимо вмикання на паралельну роботу трансформаторів із різними групами з'єднання обмоток.**

5.3.4 Паралельна робота трансформаторів із різними напругами короткого замикання

Відповідно до спрощеної схеми заміщення кожний ТР можна представити повним опором короткого замикання Z_κ . Схема заміщення двох ТР, ввімкнених на паралельну роботу, показана на рис. 5.19.

При паралельному з'єднанні ТР падіння напруги при навантаженні у всіх трансформаторів будуть вимушено однаковими

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2I} \cdot Z_{\kappa I} &= \dot{I}_{2II} \cdot Z_{\kappa II}, \text{ або} \\ \frac{\dot{I}_{2I}}{\dot{I}_{2II}} &= \frac{Z_{\kappa II}}{Z_{\kappa I}} = \frac{Z_{\kappa II} \cdot e^{j\varphi_{\kappa II}}}{Z_{\kappa I} \cdot e^{j\varphi_{\kappa I}}}, \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\frac{\dot{I}_{2I}}{\dot{I}_{2II}} = \frac{Z_{\kappa II}}{Z_{\kappa I}} \cdot e^{j(\varphi_{\kappa II} - \varphi_{\kappa I})}. \quad (5.20)$$

Якщо потужності трансформаторів, що вмикаються паралельно, не дуже відрізняються, то $\varphi_{\kappa II} \approx \varphi_{\kappa I}$, тобто вторинні струми збігаються за фазою.

Вираз (5.20) можна записати для модулів струмів

$$\frac{I_{2I}}{I_{2II}} = \frac{Z_{\kappa II}}{Z_{\kappa I}}. \quad (5.21)$$

Якщо обидві частини виразу (5.21)

помножити на $\frac{I_{нII}}{I_{нI}} = \frac{U_n}{U_n}$, то дістаємо

вираз

$$\frac{\frac{I_{2I} \cdot U_n}{I_{нI} \cdot U_n}}{\frac{I_{2II} \cdot U_n}{I_{нII} \cdot U_n}} = \frac{\frac{Z_{\kappa II} \cdot I_{нII}}{U_n}}{\frac{Z_{\kappa I} \cdot I_{нI}}{U_n}},$$

звідки

$$\frac{S_I / S_{нI}}{S_{II} / S_{нII}} = \frac{u_{\kappa II}}{u_{\kappa I}} \quad (5.22)$$

Коефіцієнт навантаження ТР $\beta = S / S_n$, і вираз (5.22) приймає вигляд

$$\frac{\beta_I}{\beta_{II}} = \frac{u_{\kappa II}}{u_{\kappa I}}. \quad (5.23)$$

Таким чином, трансформатори, що ввімкнені паралельно, завантажуються обернено пропорційно величині напруги короткого замикання. Для того щоб навантаження розподілялося між ТР, що ввімкнені паралельно, пропорційно їхнім номінальним потужностям, необхідно, щоб у них були однакові u_κ .

Якщо $u_{\kappa I} \neq u_{\kappa II}$, то трансформатор із меншим u_κ перевантажений, а з більшим – недовантажений (рис. 6.9).

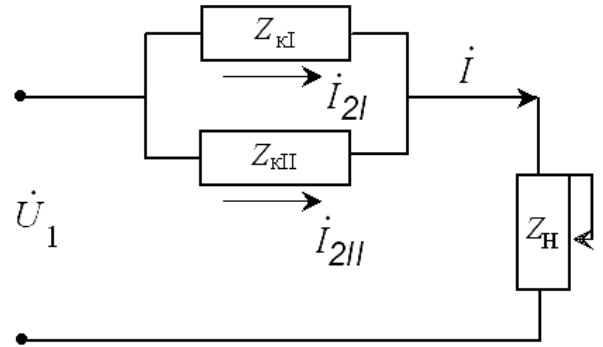


Рисунок 5.19 - Схема заміщення ТР при паралельній роботі

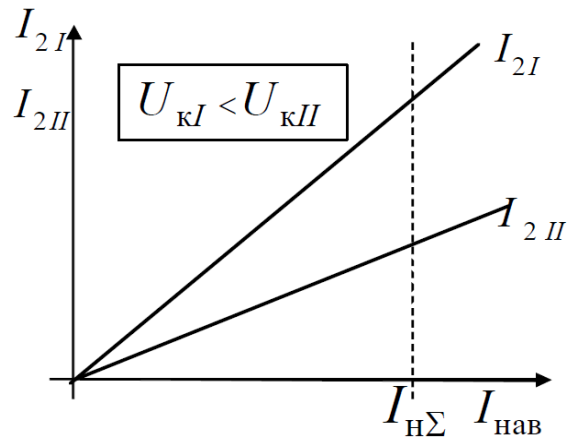


Рисунок 5.20 – Розподіл навантаження ТР

Це означає, що коли ТР, який має менше значення u_k , навантажиться до своєї номінальної потужності, інші будуть недовантажені. Подальшому збільшенню загального навантаження перешкоджає перевантаження першого ТР.

Таким чином, встановлена потужність не може бути цілком використана.

Розподіл навантаження між паралельно працюючими трансформаторами визначається з виразу

$$S_i = \frac{S_{ni} \cdot S_{\Sigma}}{\left(u_{ki\%} \cdot \sum_{v=1}^n \left(\frac{S_{nv}}{u_{kv\%}} \right) \right)}, \quad (5.24)$$

де S_i - навантаження ($\text{кВ} \cdot \text{А}$) розглянутого трансформатора з номінальною потужністю S_{ni} ($\text{кВ} \cdot \text{А}$), що має напругу короткого замикання $u_{ki\%}$;

n - кількість трансформаторів, що ввімкнені паралельно;

S_{Σ} - загальне навантаження паралельно ввімкнених ТР.

Загальне навантаження усіх ввімкнених на паралельну роботу ТР не повинно перевищувати сумарної номінальної потужності цих ТР

$$S_{\Sigma} \leq \sum_{v=1}^n S_{nv}.$$

Приклад. На паралельну роботу ввімкнені три трансформатори

$$S_{nI} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}; \quad S_{nII} = 1800 \text{ кВ} \cdot \text{А}; \quad S_{nIII} = 2200 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{kI\%} = 6,5\%; \quad U_{kII\%} = 6,65\%; \quad U_{kIII\%} = 6,3\%.$$

Сумарна встановлена потужність ТР

$$S_{\Sigma} = S_{nI} + S_{nII} + S_{nIII} = 5000 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Розрахункова складова

$$\sum_{v=1}^n \frac{S_{nv}}{U_{kv\%}} = \frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} = 775.$$

Навантаження кожного ТР:

$$S_I = \frac{5000 \cdot 1000}{(6,5 \cdot 775)} = 995 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{II} = \frac{5000 \cdot 1800}{(6,65 \cdot 775)} = 1755 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{III} = \frac{5000 \cdot 2200}{(6,3 \cdot 775)} = 2250 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Третій трансформатор буде перевантажений на

$$\frac{2250 - 2200}{2200} \cdot 100 = 2,3\%.$$

Для усунення перевантаження необхідно зменшити навантаження на 2,3%, тобто до $S_{\Sigma} = 0,977 \cdot 5000 = 4885 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Таким чином, встановлена потужність трансформаторів у $5000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ може бути використана на 97,7 %

Якщо паралельно працюють ТР різної потужності, то краще, щоб ТР меншої потужності мав більшу напругу короткого замикання, тому що недовантаження ТР меншої потужності відбивається на загальній потужності системи слабкіше, ніж недовантаження більшого трансформатора.

При нерівності активних $u_{ка}$ і реактивних $u_{кр}$ складових напруг короткого замикання струми паралельно працюючих ТР зсунуті за фазою на кут $\varphi = \varphi_{кI} - \varphi_{кII}$. Припустимо, що $u_{кI} = u_{кII}$, але $u_{каI} < u_{каII}$, а $u_{крI} > u_{крII}$ (рис. 5.21).

З'єднаємо гіпотенузи трикутників короткого замикання. Якщо зневажити струмом неробочого ходу, то сумарний струм навантаження дорівнює геометричній сумі вторинних струмів $\dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_{2I} + \dot{I}_{2II}$. При цьому сумарний струм I_{Σ} , що віддається навантаженню, менше від арифметичної суми номінальних вторинних струмів паралельно ввімкнених трансформаторів (рис. 5.21).

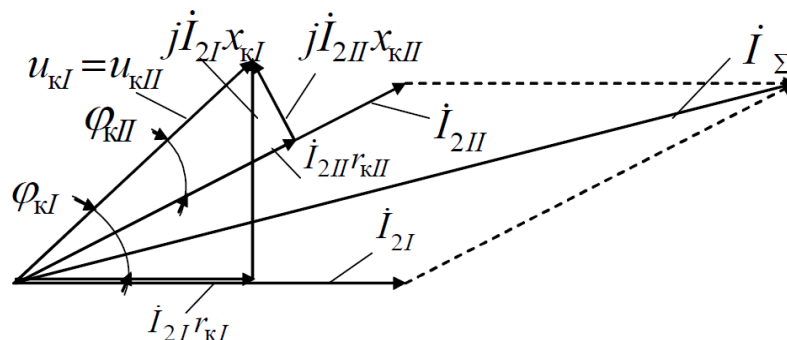


Рисунок 5.21 - Паралельна робота трансформаторів при $\varphi_{кI} \neq \varphi_{кII}$

Отже, і в цьому випадку номінальна потужність ТР використовується не цілком. У ТР різних потужностей складові $u_{ка}$ і $u_{кр}$ різні.

Рекомендують, щоб при паралельній роботі співвідношення найбільшої потужності ТР до найменшої не перевищувало 1:3.

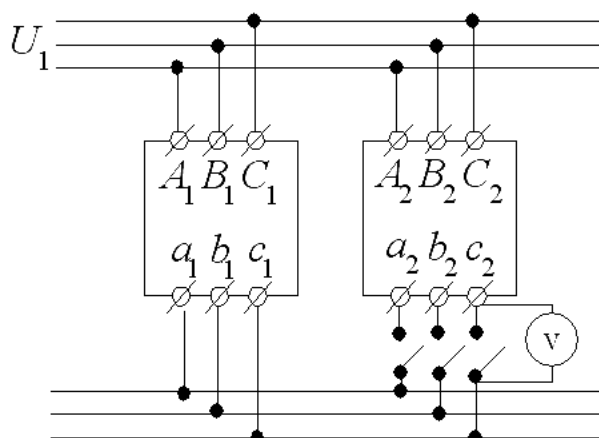


Рисунок 5.22 – Схема проведення фазування

Держстандарт допускає вмикання ТР на паралельну роботу при різниці напруги короткого замикання кожного ТР не більше ніж на 10 % від їхнього середньоарифметичного значення.

Крім виконання зазначених трьох умов паралельної роботи, необхідно перед вмиканням ТР перевірити порядок чергування фаз у всіх ТР, тобто виконати фазування (рис. 5.22).

При правильному підмиканні показання вольметра між протилежно розташованими затискачами по всіх трьох фазах вторинної обмотки дорівнює нулю.

5.4 Несиметричне навантаження трансформаторів

5.4.1 Загальні положення

При експлуатації окремі фази ТР можуть бути навантажені несиметрично через нерівномірний розподіл за фазами освітлювального або іншого однофазного навантаження. Іноді мають місце і несиметричні режими, викликані аваріями в електричних мережах.

При несиметричних навантаженнях ЕРС та напруги вторинних обмоток можуть істотно відрізнятись від їхніх значень при симетричному навантаженні. Це негативно впливає на споживачів електричної енергії: зменшується потужність електродвигунів, підвищується напруга на лампах розжарювання, що знижує термін їхньої служби.

Основним методом аналізу несиметричних режимів трансформаторів є метод симетричних складових.

Будь-яку несиметричну систему векторів (струмів, напруги) у загальному випадку можна розкласти на три симетричні системи: прямої, зворотної та нульової послідовностей фаз.

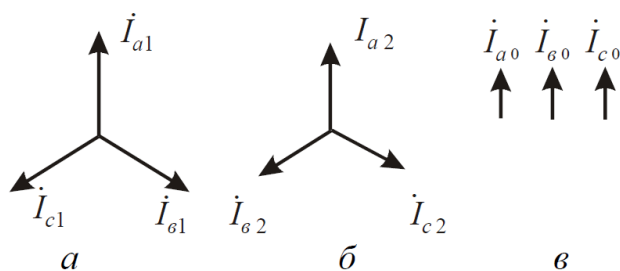


Рисунок 5.23

При прийнятому напрямку обертання векторів проти годинникової стрілки пряма система векторів утворює симетричну зірку струмів $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$, що йдуть один за одним у порядку проходження відповідних букв алфавіту (рис. 5.23,а).

Отже,

$$\dot{I}_{b1} = \dot{I}_{a1} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = \dot{I}_{c1} e^{j\frac{2\pi}{3}} = a^2 \dot{I}_{a1} = a \dot{I}_{c1}, \quad (5.25)$$

де a і a^2 – оператори повороту

$$\begin{aligned} a &= -0,5 + j\sqrt{3}/2 = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{-j\frac{4\pi}{3}}; \\ a^2 &= -0,5 - j\sqrt{3}/2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}}. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Система векторів зворотної послідовності $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{c2}, \dot{I}_{b2}$, (рис. 5.23,б) має зворотне чергування фаз та характеризується відношеннями

$$\dot{I}_{\epsilon 2} = \dot{I}_{a2} e^{j\frac{2\pi}{3}} = \dot{I}_{c2} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = a \dot{I}_{a2} = a^2 \dot{I}_{c2}. \quad (5.27)$$

Нульова система являє собою три вектори, рівні за величиною та збіжні за фазою (рис. 5.23,в)

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{\epsilon 0} = \dot{I}_{c0}. \quad (5.28)$$

Результуючий струм фаз:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_\epsilon = \dot{I}_{\epsilon 1} + \dot{I}_{\epsilon 2} + \dot{I}_{\epsilon 0} = a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}. \end{cases} \quad (5.29)$$

Розв'язавши систему відносно струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, отримаємо

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a \dot{I}_\epsilon + a^2 \dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_\epsilon + a \dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_\epsilon + \dot{I}_c). \end{cases} \quad (5.30)$$

Користуючись цією системою рівнянь, будь-яку несиметричну систему можна розкласти на симетричні складові.

На рис. 5.24 як приклад показане розкладання несиметричної системи струмів (рис. 5.24,а) на симетричні складові \dot{I}_{a1} (рис. 5.24,б), \dot{I}_{a2} (рис. 5.24,в), \dot{I}_{a0} (рис. 5.24,г).

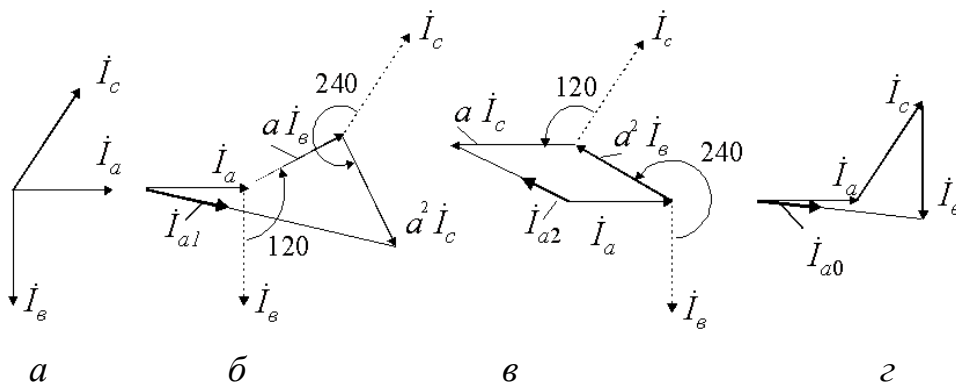


Рисунок 5.24 - Розкладання несиметричної системи струмів

При дослідженні несиметричних режимів роботи приймаються такі допущення:

- мережа, від якої живиться ТР, вважається нескінченно великою, тобто напруга цієї мережі не змінюється в залежності від режиму роботи;
- нехтують струмом неробочого ходу ($I_0 = 0$);
- число витків вторинної обмотки $w_2 = w_1$, тобто коефіцієнт трансформації $k_m = 1$, що позбуває від необхідності користуватися штрихами при написанні вторинних величин.

5.4.2 Трансформація струмів в обмотках трансформатора

Розглянемо трансформатор, з'єднаний за схемою Y/Y.

Для первинної та вторинної зірок струмів за першим законом Кірхгофа можна записати (за відсутності нульового проводу)

$$\begin{cases} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; \\ \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \end{cases} \quad (5.31)$$

Оскільки ми нехтуємо струмом неробочого ходу, то повний струм крізь будь-який замкнутий контур (рис. 5.25) дорівнює нулю, тобто

$$\begin{aligned} \text{для I контура } \dot{I}_A + \dot{I}_a - \dot{I}_b - \dot{I}_B &= 0; \\ \text{для II контура } \dot{I}_B + \dot{I}_b - \dot{I}_c - \dot{I}_C &= 0; \\ \text{для III контура } \dot{I}_A + \dot{I}_a - \dot{I}_c - \dot{I}_C &= 0. \end{aligned} \quad (5.32)$$

Розв'язуючи спільно системи (5.31) та (5.32), дістаємо

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_a; \dot{I}_B = -\dot{I}_b; \dot{I}_C = -\dot{I}_c. \quad (5.33)$$

Струми кожної із фаз вторинної сторони цілком трансформуються на первинну. На кожному осерді первинні та вторинні струми у магнітному відношенні врівноважують один одного і сума потоків стержнів

$$\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 = 0.$$

Оскільки порядок чергування фаз у ТР не має значення, то співвідношення між вторинними та первинними струмами зворотної послідовності будуть такими ж, як і для струмів прямої послідовності

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= -\dot{I}_{a1}; \dot{I}_{B1} = -\dot{I}_{\epsilon1}; \dot{I}_{C1} = -\dot{I}_{c1}; \\ \dot{I}_{A2} &= -\dot{I}_{a2}; \dot{I}_{B2} = -\dot{I}_{\epsilon2}; \dot{I}_{C2} = -\dot{I}_{c2}. \end{aligned} \quad (5.34)$$

Симетричні складові прямої та зворотної послідовностей трансформуються з первинної обмотки у вторинну завжди.

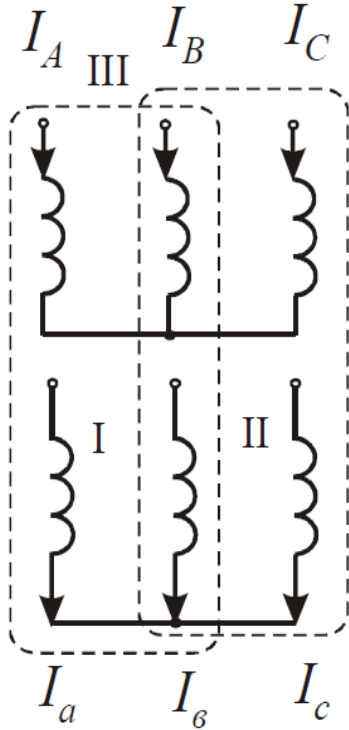


Рисунок 5.25 - Вигляд замкнутого контуру

Трансформація струмів нульової послідовності залежить від схеми сполучення. Якщо у первинній та вторинній обмотках є контури для замикання струмів нульової, то вони будуть трансформуватися

$$\dot{I}_{A0} = -\dot{I}_{a0}; \dot{I}_{B0} = -\dot{I}_{\epsilon0}; \dot{I}_{C0} = -\dot{I}_{c0}. \quad (5.35)$$

Таким чином, при з'єднанні первинної та вторинної обмоток, наприклад за схемами Y_0 / Y_0 і Δ / Y_0 , фазні струми первинної обмотки виявляються рівними відповідним приведеним вторинним фазним струмам

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = -(\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}) = \dot{I}_a; \\ \dot{I}_B &= -\dot{I}_\epsilon; \dot{I}_C = -\dot{I}_c. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Якщо ж в одній обмотці цей контур є, а в другій його немає, то трансформації струмів нульової послідовності не буде. Наприклад, при схемі сполучення Y / Y_0 струм нульової послідовності протікає тільки у вторинних обмотках і не трансформується у первинну. По фазах первинної обмотки протікають струми прямої та зворотної послідовностей:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = -(\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}) = -(\dot{I}_a - \dot{I}_{a0}); \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = -(\dot{I}_{\epsilon1} + \dot{I}_{\epsilon2}) = -(\dot{I}_\epsilon - \dot{I}_{\epsilon0}); \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = -(\dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2}) = -(\dot{I}_c - \dot{I}_{c0}), \end{aligned} \quad (5.37)$$

тобто від повного вторинного струму віднімається струм нульової послідовності.

Такі режими роботи є самими несприятливими, тому що струми нульової послідовності створюють магнітне поле нульової послідовності, що наводить у

фазах первинної і вторинної обмоток значні ЕРС нульової послідовності, що призводять до порушення рівності фазних напруг.

За відсутності струмів нульової послідовності у первинних і вторинних обмотках ТР кожну фазу при несиметричному навантаженні можна розглядати як однофазний трансформатор. У цьому випадку приведені фазні напруги вторинної обмотки відрізняються від первинних на невелике падіння напруги на опорі Z_{κ} .

$$\begin{aligned}\dot{U}_A - \dot{I}_A \cdot Z_{\kappa} &= -\dot{U}_a; \\ \dot{U}_B - \dot{I}_B \cdot Z_{\kappa} &= -\dot{U}_b; \\ \dot{U}_C - \dot{I}_C \cdot Z_{\kappa} &= -\dot{U}_c.\end{aligned}\tag{5.38}$$

5.5 Перехідні процеси у трансформаторах

5.5.1 Вмикання однофазного трансформатора на неробочому ходу

Відомо, що при сталому режимі роботи струм неробочого ходу ТР складає $(2 \div 10)\% I_{1н}$. Але при вмиканні ТР на номінальну напругу в режимі неробочого ходу можуть виникати значні поштовхи струму.

При сталому режимі неробочого ходу даному значенню первинної напруги $U_1 = ab$ відповідає значення сталого магнітного потоку $\Phi_{стал} = ac$ (рис. 5.27). Якщо зневажити потоком залишкового намагнічування ($\Phi_{зал} = 0$), то у момент вмикання трансформатора (φ_0) струм i_0 та створюваний їм магнітний потік Φ повинні дорівнювати нулю. Тому в трансформаторі при вмиканні його у мережу виникає такий магнітний потік $\Phi_{св}$, щоб $\Phi_{стал} + \Phi_{св} = 0$.

Якби активний опір первинної обмотки дорівнював нулю ($r_1 = 0$), то електромагнітна енергія, що відповідає потоку $\Phi_{св}$, не могла би розсіятися і $\Phi_{св}$ залишався би постійним за величиною і напрямком. Вільний потік $\Phi_{св}$ накладається на потік $\Phi_{стал}$, що періодично змінюється:

$$\Phi_t = \Phi_{св} + \Phi_{стал}.$$

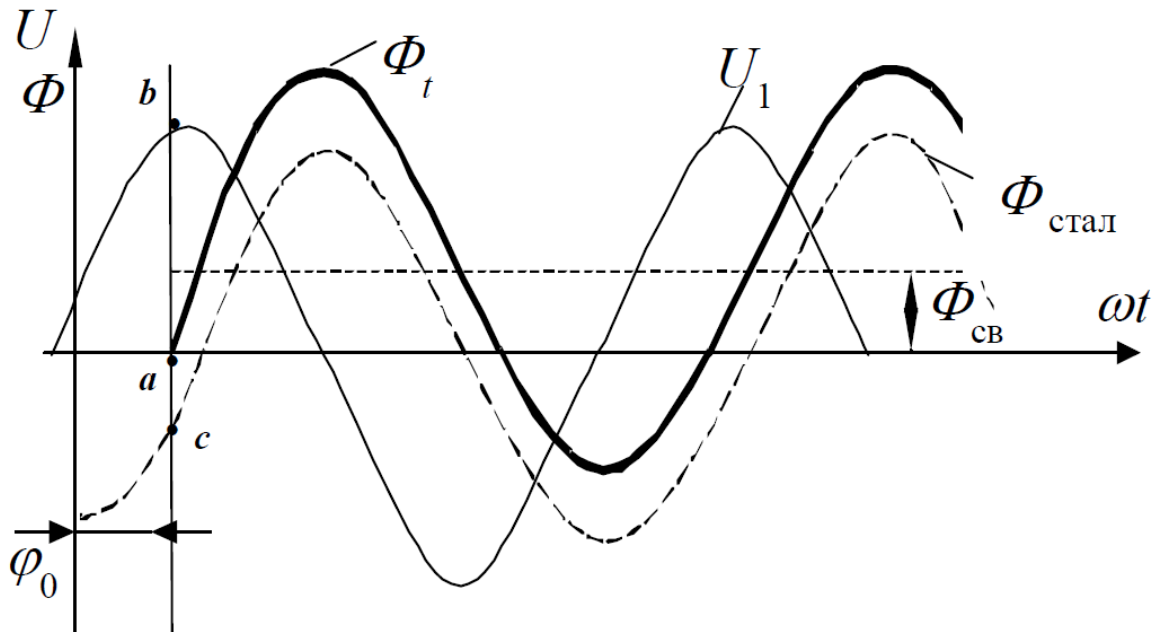


Рисунок 5.27 - Вмикання трансформатора на неробочому ході

У ті моменти часу, коли обидва потоки направлені по контуру осердя однаково, тобто додаються, сталь осердя ТР насичується набагато сильніше, ніж у режимі неробочого ходу.

У дійсності $r_1 \neq 0$ і потік $\Phi_{св}$ згасає.

Якщо напруга змінюється за синусоїдним законом, то в момент вмикання (φ_0) для первинного кола можна записати рівняння рівноваги

$$U_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = i_0 \cdot r_1 + w_1 \cdot \frac{d\Phi_t}{dt}, \quad (5.39)$$

де φ_0 - фаза вмикання, тобто кут, що визначає величину напруги у момент вмикання ТР (рис. 5.27).

Оскільки залежність $\Phi_t = f(i_0)$ є нелінійною, то розв'язання цього рівняння можливо за припущення, що Φ_t залежить лінійно від i_0 , тобто $\Phi_t \cdot w_1 = L_1 \cdot i_0$, звідки $i_0 = \frac{\Phi_t}{L_1} w_1$, де L_1 – постійна індуктивність, що від- повідає повному потоку, зчепленому з первинною обмоткою.

Рівняння (5.39) можна представити так:

$$U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = \Phi_t \cdot \frac{r_1}{L_1} \cdot w_1 + w_1 \frac{d\Phi_t}{dt}, \quad (5.40)$$

або

$$\frac{U_{1m}}{w_1} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = \Phi_t \cdot \frac{r_1}{L_1} + \frac{d\Phi_t}{dt}. \quad (5.41)$$

Розв'язання рівняння (5.41) будемо шукати у вигляді $\Phi_t = \Phi_{стал} + \Phi_{св}$.
Потік $\Phi_{стал}$ відстає від напруги на кут $\pi / 2$, тобто

$$\Phi_{стал} = \Phi_m \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (5.42)$$

де Φ_m - амплітуда магнітного потоку при сталому режимі роботи.

Потік $\Phi_{св}$ визначають із розв'язання рівняння (5.41) при $U_1 = 0$ і $\Phi_{стал} = 0$:

$$0 = \Phi_{св} \frac{r_1}{L_1} + \frac{d\Phi_{св}}{dt}, \text{ тоді } \Phi_{св} = C \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t},$$

де C - постійна інтегрування, визначувана з початкових умов.

У момент вмикання ТР у мережу при $t = 0$ існує тільки потік залишкового намагнічування.

$$\text{Тому } \Phi_{t(t=0)} = \left| \Phi_{зал} + \Phi_{стал} \right|_{(t=0)} = -\Phi_m \cdot \cos \varphi_0 + C = \pm \Phi_{зал}.$$

Звідки $C = \Phi_m \cdot \cos \varphi_0 \pm \Phi_{зал}$, отже

$$\Phi_{св} = \Phi_m \cdot \cos \varphi_0 \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \Phi_{зал} \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (5.43)$$

Сумарний магнітний потік

$$\Phi_t = \Phi_{стал} + \Phi_{св} = -\Phi_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + (\Phi_m \cdot \cos \varphi_0 \pm \Phi_{зал}) \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (5.44)$$

Найбільш сприятливий випадок вмикання, коли $\varphi_0 = \pm \pi / 2$ та $\Phi_{зал} = 0$ (рис. 5.28).

При цьому з формули (5.43) $\Phi_{св} = 0$ і магнітний потік

$$\Phi_t = -\Phi_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \cdot \sin \omega t. \quad (5.45)$$

У момент вмикання трансформатора (при $t = 0$) напруга проходить через максимум, а магнітний потік $\Phi_t = 0$, тобто в трансформаторі відразу

встановлюється синусоїдальний потік, що відповідає сталому режиму роботи, і перехідний режим відсутній.

Найменш сприятливі умови вмикання, коли $\varphi_0 = 0, U_1 = 0$ та залишковий потік дорівнює $+\Phi_{зал}$ (рис. 5.29).

У цьому випадку магнітний потік

$$\Phi_t = \Phi_{стал} + \Phi_{св} = -\Phi_m \cdot \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_{зал}) \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (5.46)$$

Звичайно $\Phi_{зал} = (0,2 \div 0,3) \cdot \Phi_{стал}$.

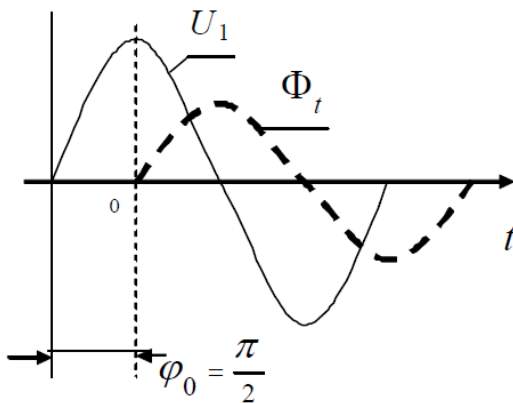


Рисунок 5.28 -
Сприятливий момент

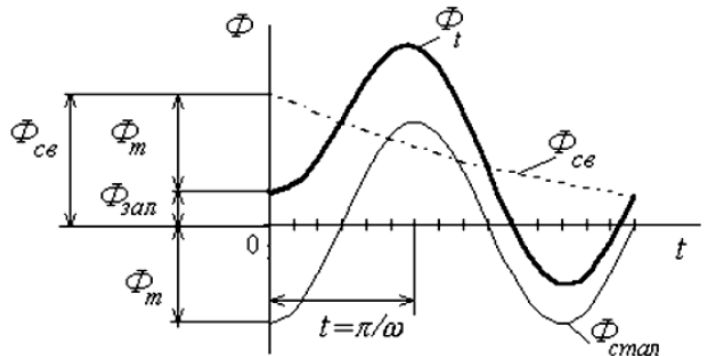


Рисунок 5.29 -
Несприятливий момент

Потік Φ_t досягає максимального значення через півперіоду після вмикання ($\omega t = \pi$), тобто при $t = \pi / \omega$.

При цьому $e^{-\frac{r_1}{L_1} t} = e^{-\frac{r_1}{L_1} \cdot \frac{\pi}{\omega}} \approx 1$, тому що $r_1 \ll \omega L_1$. Тому магнітний потік досягає значення

$$\Phi_{tm} = 2\Phi_m + \Phi_{зал} \approx (2,2 \div 2,3)\Phi_m.$$

Таким чином, Φ_{tm} більш ніж у два рази перевищує нормальну величину робочого потоку і осердя ТР сильно насичується. Струм, необхідний для створення такого потоку, визначається за кривою намагнічування (точка В на рис. 5.30).

При цьому струм вмикання може до $100 \div 120$ разів перевищувати амплітуду сталого струму неробочого ходу.

При $B = 1,4 \text{ Тл}$ це співвідношення дорівнює $50 \div 80$.

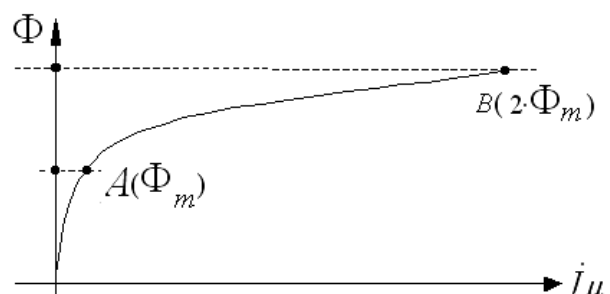


Рисунок 5.30 – Крива намагнічування

Якщо прийняти, що відношення $I_{0стал} / I_n \approx 5\%$, а

$$\frac{I_{0вкл}}{I_{0стал}} = 100,$$

то струм вмикання ТР при неробочому ході може складати

$$\frac{I_{0вкл}}{I_{1н}} \approx 100 \frac{I_{0стал}}{I_{1н}} \approx 100 \cdot 0,05 = 5.$$

Струм вмикання не завдає небезпеки для ТР, але може привести до вимикання його від мережі. Тому захисна апаратура повинна бути розрахована так, щоб можна було уникнути неправильних вимикань ТР. Ми розглянули однофазний ТР. При вмиканні трифазних ТР слід очікувати більш-менш значних поштовхів струму, тому що завжди буде фаза, напруга якої в момент вмикання близька до нуля.

5.5.2 Раптове коротке замикання на виводах вторинної обмотки

Раптове коротке замикання виникає у результаті різноманітних несправностей і є аварійним режимом. Струми, що виникають у цьому режимі, у десятки раз перевищують номінальні і є небезпечними для трансформатора.

При сталому КЗ струм, що намагнічує, дуже малий у порівнянні з повним струмом обмотки і ним звичайно зневажають. Тому і при раптовому короткому замиканні струмом I_μ можна зневажити. У цьому випадку $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$ і перехідний процес можна розрахувати за спрощеною схемою заміщення трансформатора, у котрій $r_k = r_1 + r_2'$, а $x_k = x_1 + x_2'$.

Перехідні процеси в такій системі описуються диференціальним рівнянням із постійними коефіцієнтами $r_k = const$, $x_k = const$

$$U_1 = U_1 \cdot \sin(\omega t + \psi_k) = r_k \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt}, \quad (5.47)$$

де ψ_k – фаза вмикання ТР при КЗ.

Розв'язання рівняння (5.47) відносно струму i_k може бути записане у вигляді

$$i_k = i_{kcv} + i_{kстал}. \quad (5.48)$$

Сталий струм короткого замикання при синусоїдальній напрузі дорівнює

$$i_{\kappa \text{ стал}} = I_{\kappa m} \cdot \sin(\omega t + \psi_{\kappa} - \varphi_{\kappa}), \quad (5.49)$$

де φ_{κ} – кут короткого замикання

$$\varphi_{\kappa} = \arctg \frac{x_{\kappa}}{r_{\kappa}};$$

$$I_{\kappa m} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_{\kappa}^2 + x_{\kappa}^2}} - \text{амплітудне значення сталого струму КЗ.}$$

Рівняння для вільного (аперіодичного) струму

$$r_{\kappa} \cdot i_{\kappa \text{ св}} + L_{\kappa} \frac{di_{\kappa \text{ св}}}{dt} = 0. \quad (5.50)$$

Звідки

$$i_{\kappa \text{ св}} = i_{\kappa \text{ св}(t=0)} \cdot e^{-\frac{r_{\kappa}}{L_{\kappa}} t},$$

де $i_{\kappa \text{ св}(t=0)}$ – значення вільного струму при ($t = 0$)

У загальному випадку ТР перед КЗ працює під навантаженням

$$i_{\kappa(t=0)} = \left| i_{\kappa \text{ стал}} + i_{\kappa \text{ св}} \right|_{(t=0)} = i_{\text{нав}(t=0)},$$

де $i_{\text{нав}(t=0)} = I_{\text{нав}} \cdot \sin(\psi_{\kappa} - \varphi_{\text{нав}})$ – миттєве значення струму навантаження в момент короткого замикання.

З останнього рівняння

$$i_{\kappa \text{ св}(t=0)} = I_{\text{нав}m} \cdot \sin(\psi_{\kappa} - \varphi_{\text{нав}}) - I_{\kappa m} \cdot \sin(\psi_{\kappa} - \varphi_{\kappa}). \quad (5.51)$$

Повний струм короткого замикання

$$i_{\kappa} = I_{\kappa m} \cdot \sin(\omega t + \psi_{\kappa} - \varphi_{\kappa}) - \left[I_{\kappa m} \cdot \sin(\psi_{\kappa} - \varphi_{\kappa}) - I_{\text{нав}m} \cdot \sin(\psi_{\kappa} - \varphi_{\text{нав}}) \right] \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (5.52)$$

Якщо КЗ відбувається в режимі неробочого ходу ТР, тобто при $i_{\text{нав}} = 0$, то

$$i_k = i_{k\text{стал}} + i_{k\text{св}} = I_{km} \cdot \sin(\omega t + \psi_k - \varphi_k) - I_{km} \cdot \sin(\psi_k - \varphi_k) \cdot e^{-\frac{r_k}{L_k} t}. \quad (5.53)$$

Струм КЗ має індуктивний характер $0 < \varphi_k < 90^\circ$. Звичайно навантаження ТР також має індуктивний характер $0 < \varphi_{\text{нав}} < 90^\circ$. За цих умов, як очевидно з виразу (5.52), навантаження викликає зменшення вільного аперіодичного струму і тим самим пікових значень струму КЗ.

Тому найбільш несприятливим є випадок КЗ на неробочому ході. Залежно від величини кута $(\psi_k - \varphi_k)$ крива $i_k = f(t)$ має різноманітний характер.

Вираз (5.53) показує, що при $\psi_k = \varphi_k$ вільна складова струму $i_{k\text{св}}$ взагалі не виникає, тому що $\sin(\psi_k - \varphi_k) = 0$ і струм КЗ відразу приймає сталі значення

$$i_k = i_{k\text{стал}} = I_{km} \cdot \sin \omega t. \quad (5.54)$$

У випадку, коли $\psi_k - \varphi_k = \frac{\pi}{2}$ вільна складова струму та пік результуючого струму мають щонайбільше значення,

$$i_k = i_{k\text{стал}} + i_{k\text{св}} = -I_{km} \cdot \cos \omega t + I_{km} \cdot e^{-\frac{r_k}{L_k} t}. \quad (5.55)$$

При цьому при $t = 0$

$$i_k = i_{k\text{стал}} + i_{k\text{св}} = -I_{km} + I_{km} = 0. \quad (5.56)$$

Максимальне, або ударне, значення струм i_k досягає через проміжок часу $t = \frac{\pi}{\omega}$ після початку КЗ (рис. 5.31).

$$i_{k\text{уд}} = -I_{km} \cdot \left(1 + e^{-\pi \frac{r_k}{x_k}}\right) = -I_{km} \cdot k_{\text{уд}}. \quad (5.57)$$

Ударний коефіцієнт показує, у скільки разів ударний струм КЗ більше від амплітуди сталого струму

$$k_{\text{уд}} = 1 + e^{-\pi \frac{r_k}{x_k}}. \quad (5.58)$$

Залежно від величини r_k / x_k цей коефіцієнт може змінюватися в межах: для потужних ТР $k_{\text{уд}} = 1,7 \div 1,8$, для малих $k_{\text{уд}} = 1,2 \div 1,3$.

Амплітуду сталого струму КЗ можна виразити через напругу КЗ

$$I_{km} = \frac{\sqrt{2}U_H}{Z_K} = \frac{\sqrt{2}U_H \cdot I_{1H}}{u_K} = \frac{100 \cdot \sqrt{2}}{u_{K\%}} \cdot I_{1H}. \quad (5.59)$$

Ударне значення струму КЗ

$$i_{kyd} = k_{yd} \cdot \frac{100 \cdot \sqrt{2}}{u_{K\%}} \cdot I_{1H}. \quad (5.60)$$

Якщо прийняти $u_K = 5\%$, то максимальне значення струму $i_{kyd} = (33...55)I_{1H}$.

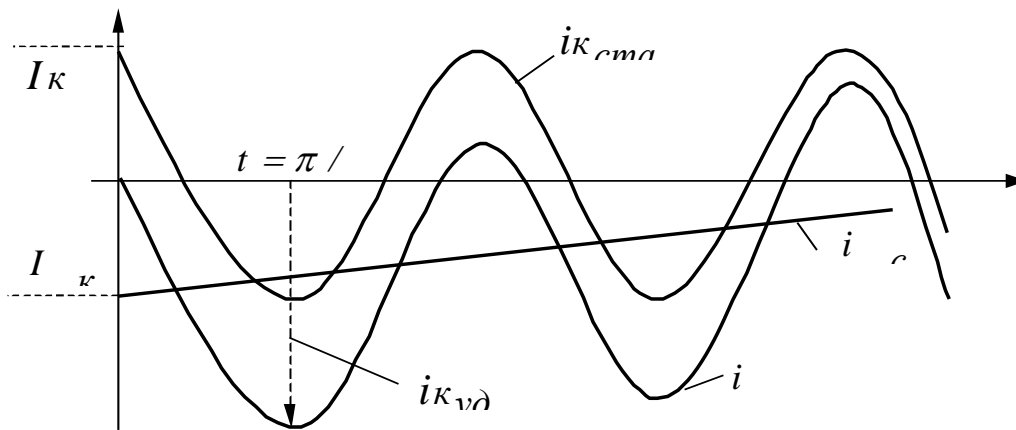


Рисунок 5.31 – Зміна струмів при несприятливому

Тривалість перехідного процесу відповідає часу загасання вільної складової струму (i_{kcb}). Через час $t = L_K / r_K$ вільна складова зменшиться у e разів. За час $t = 3 \cdot \frac{L_K}{r_K}$ вона зменшується більш ніж у 20 разів, тобто практично загасає. Час, протягом якого постійна складова зменшується в e разів, називають постійною часу загасання $\tau = \frac{x_K}{\omega \cdot r_K} = 0,01 \div 0,2$ с.

Великі струми, що виникають при короткому замиканні, становлять небезпеку для обмоток ТР, тому що збільшують нагрів обмоток і створюють значні електромагнітні сили, що діють на них.

5.5.3 Перенапруга в трансформаторах

За нормальних умов експлуатації ТР між окремими частинами його обмоток, а також між обмотками та заземленою магнітною системою діють синусоїдальні напруги нормальної частоти й амплітуди.

Проте в процесі експлуатації ТР піддається впливу перенапруг, що перевищують номінальну за амплітудою та мають інші частоту і форму кривої. Розрізняють внутрішні і зовнішні перенапруги.

Внутрішні перенапруги виникають або в процесі операцій вмикання та вимикання ТР, або в результаті аварійних процесів (КЗ, дугові замикання на землю). Значення внутрішніх перенапруг складає $(2,5 \div 3,5)U_n$.

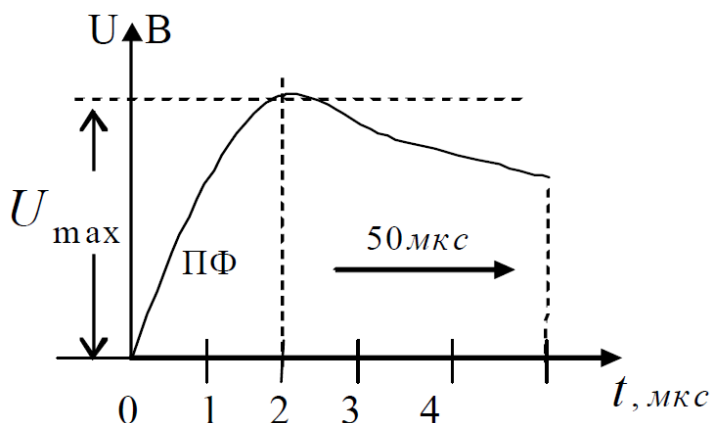


Рисунок 5.32– Форма хвилі напруг

Зовнішні (атмосферні) перенапруги обумовлені атмосферними розрядами або прямим улученням блискавки в проводи або опори лінії електропередачі. Значення перенапруг у цьому випадку може досягати кількох тисяч кіловольт. При атмосферних перенапругах до ТР накинеться імпульс із крутим переднім фронтом (ПФ) (рис. 5.32). При цьому напруга між вводом ТР

та землею досягає максимуму через $1 \div 2 \text{ мкс}$. Ці імпульси у вигляді хвиль поширюються уздовж лінії електропередачі зі швидкістю, близькою до швидкості світла.

Для захисту ТР від перенапруг застосовують зовнішні і внутрішні заходи. До заходів зовнішнього захисту належить застосування розрядників, що знижують максимальне значення хвилі перенапруги до значення, що перевищує номінальну напругу не більше ніж у 4–5 разів. Внутрішніми заходами захисту є посилення ізоляції вхідних і кінцевих котушок обмотки ВН і застосування ємнісного захисту. Ємнісний захист застосовується з метою наближення початкового розподілу напруги до кінцевого. У цьому випадку зменшується також амплітуда коливань в електромагнітному перехідному процесі.

5.6 Спеціальні трансформатори

5.6.1 Триобмоткові трансформатори

Найбільш поширені триобмоткові ТР, у яких одна первинна і дві вторинні обмотки. Такі ТР використовуються на електростанціях і підстанціях для живлення розподільних мереж і дозволяють досягти економії в капітальних затратах за рахунок встановлення меншої кількості трансформаторів.

Принцип роботи триобмоткового ТР не відрізняється від роботи двообмоткового. Аналогічно двообмотковому ТР можна зобразити схему заміщення (рис. 5.33) і записати основні рівняння.

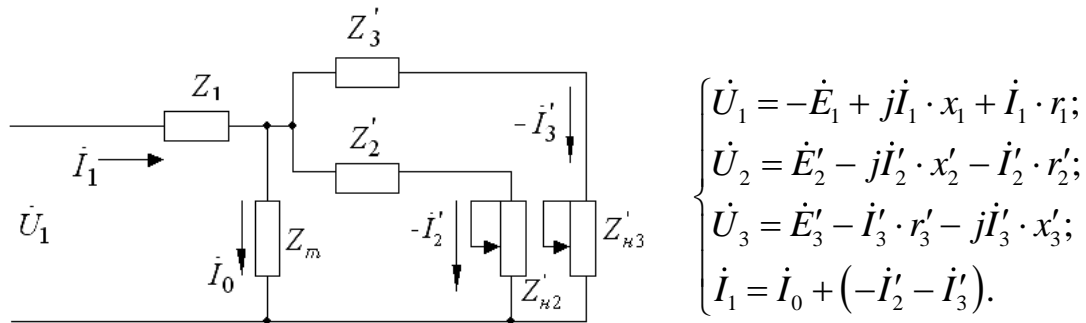


Рисунок 5.33 - Схема заміщення триобмоткового ТР

Векторну діаграму триобмоткового ТР будують, повертаючи нижню частину на 180°. Для триобмоткового ТР справедлива рівність

$$-\dot{E}_1 = -\dot{E}_2' = -\dot{E}_3'. \quad (5.62)$$

Визначивши із рівностей (5.61) ЕРС і підставивши в рівність (5.62), отримаємо

$$\dot{U}_1 = j\dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_1 \cdot r_1 = -\dot{U}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2' = -\dot{U}_3' - \dot{I}_3' r_3' - j\dot{I}_3' x_3'. \quad (5.63)$$

За цим рівнянням та рівнянням струмів на рис. 5.34 побудована векторна діаграма триобмоткового ТР. Із схеми заміщення та векторної діаграми очевидно, що при зміні навантаження в однієї з вторинних обмоток змінюється напруга на обох вторинних обмотках, тобто є взаємний вплив вторинних обмоток. Це пояснюється тим, що змінюється падіння напруги в первинній обмотці $\dot{I}_1 \cdot z_1$, по якій проходить сумарний струм \dot{I}_1 .

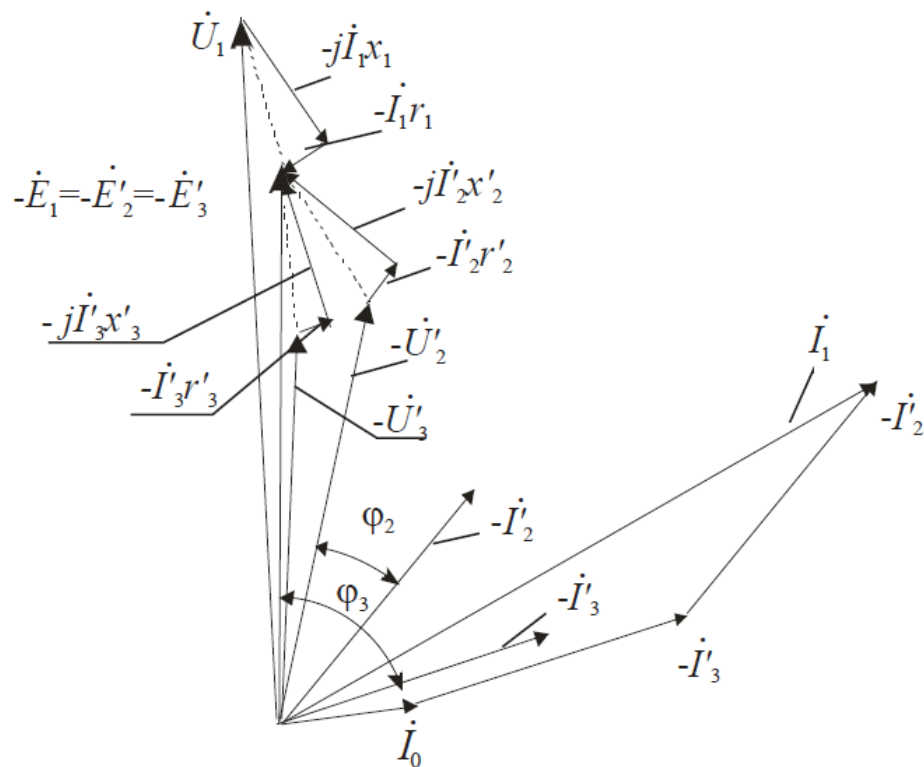


Рисунок 5.34 - Векторна діаграма триобмоткового трансформатора

5.6.2 Автотрансформатори

Автотрансформатори (АТ) – це трансформатори, у яких первинна та вторинна обмотки, крім магнітного зв'язку, мають ще й електричний зв'язок. Часто вважають, що в автотрансформаторах є тільки одна обмотка.

Розрізняють загальну (1) і послідовну (2) частини обмотки (рис. 5.35). Регулювальний автотрансформатор (ЛАТР, рис. 5.36) широко використовується в науково-дослідних лабораторіях. АТ можуть бути знижувальними, підвищувальними, однофазними і трифазними.

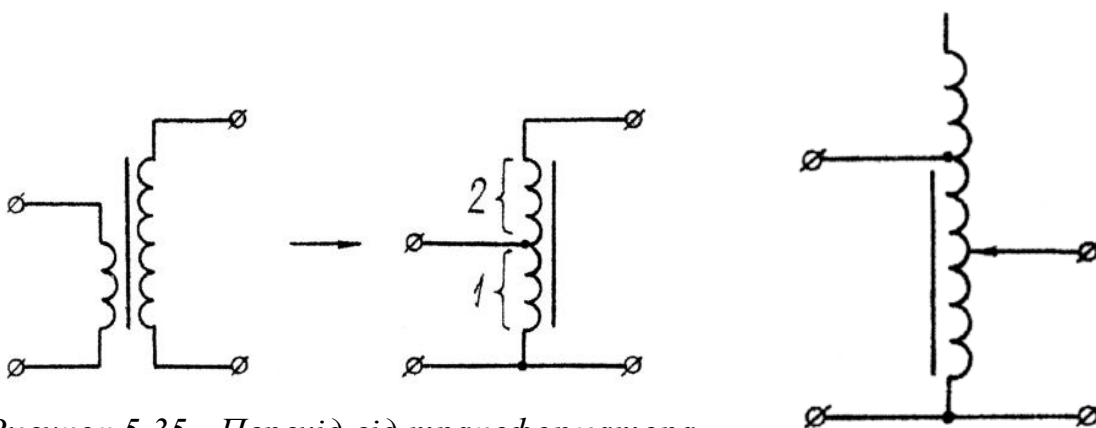


Рисунок 5.35 - Перехід від трансформатора до автотрансформатора: 1 – загальна частина обмотки; 2 – послідовна частина

Рисунок 5.36 - Регулювальний автотрансформатор (ЛАТР)

Розглянемо роботу однофазного знижувального ($U_1 > U_2$) АТ (рис. 5.37). Первинна напруга підводиться до затискачів A та X . Вторинною обмоткою служить частина первинної обмотки між затискачами a та x , причому затискачі X та x з'єднані. При цьому обмотка низької напруги є частиною обмотки високої напруги.

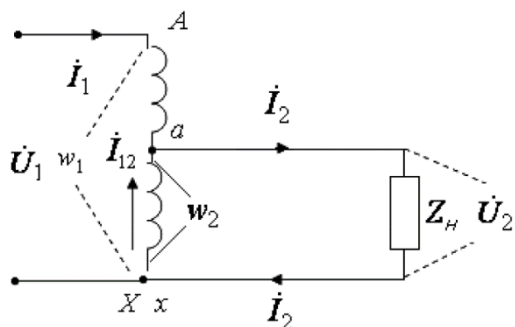


Рисунок 5.37 -Знижувальний (б) трансформатори

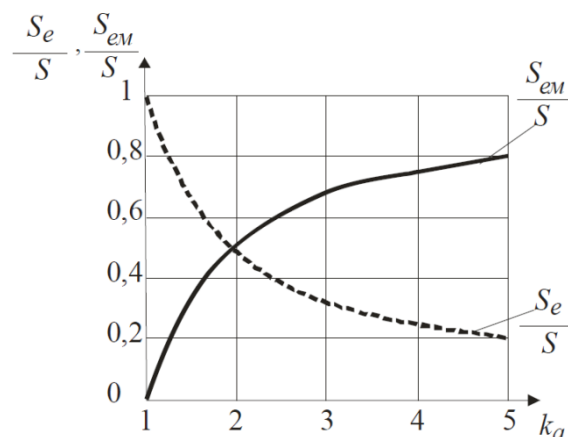


Рисунок 5.38 - Залежності потужностей АТ S_e і S_{em}

Потужність, передану з первинної сторони у вторинну, називають **прохідною потужністю**

На рис. 5.38 зображені залежності потужностей АТ S_e і S_{em} в долях від прохідної потужності S . Очевидно, що чим ближче до одиниці величина k_a , тим менша електромагнітна потужність S_{em} АТ і тим вигідніше його застосовувати з погляду зменшення маси, габаритних розмірів, втрат потужності.

$$S = U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot (I_1 + I_{12}) = U_2 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_{12} = S_e + S_{em}, \quad (5.64)$$

де S_e – електрична потужність, що передається з первинної сторони у вторинну електричним шляхом; S_{em} – електромагнітна потужність, що передається електромагнітним шляхом за допомогою магнітного поля.

Вирази для електричної (S_e) та електромагнітної (S_{em}) потужностей мають такий вигляд:

$$S_e = U_2 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \frac{w_2}{w_1} = U_2 \cdot I_2 \frac{1}{k_a} = S \cdot \frac{1}{k_a}; \quad (5.65)$$

$$S_{em} = S - S_e = U_2 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_2 \frac{1}{k_a} = S \left(1 - \frac{1}{k_a} \right). \quad (5.66)$$

Коефіцієнт трансформації АТ

$$k_a = w_{AX} / w_{ax} = U_{BH} / U_{HH} > 1, \quad (5.67)$$

де $w_{AX} = w_1$ – повне число витків первинної обмотки високої напруги між затискачами A та X ;

$w_{ax} = w_2$ – число витків частини обмотки між затискачами a та x (або a та X).

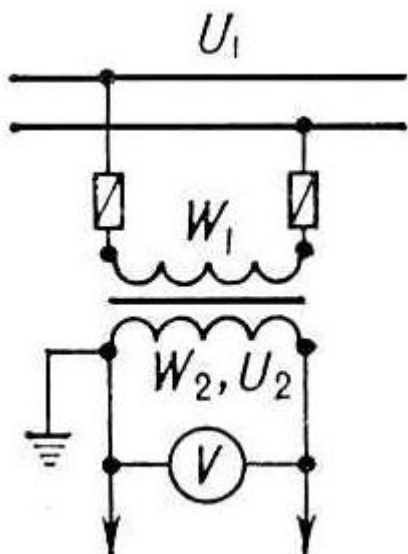


Рисунок 5.39 – Вимірювальний трансформатор напруги

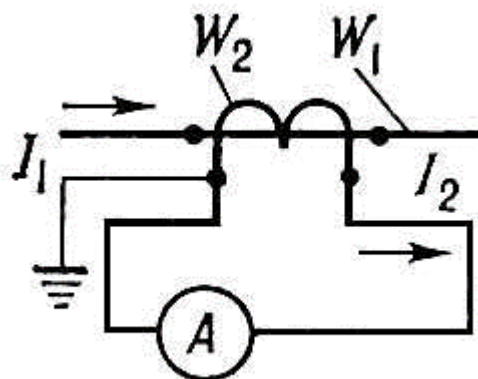


Рисунок 5.40 - Вимірювальний трансформатор струм

Найбільш доцільно застосування АТ із коефіцієнтом трансформації $1 < k_a < 2,5$

При великих значеннях k_a переважне значення мають недоліки АТ:

- великі струми короткого замикання;
- електричний зв'язок між обмотками ВН і НН вимагає посиленої ізоляції обмотки НН;
- між проводами мережі НН і землею виникає напруга, яка приблизно дорівнює напрузі між проводами і землею на стороні ВН, тобто обмотка НН повинна мати ту ж саму ізоляцію відносно землі, що й обмотка ВН;
- з метою забезпечення електробезпеки обслуговуючого персоналу не можна застосовувати АТ для зниження напруги мереж ВН до значення НН, яка підводиться до споживачів.

Силкові АТ широко застосовують у лініях передачі і розподілу електроенергії для зв'язку мереж суміжних напруг, наприклад 110 та 220, 220 та 500 кВ та ін. Такі АТ виконують на потужності до $500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ та вище.

АТ застосовують в електроприводах змінного струму для зменшення пускових струмів двигунів великої потужності, для регулювання режимів роботи електрометалургійних печей. АТ малої потужності застосовують в пристроях радіо, зв'язку й автоматики.

Широко поширені АТ із змінним коефіцієнтом трансформації. У цьому випадку використовують пристрій, що дозволяє регулювати значення вторинної напруги АТ шляхом зміни числа витків вторинної обмотки. Такі АТ, названі регуляторами напруги, можуть бути однофазними і трифазними.

5.6.3 Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори застосовуються для ізоляції вимірювальних приладів від високої напруги та розширення границь вимірювання вольтметрів і амперметрів(рис. 5.39)

Вимірювальні трансформатори діляться на трансформатори напруги і трансформатори струму. З'єднання обмоток по групі 12.Вторинна номінальна напруга у всіх трансформаторів напруги згідно ГОСТ дорівнює 100 В. До 6 кВ трансформатори напруги виготовляються сухими, тобто з природним охолодженням. Понад 6 кВ трансформатори напруги виготовляються рідинними.

Вимірювальні прилади, що працюють з вимірювальними трансформаторами, градууються з урахуванням коефіцієнта трансформації.

Трансформатор струму з боку первинної обмотки включається як амперметр (рис. 5.40).

Література

[1],[3],[4]

РОЗДІЛ 2 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

ТЕМА 6

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ПРИНЦИП ДІЇ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

- 6.1 Область застосування машин постійного струму
- 6.2 Принцип дії машин постійного струму
- 6.3 Конструкція колекторної машини постійного струму
- 6.4 Обмотки якоря машин постійного струму (МПС)
- 6.5 Електрорушійна сила і електромагнітний момент машини постійного струму
- 6.6 Способи збудження машин постійного струму

6.1 Область застосування машин постійного струму

Електричні машини постійного струму використовуються як в якості генераторів, так і в якості двигунів. Найбільше застосування мають двигуни постійного струму, області застосування і діапазон потужності яких досить широкі: від долей вата (для приводу пристроїв автоматики) до декількох тисяч кіловат (для приводу прокатних станів, шахтних підйомників та інших механізмів).

Двигуни постійного струму широко використовуються для приводу підйомних засобів у якості кранових двигунів і приводу транспортних засобів в якості тягових двигунів.

Основні переваги двигунів постійного струму в порівнянні з безколекторними двигунами змінного струму - хороші пускові і регульовальні властивості, можливість отримання частоти обертання понад 3000 об/хв, а недоліки - відносно висока вартість, деяка складність у виготовленні і знижена надійність.

Всі ці недоліки машин постійного струму обумовлені наявністю в них щітково-колекторного вузла, який до того ж є джерелом радіоперешкод і пожежонебезпеки. Ці недоліки обмежують застосування машин постійного струму.

В останні роки створені й успішно застосовуються двигуни постійного струму, у яких механічний колектор замінений безконтактним комутатором на напівпровідникових елементах.

6.2 Принцип дії машин постійного струму

Характерною ознакою колекторних машин є наявність у них колектора - механічного перетворювача змінного струму в постійний і навпаки. Необхідність в такому перетворювачі пояснюється тим, що в обмотці якоря колекторної машини повинен протікати змінний струм, тому що тільки в цьому випадку в

машині відбувається безперервний процес електромеханічного перетворення енергії.

Розглянемо принцип дії колекторного генератора постійного струму. На рис. 6.1 зображена спрощена модель такого генератора: між полюсами N і S постійного магніту знаходиться обертальна частина генератора - якір, вал якого за допомогою шківів і ремінної передачі механічно пов'язаний з приводним двигуном (на малюнку не показаний) - джерелом механічної енергії. У двох поздовжніх пазах на осерді якоря розташована обмотка у вигляді одного витка $abcd$, кінці якого приєднані до двох мідних ізолюваних один від одного півкільця, що створює найпростіший колектор. На поверхню колектора накладені щітки A і B , які здійснюють ковзний контакт з колектором і зв'язують генератор із зовнішнім колом, куди включена навантаження з опором R .

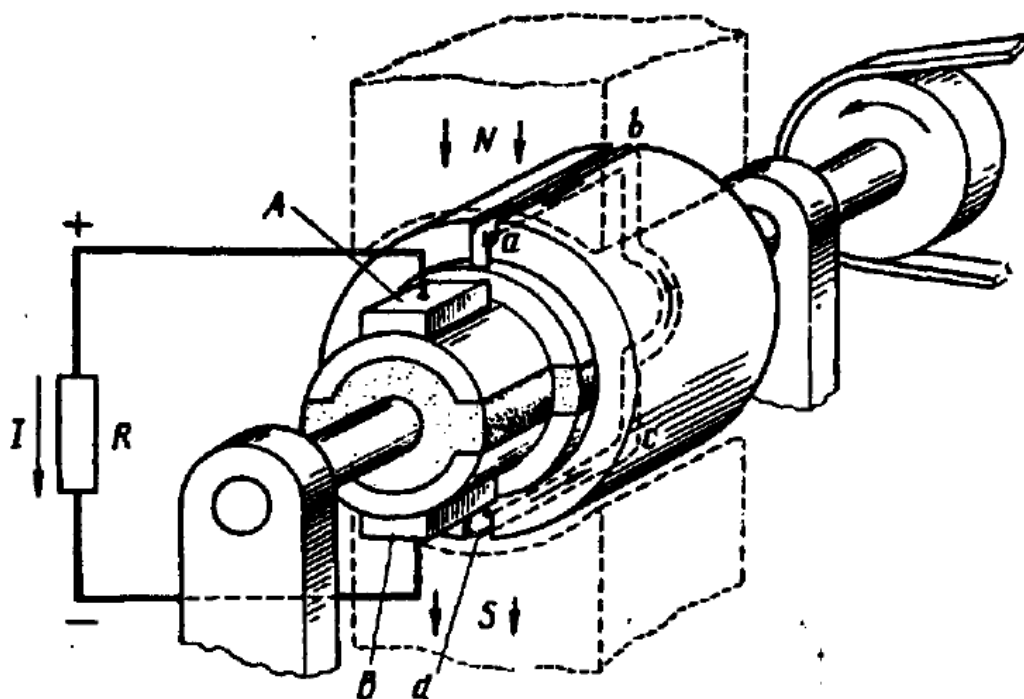


Рисунок 6.1 – Спрощена модель колекторної машини

Припустимо, що приводний двигун обертає якір генератора проти годинникової стрілки, тоді в витку на якорі, що обертається в магнітному полі постійного магніту, наводиться ЕРС, миттєве значення якої $e = B \cdot l \cdot v$ (B - індукція магнітного поля, l - довжина активної зони провідника, v - лінійна швидкість переміщення провідника в магнітному полі), а напрямок для положення якоря, зображеного на рис. 6.1, зазначено стрілками (напрямок ЕРС визначається, як відомо, за правилом правої руки).

В процесі роботи генератора якір обертається і виток $abcd$ займає різне просторове положення, тому в обмотці якоря наводиться змінна ЕРС. Якби в машині не було колектора, то струм у зовнішньому колі (в навантаженні R) був би змінним, але за допомогою колектора і щіток змінний струм обмотки якоря перетворюється в пульсуючий струм у зовнішньому колі генератора, тобто струм, незмінний за напрямком.

При положенні витка якоря, показаного на малюнку, струм у зовнішньому колі (в навантаженні) спрямований від щітки *A* до щітки *B*; отже, щітка *A* є позитивною, а щітка *B* - негативною. Після повороту якоря на 180° (див. рис. 6.2, а) напрямок струму в витку якоря зміниться на протилежний, проте полярність щіток, а отже, і напрямок струму в зовнішньому колі (в навантаженні) залишаться незмінними (рис. 6.2, б). Пояснюється це тим, що в той момент, коли струм у витку якоря змінює свій напрямок, відбувається зміна колекторних пластин під щітками.

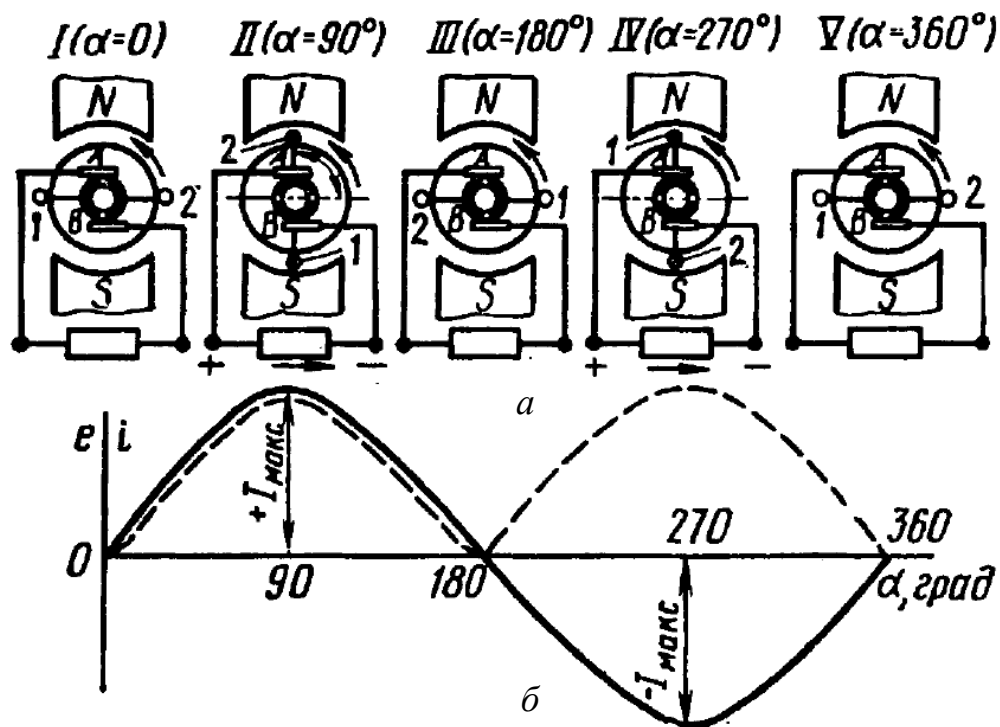


Рисунок 6.2 – Форма кривих ЕРС і струму в обмотці якоря та зовнішньому колі генератора постійного струму: 1 – ЕРС та струм в обмотці якоря; 2 – струм у зовнішньому колі генератора

Таким чином, під щіткою *A* завжди знаходиться пластина, з'єднана з провідником, розташованим під північним магнітним полюсом, а під щіткою *B* - пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом. Завдяки цьому полярність щіток генератора залишається незмінною незалежно від положення витка якоря.

Що ж стосується пульсацій струму в зовнішньому колі, то вони набагато послаблюються при збільшенні числа витків в обмотці якоря при їх рівномірному розподілі по поверхні якоря і відповідне збільшення числа пластин в колекторі.

Відповідно до принципу оборотності електричних машин спрощена модель машини постійного струму може бути використана в якості двигуна постійного струму.

Для цього необхідно відключити навантаження генератора і підвести до щіток машини напругу від джерела постійного струму. Наприклад, якщо до щітки *A* підключити затиск «плюс», а до щітки *B* - «мінус», то в обмотці якоря з'явиться струм напрямком якого показано на малюнку.

В результаті взаємодії цього струму з магнітним полем постійного електромагніту (поля збудження) з'являються електромагнітні сили $F_{\text{эм}} = B \cdot I \cdot l$ (B - індукція магнітного поля, I - струм в провіднику, l - довжина активної зони провідника), що створюють на якорі електромагнітний момент $M = F_{\text{эм}} \cdot D_a$ і обертають його проти годинникової стрілки.

Напрямок електромагнітних сил визначається, як відомо, за правилом лівої руки.

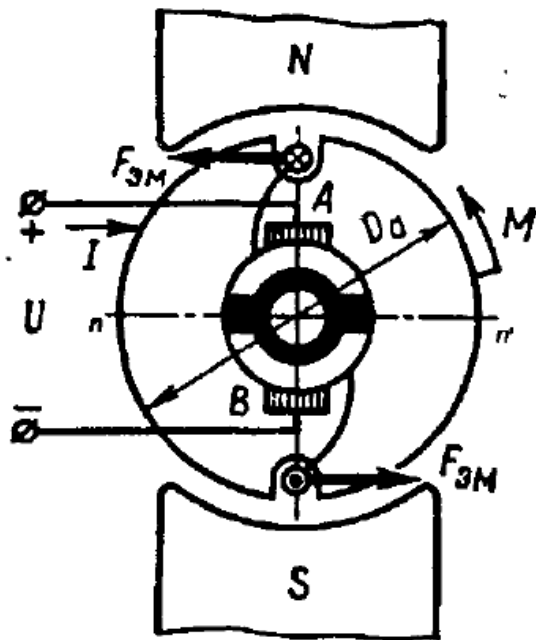


Рисунок 6.3 – Принцип дії двигуна постійного струму

Після повороту якоря на 180° електромагнітні сили не змінюють свого напрямку, тому що одночасно з переходом кожного провідника обмотки якоря із зони одного магнітного полюса в зону іншого полюса в цих провідниках змінюється напрямок струму.

Таким чином, призначення колектора і щіток в двигуні постійного струму - змінювати напрямок струму в провідниках обмотки якоря при їх переході із зони магнітного полюса однієї полярності в зону полюса іншої полярності.

Розглянута спрощена модель машини постійного струму не забезпечує двигуна стійкої роботи, тому що при проходженні провідниками обмотки якоря геометричної нейтралі $n-n'$ електромагнітні сили $F_{\text{эм}} = 0$ (тому що магнітна індукція в середині міжполюсного простору дорівнює нулю). Однак зі збільшенням числа провідників в обмотці якоря (при рівномірному їх

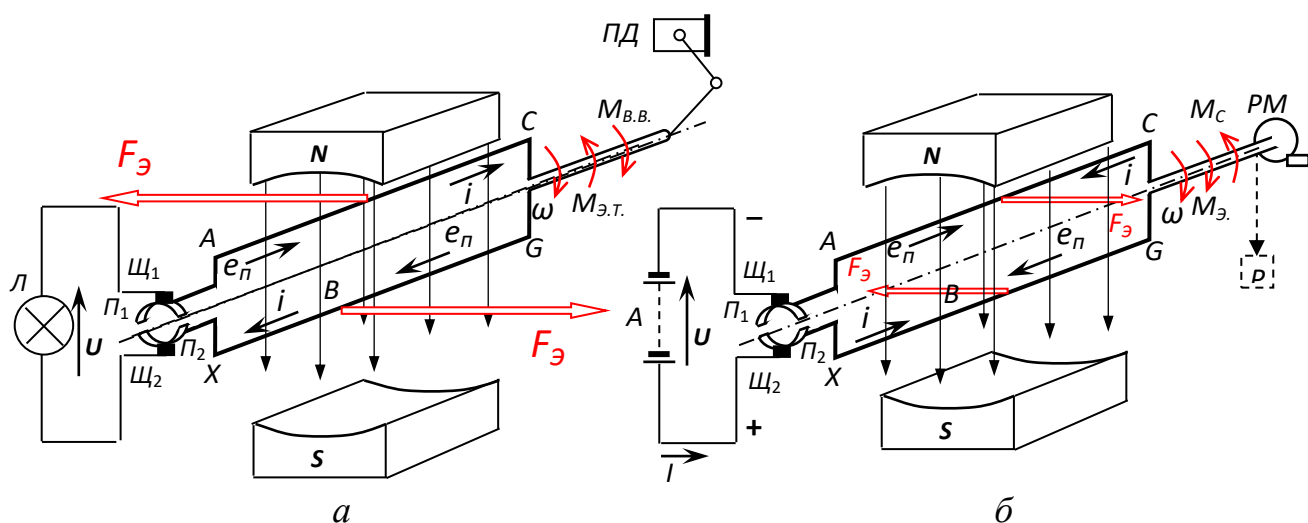


Рисунок 6.4 – Схема генератора (а) і двигуна (б) постійного струму

розподілі на поверхні якоря) і числа пластин колектора обертання якоря двигуна стає стійким і рівномірним.

В даний час заводи електромашинобудування виготовляють електричні машини постійного струму, призначені для роботи в найрізноманітніших галузях промисловості.

Призначення	Використання	P, кВт	I, А	U, В	Примітка
Двигуни	Трамвай	40÷50	75÷100	550	Мають переваги перед двигунами змінного струму: 1)широке регулювання частоти обертання; 2)розвивають великий пусковий момент
	Електровоз	600÷900	400÷600	1500	
	Прокатний стан	11500	11500	1000	
Генератори	Для електролізу	60÷120	10000	6÷12	Частіше використовуються генератори змінного струму з випрямлячами
	Тепловоз	2700	3600	750	

6.3 Конструкція колекторної машини постійного струму

Основними елементами машини постійного струму є:

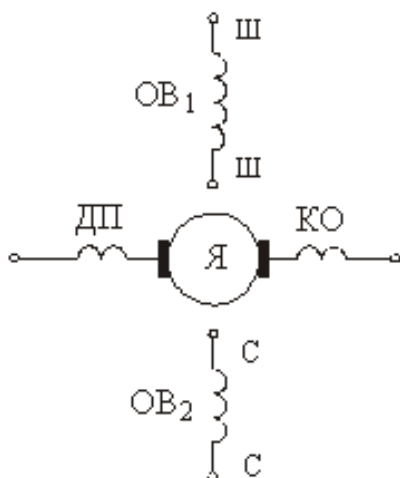
6. Статор - індуктор

а) станина (яромо); б) основні полюси; в) додаткові полюси; г) підшипникові щити; д) щітковий апарат

7. Ротор - якір

а) сердечник якоря; б) обмотка якоря; в) колектор.

Види обмоток машин постійного струму



6. Обмотки збудження ОВ1 і ОВ2 (Ш-Ш - шунтова обмотка, С-С - серієсна обмотка).

7. Обмотка якоря (Я1-Я2).

8. Обмотка додаткових полюсів (ДП).

9. Компенсаційна обмотка (КО).

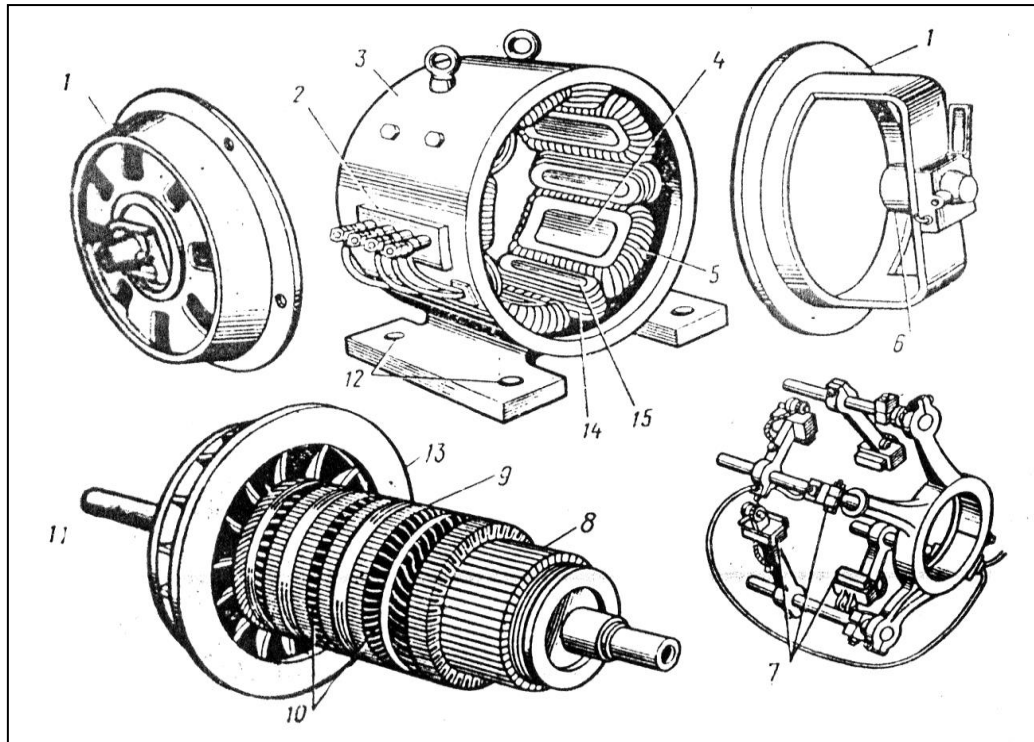
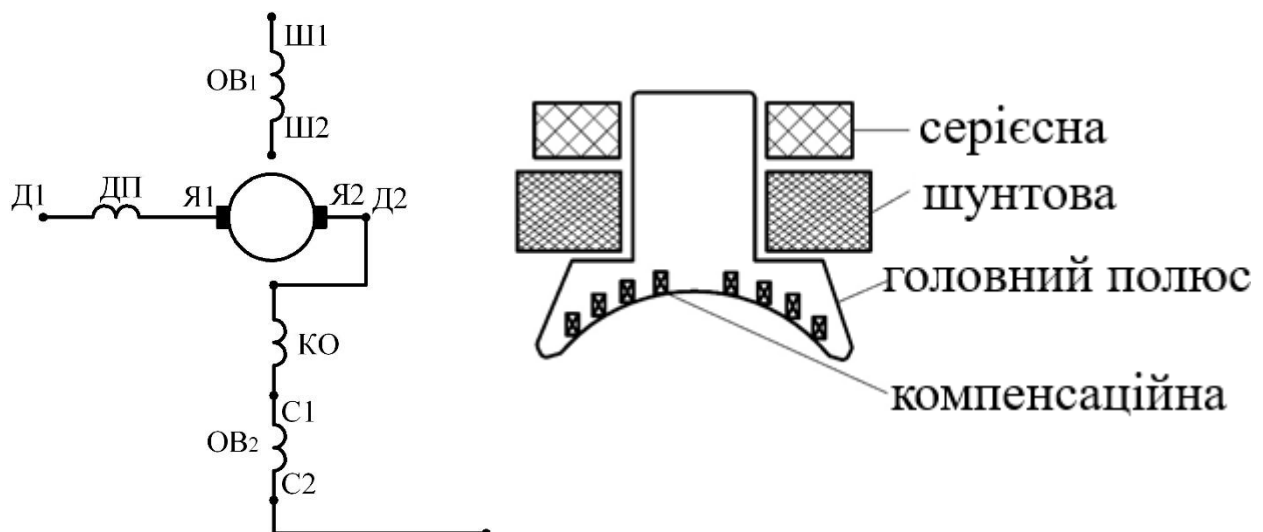


Рисунок 6.5 – Конструкція машини постійного

1 - підшипникові щити, 2 - затискачі для підключення обмоток машини, 3 - станина машини, 4 і 5 - головні (основні) полюси з обмоткою збудження, 15 і 14 - додаткові полюси з компенсаційною обмоткою, 7 - щітковий апарат, 8 - колектор, 9 і 10 - якір машини, 11 - вал, 13 - вентилятор.



Нерухома частина машини постійного струму називається індуктором (статором), оберտальна частина - якорем.

Індуктор. Складається зі станини 8 і головних полюсів 6. Станина 8 призначена для кріплення полюсів і підшипникових щитів і є частиною магнітопроводу, тому що через неї замикається магнітний потік машини. Станину

виготовляють зі сталі - матеріалу, що має достатню механічну міцність і велику магнітну проникність. У нижній частині станини є лапи *11* для кріплення машини до плити фундаменту, а по колу станини розташовані отвори для кріплення сердечників головних полюсів *6*.

Зазвичай станину роблять цільну зі сталеві труби, або зварну з листової сталі, за винятком машин з дуже великим зовнішнім діаметром, у яких станину роблять рознімною, що полегшує транспортування і монтаж машини.

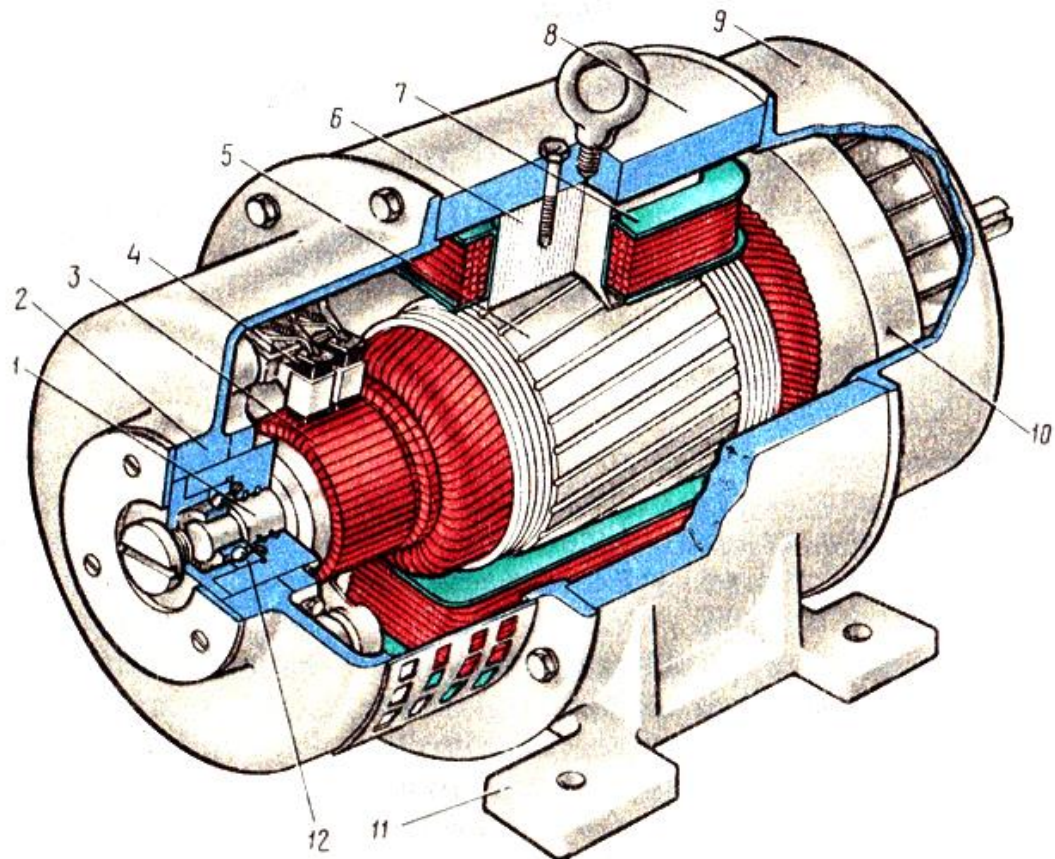


Рисунок 6.6 – Загальний вигляд машини постійного струму

Головні полюси призначені для створення в машині магнітного поля збудження. Головний полюс складається з сердечника *6* і полюсної котушки збудження *7*. З боку, оберненого до якоря *5*, сердечник полюса має полюсний наконечник, який забезпечує необхідний розподіл магнітної індукції в зазорі машини.

Сердечники головних полюсів роблять шихтованими з листової конструкційної сталі товщиною 1 - 2 мм або з тонколистової електротехнічної анізотропної холоднокатаної сталі, наприклад марки 3411. Штамповані пластини головних полюсів спеціально не ізолюють, тому що тонка плівка оксиду на їх поверхні достатня для значного ослаблення вихрових струмів, наведених в полюсних наконечниках пульсаціями магнітного потоку, викликаного зубчастістю сердечника якоря. Анізотропна сталь має підвищену магнітну проникність уздовж прокату, що має враховуватися при штампуванні пластин і їх складанні в пакет.

У машинах постійного струму невеликої потужності полюсні котушки роблять безкаркасними – з намотуванням мідного обмотувального проводу безпосередньо на сердечник полюса, попередньо накладаючи на нього ізоляційну прокладку (Рисунок 6.7, а). У більшості машин (потужністю 1 кВт і більше) полюсну котушку роблять каркасною: обмотувальний провід намотують на каркас (зазвичай пластмасовий), а потім надягають на сердечник полюса (Рисунок 6.7, б).

У деяких конструкціях машин полюсну котушку для більш інтенсивного охолодження розділяють по висоті на частини, між якими залишають вентиляційні канали.

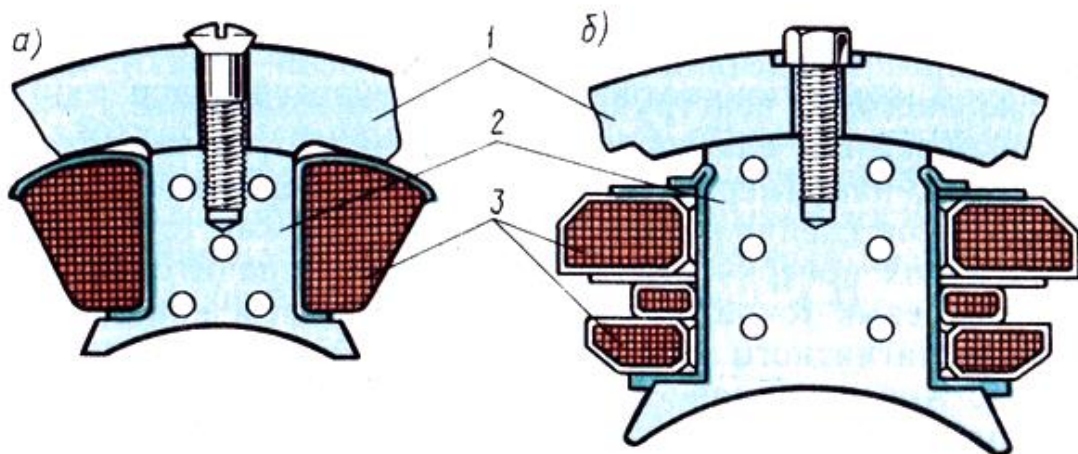


Рисунок 6.7 - Головні полюси з безкаркасною (а) і каркасною (б) полюсними котушками: 1 - станина; 2 - осердя полюса; 3 - полюсна котушка збудження

Якір. Якір машини постійного струму (див. попередній рис. 6.6) складається з вала 1, сердечника 5 з обмоткою і колектора 3. Сердечник якоря має шихтовану конструкцію, набирається зі штампованих пластин тонколистової електротехнічної сталі. Листи покривають ізоляційним лаком, збирають в пакет і запікають. Готовий сердечник напресовують на вал якоря. Така конструкція сердечника якоря дозволяє значно послабити в ньому вихрові струми, що виникають в результаті його перемагнічування в процесі обертання в магнітному полі. На поверхні якоря є поздовжні пази, в які укладають обмотку якоря.

Обмотку якоря виконують мідним дротом круглого або прямокутного перерізу. Пази якоря після заповнення їх проводами обмотки зазвичай закривають клинами (текстолітовими або гетинаксовими). У деяких машинах пази не закривають клинами, а накладають на поверхню якоря бандаж. Бандаж роблять з дроту або склеленти з попереднім натягом. Лобові частини обмотки якоря кріплять до обмоткотримача бандажем.

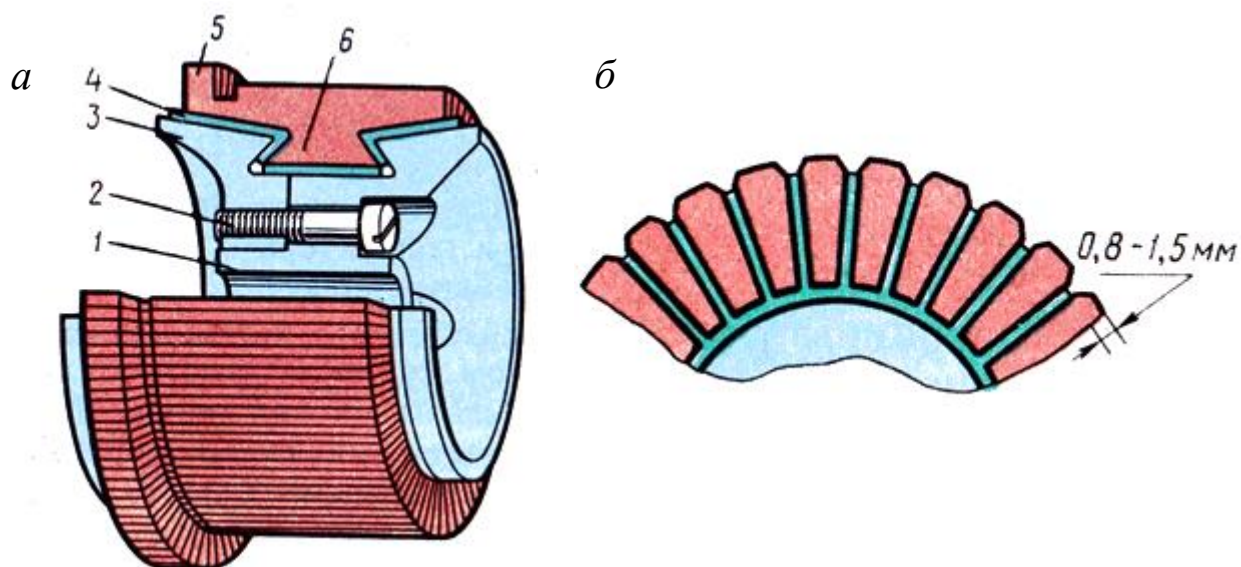


Рисунок 6.8 – Конструкція колектора з конусним шайбами

Верхня частина 5 колекторних мідних пластин 6 (рис. 6.8, а), яка називається **півником**, має вузький поздовжній паз, в який закладають провідники обмотки якоря і ретельно припаюють. Колекторні пластини 6 ізолювані один від одного і від корпусу 1 ізоляційним матеріалом 4

У машинах постійного струму малої потужності часто застосовують колектори на пластмасі, що відрізняються простотою у виготовленні. Набір мідних і міканітових пластин в такому колекторі утримується пластмасою, запресованою в простір між набором пластин і сталеву втулкою і утворює корпус колектора. Іноді з метою збільшення міцності колектора цю пластмасу армують сталевими кільцями. Електричний контакт з колектором здійснюється за допомогою щіток, що розташовуються в щіткотримачах 4 (рис. 6.6).

Щіткотримач (рис. 6.9) складається з обойми 4, в яку поміщують щітку 3, курка 1, що представляє собою відкидну деталь, що передає тиск пружини 2 на щітку. Щіткотримач кріплять на пальці затискачем 5. Щітка забезпечується гнучким тросом 6 для включення її в електричне коло машини. Всі щіткотримачі однієї полярності з'єднані між собою збірними шинами, підключеними до виводів машини. Одне з основних умов безперебійної роботи машини - щільний і надійний контакт між щіткою і колектором.

Тиск на щітку має бути відрегульованим, тому що надмірний тиск може викликати передчасний знос щітки і перегрів колектора, а недостатній тиск - іскріння на колекторі.

Крім зазначених частин машина постійного струму має два підшипникових щита: передній 2 (з боку колектора) і задній 9 (див. рис. 6.6).

У центральній частині щита є розточування під підшипник 12. На передньому підшипниковому щиті є оглядове вікно (люк) з кришкою, через яке

можна оглянути колектор і щітки не розбираючи машини. Кінці обмоток виведені на затискачі коробки виводів. Вентилятор 10 служить для самовентиляція машини: повітря надходить в машину зазвичай з боку колектора, обдуває нагріті частини (колектор, обмотки і осердя) і викидається з протилежного боку через решітку.

З розглянутого принципу дії і будови колекторної машини постійного струму виходить, що неодмінним елементом цієї машини, включеним між обмоткою

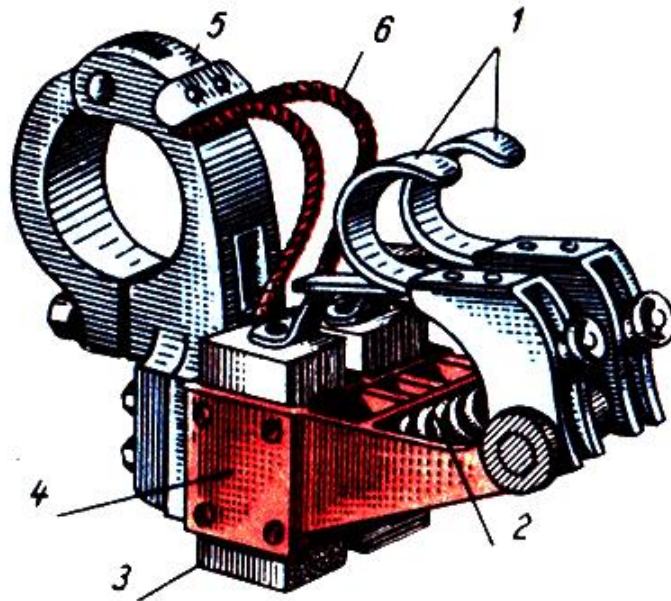


Рисунок 6.9 - Щіткотримач (здвоєний) машини постійного струму

якоря і зовнішньою мережею, є щітково-колекторний вузол - механічний перетворювач роду струму. Таким чином, колекторні машини складніше безколекторних машин змінного струму (асинхронної і синхронної) і, отже, поступаються їм (особливо асинхронної машині) в надійності і мають більш високу вартість.

6.4 Обмотки якоря машин постійного струму (МПС)

6.4.1 Петльові обмотки якоря

Основні поняття. Обмотка якоря машини постійного струму являє собою замкнуту систему провідників, певним чином укладених на осерді якоря і приєднаних до колектора.

Елементом обмотки якоря є секція (котушка), приєднана до двох колекторних пластин. Відстань між пазовими частинами секції повинна буди однаковою або мало відрізнятися від полюсного поділу τ (див.рис. 6.10):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot p}, \quad (6.1)$$

де D_a – діаметр сердечника якоря.

Обмотки якоря зазвичай виконують двошаровими. Вони характеризуються такими параметрами: числом секцій S , числом пазів (реальних) Z , числом секцій, що припадають на один паз, $S_n = S / Z$, числом витків секції W_c , числом пазових сторін в обмотці N , числом пазових сторін в одному пазу

$$n_n = N / Z = 2 \cdot W \cdot S_n \quad (6.2)$$

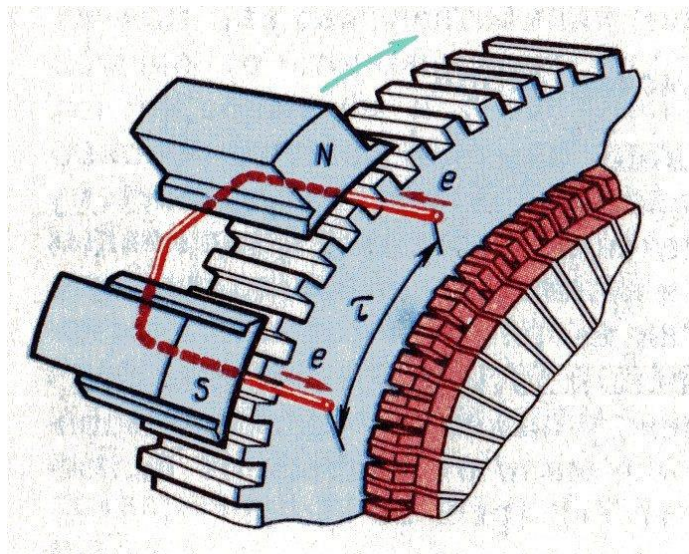


Рисунок 6.10 - Розташування пазових сторін секції на осерді якоря

Верхня пазова сторона однієї секції і нижня пазова сторона іншої секції, що лежать в одному пази, утворюють елементарний паз. Число елементарних пазів в реальному пази Z_n визначається числом секцій, що припадають на один паз (рис. 6.11):

$$S_n = S / Z \quad (6.3)$$

Схеми обмоток якоря роблять розгорнутими, при цьому всі секції показують одновитковими. В цьому випадку кожній секції, що містить дві пазові сторони, відповідає один елементарний паз. Кінці секції приєднують до колекторним пластин, при цьому до кожної пластини приєднують початок однієї секції і кінець іншої, тобто на кожну секцію приходить одна колекторна пластина.

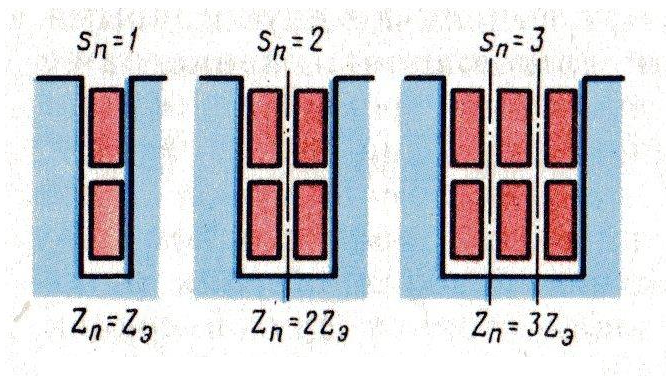


Рисунок 6.11 - Елементарні пази

Таким чином, для обмотки якоря справедливо $S = Z_3 = K$, де - Z_3 - число елементарних пазів; K - число колекторних пластин в колекторі. Число секцій, що припадають на один реальний паз, визначається співвідношенням Z_3 / Z .

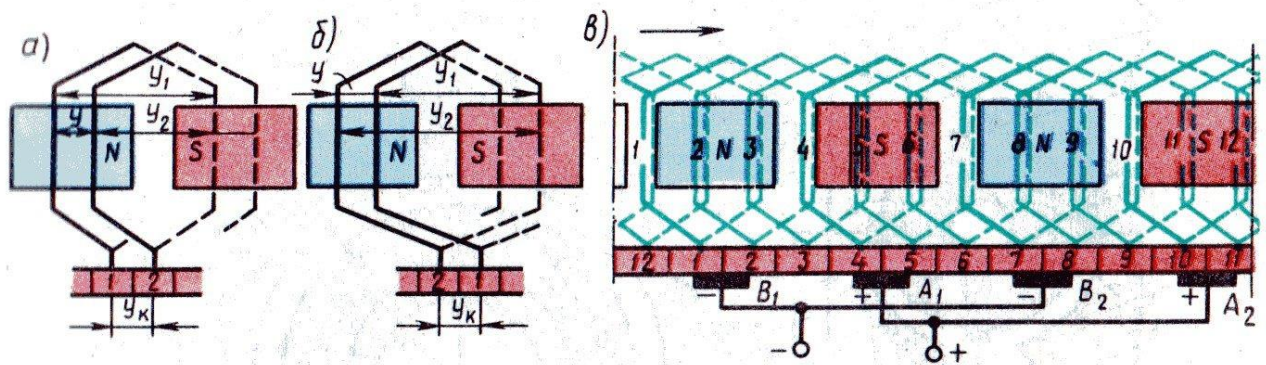


Рисунок 6.12 - Проста петльова обмотка:
а - правоходова; б - лівоходова; в - розгорнута схема

Відстань між двома колекторними пластинами, до яких приєднані початок і кінець однієї секції, називають кроком обмотки по колектору y_k . Кроки обмотки по якорю y_1 й y_2 виражають в елементарних пазах, а крок по колектору - в колекторних поділах (пластинах).

Початок і кінець кожної секції в простій петльовій обмотці приєднані до поруч лежачих колекторних пластин, отже, $y = y_k = \pm 1$, де знак плюс відповідає правоходовій обмотці, а знак мінус - лівоходовій.

Для визначення всіх кроків простої петльової обмотки досить розрахувати перший частковий крок по якорю:

$$y_1 = (Z / 2 \cdot p) \mp \varepsilon, \quad (6.4)$$

де ε - деяка величина, менша за одиницю, віднімаючи або підсумовуючи яку отримують значення кроку y_1 , рівне цілому числу.

$y_2 = y_1 \mp y = y_1 \mp 1$ - другий частковий крок обмотки по якорю

Приклад. Розрахувати кроки і виконати розгорнуту схему простої петльової обмотки якоря для чотириполюсних машин ($2 \cdot p = 4$) постійного струму. Обмотка правоходова, містить 12 секцій.

Рішення. Перший частковий крок по якорю: $y_1 = \frac{Z}{2 \cdot p} \mp \varepsilon = \frac{12}{4} \mp 0 = 3$ паза.

Другий частковий крок по якоря: $y_2 = y_1 - 1 = 2$ паза.

Перш ніж приступити до виконання схеми обмотки, необхідно відзначити і пронумерувати всі пази і секції, нанести на передбачувану схему контури магнітних полюсів і вказати їх полярність. Потім зображають колекторні пластини і наносять на схему першу секцію, пазові частини якої розміщують в пазах 1 і 4.

Колекторні пластини, до яких приєднані початок і кінець цієї секції, позначають 1 і 2. Потім нумерують всі інші пластини і наносять на схему інші секції (2, 3, 4 і т. д.). Остання секція 12 повинна замкнути обмотку, що буде свідчити про правильне виконання схеми.

Далі на схемі зображують щітки. Відстань між щітками А і В має дорівнювати $\frac{K}{2 \cdot p} = \frac{12}{4} = 3$, тобто повинно відповідати полюсному поділу τ .

Що ж стосується розташування щіток на колекторі, то при цьому слід керуватися наступним. Припустимо, що електричний контакт обмотки якоря з зовнішньої колом здійснюється не через колектор, а безпосередньо через пазові частини обмотки, на які накладено "умовні" щітки (Рисунок 6.13, а). У цьому випадку найбільша ЕРС машини відповідає положенню "умовних" щіток на геометричній нейтралі.

Але через те, що колекторні пластини зміщені відносно пазових сторін з'єднаних з ними секцій на $0.5 \cdot \tau$ (Рисунок 6.13, б), то переходячи до реальних щіток, їх слід розташувати на колекторі по осі головних полюсів, як це показано на попередньому малюнку в.

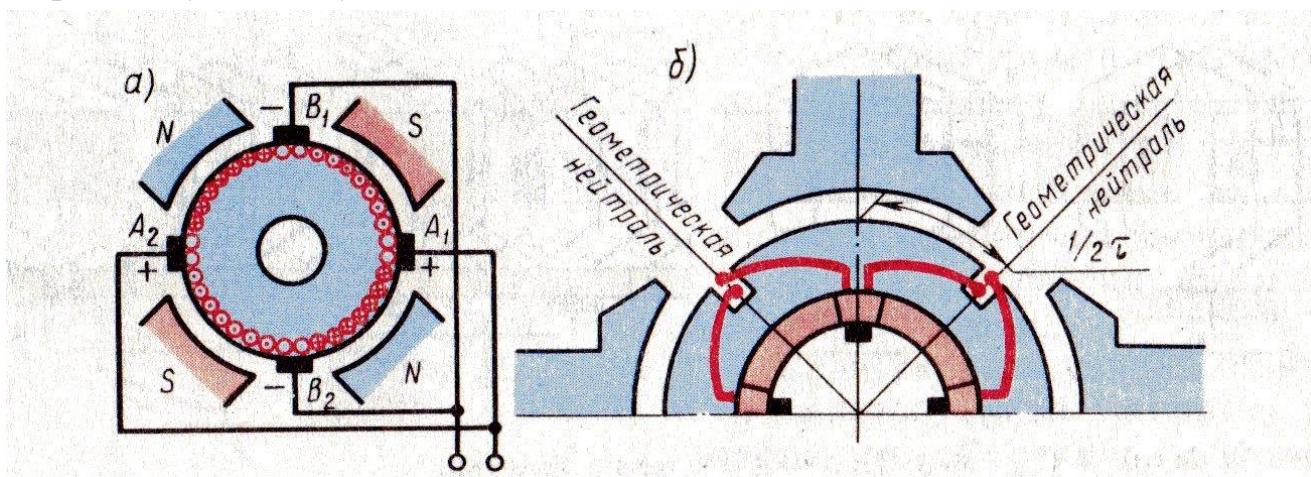


Рисунок 6.13 - Розташування умовних (а) і реальних (б) щіток

При визначенні полярності щіток припускають, що машина працює в генераторному режимі і її якор обертається в напрямку стрілки (рис. 6.12, в). Скориставшись правилом "правої руки", знаходять напрямок ЕРС (струму), наведеної в секціях. У підсумку отримуємо, що щітки A_1 і A_2 , від яких струм відводиться в зовнішнє коло, є позитивними, а щітки B_1 і B_2 - негативними. Щітки однаковою полярності приєднують паралельно до виводів машини відповідної полярності.

Паралельні гілки обмотки якоря. Якщо простежити за проходження струму в секціях обмотки якоря (рис. 6.12, в), то можна помітити, що обмотка складається з чотирьох ділянок, з'єднаних паралельно один одному і званих паралельними гілками. Кожна паралельна гілка містить кілька послідовно з'єднаних секцій з однаковим напрямком струму в них.

Розподіл секцій в паралельних гілках показано на електричній схемі обмотки (рис. 6.14). Цю схему отримують з розгорнутою схеми обмотки (рис. 6.12, в) у такий спосіб. На аркуші паперу зображують щітки і колекторні пластини, що мають з ними контакт, як це показано на малюнку.

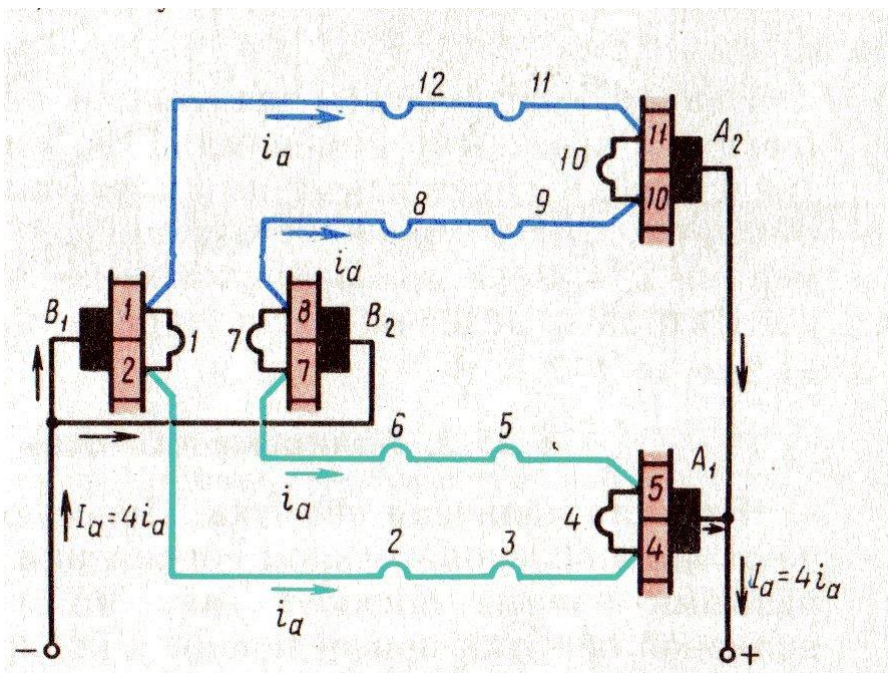


Рисунок 6.14 – Електрична схема обмотки

обмотки якоря визначається значенням ЕРС однієї паралельної гілки, тоді як значення струму обмотки визначається сумою струмів всіх гілок обмотки:

$$I_a = 2 \cdot a \cdot i_a, \quad (6.5)$$

де $2 \cdot a$ - число паралельних гілок обмотки якоря;

i_a - струм однієї паралельної гілки.

Потім здійснюють обхід секцій обмотки починаючи з секції 1, яка виявляється замкнутою накоротко щіткою B_1 .

Далі йдуть секції 2 і 3, які утворюють паралельну гілку.

Таким же чином обходять всі інші секції. В результаті отримуємо схему з чотирма паралельними гілками, по дві секції в кожній гілці.

З отриманої схеми виходить, що ЕРС

У простій петльовій обмотці число паралельних гілок дорівнює числу головних полюсів машини: $2 \cdot a = 2 \cdot p$.

Неважко відмітити, що число паралельних гілок в обмотці якоря визначає значення основних параметрів машини - струму і напруги.

6.4.2 Складна петльова обмотка

При необхідності отримати петльову обмотку з великим числом паралельних гілок, як це потрібно, наприклад, в низьковольтних машинах постійного струму, застосовують складну петльову обмотку. Така обмотка являє собою кілька (зазвичай дві) простих петльових обмоток, покладених на одному якорі і приєднаних до одного колектора. Число паралельних гілок в складній петльовій обмотці:

$$2 \cdot a = 2 \cdot p \cdot m, \quad (6.6)$$

де m - число простих петльових обмоток, з яких складена складна обмотка (зазвичай $m = 2$). Ширина щіток при складній петльовій обмотці приймається такою, щоб кожна щітка одночасно перекривала m колекторних пластин, тобто стільки пластин, скільки простих обмоток в складній. При цьому прості обмотки виявляються приєднаними паралельно одна одній.

На рис. 6.15 показана розгорнута схема складної петльової обмотки, що складається з двох простих петльових обмоток ($m = 2$): $2 \cdot p = 4$; $Z_{\text{я}} = 16$.

Результуючий крок обмотки по якорю і крок по колектору складної петльової обмотки приймають рівним $y = y_k = m$.

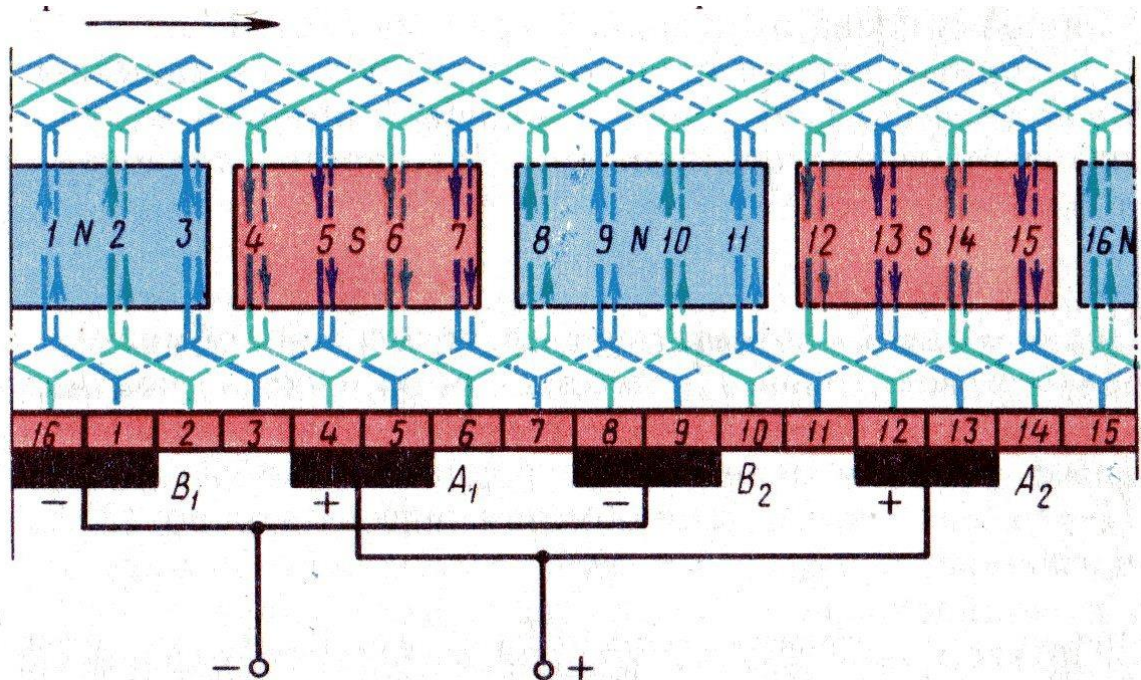


Рисунок 6.15 - Розгорнута схема складної петльової обмотки

6.4.3 Хвильові обмотки якоря

Проста хвильова обмотка. Просту хвильову обмотку отримують при послідовному з'єднанні секцій, які перебувають під різними парами полюсів (рис. 6.16). Кінці секцій простої хвильової обмотки приєднують до колекторним пластин, віддаленим один від одного на відстань кроку обмотки по колектору

$$y_k = y = \frac{K \mp 1}{p}.$$

За один обхід по якорю укладають стільки секцій, скільки пар полюсів має машина, при цьому кінець останньої по обходу секції приєднують до пластині, розташованій поруч з вихідною.

Просту хвильову обмотку називають лівоходовою, якщо кінець останньої по обходу секції приєднується до пластини, що знаходиться зліва від вихідної (рис. 6.16, а). Якщо ж ця пластина знаходиться праворуч від вихідної, то обмотку називають правоходовою (рис. 6.16, б). Секції хвильової обмотки можуть бути одновитковими і багатовитковими..

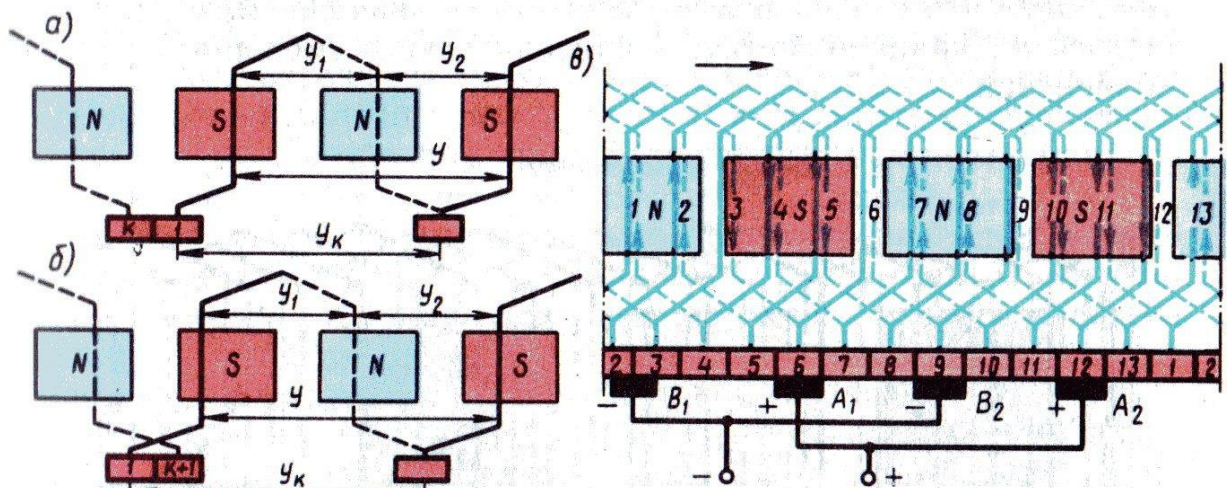


Рисунок 6.16 - Проста хвильова обмотка:
а - Правоходова; б - лівоходова; в - розгорнута схема

Правоходова обмотка не отримала практичного застосування, бо її виконання пов'язане з додатковою витратою міді на перехрещення лобових частин.

Перший частковий крок обмотки визначають так само як і для петльової обмотки, а другий частковий крок: $y_2 = y - y_1$.

Приклад. Чотириполюсна машина постійного струму має просту хвильову обмотку якоря з 13 секцій. Побудувати розгорнуту схему і схему паралельних гілок цієї обмотки.

Рішення. Кроки обмотки:

$$y_k = y = (K \mp 1) / p = (13 - 1) / 2 = 6 \text{ пазів};$$

$$y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3 \text{ паза}.$$

$$y_1 = [Z_s / (2 \cdot p)] \mp \varepsilon = 13 / 4 - 0,25 = 3 \text{ паза};$$

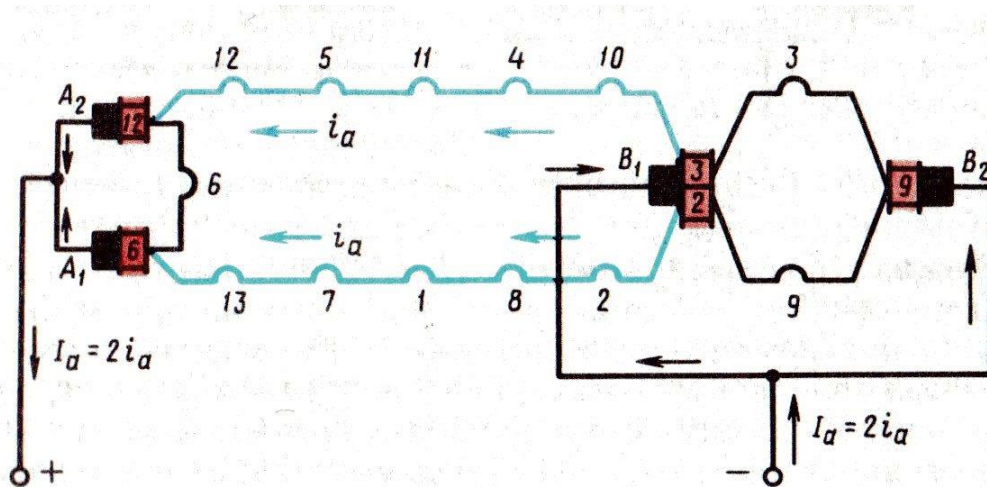


Рисунок 6.17 - Електрична схема простої хвильової обмотки

При першому обході по якорю укладаємо секції 1 і 7 (рис. 6.16, в). При другому обході укладаємо секції 13 і 6 і т.д., поки не будуть укладені всі 13 секцій і обмотка не опиниться замкнутою. Секції 3, 6 і 9 в даний момент часу замкнуті накоротко через щітки однаковою полярності і дроти, що сполучають їх. Потім визначаємо полярність щіток. Далі виконуємо електричну схему (схему паралельних гілок), з якої видно (рис. 6.17), що обмотка складається з двох паралельних гілок ($2 \cdot a = 2$). Це є характерним для простих хвильових обмоток, у яких число паралельних гілок не залежить від числа полюсів і завжди дорівнює двом.

З розглянутих схем видно, що секції, що входять в одну паралельну гілку, рівномірно розподілені під усіма полюсами машини. Слід також зазначити, що в простій хвильовій обмотці можна було б обійтися двома щітками, наприклад, щітками B_2 й A_2 . Але в цьому випадку порушилася б симетрія обмотки і число секцій в паралельних гілках стало б неоднаковим: в одній гілці сім секцій, а в іншій - шість. Тому в машинах з простими хвильовими обмотками встановлюють повний комплект щіток, стільки ж, скільки головних полюсів, тим більше що це дозволяє зменшити значення струму, що припадає на кожну щітку, а, отже, зменшити розміри колектора.

6.4.4 Складна хвильова обмотка (див. рис. 6.18) Кілька простих хвильових обмоток (зазвичай дві), покладених на одному якорі, утворюють складну хвильову обмотку. Число паралельних гілок в складній хвильовій обмотці $2 \cdot a = 2 \cdot m$ (зазвичай $2 \cdot a = 4$), де m - число простих обмоток в складній (зазвичай $m = 2$). Прості обмотки, що входять в складну, з'єднують паралельно за допомогою щіток. Крок по колектору, а, отже, і результуючий крок по якорю:

$$y_k = y = \frac{K \mp m}{p}. \quad (6.7)$$

Перший частковий крок по якоря визначають також, як і для петльової обмотки.

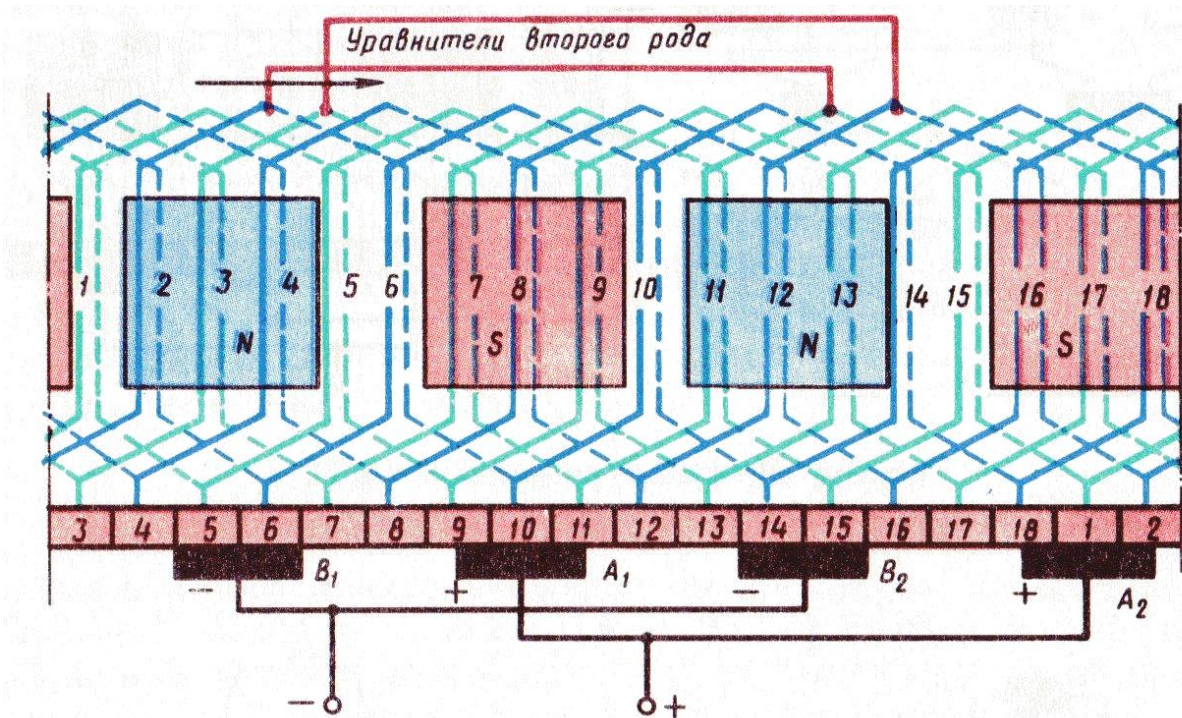


Рисунок 6.18 - Розгорнута схема складної хвильової обмотки

Приклад. Складна хвильова обмотка з $m=2$ складається з 18 секцій. Виконати розгорнуту схему цієї обмотки, якщо $2 \cdot a = 4$.

Рішення Кроки обмотки;

$$y_1 = [Z_s / (2 \cdot p)] \mp \varepsilon = 18 / 4 - 0,5 = 4 \text{ паза};$$

$$y_k = y = (K \mp m) / p = (18 - 2) / 2 = 8 \text{ пазів};$$

$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4 \text{ паза.}$$

Порядок виконання схеми обмотки такий же, як і при складній петльовій обмотці: спочатку укладають в пази якоря одну просту обмотку, що складається з непарних секцій, а потім іншу, що складається з парних секцій. Число паралельних гілок в обмотці $2 \cdot a = 4$.

6.4.5 Умови симетрії обмотки якоря. Обмотку якоря називають симетричною, якщо її паралельні гілки мають однакові електричними

властивостями: мають однакові електричні опори і в них індукуються однакові ЕРС.

У несиметричній обмотці якоря струм якоря розподіляється в паралельних гілках неоднаково, що тягне за собою перевантаження одних гілок і недовантаження інших. В результаті зростають електричні втрати в обмотці якоря, а корисна потужність машини зменшується.

Обмотка якоря стає симетричною лише при дотриманні певних умов, які називаються умовами симетрії.

Перша умова. Кожна пара паралельних гілок обмотки повинна складатися з однакової кількості секцій, тобто відношення числа секцій S до числа пар паралельних гілок обмотки дорівнює цілому числу (ц.ч.):

$$\frac{S}{a} = \text{ц.ч.} \quad (6.8)$$

Неважко переконатися, що при недотриманні його запровадження електричний опір паралельних гілок, а також їх ЕРС стають неоднаковими. Це призвело б до нерівномірного розподілу струмів в паралельних гілках з усіма небажаними наслідками.

Друга умова. Секції кожної пари паралельних гілок повинні займати на якорі однакове число пазів:

$$\frac{Z}{a} = \text{ц.ч.} \quad (6.9)$$

Третя умова. Кожна пара паралельних гілок обмотки повинна займати однакове положення щодо системи головних полюсів, що здійснимо при:

$$\frac{2 \cdot p}{a} = \text{ц.ч.} \quad (6.10)$$

Для складної петльової обмотки $2 \cdot a = 2 \cdot p \cdot m$. Підставивши цей вираз в попереднє рівняння, отримаємо:

$$\frac{2 \cdot p}{a} = \frac{2 \cdot p}{p \cdot m} = \frac{2}{m} = \text{ц.ч.} \quad (6.11)$$

Звідси випливає, що складна петльова обмотка буде симетричною тільки при $m = 2$.

6.4.6 Зрівняльні з'єднання. Навіть при дотриманні всіх умов симетрії обмоток ЕРС паралельних гілок обмотки якоря в багатополюсних машинах можуть виявитися неоднаковими. Причина цього - *магнітна несиметрія*, через неї магнітні потоки однойменних полюсів будуть неоднаковими. Відбувається це через дефекти, що виникають при виготовленні машини: наявності раковин в литві станини, неякісного складання полюсів, неправильної центрування якоря, тобто його перекося, через що повітряний зазор під полюсами стає неоднаковим.

Вплив магнітної несиметрії на роботу машини залежить від типу обмотки якоря. У хвильових обмотках секції кожної паралельної гілки рівномірно розподілені під усіма полюсами машини, тому магнітна несиметрія не тягне за собою нерівності ЕРС в паралельних гілках, тому що вона однаково впливає на всі паралельні гілки обмотки.

У петльових обмотках якоря секції, що утворюють паралельну гілку, розташовані під суміжною парою полюсів. Тому при $2 \cdot p > 2$ магнітна несиметрія стає причиною нерівності ЕРС паралельних гілок, що веде до появи в обмотці якоря зрівняльних струмів.

Для зменшення нерівномірного навантаження щіток в простих петльових обмотках через зрівняльні струми надходять у такий спосіб: точки обмотки якоря, потенціали яких теоретично повинні бути однаковими, електрично з'єднують між собою. У цьому випадку виникають в обмотці зрівняльні струми замикаються всередині обмотки без виходу на щітки.

Зазначені сполуки виконують мідними проводами і називають **зрівняльними з'єднаннями першого роду (зрівнювачами)**. Практично доступними для з'єднання точками рівного потенціалу є кінці секцій, що приєднуються до колекторним пластин, або лобові частини обмотки з боку, зворотного до колектору.

У складних петльових і хвильових обмотках прості обмотки, що утворюють складну, з'єднані паралельно через щітковий контакт. Але забезпечити однаковий контакт щіток з усіма простими обмотками практично неможливо, тому струм між простими обмотками розподіляється неоднаково, що порушує рівномірний розподіл потенціалу по колектору і може викликати на ньому іскріння. Для усунення цього небажаного явища застосовують **зрівняльні з'єднання (зрівнювачі) другого роду**, за допомогою яких прості обмотки, що входять в складну, електрично з'єднують між собою в точках рівного потенціалу.

Таким чином, якщо зрівнювачі першого роду усувають небажані наслідки магнітної несиметрії, то зрівнювачі другого роду усувають нерівномірність в розподілі потенціалу по колектору при складних обмотках якоря.

6.4.7 Комбінована обмотка. Комбінована (жаб'яча) обмотка являє собою поєднання петльової і хвильової обмоток, розташованих в одних пазах і приєднаних до загального колектору. Через те, що кожна зі складових обмоток двошарова, то комбіновану обмотку укладають в пазах якоря в чотири шари, а до кожної пластини колектора припадають по чотири провідника.

Перевага комбінованої обмотки - велике число паралельних гілок при відсутності зрівняльних з'єднань. Однак деяка технологічна складність у виконанні комбінованих обмоток обмежує їх застосування. Вони використовуються в машинах постійного струму великої потужності і в швидкохідних машинах.

Застосування обмоток

6. Проста петльова.

В. Машини середньої потужності 50...500 κBm ; нормальної напруги 110...220 В.

Машини великої потужності понад 500 κBm підвищеної напруги 440...600 В.

7. *Складна петльова.*

Машини малої потужності до 50 κBm вельми низької напруги 6... 12 В.

Машини великої потужності понад 500 κBm зниженої і низької напруги 24... 80 В.

8. *Проста хвильова.*

Машини малої потужності до 50 κBm ; нормального напруги 110... 220 В.

Машини середньої потужності 50...500 κBm ; підвищеної і високої напруги 440...600...1000 В.

9. *Складна хвильова.*

В. Машини середньої потужності 50...500 κBm ; підвищеної напруги 440...600 В.

10. *Спеціальні.*

Машини великої потужності понад 500 κBm .

6.5 Електрорушійна сила і електромагнітний момент машини постійного струму

6.5.1 Електрорушійна сила.

Вона наводиться в обмотці якоря при його обертанні основним магнітним потоком. Для отримання виразу цього потоку до графіку розподілу індукції в зазорі машини (в поперечному перерізі), який при рівномірному зазорі в межах кожного полюса має вигляд криволінійної трапеції (рис. 6.19, а, графік 1).

Замінімо дійсний розподіл індукції в зазорі прямокутником (графік 2), при цьому висоту прямокутника приймемо рівною максимальному значенню індукції B_δ , а ширину b_i що дорівнює величині, при якій площа прямокутника дорівнює площі, обмеженій криволінійною трапецією. Величина b_i називається *розрахунковою полюсною дугою*.

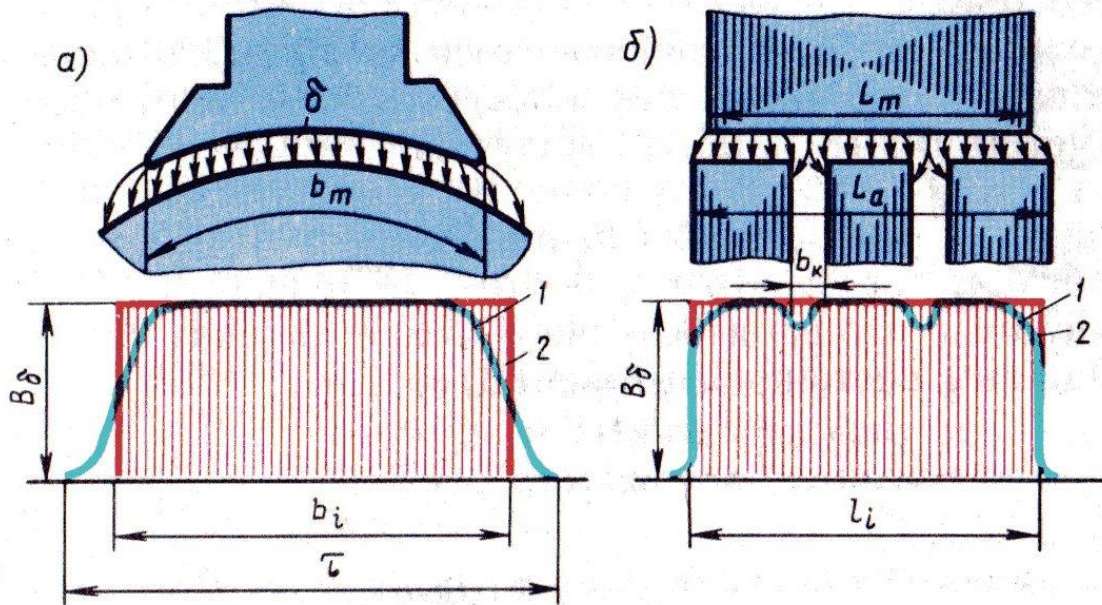


Рисунок 6.19 - Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини постійного струму

У машинах постійного струму розрахункова полюсна дуга b_i мало відрізняється від полюсної дуги b_m .

$$b_i \approx b_m + 2 \cdot \delta, \quad (6.12)$$

або скориставшись коефіцієнтом полюсного перекриття $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau}$, отримаємо $b_i = \alpha_i \cdot \tau$.

Тоді основний магнітний потік:

$$\Phi = B_\delta \cdot b_i \cdot l_i = B_\delta \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot \tau, \quad (6.13)$$

де τ – полюсний поділ; l_i – розрахункова довжина якоря.

Коефіцієнт полюсного перекриття α_i має великий вплив на властивості машини постійного струму. На перший погляд здається доцільним вибрати найбільше значення α_i , через те що це сприяє збільшенню магнітного потоку Φ а, отже, і збільшенню потужності машини (при заданих розмірах). Проте занадто велике його значення призведе до зближення полюсних наконечників суміжних полюсів, що сприятиме зростанню магнітного потоку розсіювання і несприятливо позначиться на інших властивостях машини.

Зазвичай $\alpha_i = 0.6 - 0.8$, при цьому менші значення α_i відповідають машинам малої потужності.

На рис. 6.19, б показаний поздовжній розріз головного полюса і якоря з радіальними вентиляційними каналами. Графік розподілу магнітної індукції в

повітряному зазорі по поздовжньому розрізу машини має вигляд зубчастої кривої (крива 1). Замінімо цю криву прямокутником висотою B_δ і основою l_i , величина якого така, що площа прямокутника дорівнює площі, обмеженій зубчастою кривою. Ця основа l_i являє собою **розрахункову довжину якоря**:

$$l_i = 0.5 \cdot (l_m + l), \quad (6.14) \quad (6.15)$$

де l_m – довжина полюса;

$l = l_a - n_k \cdot b_k$ – довжина якоря без радіальних вентиляційних каналів;

l_a – загальна довжина якоря, включаючи вентиляційні канали;

b_k – ширина вентиляційного каналу (зазвичай 10 мм).

При виведенні формули ЕРС будемо виходити з прямокутного закону розподілу індукції в зазорі, при цьому магнітна індукція на ділянці розрахункової полюсної дуги $b_i = \alpha_i \cdot \tau$ дорівнює B_δ , а за її межами дорівнює нулю і в провідниках, розташованих за межами b_i , ЕРС не наводиться. Це еквівалентно зменшенню загального числа пазових провідників в обмотці якоря до значення $N_i = \alpha_i \cdot N$.

Виходячи з цього та враховуючи, що ЕРС обмотки визначається сумою ЕРС секцій, що входять лише в одну паралельну гілку з числом пазових провідників $\frac{N}{2 \cdot a}$, запишемо:

$$E_a = E_{\text{пр}} \cdot \frac{N}{2 \cdot a} \cdot \alpha_i, \quad (6.16)$$

де $E_{\text{пр}} = B_\delta \cdot l_i \cdot v$ – ЕРС одного провідника обмотки якоря, l_i активна довжина провідника, v – лінійна швидкість переміщення провідника в магнітному полі.

Лінійну швидкість v висловимо через окружну швидкість обертового якоря n (об/хв):

$$v = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot p \cdot \tau \cdot n}{60}. \quad (6.17)$$

Тоді

$$E_a = B_\delta \cdot l_i \cdot \tau \cdot \alpha_i \cdot \frac{2 \cdot p \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{2 \cdot a}, \quad (6.18)$$

або, враховуючи, що добуток $B_\delta \cdot l_i \cdot \tau \cdot \alpha_i = \Phi$, отримаємо вираз ЕДС машини постійного струму:

$$E_a = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n = c_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (6.19)$$

де $c_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$ – стала для даної машини величина;

Φ – основний магнітний потік (Вб); n – швидкість обертання якоря (об/хв).

На ЕРС машини впливає стан щіток: при знаходженні щіток на геометричній нейтралі ЕРС найбільша, через те що в цьому випадку в кожній паралельній гілці обмотки всі секції мають однаковий напрямок ЕРС; якщо ж щітки змістити з нейтралі, то в паралельних гілках виявляться секції з протилежним напрямком ЕРС, в результаті ЕРС обмотки якоря буде зменшена.

При досить великому числі колекторних пластин зменшення ЕРС машини при зсуві щіток з нейтралі враховується множителем $\cos \beta$

$$E_a = c_e \cdot \Phi \cdot n \cdot \cos \beta, \quad (6.20)$$

де β – кут зсуву осі щіток відносно нейтралі.

6.5.2 Електромагнітний момент

При проходженні по пазовим провідникам обмотки якоря струму i_a на кожен з провідників з боку магнітного поля впливає електромагнітна сила

$$F_{эм} = B_\delta \cdot l_i \cdot i_a. \quad (6.21)$$

Сукупність усіх електромагнітних сил $F_{эм}$ на якорі, які діють на плече, що дорівнює радіусу сердечника якоря $D_a / 2$ створює на якорі електромагнітний момент M

Виходячи з прямокутного закону розподілу магнітної індукції в зазорі, слід вважати, що сила $F_{эм}$ одночасно діє на число пазових провідників $N_i = \alpha_i \cdot N$

Отже, електромагнітний момент машини постійного струму:

$$M = F_{эм} \cdot \alpha_i \cdot N \cdot \frac{D_a}{2}. \quad (6.22)$$

Враховуючи що $F_{эм} = B_\delta \cdot l_i \cdot i_a$ і струм паралельної гілки $i_a = \frac{I_a}{2 \cdot a}$, отримаємо:

$$M = B_{\delta} \cdot l_i \cdot \frac{I_a}{2 \cdot a} \cdot \alpha_i \cdot N \cdot \frac{D_a}{2}, \quad (6.23)$$

де I_a – струм якоря.

Використовуючи вираз основного магнітного потоку

$$\Phi = B_{\delta} \cdot b_i \cdot l_i = B_{\delta} \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot \tau, \quad (6.24)$$

а також маючи на увазі, що

$$D_a = 2 \cdot p \cdot \tau / \pi, \quad (6.25)$$

отримаємо вираз електромагнітного моменту:

$$M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (6.26)$$

де $C_M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$ – величина, стала для даної машини.

Електромагнітний момент машини при її роботі в руховому режимі є обертовим, а при генераторному режимі - гальмівним по відношенню до обертального моменту приводного двигуна.

Підставивши вираз основного магнітного потоку $\Phi = \frac{E_a}{C_e \cdot n}$ ($C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$) в формулу моменту, отримаємо ще один вираз електромагнітного моменту:

$$M = \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot E_a \cdot I_a = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эм}}}{n} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega}, \quad (6.27)$$

де $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$ – частота обертання якоря (рад/сек);

$P_{\text{эм}} = E_a \cdot I_a$ – електромагнітна потужність машини постійного струму.

З останньої формули моменту виходить, що у машинах однакової потужності електромагнітний момент більше у машини з меншою частотою обертання якоря.

6.6 Способи збудження машин постійного струму

Для роботи електричної машини необхідна наявність магнітного поля. У більшості машин постійного струму це поле створюється обмоткою збудження, що живиться постійним струмом. Властивості машин постійного струму в значній

мірі визначаються способом включення обмотки збудження, тобто способом збудження.

За способами збудження машин постійного струму можна класифікувати наступним чином:

машини незалежного збудження, в яких обмотка збудження (ОВ) живиться постійним струмом від джерела, електрично пов'язаного з обмоткою якоря (рис. 6.20,а);

машини паралельного збудження, в яких обмотка збудження і обмотка якоря з'єднані паралельно (рис. 6.20,б);

машини послідовного збудження, в яких обмотка збудження і обмотка якоря з'єднані послідовно (рис. 6.20,в);

машини змішаного збудження, в яких дві обмотки збудження - паралельна ОВ1 і послідовна ОВ2 (рис. 6.20,г);

машини зі збудження постійними магнітами (рис. 6.20,д).

Всі зазначені машини (крім останніх) відносяться до машин з електромагнітним збудженням, так як магнітне поле в них створюється електричним струмом, що проходить по обмотці збудження.

Початки і кінці обмоток машин постійного струму згідно стандарту позначаються так:

обмотка якоря - Я1 и Я2;

обмотка додаткових полюсів - Д1 і Д2;

компенсаційна обмотка - К1 і К2;

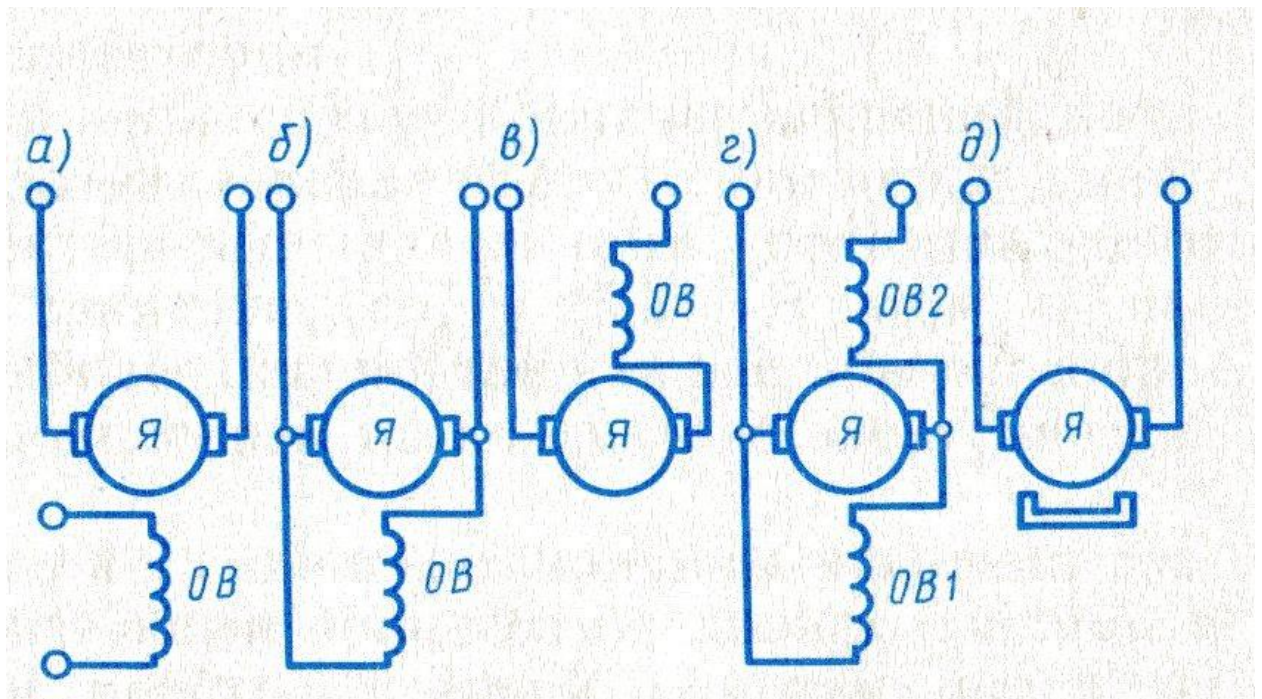


Рисунок 6.20 Способи збудження машин постійного

обмотка збудження незалежна - М1 і М2;

обмотка збудження паралельна (шунтова) - Ш1 і Ш2;
обмотка збудження послідовна (серієсна) - С1 і С2.

Література:

[2],[1],[5]

ТЕМА 7

МАГНІТНЕ ПОЛЕ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

7.1 Магнітне коло машини постійного струму

7.2 Реакція якоря машини постійного струму

7.3 Усунення шкідливого впливу реакції якоря

7.1 Магнітне коло машини постійного струму

Магнітна система машини постійного струму складається зі станини (ярма), сердечників головних полюсів з полюсними наконечниками, повітряного зазору і сердечника якоря.

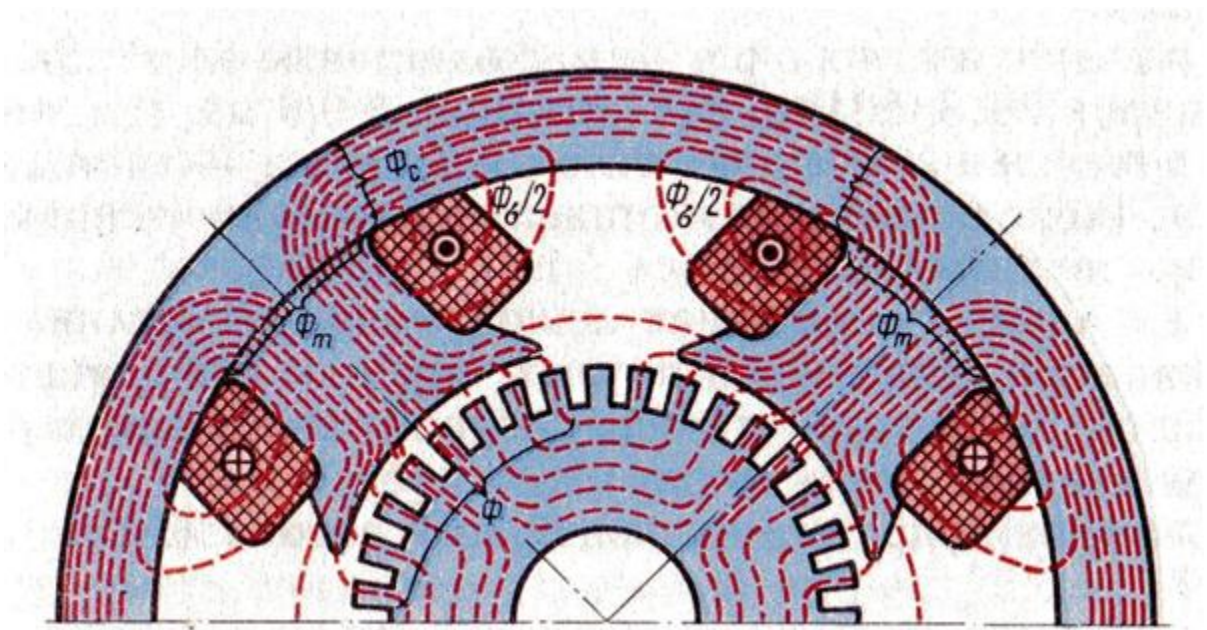


Рисунок 7.1 - Магнітне поле машини постійного струму в режимі ХХ

На рис. 7.1 показана картина магнітного поля чотириполюсної машини. При цьому мається на увазі машина, яка працює в режимі холостого ходу, коли МРС створюється лише обмоткою збудження, а в обмотці якоря і в обмотці додаткових полюсів струму немає або він настільки малий, що його впливом на картину магнітного поля машини можна знехтувати. З метою спрощення на малюнку не показані додаткові полюси, через те що в режимі холостого ходу їх вплив на картину магнітного поля незначно.

Як це впливає з малюнка, магнітний потік головних полюсів Φ_m складається з двох нерівних частин: велика частина утворює основний магнітний потік Φ , а менша Φ_c – магнітний потік розсіювання полюсів. Потік розсіювання враховується коефіцієнтом розсіювання σ_m .

Магніторухійна сила обмотки збудження на пару полюсів в режимі холостого ходу визначається сумою магнітних напруг на ділянках магнітного кола (рис. 7.2):

$$F_{\text{возб}} = \Sigma F = 2 \cdot F_{\delta} + 2 \cdot F_z + 2 \cdot F_m + F_a + F_{\text{я}}, \quad (7.1)$$

де F_{δ} , F_z , F_m , F_a , $F_{\text{я}}$ - магнітні напруження повітряного зазору, зубцевого шару якоря, головного полюса, спинки якоря, станини (ярма) відповідно.

Якщо машина має компенсаційну обмотку, то в рівняння слід ввести ще один доданок, що представляє собою магнітне напруження зубцевого шару головного полюсу.

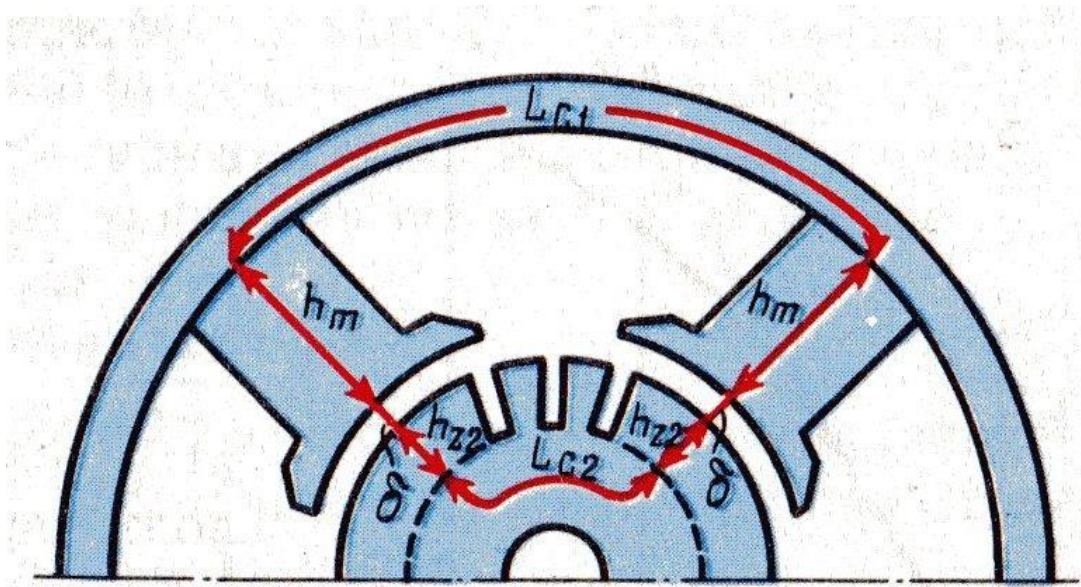


Рисунок 7.2 Розрахункова ділянка магнітного кола чотирьохполюсної машини постійного струму

Порядок розрахунку магнітних напружень на ділянках магнітного кола машини постійного струму в принципі такий же, що і в разі асинхронної машини. При цьому розрахунок магнітних напружень станини і осердя головного полюса ведуть по магнітному потоку головного полюса Φ_m який більше основного потоку Φ на значення потоку розсіювання Φ_{σ} :

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma} = \Phi \cdot (1 + \sigma_m), \quad (7.2)$$

де $\sigma_m \approx \frac{10 \cdot \delta}{\tau} = 0.1 \div 0.25$ - коефіцієнт розсіювання.

При заданому значенні ЕРС машини E_a визначають необхідне значення основного магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{60 \cdot a \cdot E_a}{p \cdot N \cdot n} \quad (7.3)$$

Далі розраховують магнітну індукцію B_x для кожної ділянки магнітного кола:

$$B_x = \frac{\Phi_x}{S_x} \quad (7.4)$$

де Φ_x – магнітний потік на даній ділянці магнітного кола;

S_x – площа поперечного перерізу цієї ділянки.

За таблицями або кривими намагнічування для відповідних феромагнітних матеріалів знаходять напруженість магнітного поля на ділянках магнітного кола H_x , а потім визначають магнітне напруження ділянок:

$$F_x = H_x \cdot l_x \quad (7.5)$$

і МРС обмотки збудження на пару полюсів.

Значення магнітних напружень для різних ділянок магнітного кола неоднакові і залежать від магнітних опорів цих ділянок. Найбільшим магнітним опором володіє повітряний зазор, тому магнітне напруження F_δ набагато більше будь-якого з доданків для $F_{\text{возб}}$.

Інші ділянки магнітного кола виконують з феромагнітних матеріалів. У машинах постійного струму для виготовлення різних елементів магнітного кола застосовують такі матеріали.

Сердечник якоря - тонколистові електротехнічні сталі марок 2013, 2312 і 2411 товщиною 0,5 мм.

Сердечник головного полюса - листова анізотропна (холоднокатана) сталь марки 3411 товщиною 1 мм, пластини не ізолюють.

Станина - в машинах малої потужності станину виготовляють зі сталевих суцільнотягнутих труб, а для машин середньої та великої потужності станини роблять звареними з листової конструкційної сталі марки Ст3.

Магнітне напруження повітряного зазору:

$$F_\delta = 0,8 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta,$$

де δ – величина повітряного зазору; k_δ – коефіцієнт повітряного зазору, що враховує збільшення магнітного опору через зубчастості якоря ($k_\delta > 1$).

Магнітна індукція в повітряному зазорі B_δ . Пропорційна основному магнітному потоку Φ . У машинах постійного струму загального призначення

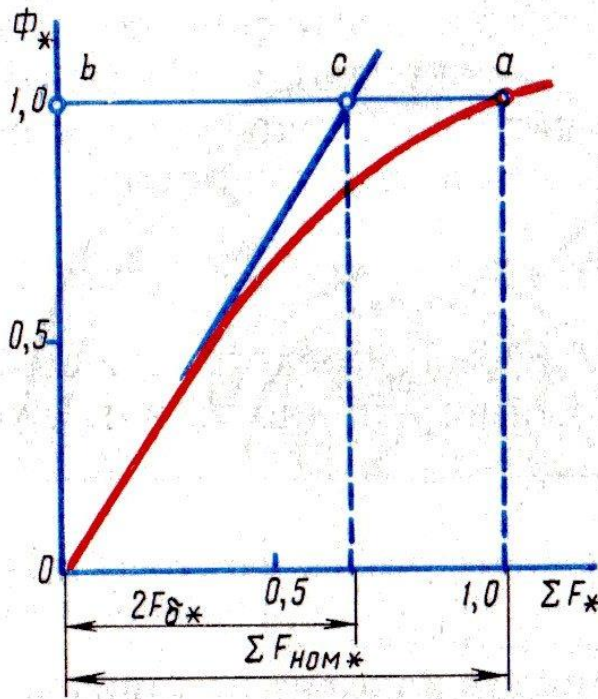


Рисунок 7.3 – Магнітна характеристика МПС

значення МРС обмотки збудження на пару полюсів в режимі холостого ходу;

$\Phi_{ном}$, $\Sigma F_{ном}$ – номінальні значення магнітного потоку і МРС в режимі холостого ходу, що відповідають номінальному значенню ЕРС E_o .

У початковій частині магнітна характеристика прямолінійна (рис. 7.3). Пояснюється це тим, що при невеликих значеннях ΣF магнітне коло ненасичене і МРС збудження визначається, в основному, магнітним напруженням повітряного зазору $\Sigma F \approx 2 \cdot F_{\delta}$.

Потім зі зростанням ΣF настає насичення магнітного кола і магнітна характеристика стає криволінійною. Коефіцієнт насичення магнітного кола машини:

$$k_{\mu} = \frac{\Sigma F_{ном*}}{2 \cdot F_{\delta*}} = \frac{ba}{bc} = \frac{1}{2 \cdot F_{\delta*}}. \quad (7.7)$$

Для машини постійного струму $k_{\mu} = 1.2 \div 1.7$.

7.2 Реакція якоря машини постійного струму

При роботі машини в режимі холостого ходу струм в обмотці якоря практично відсутній, а тому в машині діє лише МРС обмотки збудження $F_{возб}$.

$B_{\delta} = 0.6 \div 1.0$ Тл (великі значення B_{δ} відповідають більш великим машинам).

Зазвичай розрахунок МРС ΣF ведуть для ряду значень магнітного потоку ($0.5 \cdot \Phi_{ном}$, $0.75 \cdot \Phi_{ном}$, $\Phi_{ном}$, и $1.2 \cdot \Phi_{ном}$), а потім будують магнітну характеристику машини:

$$\Phi_* = f(\Sigma F_*), \quad (7.6)$$

де $\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_{ном}}$ – відносне значення магнітного потоку;

$$\Sigma F_* = \frac{\Sigma F}{\Sigma F_{ном}} \quad - \quad \text{відносне}$$

Магнітне поле машини в цьому випадку симетрично відносно осі полюсів (рис. 7.4). Графік розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку є кривою, близька до трапеції.

Якщо ж машину навантажити, то в обмотці якоря з'явиться струм, який створить в магнітній системі машини МРС якоря F_a . Припустимо, що МРС збудження дорівнює нулю і в машині діє лише МРС якоря. Тоді магнітне поле, створене цієї МРС, матиме вигляд, представлений на рис. 7.5. З цього малюнка видно, що магнітний потік обмотки якоря спрямований по лінії щіток (в даному випадку по геометричній нейтралі $n - n'$).

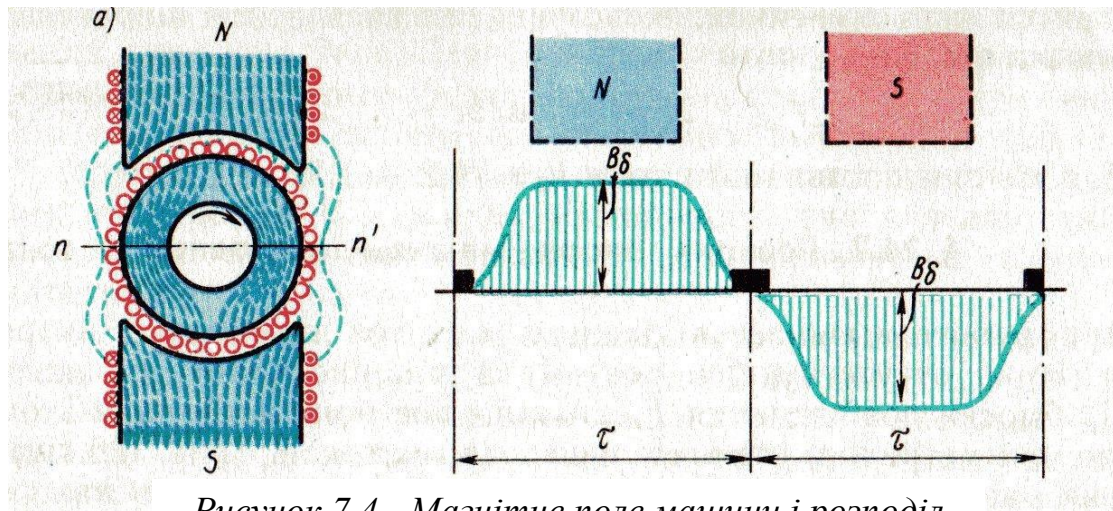


Рисунок 7.4 - Магнітне поле машини і розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі

Незважаючи на те, що якір обертається, просторове положення МРС і магнітного потоку обмотки якоря залишається незмінним, через те що їх напрямок визначається положенням щіток.

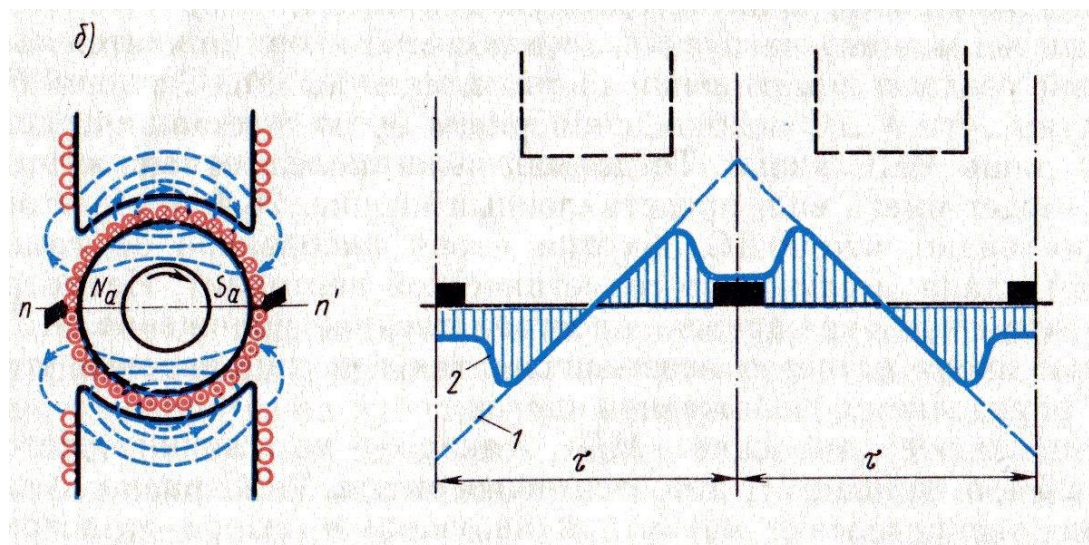


Рисунок 7.5 - Магнітне поле якоря і розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі при навантаженні

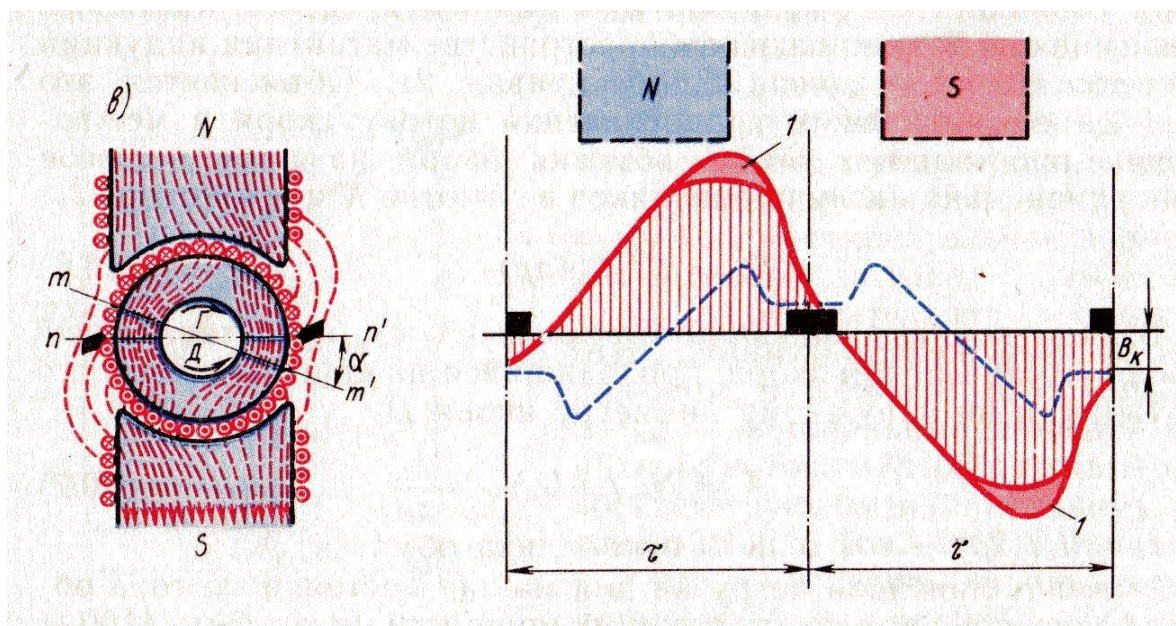


Рисунок 7.6 - Результуюче магнітне поле машини і розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі при навантаженні

Вплив МРС обмотки якоря на магнітне поле машини називають **реакцією якоря**. Реакція якоря спотворює магнітне поле машини, робить його несиметричним відносно осі полюсів (рис. 7.6).

Найбільше значення МРС якоря - на лінії щіток (рис. 7.5, крива 1), а по осі полюсів ця МРС дорівнює нулю. Однак розподіл магнітної індукції в зазорі від потоку якоря збігається з графіком МРС лише в межах полюсних наконечників. У міжполюсному просторі магнітна індукція різко послаблюється (рис. 7.5, крива 2). Пояснюється це збільшенням магнітного опору потоку якоря в міжполюсному просторі. МРС обмотки якоря на пару полюсів пропорційна числу провідників в обмотці N і току якоря I_a :

$$F_a = \frac{N \cdot I_a}{4 \cdot a \cdot p}. \quad (7.8)$$

Введемо поняття **лінійного навантаження** ($A/м$), що представляє собою сумарний струм якоря, що припадає на одиницю довжину її кола по зовнішньому діаметру якоря D_a :

$$A = \frac{N \cdot i_a}{\pi \cdot D_a} \quad (7.9)$$

де $i_a = \frac{I_a}{2 \cdot a}$ – струм одного провідника обмотки.

Значення лінійного навантаження для машин постійного струму загального призначення в залежності від їх потужності може досягати величини $(10000 \div 50000) A/м$.

Скориставшись лінійним навантаженням, запишемо вираз для МРС якоря:

$$F_a = A \cdot \tau . \quad (7.10)$$

Таким чином, в навантаженій машині постійного струму діють дві МРС: збудження $F_{\text{возб}}$ і якоря F_a .

Вплив МРС обмотки якоря на магнітне поле машини називають реакцією якоря. Реакція якоря спотворює магнітне поле машини, робить його несиметричним відносно осі полюсів.

На рис. 7.6 показано розподіл магнітних силових ліній результуючого поля машини, що працює в генераторному режимі при обертанні якоря за годинниковою стрілкою. Такий же розподіл магнітних силових ліній відповідає роботі машини в режимі двигуна, але при обертанні якоря проти годинникової стрілки.

Якщо прийняти, що магнітна система машини ненасичена, то реакція якоря буде лише спотворювати результуючий магнітний потік, не змінюючи його значення: край полюсу і розташовану під ним зубцевий шар якоря, де МРС якоря збігається за напрямком з МРС збудження, підмагнічується; інший край полюса і зубцевий шар якоря, де МРС якоря спрямована проти МРС збудження, розмагнічуються.

При цьому результуючий магнітний потік ніби повертається відносно осі головних полюсів на деякий кут, а фізична нейтраль $m - m'$ (лінія, що проходить через точки на якорі, в яких індукція дорівнює нулю) зміщується відносно геометричної нейтралі $n - n'$ на кут α . Чим більше навантаження машини, тим сильніше спотворення результуючого поля, а отже, тим більше кут зсуву фізичної нейтралі. *При роботі машини в режимі генератора фізична нейтраль зміщується у напрямку обертання якоря, а при роботі двигуном - проти обертання якоря.*

Спотворення результуючого поля машини несприятливо відбивається на робочих властивостях машини. По-перше, зрушення фізичної нейтралі відносно геометричної призводить до більш важких умов роботи щіткового контакту і може послужити причиною посилення іскріння на колекторі. По-друге, спотворення результуючого поля машини тягне за собою перерозподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини.

З графіка рис. 7.6 виходить, що магнітна індукція в зазорі машини розподіляється несиметрично відносно осі полюсів, різко збільшуючись під підмагніченими краями полюсів. Це призводить до того, що миттєві значення ЕРС секцій обмотки якоря в моменти потрапляння їх пазових сторін в зони максимальних значень магнітної індукції (під підмагнічені краї полюсних наконечників) різко підвищуються. В результаті зростає напруга між суміжними колекторними пластинами U_k .

При значних навантаженнях машини напруга U_k може перевершити допустимі межі і міканітовaя прокладка між суміжними пластинами буде

перекрита електричною дугою. Наявні на колекторі частки графіту сприятимуть розвитку електричної дуги, що призведе до виникнення потужної електричної дуги, що перекриває весь колектор або значну його частину, - явища надзвичайно небезпечного (круговий вогонь).

Такі наслідки впливу реакції якоря на машину з ненасиченої магнітної системою.

Якщо ж магнітна система машини *насичена*, що має місце в більшості електричних машин, то підмагнічування одного краю полюсного наконечника і розташованого під ним зубцевого шару якоря відбувається в меншій мірі, ніж розмагнічування іншого краю і розташованого під ним зубцевого шару якоря. Це сприятливо позначається на розподілі магнітної індукції в зазорі, яке стає більш рівномірним, через те що максимальне значення індукції під підмагнічуючим краєм полюсного наконечника зменшується на величину, яка визначається висотою ділянки 1 на рис. 7.6.

Однак результуючий магнітний потік машини при цьому зменшується. Таким чином, реакція якоря в машині з насиченою магнітної системою розмагнічує машину (так само як і у синхронній машині при активному навантаженні). В результаті погіршуються робочі властивості машини: у генераторів знижується ЕРС, у двигунів зменшується крутний момент.

Вплив реакції якоря на роботу машини посилюється при *зміщенні щіток з геометричної нейтралі*. Пояснюється це тим, що разом зі щітками зміщується і вектор МРС якоря (рис. 7.7). При цьому МРС якоря F_a крім поперечної складової $F_{aq} = F_a \cdot \cos \beta$ набуває і поздовжню складову $F_{ad} = F_a \cdot \sin \beta$, спрямовану по осі полюсів.

Якщо машина працює в *генераторному режимі*, то при зсуві щіток в напрямку обертання якоря поздовжня складова МРС обмотки якоря F_{ad} діє зустрічно МРС обмотки збудження $F_{\text{возб}}$, що послаблює основний магнітний потік машини; при зміщенні щіток проти обертання якоря поздовжня складова МРС обмотки якоря F_{ad} діє узгоджено з МРС обмотки збудження $F_{\text{возб}}$ ($F_{\text{в.о}}$), що викликає деяке підмагнічування машини і може бути причиною появи іскор на колекторі

Якщо машина працює в *руховому режимі*, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря поздовжня складова МРС обмотки якоря F_{ad} підмагнічує машину, а зсув щіток проти обертання якоря поздовжня складова МРС обмотки якоря розмагнічує машину.

Слід звернути увагу на те, що зміщення щіток з геометричної нейтралі впливає і на поперечну складову МРС якоря - величину, що залежить від кута β , зі зростанням якого вона зменшується ($F_{aq} = F_a \cdot \cos \beta$).

Таким чином, в колекторних машинах можливі два випадки: 1) щітки встановлені на геометричній нейтралі і реакція якоря є тільки поперечною; 2)

щітки зміщені з геометричної нейтралі і реакція якоря має дві складові -

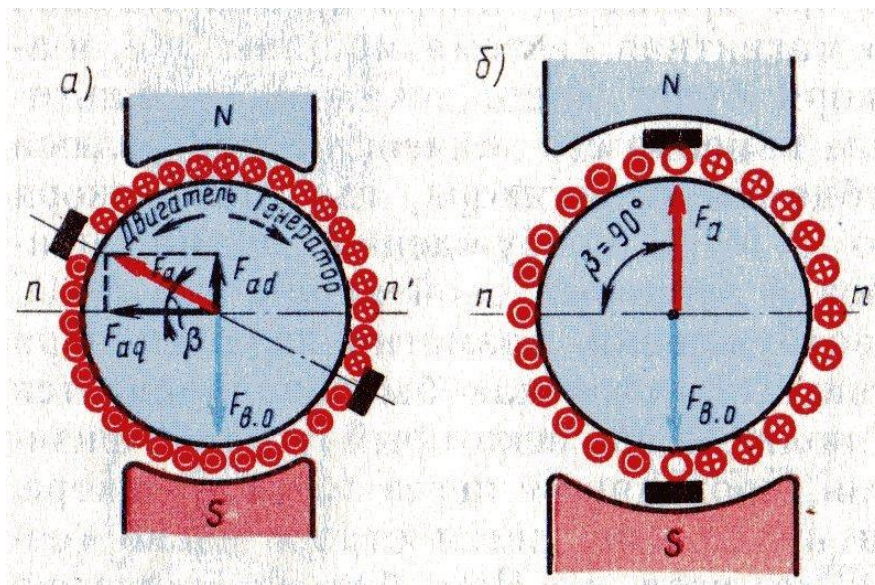


Рисунок 7.7 - Розкладання МРС обмотки якоря на подовжню та поперечну складові

поперечну і подовжню (що розмагнічує).

Загалом також можливий випадок, коли реакція якоря по поперечній осі відсутня. Це має місце, коли щітки розташовані по осі, що перпендикулярна геометричній нейтралі, тобто коли $\beta = 90^\circ$ (рис. 7.7,б).

Однак такий випадок не має практичного застосування, через те що машина стає непрацездатною: в генераторному режимі ЕРС машини дорівнює нулю, через те що в паралельну гілку обмотки входить рівне число секцій із зустрічним напрямком ЕРС, а в руховому режимі електромагнітні сили активних сторін обмотки якоря, що діють ліворуч і праворуч від осі щіток, рівні і протилежно спрямовані, а тому не створюють крутного моменту.

7.3 Усунення шкідливого впливу реакції якоря

У зв'язку з тим, що реакція якоря несприятливо впливає на робочі властивості машини постійного струму, при проектуванні машини вживають заходів для усунення реакції якоря або хоча б до послаблення її впливу до допустимих меж.

Компенсаційна обмотка. Найбільш ефективним засобом зменшення впливу реакції якоря по поперечній осі є застосування в машині компенсаційної обмотки. Цю обмотку укладають в пази полюсних наконечників (див. рис. 7.8) 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 роблять розподіленою по поверхні полюсного наконечника всіх головних полюсів

машини. При цьому лінійне навантаження для компенсаційної обмотки приймають рівним лінійному навантаженню обмотки якоря.

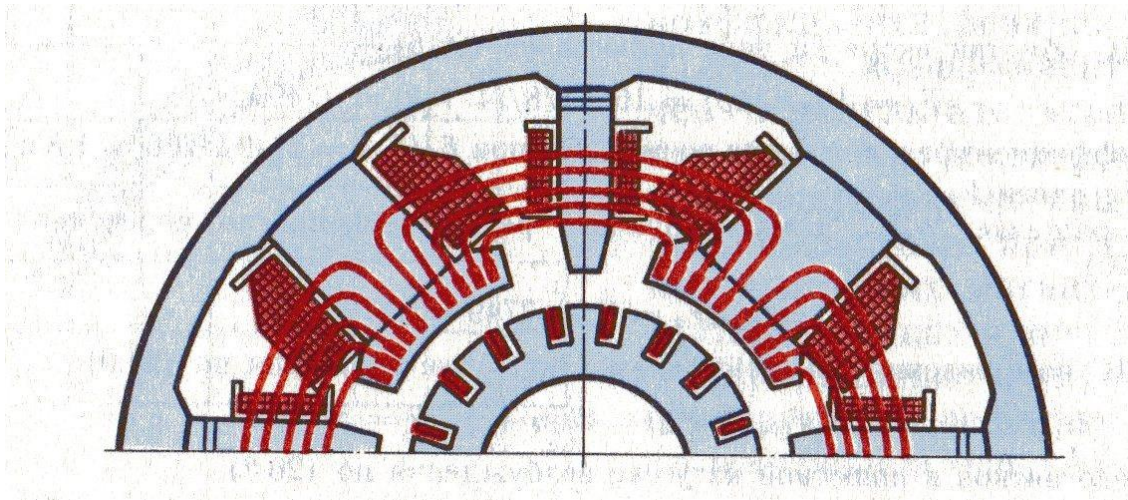


Рисунок 7.8 - Усунення шкідливого впливу реакції якоря: Компенсаційна обмотка. Додаткові полюси. Збільшення повітряного зазору під головними полюсами

Включення компенсаційної обмотки послідовно в коло якоря забезпечує автоматичність компенсації МРС якоря при будь-якому (в межах номінального) навантаженні машини. Таким чином, в машині постійного струму з компенсаційною обмоткою при переході від холостого ходу до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції в зазорі головних полюсів залишається практично незмінним.

Однак в міжполюсному просторі частина МРС якоря залишається некомпенсованою. Небажаний вплив цієї МРС на роботу щіткового контакту усувають застосуванням в машині додаткових полюсів.

Компенсаційні обмотки застосовують лише в машинах середньої і великої потужності (потужність понад $150 \div 500 \text{ кВт}$ при напрузі $U > 400 \text{ В}$), працюючих з різкими коливаннями навантаження, наприклад в двигунах для прокатних станів. Пояснюється це тим, що компенсаційна обмотка здорожує і ускладнює машину і її застосування в деяких машинах економічно невиправдано.

Збільшення повітряного зазору під головними полюсами. У машинах малої і середньої потужності, які не мають компенсаційної обмотки, шкідливий вплив реакції якоря по поперечній осі послаблюють відповідним вибором повітряного зазору під головними полюсами. При цьому слід мати на увазі, що при досить малому повітряному зазорі і значному лінійному навантаженні реакція якоря по поперечній осі може не тільки послабити магнітне поле під однією з частин головного полюса, але і перемагнітити його, тобто змінити полярність - "перекинути поле". Деяке збільшення повітряного зазору під головними полюсами, особливо на їх краях, значно послаблює дію реакції якоря. Однак не слід забувати, що збільшення повітряного зазору веде до необхідності підвищення МРС обмотки головних полюсів, а отже, і до збільшення розмірів полюсних катушок, полюсів і габаритів машини в цілому.

На цьому ж принципі зменшення МРС поперечної реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії заснований і інший спосіб ослаблення дії реакції якоря. Цей спосіб полягає в тому, що сердечники головних полюсів роблять з листової анізотропної (холоднокатаної) сталі (зазвичай застосовують сталь марки 3411). Ця сталь в напрямку прокату має підвищену магнітну проникність, а "поперек прокату" - невеликою магнітною проникністю. Штампувати пластини полюсів з такої сталі слід так, щоб вісь полюса збігалася з напрямком прокату листа сталі.

Література:

[2],[1],[5]

ТЕМА 8

ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

- 8.1 Основні поняття і рівняння генератора постійного струму
- 8.2 Генератор незалежного збудження
- 8.3 Генератор змішаного збудження
- 8.4 Генератор змішаного збудження
- 8.5 Паралельна робота генераторів постійного струму

8.1 Основні поняття і рівняння генератора постійного струму

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

$$U = E_a - I_a \cdot \sum r. \quad (8.1)$$

Тут $\sum r = r_a + r_d + r_{к.о} + r_c + r_{щ}$ – сума опорів всіх ділянок кола якоря: обмотки якоря r_a , обмотки додаткових полюсів r_d , компенсаційної обмотки $r_{к.о}$, послідовної обмотки збудження r_c і перехідного щіткового контакту $r_{щ}$.

При відсутності в машині будь-якої із зазначених обмоток в останнє рівняння не входять відповідні складові.

Якір генератора приводиться в обертання приводним двигуном, який створює на валу генератора обертає M_1 . Якщо генератор працює в режимі ХХ ($I_a = 0$), то для обертання його якоря потрібен порівняно невеликий момент

холостого ходу M_0 . Цей момент обумовлений гальмівними моментами, що виникають в генераторі при його роботі в режимі ХХ: моментами від сил тертя і вихрових струмів в якорі.

При роботі навантаженого генератора в проводах обмотки якоря з'являється струм, який, взаємодіючи з магнітним полем збудження, створює на якорі електромагнітний момент. У генераторі цей момент спрямований зустрічно обертального моменту приводного двигуна ПД (см. рис. 8.1), тобто він є навантажувальним (гальмуючим).

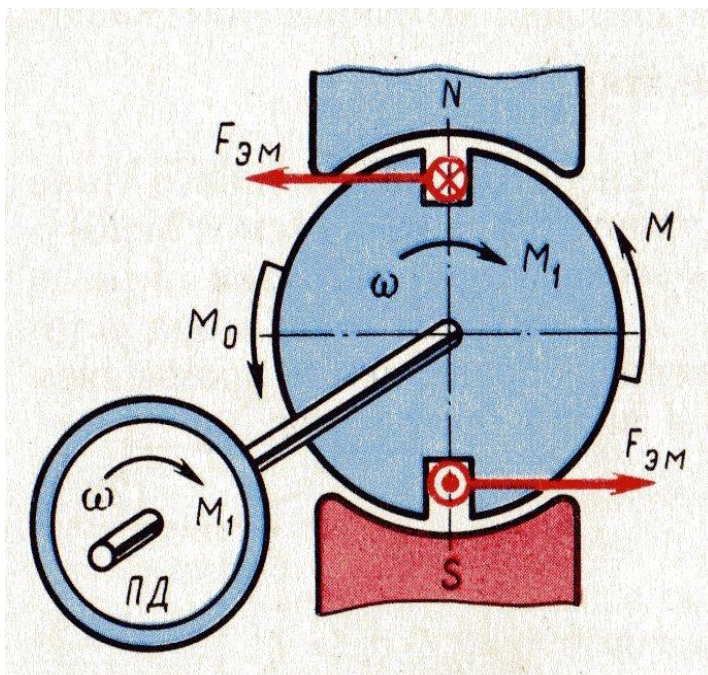


Рисунок 8.1 - Моменти, що діють в генераторі

При незмінній швидкості обертання n крутний момент приводного двигуна M_1 врівноважується сумою протидіючих моментів: моментом ХХ M_0 і електромагнітним моментом M , тобто

$$M_1 = M_0 + M. \quad (8.2)$$

Останній вираз - рівняння моментів для генератора при $n = const$.

Помноживши члени рівняння на кутову швидкість обертання якоря ω отримаємо рівняння потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{\text{ЭМ}}, \quad (8.3)$$

де $P_1 = M_1 \cdot \omega$ – потужність, що підводиться від приводного двигуна до генератора (механічна);

$P_0 = M_0 \cdot \omega$ – потужність ХХ, тобто потужність, що підводиться до генератора в режимі ХХ (при відключеному навантаженні);

$P_{\text{ЭМ}} = M \cdot \omega$ – електромагнітна потужність генератора.

З іншого боку $P_{\text{ЭМ}} = E_a \cdot I_a$

або

$$P_{\text{ЭМ}} = U_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot \sum r = P_2 + P_{\text{ЭЛ}}, \quad (8.4)$$

де $P_2 = U_a \cdot I_a$ – корисна потужність генератора (електрична), тобто потужність, що віддається генератором навантаженню;

$P_{\text{ЭЛ}} = I_a^2 \cdot \sum r$ – потужність втрат на нагрівання обмоток і щіткового контакту в колі якоря.

З огляду на електричні втрати на збудження генератора $P_{\text{ЭВ}}$, отримаємо рівняння потужностей для генератора постійного струму:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{\text{ЭЛ}} + P_{\text{ЭВ}} \quad (8.5)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном P_1 перетвориться в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття втрат $P_0 + P_{\text{ЭЛ}} + P_{\text{ЭВ}}$

Через те, що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їх характеристики розглядають за умови $n = const$. Розглянемо основні характеристики генераторів постійного струму.

Характеристика холостого ходу - залежність напруги на виході генератора в режимі ХХ U_0 від струму збудження I_B

$$U_0(I_B) \text{ при } I_a = 0 \quad \text{и } n = \text{const}.$$

Навантажувальна характеристика- залежність напруги на виході генератора U при роботі з постійним навантаженням від струму збудження I_B

$$U(I_B) \text{ при } I_a = \text{const} \quad \text{и } n = \text{const}.$$

Зовнішня характеристика - залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I_a

$$U(I_a) \text{ при } r_{\text{PT}} = \text{const} \quad \text{и } n = \text{const},$$

де r_{PT} – регулювальний опір в колі обмотки збудження.

Регулювальна характеристика - залежність струму збудження I_B від струму навантаження I_a при постійній напрузі на виході генератора:

$$I_B(I_a) \text{ при } U = \text{const} \quad \text{и } n = \text{const}.$$

Вид перерахованих характеристик визначає робочі властивості генераторів постійного струму.

8.2 Генератор незалежного збудження

Схема включення генератора незалежного збудження показана на рис. 8.2, а. Реостат r_{PT} , включений в коло збудження, дає можливість регулювати струм I_B 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, званого в цьому випадку *збудником*.

8.2.1 Характеристика холостого ходу

При знятті характеристики $U_0(I_B)$ генератор працює в режимі ХХ ($I_a = 0$). Встановивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінною, поступово збільшують струм в обмотці збудження від нульового значення до $+I_B$, при якому напруга ХХ $U_{0.\text{max}} = 1.15 \cdot U_{\text{ном}}$. і отримують дані для побудови кривої 1 (рис. 8.2,б).

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 в колі збудження до $-I_B$.

Отримана таким чином крива 2 називається низхідній гілкою характеристики. У першому квадраті крива 2 розташовується вище кривої 1. Пояснюється це тим, що в процесі зняття кривої 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять в зворотному напрямку, тобто зменшують струм збудження від $-I_B$ до $I_B = 0$, а потім збільшують його до значення $+I_B$. В результаті отримують криву 3, звану висхідній гілкою характеристики ХХ.

Низхідна і висхідна гілки характеристики ХХ утворюють петлю намагнічування. Провівши між кривими 2 і 3 середню лінію 4, отримаємо розрахункову характеристику ХХ.

Прямолінійна частина характеристики ХХ відповідає ненасиченої магнітної системі машини. При подальшому збільшенні струму сталь машини насичується і

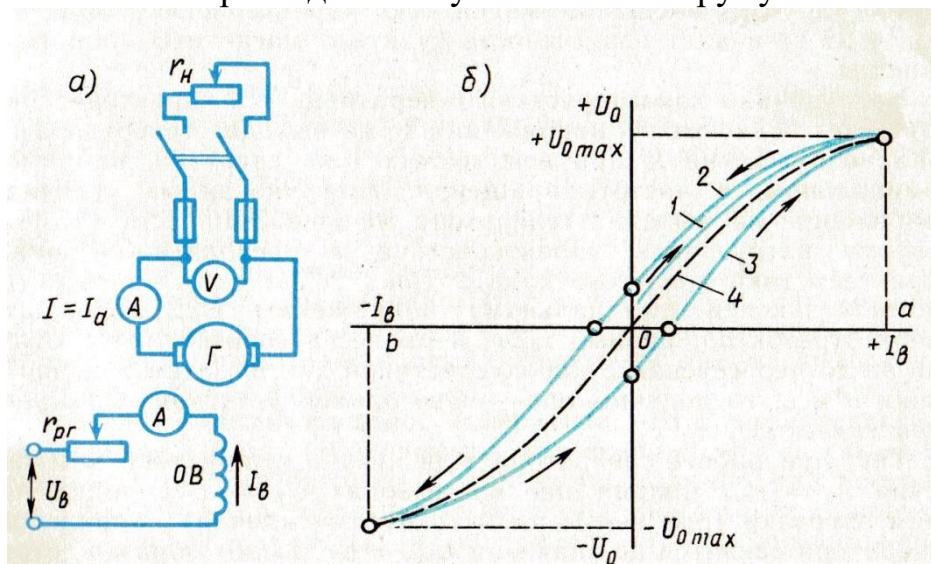


Рисунок 8.2 - Генератор незалежного збудження і його характеристика холостого ходу

характеристика набуває криволінійний характер. залежність $U_0(I_B)$ повторює в іншому масштабі магнітну характеристику машини $B(H)$ і дає можливість судити про магнітні властивості машини.

8.2.2 Навантажувальна характеристика генератора

Ця характеристика виражає залежність напруги на виводах генератора U від струму збудження I_B при незмінних струмі навантаження, наприклад, номінальному, і частоті обертання.

При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика 1 $U(I_B)$ розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (рис. 8.3).

Якщо з точки a , що відповідає номінальній напрузі $U_{\text{НОМ}}$ відкласти вгору відрізок ab , рівний $I_a \cdot \sum r$, і провести горизонтально відрізок bc до перетину з характеристикою ХХ, а потім з'єднати точки a і c , то отримаємо трикутник реактивний (характеристичний) abc .

Так, при роботі генератора в режимі ХХ при струмі збудження $I_{B1} = I_{\text{В.НОМ}}$ напруга на виводах U_0 буде визначатися довжиною відрізка de .

З підключенням навантаження (при постійному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_{\text{НОМ}} \equiv ae$.

Таким чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{\text{НОМ}}$ при $I_{B1} = I_{\text{В.НОМ}}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: падіння напруги в колі якоря $I_a \cdot \sum r$ і

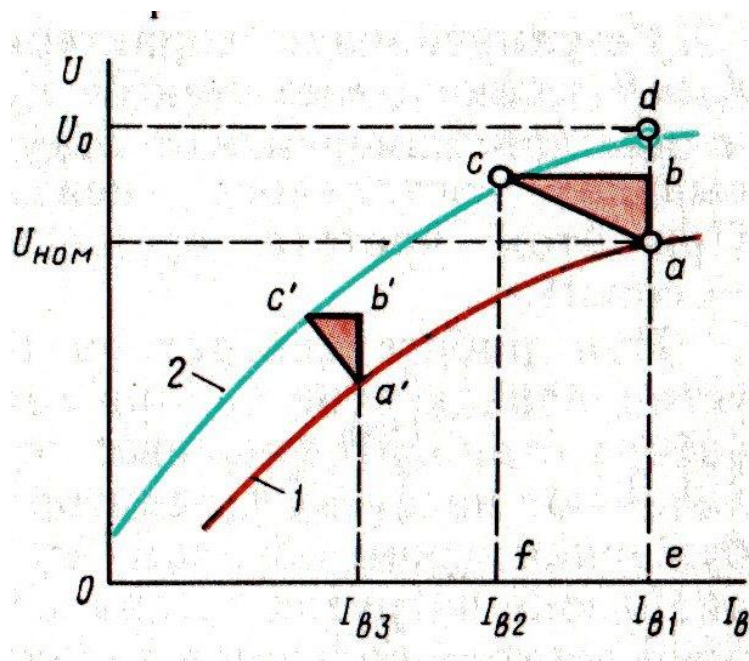


Рисунок 8.3 – Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Отриманий відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; в режимі ХХ для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{B2} < I_{B1}$

Отже, відрізок fe , що дорівнює різниці струмів збудження $I_{B1} - I_{B2}$, є струм збудження, компенсуючий розмагнічуючий вплив реакції якоря.

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, що викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: падіння

розмагнічуючого впливу реакції якоря. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши падіння напруги $I_a \cdot \sum r$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження:

$$E_a = U_{\text{НОМ}} + I_a \cdot \sum r.$$

На малюнку ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж в режимі ХХ ($be < de$), що пояснюється розмагнічувати впливом реакції якоря.

Для кількісної оцінки цього впливу з точки c опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис.

напруги в колі якоря $I_a \cdot \sum r$ визначає катет ab , а струм збудження $I_{B.1} - I_{B.2}$, компенсуючий розмагнічуючу дію реакції якоря, визначає катет bc

$$I_{B.1} - I_{B.2} = \frac{2 \cdot F_{qd} + F_{ad}}{2 \cdot W_B}, \quad (8.6)$$

де F_{qd} й F_{ad} величини МРС, що визначають розмагнічуючу дію реакції якоря по поперечній і поздовжніх осях; W_B число витків в полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$ поконструкційний для іншого значення струму збудження I_{B3} . Сторона трикутника $a'b'$ залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що пояснюється незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' < bc$), так як при меншому струмі збудження зменшилася ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і розмагнічуюча дія реакції якоря.

8.2.3 Зовнішня характеристика генератора

Ця характеристика являє собою залежність напруги U на виводах генератора від струму навантаження I_a (рис. 8.4,а).

При знятті даних для побудови зовнішньої характеристики генератор приводять в обертання з номінальною швидкістю і навантажують його до номінального струму при номінальній напрузі. Потім, поступово зменшуючи навантаження аж до ХХ ($I_a = 0$) знімають показання приладів. Опір кола збудження і швидкість обертання машини протягом досвіду підтримують незмінними ($r_B = const$, $n = const$).

На рис. 8.4, а представлена зовнішня характеристика генератора незалежного збудження, з якої видно, що при збільшенні струму навантаження $I = I_a$ напруга U на виводах генератора знижується; це пояснюється розмагнічувати впливом реакції якоря і падінням напруги в колі якоря.

Нахил зовнішньої характеристики до осі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальним зміною напруги генератора при скиданні навантаження:

$$\Delta U_{НОМ} = \frac{U_0 - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\% \quad (8.7)$$

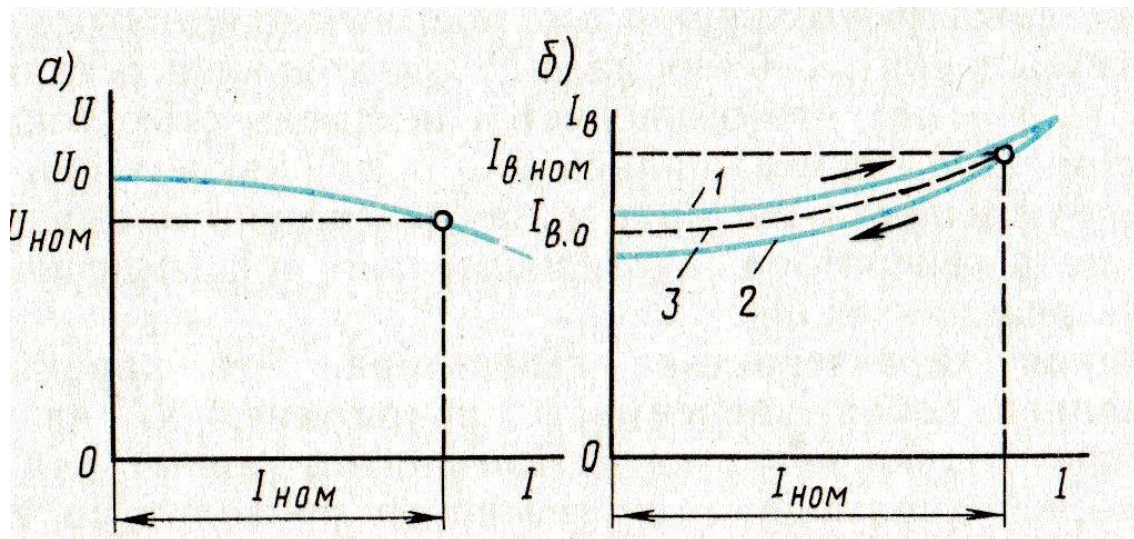


Рисунок 8.4 - Зовнішня (а) і регулювальна (б) характеристики генератора незалежного збудження

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

8.2.4 Регулювальна характеристика генератора

Характеристика $I_{\text{в}}(I_{\text{а}})$ показує, як слід змінювати струм в колі збудження $I_{\text{в}}$, щоб при змінах струму навантаження генератора $I = I_{\text{а}}$ напруга на його виводах залишалася незмінною, рівна номінальній. При цьому частота обертання також зберігається постійною ($U = \text{const}$ и $n = \text{const}$).

При роботі генератора без навантаження в колі збудження встановлюють струм $I_{\text{в.0}}$, при якому напруга на виводах генератора стає рівним номінальному. Потім поступово збільшують навантаження генератора, одночасно підвищують струм збудження таким чином, щоб напруга генератора в усьому діапазоні навантажень залишалася рівним номінальному.

Так отримують висхідну гілку характеристики (крива 1 на рис. 8.4, б). Поступово зменшуючи навантаження генератора до ХХ і регулюючи відповідним чином струм збудження, отримують спадну гілку характеристики (крива 2 на рис. 8.4, б). Низхідна гілка регулювальної характеристики розташована нижче висхідної, що пояснюється впливом зрослого залишкового намагнічування магнітної кола машини в процесі зняття висхідній гілки. Середню криву 3, проведену між висхідній і низхідній гілками, називають практичної регулювальної характеристикою генератора.

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

8.3 Генератор паралельного возбуждения

Принцип самозбудження генератора постійного струму заснований на тому,

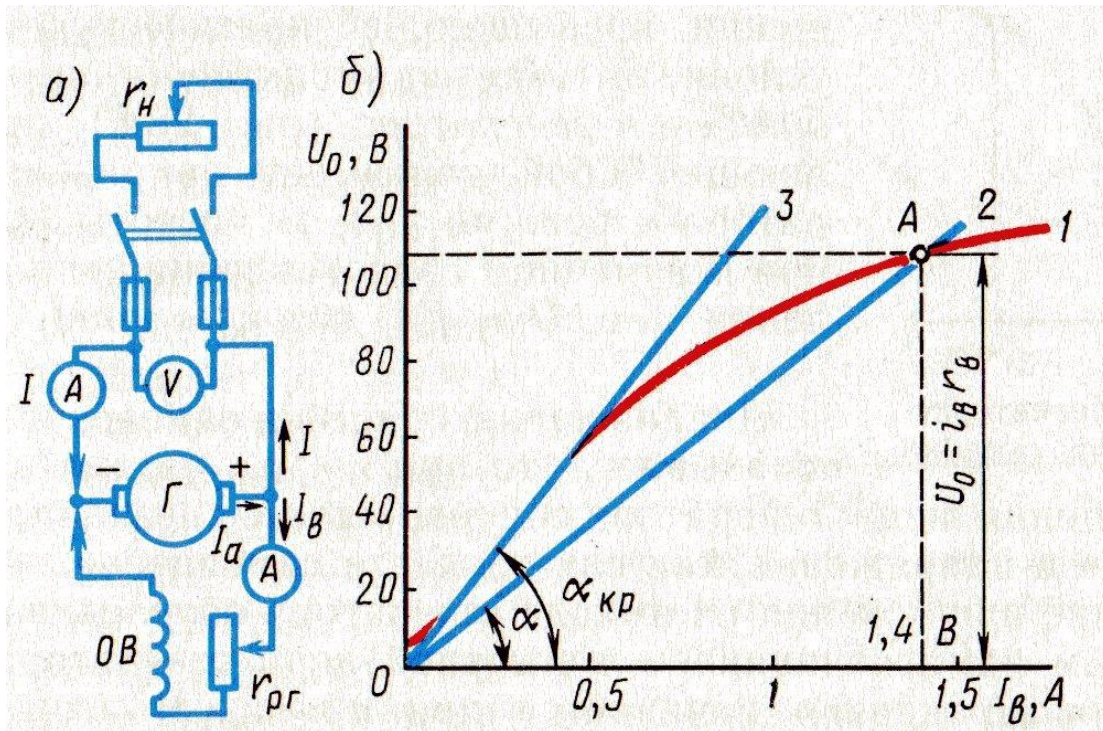


Рисунок 8.5 - Принципова схема (а) і характеристика ХХ (б) генератора паралельного збудження

що магнітна система машини, будучи намагніченою, зберігає тривалий час невеликий магнітний

потік залишкового магнетизму сердечників полюсів і станини $\Phi_{ост}$ (близько 2 - 3% від повного потоку). При обертанні якоря потік $\Phi_{ост}$ індукує в якірній обмотці ЕРС $E_{ост}$, під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм $I_{в.ост}$.

Якщо МРС обмотки збудження $I_{в.ост} \cdot W_B$ має такий же напрямок, як і потік $\Phi_{ост}$, то вона збільшує потік головних полюсів. Це, в свою чергу, викликає збільшення ЕРС генератора, від чого струм збудження знову збільшиться. Так буде тривати до тих пір, поки напруга якоря генератора не буде врівноважена падінням напруги в колі збудження, тобто. $I_B \cdot r_B = U$.

На рис. 8.5, а показана схема включення генератора паралельного збудження, а на рис. 8.5, б представлена характеристика ХХ генератора $U_0 = f(I_B)$ (Крива 1) і залежність падіння напруги від струму збудження $I_B \cdot r_B = f(I_B)$ (Пряма 2). Точка перетину А цих кривих відповідає закінченню процесу самозбудження, так як саме в ній $U_0 = I_B \cdot r_B$.

Кут нахилу прямої OA до осі абсцис визначається з трикутника OAB :

$$\frac{m_U}{m_i} \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_B} = r_B, \quad (8.8)$$

де m_i – масштаб струму (по осі абсцис);

m_U – масштаб напруги (по осі ординат).

З останнього виразу випливає, що кут нахилу прямої $I_B \cdot r_B = f(I_B)$ до осі абсцис прямо пропорційний опору кола збудження. Однак при деякому значенні опору реостата $r_{\text{РГ}}$ опір r_B досягає значення, при якому залежність $I_B \cdot r_B = f(I_B)$ стає дотичною до прямолінійної частини характеристики ХХ (пряма 3).

У цих умовах генератор не самозбуджується. Опір кола збудження, при якому припиняється самозбудження генератора, називається критичним опором

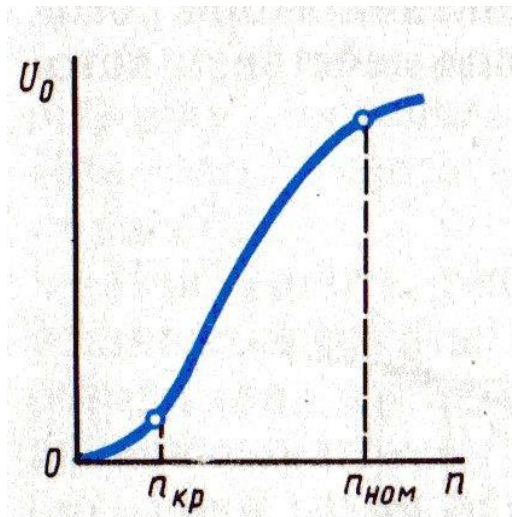


Рисунок 8.6 - Характеристика самозбудження

$r_{B.\text{кр}}$. Слід зазначити, що самозбудження генератора можливо лише при частоті обертання, що перевищує критичну $n_{\text{кр}}$.

Ця умова випливає з характеристики самозбудження генератора (рис. 8.6), що представляє собою залежність напруги генератора в режимі ХХ U_0 від частоти обертання n при незмінному опорі кола збудження, тобто. $U_0 = f(n)$ при $r_B = \text{const}$.

Аналіз характеристики самозбудження показує, що при $n < n_{\text{кр}}$ збільшення частоти обертання якоря генератора супроводжується незначним збільшенням напруги, так як процесу самозбудження немає і поява напруги на виході генератора обумовлено лише залишковим намагнічуванням магнітного кола генератора.

Процес самозбудження починається при $n > n_{\text{кр}}$. У цьому випадку збільшення частоти обертання супроводжується різким зростанням напруги U_0 .

Однак при частоті обертання, близької до номінальної, зростання напруги дещо сповільнюється, що пояснюється магнітним насиченням генератора. Критична частота обертання залежить від опору кола збудження і з ростом останнього збільшується.

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

- а) магнітна система машини повинна мати залишковий магнетизм; $\Phi_{\text{ост}}$

б) приєднання обмотки збудження має бути таким, щоб МРС обмотки збігалася у напрямку з потоком залишкового магнетизму

в) опір кола збудження повинен бути менше критичного;

г) частота обертання якоря повинна бути більше критичної.

Так як генератор паралельного збудження самозбуджується лише в одному напрямку, то і характеристика ХХ цього генератора може бути знята тільки для одного квадранта осей координат.

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

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рис.8.7, крива 1) менш жорстка, ніж у генератора незалежного збудження. Пояснюється це тим, що в генераторі паралельного збудження крім причин, які сприяють зменшенню напруги в генераторі незалежного збудження (реакція якоря і падіння напруги в колі якоря) діє ще і третя причина

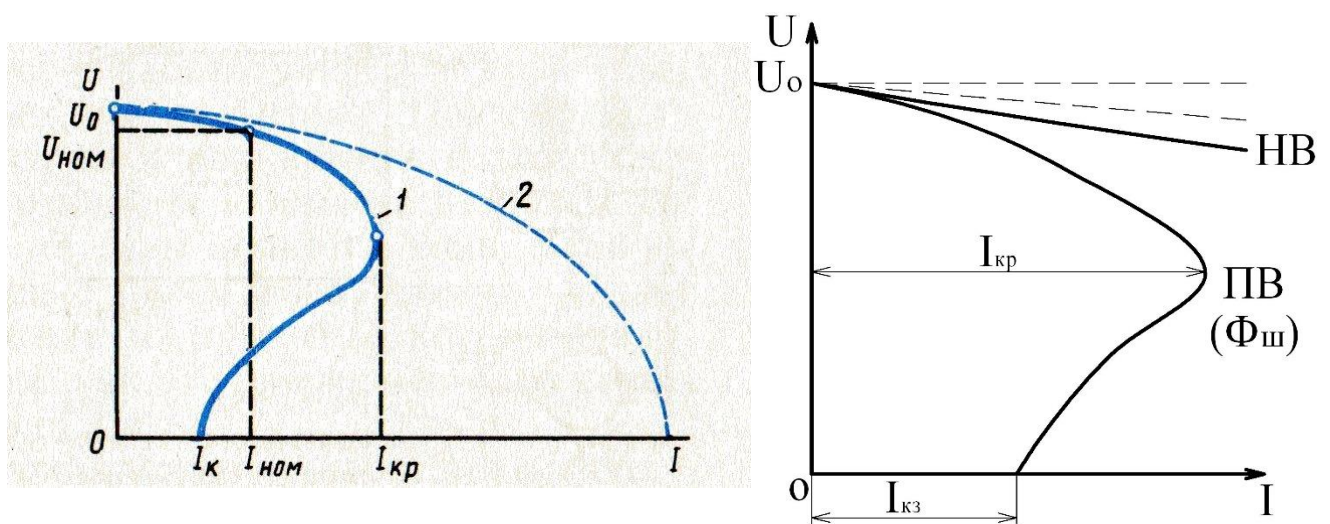


Рисунок 8.7 - Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

- зменшення струму збудження, викликане зниженням напруги від дії перших двох причин.

Цим же пояснюється і те, що при поступовому зменшенні опору навантаження струм збільшується лише до критичної позначки $I_{кр}$, а потім при подальшому зменшенні опору навантаження струм починає зменшуватися до значення струму короткого замикання ($I_{к} < I_{кр}$).

Справа в тому, що зі збільшенням струму навантаження посилюється 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. Так як

струм визначається напругою на виводах генератора U і опором навантаження r_n , тобто.

$$I = \frac{U}{r_n},$$

то при токах навантаження $I < I_{кр}$ коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж зменшується опір навантаження, відбувається зростання струму навантаження.

Після того як $I = I_{кр}$ подальше зменшення r_n супроводжується зменшенням струму навантаження, так як в цьому випадку напруга U убуває швидше, ніж зменшується опір навантаження.

Таким чином, коротке замикання, викликане поступовим зменшенням опору навантаження, не є небезпечним для генератора паралельного збудження. Але при раптовому КЗ магнітна система генератора не встигає розмагнітитися і ток I_k досягає небезпечних для машини значень $I_k = (8 \div 12) \cdot I_{ном}$ (рис. 8.7, крива 2).

При такому різкому зростанні струму навантаження на валу генератора виникає значний гальмуючий момент, а на колекторі з'являється сильне іскріння, що переходить в круговий вогонь. Тому необхідно захищати генератор від перевантаження і КЗ за допомогою плавких запобіжників або ж застосуванням релейного захисту.

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

8.4 Генератор змішаного збудження

Генератор змішаного збудження (рис. 8.8) має паралельну і послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється в основному паралельною обмоткою. Послідовна обмотка зазвичай включається згідно із паралельною (щоб МРС обмоток склалися), що забезпечує отримання жорсткої зовнішньої характеристики генератора.

У режимі холостого ходу генератор має тільки паралельне збудження, а з появою навантаження виникає МРС послідовної обмотки збудження, яка, підмагнічуючи машину, компенсує розмагнічуючу дію реакції якоря і падіння напруги в якорі.

Зовнішня характеристика в цьому випадку стає найбільш жорсткою (рис. 8.8 б, крива 2), тобто напруга на затискачах генератора при збільшенні струму навантаження залишається майже незмінною.

Якщо ж потрібно, щоб напруга на затискачах споживача (в кінці лінії) залишалася практично незмінною, то число витків послідовної обмотки збільшують так, щоб МРС цієї обмотки компенсувала ще і падіння напруги в проводах лінії (крива 1).

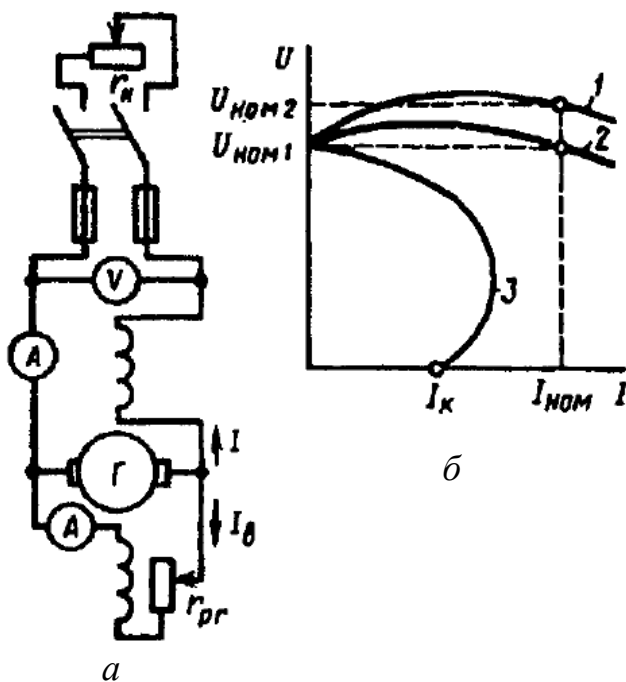


Рисунок 8.8 – Схема включення генератора змішаного збудження (а) і його зовнішні характеристики (б)

При зустрічному включенні обмоток збудження напруга генератора з ростом струму навантаження різко зменшується (крива 3), що пояснюється розмагнічуючою дією послідовної обмотки збудження, МРС якої спрямована проти МРС паралельної обмотки. Зустрічне включення обмоток застосовують лише в генераторах спеціального призначення, наприклад, в зварювальних, де необхідно отримати круто падаючу зовнішню характеристику.

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

8.5 Паралельна робота генераторів постійного струму

Під паралельною роботою розуміється робота генераторів на спільне навантаження. Необхідність в паралельній роботі виникає при змінному характері навантаження, коли вона змінюється протягом доби або пори року, і для підвищення надійності живлення.

Якщо вибрати генератор виходячи з максимально можливого навантаження, то при змінному її характері, коли навантаження знизиться, частина часу генератор буде працювати недовантаженим. Робота генератора при навантаженні, значно меншою за номінальну, буде неекономічною, через те, що ККД його буде низьким. У цьому випадку доцільно встановити кілька генераторів і в залежності від навантаження включити ту чи іншу їх кількість на паралельну роботу. Тоді кожен з генераторів буде працювати з навантаженням, близьким до номінального, і ККД у них буде високий.

Установка одного генератора на станції має ще й той недолік, що при виході його з ладу припиняється повністю живлення навантаження. При декількох генераторах аварія у одного з них не спричинить припинення живлення. Іноді до паралельної роботи вдаються і в тому випадку, коли потужність навантаження перевищує граничну потужність генераторів.

Розглянемо паралельну роботу двох генераторів незалежного збудження (рис. 8.9). Припустимо, що перший генератор $G1$ підключений до опору навантаження $R2$ і навантажений струмом I_1 . Напруга на навантаженні дорівнює U

Включення на паралельну роботу другого генератора має бути здійснене так, щоб не порушувався режим роботи мережі, тобто щоб при включенні генератора $G2$ в ній не виникали великі поштовхи струму і напруги. Для здійснення цього

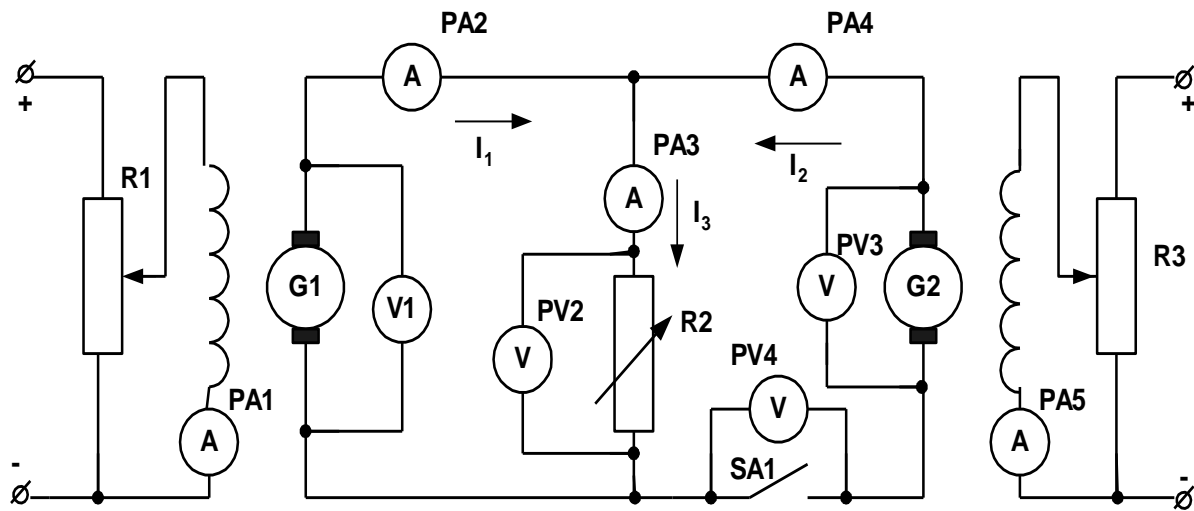


Рисунок 8.9 – Схема включення генераторів незалежного збудження для паралельної роботи

необхідно виконати дві умови.

1. ЕРС E_2 генератора, що підключається повинна дорівнювати напрузі мережі U , при цьому струм в якорі генератора після його включення в мережу буде дорівнювати нульовому значенню:

$$I = \frac{E_2 - U}{R_{a2}} = 0 \quad (8.9)$$

7. Полярність генератора, що підключається повинна відповідати полярності мережі.

Перевірку відповідності полярності можна зробити двома способами:

1) за допомогою вольтметра магнітоелектричної системи; якщо виміряти цим вольтметром напругу в мережі, а потім перенести провідники від вольтметра на відповідні виводи генератора, то відхилення його стрілки в одну і ту ж сторону буде свідчити, що полярності однакові;

2) підключенням вольтметра $PV4$ до виводів вимикача $SA1$: при правильній полярності показання вольтметра має дорівнювати нулю.

8.5.1 Переведення навантаження з одного генератора на інший

Якщо виконані умови включення генератора на паралельну роботу, то у підключеного генератора струм дорівнює нулю. Тепер потрібно частину навантаження з першого генератора перевести на інший - підключений, при цьому необхідно зберегти напругу на навантаженні: $U = const$.

Струми навантаження генераторів рівні:

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{a1}}, \quad I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{a2}} \quad (8.10)$$

Для того щоб зробити перерозподіл струмів при $U = const$ необхідно змінити ЕРС E_1 і E_2 шляхом впливу на кола збудження генераторів. Для збільшення навантаження генератора його струм збудження слід підвищувати, а для зменшення - знижувати.

8.5.2 Розподіл навантаження між паралельно працюючими генераторами

На розподіл навантаження між паралельно працюючими генераторами істотний вплив роблять їхні зовнішні характеристики. Припустимо, що два генератора однакової потужності включені на паралельну роботу при холостому ході. Прийнемо, що їх зовнішні характеристики $U = f(I)$, зняті окремо для кожного з генераторів, неоднакові (рис. 8.10). Якщо підключити навантаження, то напруга впаде від значення U_0 до значення U спільного для двох генераторів, через те що вони включені паралельно.

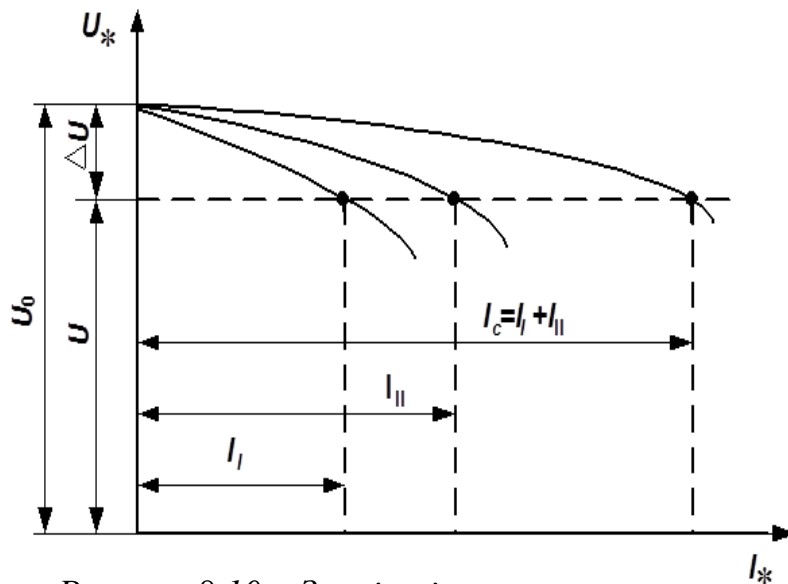


Рисунок 8.10 – Зовнішні характеристики генераторів при паралельній роботі

При цьому напруги струми генераторів будуть неоднаковими. Генератор, що має більш падаючу зовнішню характеристику, навантажується меншим струмом, ніж генератор, у якого зовнішня характеристика більш полого (жорстка).

Література:

[2],[1],[5]

ТЕМА 9

ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

- 9.1 Основні поняття про колекторні двигуни
- 9.2 Пуск двигуна постійного струму
- 9.3 Двигун паралельного збудження
- 9.4 Регулювання частоти обертання двигунів паралельного збудження
- 9.5 Двигун послідовного збудження
- 9.6 Двигун змішаного збудження
- 9.7 Втрати і коефіцієнт корисної дії колекторної машини постійного струму
- 9.8 Режими роботи машини постійного струму
- 9.9 Режими гальмування машини постійного струму

9.1 Основні поняття про колекторні двигуни

Колекторні машини мають властивість оборотності, тобто вони можуть працювати як в 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 з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на якорі електромагнітний момент M , який не є гальмуючим, як це мало місце в генераторі, а **обертаючим**.

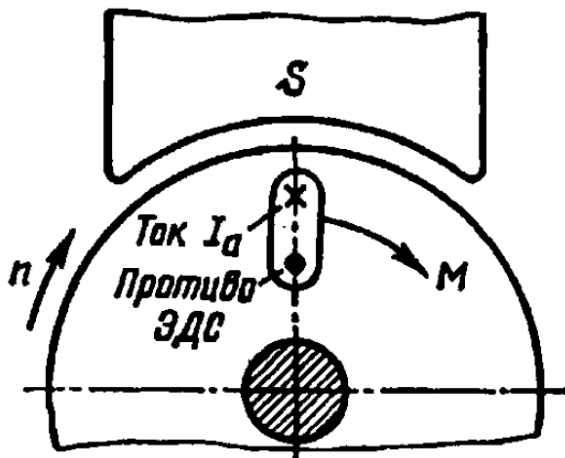


Рисунок 9.1 - Напрямок проти-ЕРС в обмотці якоря двигуна

Під дією електромагнітного моменту якоря машина починає обертатися, тобто машина буде працювати в режимі двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну. В процесі роботи двигуна його якорь обертається в магнітному полі. В обмотці якоря при цьому наводиться ЕРС, напрямом якої можна визначити за правилом "правої руки".

За своєю природою вона не відрізняється від ЕРС, яка наводиться в обмотці якоря генератора. Тільки у двигуна ЕРС спрямована проти струму, і тому її називають **проти-ЕРС** (рис. 9.1).

Для двигуна, який працює з постійною частотою обертання (рис. 9.2, б),

$$U - I_a \cdot \sum r = E_a, \quad (9.1)$$

або

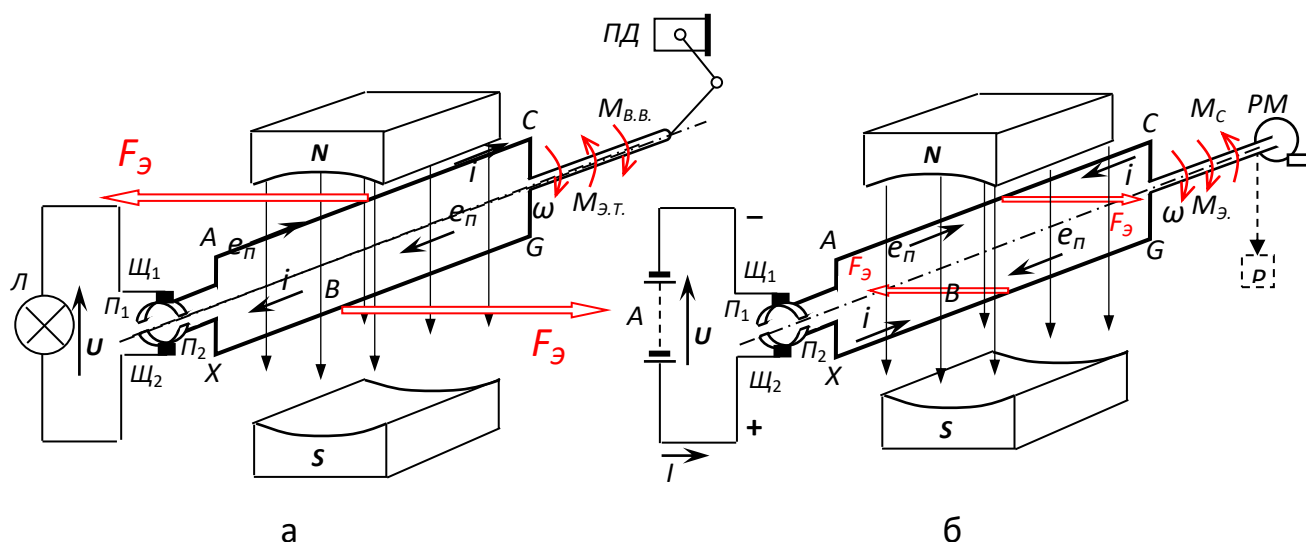


Рисунок 9.2 - Схема генератора постійного струму (а) і двигуна постійного струму (б)

$$U = E_a + I_a \cdot \sum r \quad (9.2)$$

З цього рівняння випливає, що напруга, яка підводиться до якоря двигуна врівноважується проти-ЕРС обмотки якоря і падінням напруги в колі якоря. На підставі цього струм якоря:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r} \quad (9.3)$$

Помноживши обидві частини попереднього рівняння на струм, отримаємо **рівняння потужності для кола якоря**:

$$U \cdot I_a = E_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot \sum r, \quad (9.4)$$

де $U \cdot I_a$ - потужність в колі обмотки якоря;

$I_a^2 \cdot \sum r$ - потужність електричних втрат в колі якоря.

Для з'ясування суті виразу $E_a \cdot I_a$ зробимо наступні перетворення:

$$E_a \cdot I_a = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot I_a, \quad (9.5)$$

або

$$E_a \cdot I_a = \frac{p \cdot N}{2 \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a \cdot \omega, \quad \left(\omega = \frac{2 \pi \cdot n}{60} \right), \quad (9.6)$$

але

$$\frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a = M \quad (9.7)$$

Тоді: $E_a \cdot I_a = M \cdot \omega = P_{\text{ЭМ}}$,

де $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ - кругова частота обертання якоря; M - електромагнітний момент;

$P_{\text{ЭМ}}$ - електромагнітна потужність двигуна.

Таким чином, вираз $E_a \cdot I_a$ являє собою *електромагнітну потужність двигуна*.

З урахуванням цього отримаємо:

$$U \cdot I_a = M \cdot \omega + I_a^2 \cdot \sum r \quad (9.8)$$

Аналіз цього рівняння показує, що зі збільшенням навантаження на вал двигуна, тобто зі збільшенням електромагнітного моменту M зростає потужність в колі обмотки якоря $U \cdot I_a$, тобто потужність на вході двигуна. Але через те, що напруга, яка підводиться до двигуна, підтримується незмінною ($U = \text{const}$), то збільшення навантаження двигуна супроводжується зростанням струму в обмотці якоря I_a .

Залежно від способу збудження двигуни постійного струму, як і генератори, поділяють на двигуни зі збудженням від постійних магнітів (магнітоелектричні) і з електромагнітним збудженням.

Останні відповідно до схеми включення обмотки збудження відносно обмотки якоря поділяють на двигуни паралельного (шунтові), послідовного (серієсний) і змішаного (компаундні) збудження.

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

$$n = \frac{E_a}{C_e \cdot \Phi} \quad (9.9)$$

Підставивши значення E_a з першого рівняння, отримаємо:

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} \quad (9.10)$$

Таким чином, частота обертання двигуна n прямо пропорційна напрузі U і обернено пропорційна магнітному потоку збудження Φ . Фізично це пояснюється тим, що підвищення напруги або зменшення потоку викликає збільшення різниці $(U - E_a)$; це, в свою чергу, веде до зростання струму I_a . Внаслідок цього зростий

струм підвищує крутний момент, і якщо при цьому навантажувальний момент залишається незмінним, то частота обертання двигуна збільшується.

З останнього рівняння випливає, що регулювати частоту обертання двигуна можна зміною або напруги U , яке підводиться до якоря двигуна, або 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 I_a . Тому, змінивши напрямок будь-якої із зазначених величин, можна змінити напрямок обертання якоря.

Слід мати на увазі, що перемикання загальних затискачів схеми в рубильнику не дає зміни напрямку обертання якоря, через те, що при цьому одночасно змінюється напрямок струму і в обмотці якоря, і в обмотці збудження.

9.2 Пуск двигуна постійного струму

Струм якоря визначається за формулою:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r} . \quad (9.11)$$

Якщо прийняти U і $\sum r$ незмінними, то струм I_a залежить від протидії 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 наводиться ЕРС ($E_a=0$). Тому при безпосередньому підключенні двигуна до мережі в обмотці його якоря виникає пусковий струм:

$$I_{a.\text{пуск}} = \frac{U}{\sum r} \quad (9.12)$$

Зазвичай опір $\sum r$ невеликий, тому значення пускового струму досягає неприпустимо великих значень, що в 10 - 20 разів перевищують номінальний струм двигуна.

Такий великий пусковий струм дуже небезпечний для двигуна. По-перше, він може викликати в машині круговий вогонь, а по-друге, при такому струмі в двигуні розвивається дуже великий пусковий момент, який спричиняє ударний дію на обертові частини двигуна і може механічно їх зруйнувати. І врешті, цей струм викликає різке падіння напруги в мережі, що несприятливо відбивається на роботі інших споживачів, які включені в цю мережу.

Тому пуск двигуна безпосереднім підключенням до мережі (безреостатний пуск) зазвичай застосовують для двигунів потужністю не більше 0,7 - 1,0 кВт. У цих двигунах завдяки підвищеному опору обмотки якоря і невеликим обертовим масам значення пускового струму лише в 3 - 5 разів перевищують номінальний, що не є небезпечним для двигуна.

Що ж стосується двигунів більшої потужності, то при їх пуску для обмеження пускового струму застосовують **пускові реостати** (ПР), які включаються послідовно в коло якоря (реостатний пуск).

Перед пуском двигуна необхідно важіль P реостата поставити на холостий контакт 0 (рис. 9.3). Потім включають рубильник джерела живлення, переводять важіль на перший проміжний контакт I і коло якоря виявляється підключеним до мережі через найбільший пусковий опір реостата

$$r_{\text{П.Р.}} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

Одночасно через важіль P і шину III до мережі підключається обмотка збудження, струм в якій протягом всього періоду пуску не залежить від положення важеля P , через те, що опір шини в порівнянні з опором обмотки збудження дуже малий.

Пусковий струм якоря при повному опорі пускового реостата:

$$I_{a.\text{пуск}} = \frac{U}{\sum r + r_{\text{П.Р.}}} \quad (9.13)$$

З появою максимального пускового струму в колі якоря $I_{a.\text{пуск}}$ виникає максимальний пусковий момент $M_{\text{пуск}}$, під дією якого починається обертання якоря.

У міру наростання частоти обертання n збільшується проти-ЕРС $E_a = C_e \cdot \Phi \cdot n$, Що веде до зменшення пускового струму і пускового моменту

$$I_{a.\text{пуск}} = \frac{U - E_a}{\sum r + r_{\text{П.Р.}}} \quad (9.14)$$

У міру розгону якоря двигуна важіль пускового реостата перемикають в положення 2, 3 і т.д.

У положенні 5 важеля реостата пуск двигуна закінчується ($r_{\text{П.Р.}} = 0$). Опір пускового реостата вибирають зазвичай таким, щоб найбільший пусковий струм перевищував номінальний не більше, ніж в 2 рази.

Через те, що крутний момент двигуна M прямо пропорційний потоку Φ , То для полегшення пуску двигуна паралельного і змішаного збудження опір регульовального реостата в колі збудження r_{pe} слід повністю вивести ($r_{pe} = 0$). потік збудження Φ в цьому випадку отримує найбільше значення і двигун розвиває необхідний крутний момент при меншому струмі якоря.

Для пуску двигунів більшої потужності застосовувати пускові реостати недоцільно, через те, що це викликало б значні втрати енергії. Крім того, пускові реостати були б громіздкими. Тому в двигунах великої потужності застосовують безреостатний пуск двигуна шляхом зниження напруги. Прикладами цього є пуск тягових двигунів електровоза перемиканням їх з послідовного з'єднання при пуску на паралельне при нормальній роботі, або пуск двигуна в схемі "генератор - двигун".

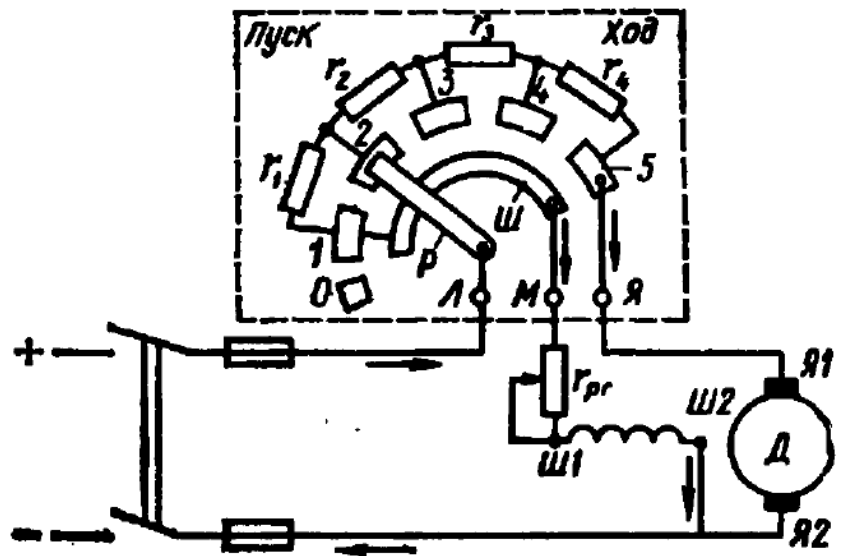


Рисунок 9.3 – Схема вмикання пускового реостату

9.3 Двигун паралельного збудження

Схема включення в мережу двигуна паралельного збудження показана на рис. 9.4, а. Характерною особливістю цього двигуна є те, що струм в обмотці збудження (ОВ) не залежить від струму навантаження (струму якоря). Реостат в колі збудження r_{pz} служить для регулювання струму в обмотці збудження і магнітного потоку головних полюсів.

Експлуатаційні властивості двигуна визначаються його **робочими характеристиками**, під якими розуміють залежність частоти обертання n , струму I , Моменту на валу M_2 , Електромагнітного обертального моменту M від потужності на валу двигуна P_2 при $U = const$ і $I_B = const$ (рис. 9.4, б).

Для аналізу залежності $n = f(P_2)$, яку зазвичай називають **швидкісною характеристикою**, звернемося до формули:

$$n = \frac{E_a}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} \quad (9.15)$$

З якої видно, що при постійній напрузі ($U = const$) На частоту обертання n впливають два фактори: падіння напруги в колі якоря $I_a \cdot \sum r$ і потік збудження Φ .

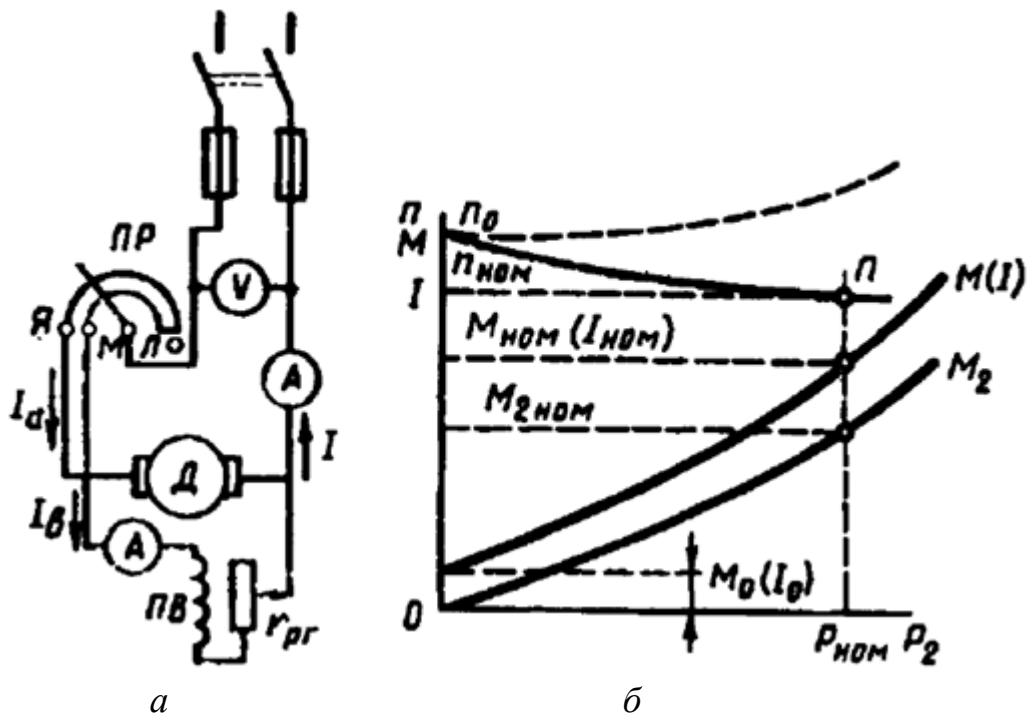


Рисунок 9.4 – Схема двигуна паралельного збудження (а) і його робочі характеристики

При збільшенні навантаження зменшується чисельник $(U - I_a \cdot \sum r)$, При цьому внаслідок реакції якоря зменшується і знаменник. Зазвичай ослаблення потоку, викликане реакцією якоря, є невеликим і перший фактор впливає на частоту обертання сильніше, ніж другий. В результаті частота обертання двигуна з ростом навантаження зменшується, а графік набуває падаючий вид з невеликою опуклістю, оберненою до осі абсцис.

Якщо ж реакція якоря в двигуні супроводжується більш значним ослабленням потоку, то частота обертання зі збільшенням навантаження буде зростати, як це показано штриховою лінією на рис. 9.4, б.

Однак така залежність є небажаною, оскільки вона не задовольняє умові стійкої роботи двигуна: з ростом навантаження на двигун зростає частота обертання, що веде до додаткового зростання навантаження і т. д., тобто частота обертання двигуна необмежена збільшується і двигун йде "в рознос".

Щоб забезпечити характеристиці частоти обертання форму падаючої кривої, в 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 розмагнічуючу дію реакції якоря так, що потік у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінним.

Зміна частоти обертання двигуна при переході від номінального навантаження до холостого ходу, виражене у відсотках, називають **номінальною зміною частоти обертання**:

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (9.16)$$

де n_0 - частота обертання двигуна в режимі холостого ходу.

Зазвичай для двигунів паралельного збудження $\Delta n = 2 \div 8\%$, Тому характеристику частоти обертання двигуна паралельного збудження $n = f(P_2)$ називають **жорсткою**.

Залежність корисного моменту (на валу) M_2 від навантаження P_2 встановлена формулою:

$$M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n} \quad (9.17)$$

при $n = \text{const}$ графік $M_2 = f(P_2)$ мав би вигляд прямої. Однак зі збільшенням навантаження частота обертання двигуна знижується, і тому залежність $M_2 = f(P_2)$ криволінійна.

Для отримання аналітичного виразу **механічної характеристики** $n = f(M)$ зробимо перетворення:

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} \quad (9.18)$$

і підставимо в нього значення струму якоря $I_a = \frac{M}{C_M \cdot \hat{\Phi}}$, виражене з формули моменту, отримаємо:

$$n = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{M \cdot \sum r}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (9.19)$$

де n_0 - частота обертання двигуна в режимі холостого ходу;

Δn - зміна частоти обертання, викликане зміною навантаження на валу двигуна.

Якщо знехтувати реакцією якоря, то (через те, що $I_B = \text{const}$) Можна прийняти $\Phi = \text{const}$. Тоді механічна характеристика $n = f(M)$ двигуна паралельного збудження являє собою пряму лінію, трохи нахилену до осі абсцис

(рис. 9.5, а). Кут нахилу механічної характеристики тим більше, чим більше значення опору, включеного в коло якоря.

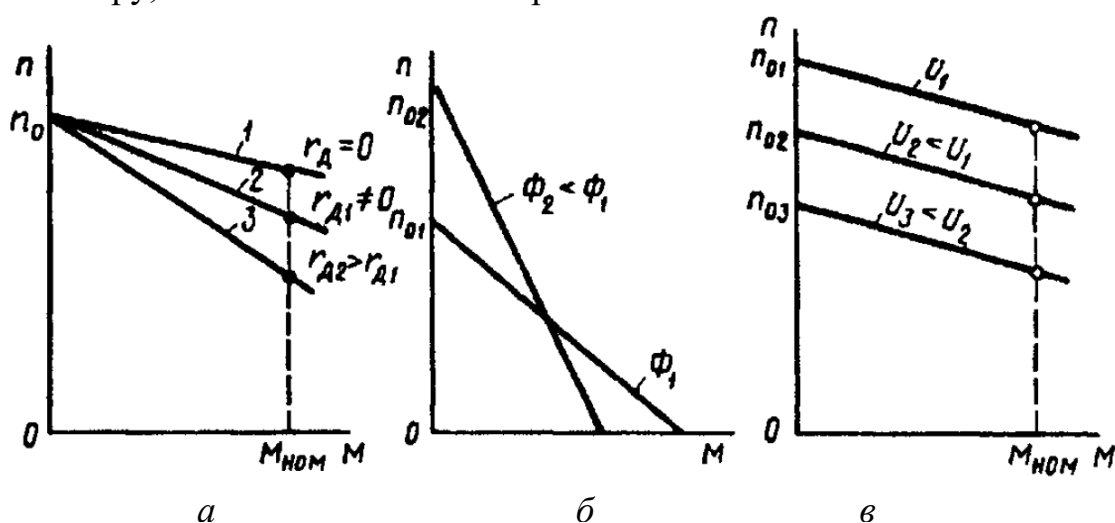


Рисунок 9.5 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження: а – при введенні в коло якоря додаткового опору; б – при зміні основного магнітного потоку; в – при зміні напруги в колі якоря

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).

Вигляд механічної характеристики залежить також і від значення основного магнітного потоку $\hat{\Phi}$. Так, при зменшенні $\hat{\Phi}$ збільшується частота обертання холостого ходу $n_0 = \frac{U}{C_e \cdot \Phi}$ і одночасно збільшується $\Delta n = \frac{M \cdot \sum r}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi}$, тобто

збільшуються обидва доданки останнього рівняння. Це призводить до різкого збільшення нахилу механічної характеристики, тобто до зменшення її жорсткості (рис. 9.5, б).

При зміні напруги на якорі змінюється частота обертання, а залишається незмінним. У підсумку жорсткість механічної характеристики (якщо знехтувати впливом реакції якоря) не змінюється (рис. 9.5, в), тобто характеристики зміщуються по висоті, залишаючись паралельними одна одній.

9.4 Регулювання частоти обертання двигунів паралельного збудження

Способи регулювання частоти обертання двигунів оцінюються наступними показниками: 1) *плавністю регулювання*; 2) *діапазоном регулювання*, який визначається відношенням максимальної частоти обертання до найменшої; 3) *економічністю регулювання*, яка визначається вартістю регулюючої апаратури і втратами електроенергії в ній.

З рівняння швидкісної характеристики

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} \quad (9.20)$$

впливає, що регулювати частоту обертання двигуна паралельного збудження можна зміною опору в колі якоря $\sum r$, Зміною основного потоку Φ і зміною напруги в колі якоря U .

9.4.1 Введення додаткового опору в коло якоря.

Додатковий опір (реостат r_D) включають в коло якоря аналогічно пусковому реостату (ПР). Однак на відміну від останнього він повинен бути розрахований на тривале протікання струму.

При включенні опору r_D в коло якоря вираз частоти обертання набуває вигляду:

$$n = \frac{U - I_a \cdot (\sum r + r_D)}{C_e \cdot \Phi} = n_0 + \Delta n, \quad (9.21)$$

де $n_0 = \frac{U}{C_e \cdot \Phi}$ - частота обертання в режимі холостого ходу;

$\Delta n = \frac{I_a \cdot (\sum r + r_D)}{C_e \cdot \Phi}$ - зміна частоти обертання, викликана падінням напруги в колі якоря.

Зі збільшенням r_D зростає Δn , Що веде до зменшення частоти обертання.

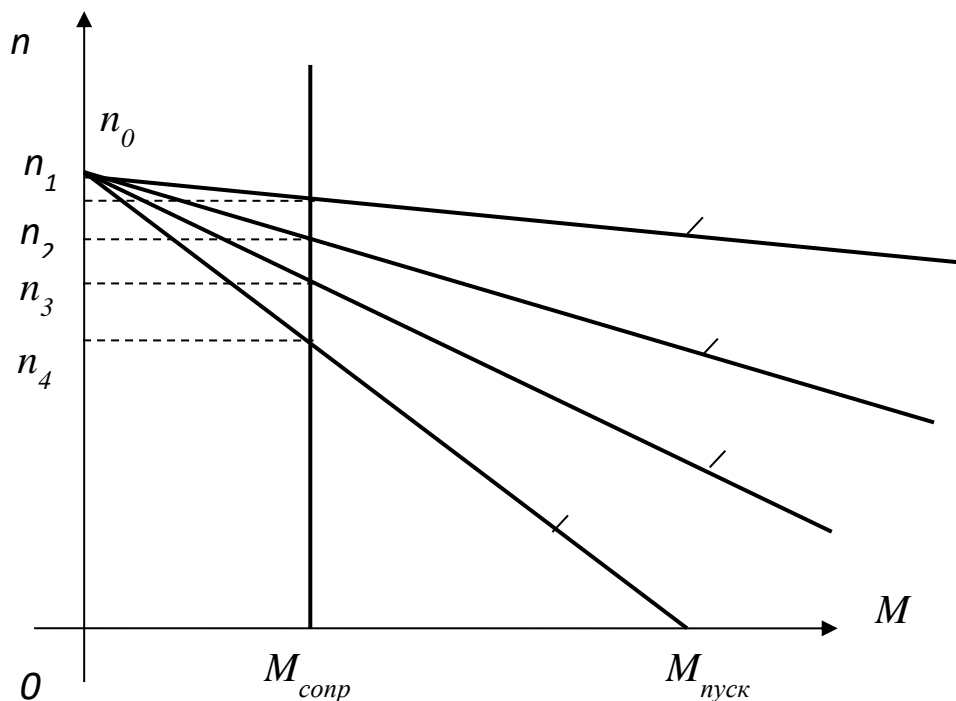


Рисунок 9.6 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження

Залежності $n = f(r_D)$ двигуна паралельного збудження ілюструються його механічними характеристиками (рис. 9.6): з підвищенням r_D збільшується нахил механічних характеристик, а частота обертання при заданому навантаженні на валу ($M = M_{\text{ном}} = M_{\text{сопр}}$) зменшується.

Цей спосіб забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні (тільки в сторону зменшення частоти від номінальної), проте він неекономічний через значні втрати електроенергії в регулювальному реостаті ($I_a^2 \cdot r_D$), які інтенсивно ростуть зі збільшенням потужності двигуна.

9.4.2 Зміна основного магнітного потоку.

Цей спосіб регулювання в двигуні паралельного збудження реалізується за допомогою реостата $r_{p\Gamma}$ в колі обмотки збудження. Так, при зменшенні опору реостата зростає магнітний потік обмотки збудження, що супроводжується зниженням частоти обертання. При збільшенні $r_{p\Gamma}$ частота обертання зростає. Залежність частоти обертання від струму збудження виражається *регулювальною характеристикою* двигуна:

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

З рівняння $n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi}$ випливає, що зі зменшенням магнітного потоку Φ частота обертання n збільшується за гіперболічним законом (рис. 9.7, а). Але одночасно зменшення потоку Φ веде до зростання струму якоря $I_a = \frac{M}{C_M \cdot \Phi}$.

При потоці $\Phi = \Phi'$ струм якоря досягає значення $I'_a = \frac{U}{2 \cdot \sum r}$, тобто падіння напруги в колі якоря досягає значення, рівного половині напруги, підведеної до якоря ($I'_a \cdot \sum r = \frac{U}{2}$). У цих умовах частота обертання двигуна досягає максимуму n_{max} .

При подальшому зменшенні потоку Φ ($\Phi < \Phi'$) частота обертання двигуна починає спадати, так як через інтенсивне зростання струму I_a другий доданок вираження частоти обертання наростає швидше першого.

При невеликому навантажувальному моменті на валу двигуна максимальна частота обертання n_{max} у багато разів перевершує номінальну частоту обертання двигуна $n_{\text{ном}}$ і є неприпустимою за умовами механічної міцності двигуна, тобто може призвести до його "розносу". З огляду на це, при виборі регулювального реостата $r_{p\Gamma}$ необхідно стежити за тим, щоб при повністю введеному його опорі частота обертання двигуна не перевищувала допустимого значення.

Наприклад, для двигунів серії 2П допускається перевищення частоти обертання над номінальною не більше, ніж в 2 - 3 рази. Необхідно також стежити за надійністю електричних з'єднань в колі обмотки збудження двигуна, так як при розриві цього кола магнітний потік зменшується до значення потоку залишкового магнетизму $\Phi_{ост}$, при якому частота обертання може досягати небезпечного

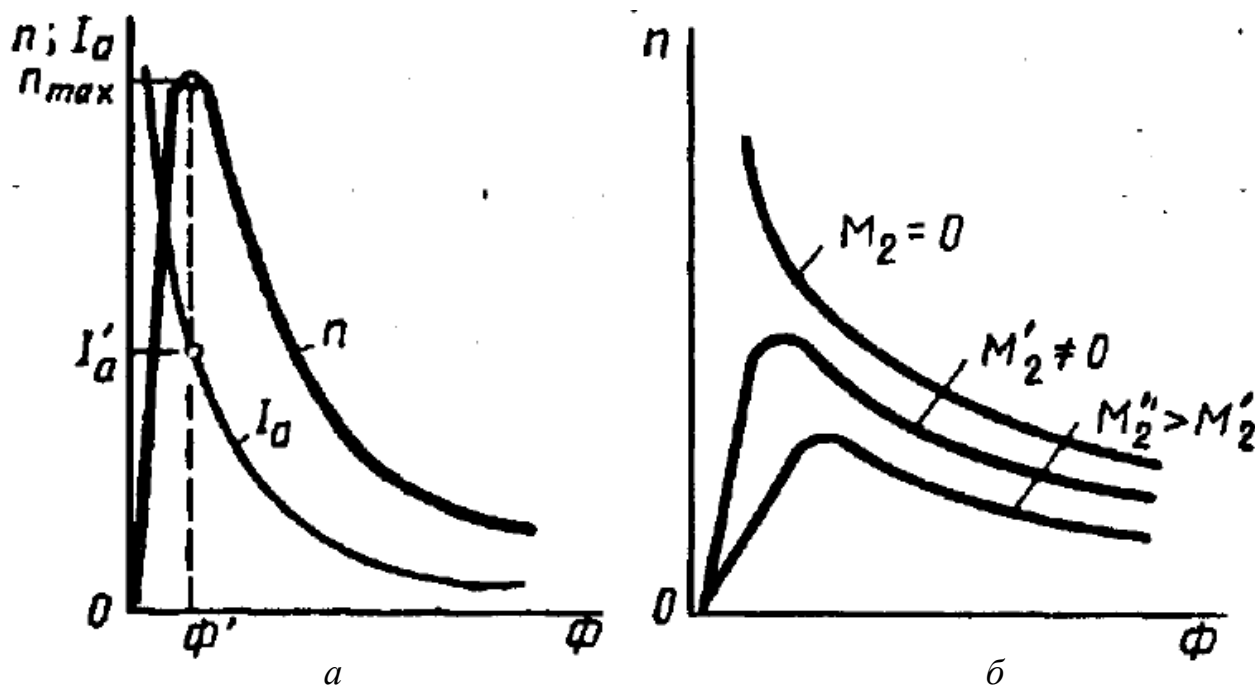


Рисунок 9.7 – Регулювальні характеристики двигуна паралельного збудження

значення.

Вид регулювальних характеристик $n = f(\Phi)$ залежить від значення моменту навантаження M_2 на валу двигуна: зі зростанням M_2 максимальна частота обертання n_{max} зменшується (рис. 9.7, б).

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, так як в двигунах паралельного збудження струм $I_B = (0,01 \div 0,07) \cdot I_a$, а тому втрати в регулювальному реостаті ($I_B^2 \cdot r_{\Gamma}$) невеликі.

Однак діапазон регулювання зазвичай становить $\frac{n_{max}}{n_{min}} = 2 \div 5$.

Пояснюється це тим, що нижня межа частоти обертання обумовлена насиченням машини, яке обмежує значення магнітного потоку Φ , а верхня межа частоти - небезпекою "розносу" двигуна і посиленням впливу реакції якоря,

спотворююча дія якого при ослабленні основного магнітного потоку Φ посилюється і веде до іскріння на колекторі або ж до появи кругового вогню.

9.4.3 Зміна напруги в колі якоря

Регулювання частоти обертання двигуна зміною напруги живлення застосовується лише при $I_B = \text{const}$, тобто при роздільному живленні кіл обмотки якоря і обмотки збудження (при незалежному збудженні).

Частота обертання в режимі холостого ходу n_0 пропорційна напрузі, а Δn від напруги не залежить, тому механічні характеристики двигуна при зміні напруги не змінюють кута нахилу до осі абсцис, а зміщуються по висоті, залишаючись паралельними один одному.

Для здійснення цього способу регулювання необхідно коло якоря двигуна підключити до джерела живлення з регульованою напругою. Для керування двигунами малої і середньої потужності в якості такого джерела можна застосувати регульований випрямляч, в якому напруга постійного струму змінюється регульовальним автотрансформатором (АТ), включеним на вході випрямляча (рис. 9.8, а).

Для керування двигунами великої потужності доцільно застосовувати генератор постійного струму незалежного збудження; привод якого здійснюється за допомогою приводного двигуна (ПД), в якості якого зазвичай використовують трифазний двигун змінного струму. Для живлення постійним струмом кіл збудження генератора Γ і двигуна Δ використовується збудник B - генератор постійного струму, напруга на виході якого підтримується незмінним. Описана схема керування двигуном постійного струму (рис. 9.8, б) відома під назвою системи "генератор - двигун" (Γ - Δ).

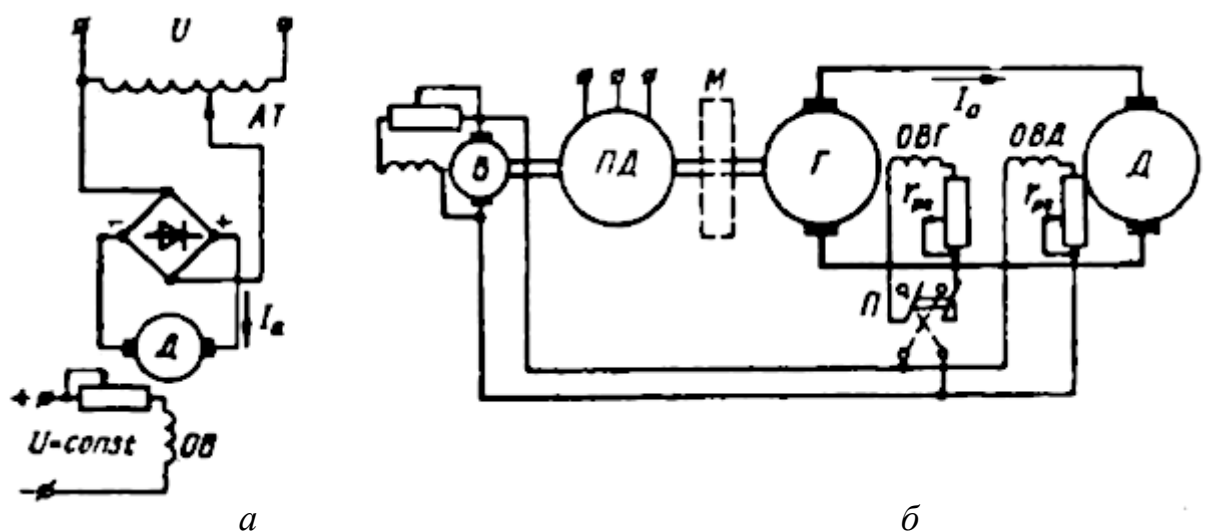


Рисунок 9.8 – Схеми вмикання двигунів постійного струму при регулюванні частоти обертання зміною напруги в колі якоря

Зміна напруги в колі якоря дозволяє регулювати частоту обертання двигуна вниз від номінальної, так як напруга вище номінальної неприпустима. При необхідності регулювати частоту обертання вгору від номінальної можна скористатися зміною струму збудження двигуна.

Зміна напрямку обертання (реверс) двигуна, що працює за системою $\Gamma - Д$ здійснюється зміною напрямку струму в колі збудження генератора Γ перемикачем $П$, тобто зміною полярності напруги на його затискачах.

Якщо двигун постійного струму працює в умовах різко змінного навантаження, то для пом'якшення коливань потужності, споживаної $ПД$ з трифазної мережі, на вал $ПД$ поміщають маховик $М$, який запасав енергію в період зменшення навантаження на двигун $Д$ і віддає її в період інтенсивного навантаження двигуна.

Регулювання частоти обертання n зміною напруги U в колі якоря забезпечує плавне економічне регулювання в широкому діапазоні $\frac{n_{\max}}{n_{\min}} > 25$.

Найбільша частота обертання тут обмежується умовами комутації, а найменша - умовами охолодження двигуна.

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

Імпульсне регулювання частоти обертання. Сутність цього способу регулювання ілюструється схемою на рис. 9.9, а. Коло обмотки якоря двигуна паралельного (незалежного) збудження періодично переривається ключем $К$. Під час замикання кола якоря на час t_1 до обмотки якоря підводиться напруга $U = U_{\text{ИМП}}$ і струм в ній досягає максимального значення $I_{a.\max}$. Потім ключем коло якоря розмикають і струм в ньому зменшується, досягаючи до моменту наступного замикання мінімального значення $I_{a.\min}$ (при розмиканні ключа $К$ струм в обмотці якоря замикається через діод VD). При наступному замиканні ключа струм досягає значення $I_{a.\max}$ і т.д. Таким чином, до обмотки якоря підводиться деяка середня напруга (рис. 9.9, б):

$$U_{CP} = \frac{U \cdot t_1}{T} = \alpha \cdot U, \quad (9.22)$$

де T - відрізок часу між двома наступними один за одним імпульсами напруги;

$\alpha = \frac{t_1}{T}$ - коефіцієнт управління (шпаруватість імпульсу).

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

При імпульсному регулюванні частота обертання двигуна:

$$n = \frac{\alpha \cdot U - I_{a.CP} \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} \quad (9.23)$$

Таким чином, імпульсне регулювання частоти обертання аналогічно регулюванню зміною підводиться до ланцюга якоря напруги. З метою зменшення пульсацій струму в колі якоря включена котушка індуктивності (дросель) L , а

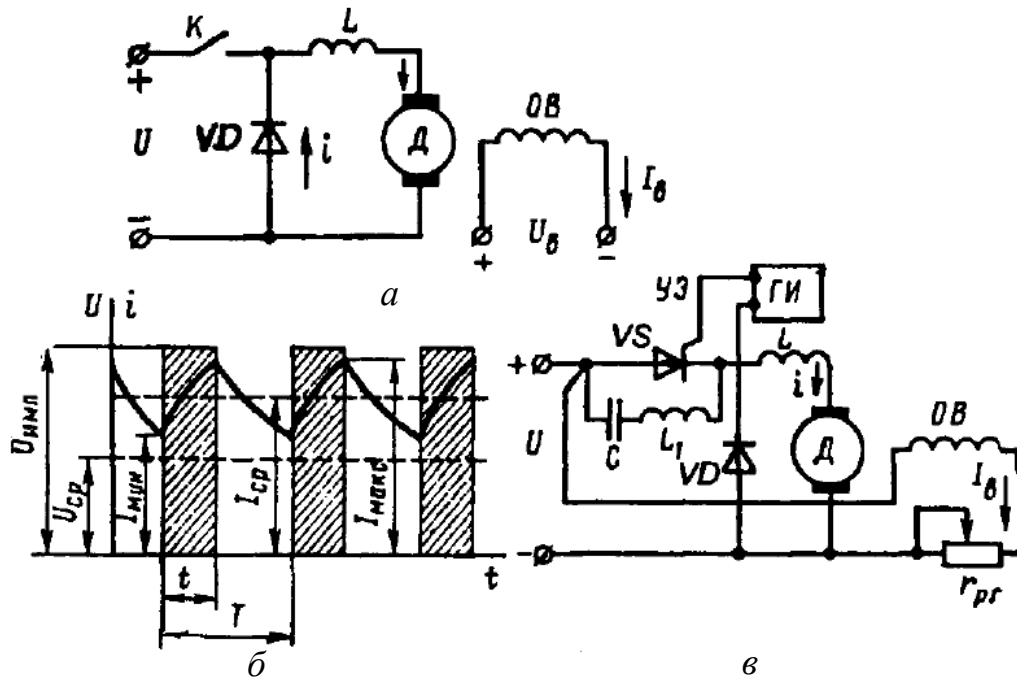


Рисунок 9.9 – Імпульсне регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

частота подачі імпульсів дорівнює 200 - 400 Гц.

На рис. 9.9, в представлена одна з можливих схем імпульсного регулювання, де в якості ключа застосований керований діод - тиристор VS . Відкривається тиристор подачею короткочасного імпульсу від генератора імпульсів ($ГІ$) на керуючий електрод (VE) тиристора. ланцюг L_1C , Шунтирующая тиристор, служить для замикання останнього в період між двома керуючими імпульсами.

Відбувається це в такий спосіб: при відкриванні тиристора конденсатор перезаряджається через контур L_1C і створює на силових електродах тиристора напруга, зворотне напрузі мережі, яке припиняє перебіг струму через тиристор. параметрами ланцюга L_1C визначається час $t(c)$ відкритого стану тиристора:

$$t = \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C}. \quad (9.24)$$

тут L_1 виражається в генрі ($Гн$); C - у Фарада (Φ).

Значення середньої напруги $U_{CP} = \frac{U \cdot t_1}{T} = \alpha \cdot U$ регулюється зміною шпаруватості керуючих імпульсів α генератора ГИ.

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

9.5 Двигун послідовного збудження

У цьому двигуні обмотка збудження включена послідовно в ланцюг якоря (рис. 9.10, а), тому магнітний потік Φ в ньому залежить від струму навантаження $I = I_a = I_B$. При невеликих навантаженнях магнітна система машини ненасичений і залежність магнітного потоку від струму навантаження прямопропорційна, т. Е. $\Phi = k \cdot I_a$. В цьому випадку електро-магнітний момент:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_a = C_M \cdot k \cdot I_a^2 = C_M' \cdot I_a^2. \quad (9.25)$$

Формула частоти обертання набуде вигляду:

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot k \cdot I_a} = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e' \cdot I_a}. \quad (9.26)$$

тут k - коефіцієнт пропорційності, $C_M' = C_M \cdot k$, $C_e' = C_e \cdot k$.

Таким чином, крутний момент двигуна при ненасиченому стані магнітної системи пропорційний квадрату струму, а частота обертання обернено пропорційна току навантаження.

На рис. 9.10, б представлені робочі характеристики $M = f(I)$ і $n = f(I)$ двигуна послідовного збудження. При великих навантаженнях настає насичення магнітної системи двигуна. В цьому випадку магнітний потік при зростанні навантаження практично не змінюється і характеристики двигуна набувають майже прямолінійний характер.

Характеристика частоти обертання двигуна послідовного збудження показує, що частота обертання двигуна значно змінюється при зміні навантаження. Таку характеристику прийнято називати *м'якою*.

При зменшенні навантаження двигуна послідовного збудження частота обертання n різко збільшується і 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 номінальної неприпустимі.

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, так як при обриві або скиданні ремня може статися "рознос" двигуна. З огляду на можливість роботи двигуна на підвищених частотах обертання, двигуни послідовного збудження, згідно зі стандартом, випробовують на протязі 2 хвилин на перевищення частоти обертання на 20% понад максимальну, зазначеної на заводському щитку, але не

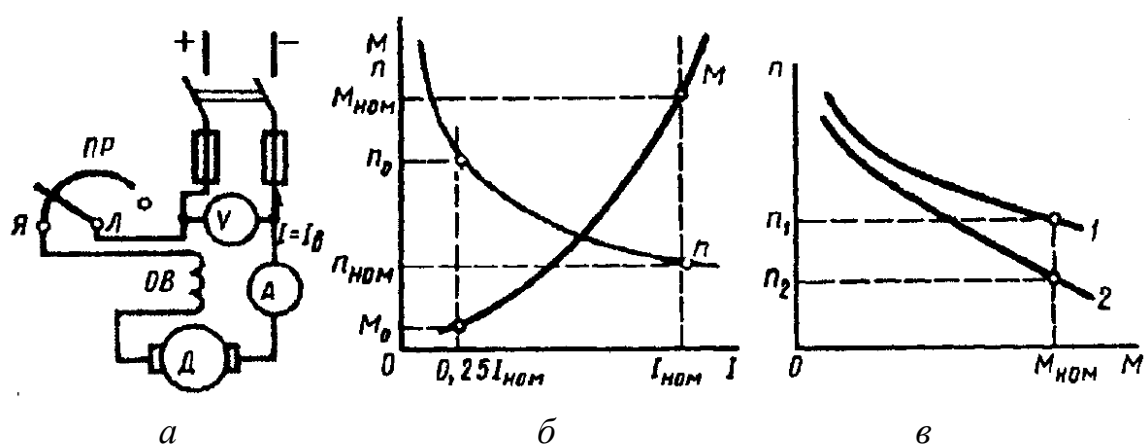


Рисунок 9.10 - Двигун послідовного збудження: а – принципова схема; б – робочі характеристики; в – механічні характеристики: 1 – природня характеристика; 2 – штучна характеристика

менше ніж на 50% понад номінальну.

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження $n = f(M)$ представлені на рис. 9.10, в. Різко падаючі криві механічних характеристик (природна 1 і штучна 2) забезпечують двигуну послідовного збудження стійку роботу при будь-якому навантаженні.

Властивість цих двигунів розвивати великий крутний момент, пропорційний квадрату струму навантаження, має важливе значення, особливо в важких умовах пуску і при перевантаженнях, так як з поступовим збільшенням навантаження двигуна потужність на його вході зростає повільніше, ніж крутний момент.

Ця особливість двигунів послідовного збудження є однією з причин їх широкого застосування в якості тягових двигунів на транспорті, а також в якості кранових двигунів в підйомних установках, тобто у всіх випадках електроприводу з важкими умовами пуску і поєднання значних навантажень на вал двигуна з малою частотою обертання.

Номінальна зміна частоти обертання двигуна послідовного збудження:

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_{(0,25)} - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100\%, \quad (9.27)$$

де $n_{(0,25)}$ - частота обертання при навантаженні двигуна, що становить 25% від номінальної.

Частоту обертання двигунів послідовного збудження можна регулювати зміною якого напруження U , або магнітного потоку обмотки збудження.

У першому випадку в ланцюг якоря послідовно включають регулювальний реостат R_{pr} (рис. 9.11, а). Зі збільшенням опору цього реостата зменшуються напруга на вході двигуна і частота його обертання. Цей метод регулювання застосовують головним чином в двигунах невеликої потужності.

У разі значної потужності двигуна цей спосіб неекономічний через великі втрат енергії в R_{pr} . Крім того, реостат R_{pr} , що розраховується на робочий струм двигуна, виходить громіздким і дорогим.

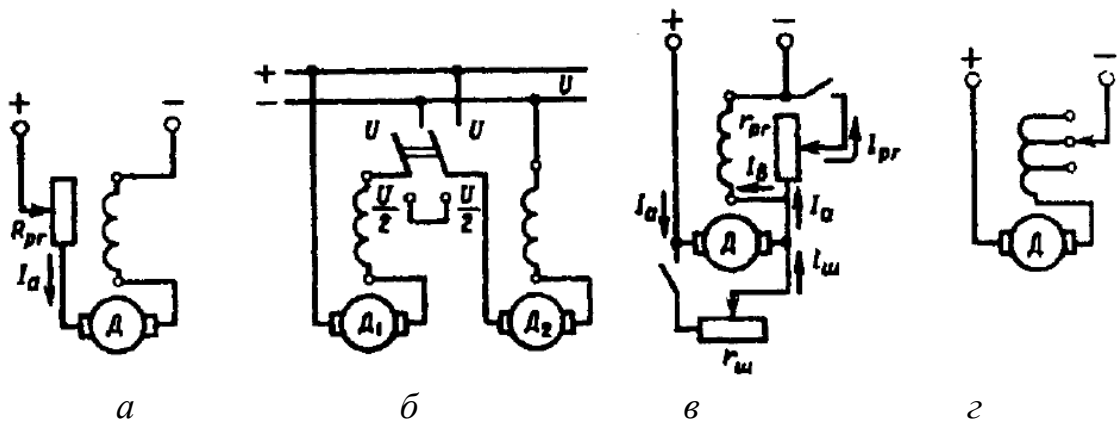


Рисунок 9.11 – Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження

При спільній роботі декількох однотипних двигунів частоту обертання регулюють зміною схеми їх включення відносно один одного (рис. 9.11, б). Так, при паралельному включенні двигунів кожен з них виявляється під повним напругою мережі, а при послідовному включенні двох двигунів на кожен двигун доводиться половина напруги мережі. При одночасній роботі великої кількості двигунів якомога більшу кількість варіантів включення.

Цей спосіб регулювання частоти обертання застосовують в електровозах, де встановлено кілька однакових тягових двигунів.

Зміна підводиться до двигуна напруги можливо також при харчуванні від джерела постійного струму з регульованою напругою (наприклад, від регульованого випрямляча). При зменшенні підводиться до двигуна напруги його

механічні характеристики зміщуються вниз, практично не змінюючи свої кривизни (рис. 9.12).

Регулювати частоту обертання двигуна зміною магнітного потоку можна трьома способами: шунтуванням обмотки збудження реостатом $r_{РГ}$ (рис. 9.11, в), секціонуванням обмотки збудження (рис. 9.11, г) і шунтуванням обмотки якоря реостатом $r_{ш}$ (рис. 9.11, в).

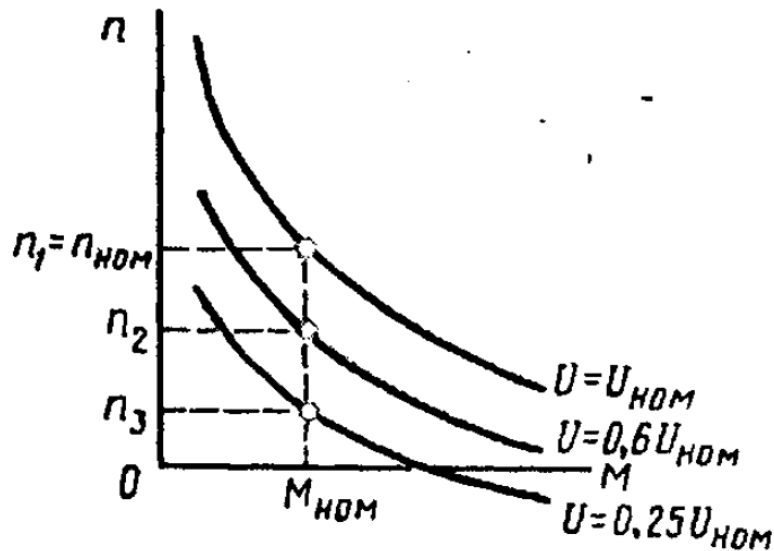


Рисунок 9.12 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при зміні напруги, що підводиться

Включення реостата $r_{РГ}$, Шунтирующего обмотку збудження, і зменшення опору цього реостата веде до зниження струму збудження $I_B = I_a - I_{РГ}$, А отже, до зростання частоти обертання. Цей спосіб еко номічних попереднього (рис. 9.11, а), применяется частіше і оцінюється коефіцієнтом регулювання

$$K_{РГ} = \frac{I_{РГ}}{I_a} \cdot 100\% \quad (9.28)$$

Зазвичай опір реостата $r_{РГ}$ приймається таким, щоб $K_{РГ} > 50\%$.

При секціонуванні обмотки збудження (рис. 9.11, г) відключення частини витків обмотки (магнітний потік зменшується) супроводжується зростанням частоти обертання.

При шунтуванні обмотки якоря реостатом $r_{ш}$ (рис. 9.11, в) збільшується струм збудження $I_B = I_a + I_{ш}$, Що викликає збільшення магнітного потоку і зменшення частоти обертання. Цей спосіб регулювання, хоча і забезпечує глибоке регулювання, неекономічний і застосовується дуже рідко.

9.6 Двигун змішаного збудження

Двигун змішаного збудження має дві обмотки збудження: паралельну і послідовну (рис. 9.13, а). Частота обертання цього двигуна:

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{C_e \cdot (\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \quad (9.29)$$

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

Знак плюс відповідає *узгодженим* включенням і ю обмоток збудження (МДС 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 n .

При *зустрічному* включенні обмоток потік Φ_2 при збільшенні навантаження розмагнічує машину (знак мінус), що, навпаки, підвищує частоту обертання n . Робота двигуна при цьому стає неустойчивой, так як зі збільшенням навантаження частота обертання необмежено зростає. Однак при невеликому числі витків послідовної обмотки зі збільшенням навантаження частота обертання не збільшується і у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінною.

На рис. 9.13, б показані робочі характеристики двигуна змішаного збудження при узгодженому включенні обмоток збудження, а на рис. 9.13, в - механічні характеристики. На відміну від механічних характеристик двигуна послідовного збудження останні мають більш пологий вигляд.

Слід зазначити, що за своєю формою характеристики двигуна змішаного збудження займають проміжне положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного і послідовного збудження в залежності від того, в який з обмоток збудження (паралельної або послідовної) переважає МДС.

Двигун змішаного збудження має переваги в порівнянні з двигуном послідовного збудження. Цей двигун може працювати вхолосту, так як потік паралельної обмотки Φ_1 обмежує частоту обертання двигуна в режимі холостого ходу і усуває небезпеку "розносу".

Регулювати частоту обертання цього двигуна можна реостатом $r_{p\Gamma}$ в колі паралельної обмотки збудження.

Однак наявність двох обмоток збудження робить двигун змішаного збудження більш дорогим у порівнянні з двигунами розглянутих вище типів, що дещо обмежує його застосування.

Двигуни змішаного збудження застосовують зазвичай там, де потрібні значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, стійка робота і допустимо лише невелике зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на вал (прокатні стани, вантажні підйомники, насоси, компресори).

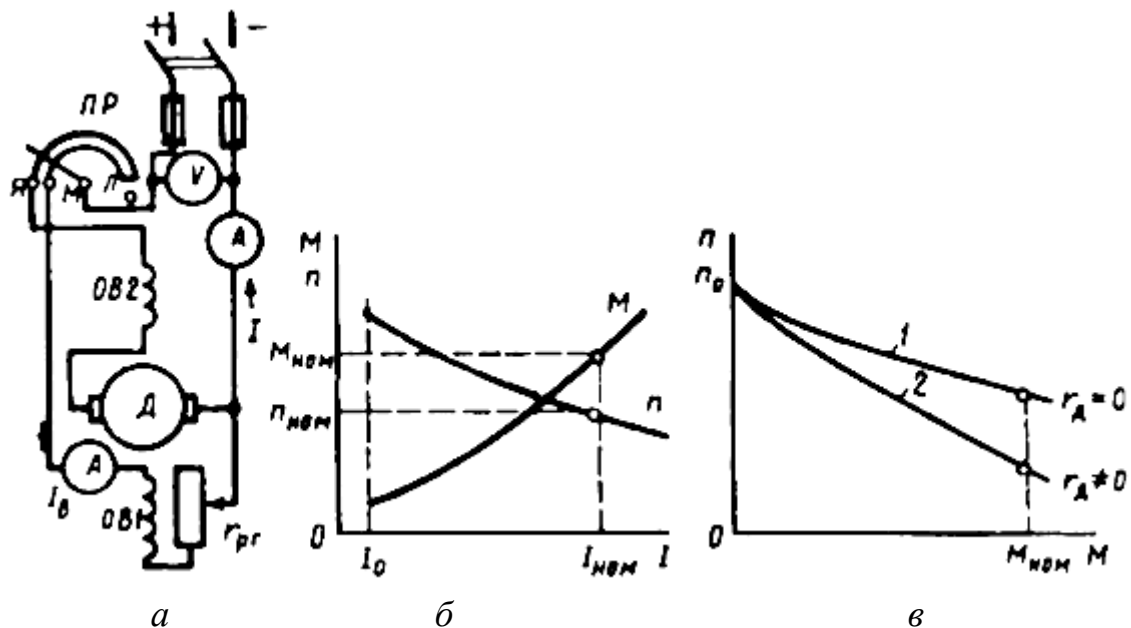


Рисунок 9.13- - Схема двигуна змішаного збудження (а), його робочого (б) і механічні (в) характеристики

9.7 Втрати і коефіцієнт корисної дії колекторної машини постійного струму

У машинах постійного струму, як і в інших електричних машинах, мають місце магнітні, електричні і механічні втрати (що складають групу основних втрат) і додаткові втрати.

Магнітні втрати P_M відбуваються тільки в осерді якоря, так як тільки цей елемент магнітопроводу машини постійного струму піддається перемагнічуванню.

Величина магнітних втрат, що складаються з втрат від гистерезиса і втрат від вихрових струмів, залежить від частоти перемагнічування $f = \frac{P \cdot n}{60}$, значень магнітної індукції в зубцях і спинці якоря, товщини листів електротехнічної сталі, її магнітних властивостей і якості ізоляції цих листів в пакеті якоря.

Електричні втрати P_{Σ} в колекторній машині постійного струму обумовлені нагріванням обмоток і щіткового контакту.

Втрати в колі збудження визначаються втратами в обмотці збудження і в реостаті, включеному в коло збудження:

$$P_{\Sigma.B} = U_B \cdot I_B. \quad (9.30)$$

тут U_B - напруга на затискачах кола збудження.

Втрати в обмотках кола якоря:

$$P_{\Sigma.я} = I_a^2 \cdot \sum r, \quad (9.31)$$

де $\sum r$ - опір обмоток в колі якоря, приведений до розрахункової робочої температури $\Theta_{\text{раб}}$.

Електричні втрати також мають місце і в контакті щіток:

$$P_{\Sigma.щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_a, \quad (9.32)$$

де $\Delta U_{щ}$ - перехідне падіння напруги на щітках обох полярностей, прийняте відповідно до марки щіток по таблиці 1 (розділ "Комутація в МПС").

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

Механічні втрати. У машині постійного струму механічні втрати

$$P_{\text{МЕХ}} = P_k + P_{\Pi} + P_{\text{ВЕН}} \quad (9.33)$$

складаються з втрат від тертя щіток по колектору $P_k = k_{TP} \cdot S_{щ} \cdot f_{щ} \cdot V_k$,

де k_{TP} - коефіцієнт тертя щіток по колектору ($k_{TP} = 0,2 \div 0,3$),

$S_{щ}$ - поверхня дотику всіх щіток з колектором,

$f_{щ}$ - питомий тиск на щітки (для машин загального призначення $f_{щ} = (2 \div 3) \cdot 10^4 \text{ Н} / \text{М}^2$),

$V_k = \pi \cdot D_k \cdot n / 60$ - окружна швидкість колектора (м / с) діаметром D_k (М)

Механічні і магнітні втрати при стабільній частоті обертання ($n = \text{const}$)
Можна вважати *постійними*.

Сума магнітних і механічних втрат $P_0 = P_M + P_{\text{МЕХ}}$ становить основну частку втрат неробочого ходу машини:

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

$$P_{\text{хх}} = U \cdot I_{a0} + U_B \cdot I_B = P_0 + I_{a0}^2 \cdot \sum r + \Delta U_{щ} \cdot I_{a0} + U_B \cdot I_B. \quad (9.34)$$

Однак з огляду на невелике значення струму I_{a0} електричні втрати $P_{\Sigma.я} = I_{a0}^2 \cdot \sum r$ і $P_{\Sigma.щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_{a0}$ дуже малі і звичайно не перевищують 3% втрат $P_0 = P_M + P_{\text{МЕХ}}$. Тому, не допускаючи помітної похибки, можна записати:

$$P_{\text{хх}} = U \cdot I_{a0} + U_B \cdot I_B = P_0 + U_B \cdot I_B, \quad (9.35)$$

звідки сума магнітних і механічних втрат холостого ходу P_0 може бути знайдена експериментально з рівняння

$$P_0 = P_{xx} - U_B \cdot I_B = P_{xx} - P_{\Sigma.B.} \quad (9.36)$$

тут $P_{\Sigma.B.} = U_B \cdot I_B$ - потужність електричних втрат в обмотці збудження.

У машинах постійного струму є ряд важко прогнозованих втрат - *додаткових*. Ці втрати складаються з втрат від вихрових струмів в міді обмоток, втрат у зрівняльних з'єднаннях, у сталі якоря через нерівномірний розподіл індукції при навантаженні, в полюсних наконечниках, обумовлених пульсацією основного потоку внаслідок зубчастості якоря, і ін.

Додаткові втрати становлять хоча і невелику величину, але таку що не піддається точному обліку. Тому, відповідно до стандарту, в машинах без компенсаційної обмотки значення додаткових втрат приймають рівним 1% від корисної потужності для генераторів або 1% від потужності, що підводиться для двигунів. У машинах з компенсаційною обмоткою значення додаткових втрат приймають рівним відповідно 0,5%.

Потужність (*Вт*) **на вході машини** постійного струму (потужність, що підводиться):

- для генератора (механічна потужність):

$$P_{1.ГЕН} = M_1 \cdot \omega = 0,115 \cdot M_1 \cdot n \quad (9.37)$$

де M_1 - крутний момент приводного двигуна, *Н * м*;

- для двигуна (електрична потужність)

$$P_{1.ДВ} = U \cdot I \quad (9.38)$$

Потужність (*Вт*) **на виході машини** (корисна потужність):

для генератора (електрична потужність)

$$P_{2.ГЕН} = U \cdot I \quad (9.39)$$

для двигуна (механічна потужність)

$$P_{2.ДВ} = M_2 \cdot \omega = 0,115 \cdot M_2 \cdot n \quad (9.40)$$

де M_2 - момент на валу електричної машини, *Н * м*;

n - частота обертання, *об / хв*.

9.7.2 Коефіцієнт корисної дії. Коефіцієнт корисної дії в електричній машині є відношення потужності, що віддається (корисної) P_2 до потужності, що підводиться (споживаної) P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (9.41)$$

Визначивши сумарну потужність вищеперелічених втрат

$$\sum P = P_M + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{Э.а}} + P_{\text{Э.ш}} + P_{\text{ДОБ}} + P_{\text{Э.В}}, \quad (9.42)$$

можна підрахувати ККД машини по одній з наступних формул:

для генератора

$$\eta_{\text{ГЕН}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{U \cdot I + \sum P}, \quad (9.43)$$

для двигуна

$$\eta_{\text{ДВ}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I + \sum P}{U \cdot I} = 1 + \frac{\sum P}{U \cdot I}. \quad (9.44)$$

Зазвичай 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 вище 100 *кВт*. Набагато менше ККД машин постійного струму малої потужності. Наприклад, для машин потужністю від 5 до 50 *Вт* $\eta = 0,15 \div 0,5$. 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 цього типу (рис. 9.14).

Коефіцієнт корисної дії електричної машини можна визначити:

а) методом безпосереднього навантаження за результатами вимірювань підведеної P_1 і відданої P_2 потужностей;

б) непрямим методом за результатами вимірювань втрат.

Метод безпосереднього навантаження може застосовуватися тільки для машин малої потужності, для інших випадків застосовується непрямий метод, як більш точний і зручний.

Встановлено, що при $\eta > 80\%$ вимірювати ККД методом безпосереднього навантаження недоцільно, так як він дає велику помилку, ніж непрямий метод.

Існує кілька непрямих методів визначення ККД.

Найбільш простий спосіб холостого ходу двигуна, коли споживана машиною постійного струму потужність витрачається тільки на втрати холостого ходу. Що ж стосується електричних втрат, то їх визначають розрахунковим шляхом після попереднього вимірювання електричних опорів обмоток та приведення їх до робочої температури.

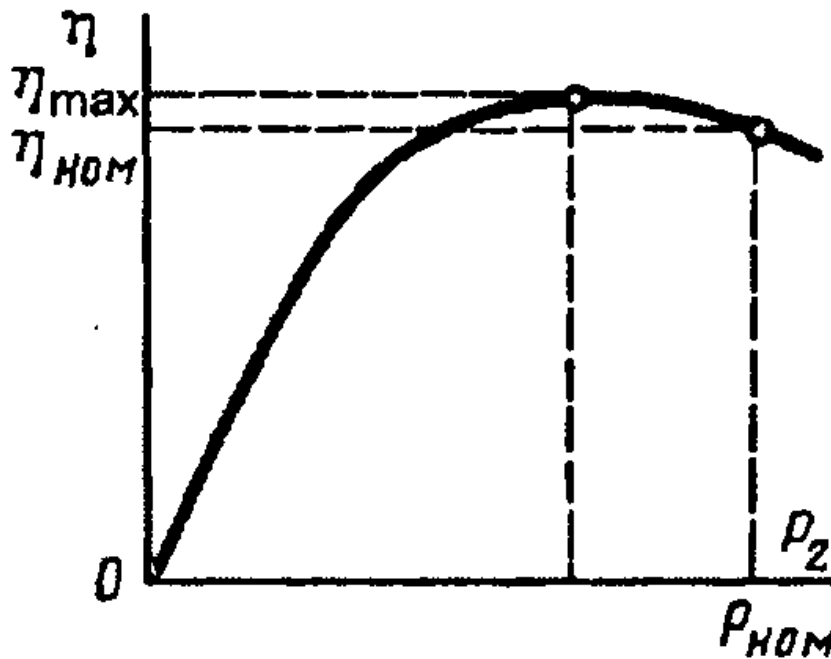


Рисунок 9.14 – Залежність ККД машини постійного струму від корисної потужності

9.8 Режими роботи машини постійного струму

У двигунах паралельного збудження при постійному струмі в обмотці збудження ($I_B = const$) магнітний потік змінюється при навантаженні досить незначно, тому з деяким наближенням можна прийняти $\Phi = const$. В цьому випадку електромагнітний момент пропорційний току в колі якоря і механічна характеристика $n = f(M)$ може бути представлена залежністю $n = f(I_a)$. Якщо цю характеристику продовжити в обидві сторони за межі осей координат (рис. 9.15, пряма 1), то можна показати, що електрична машина в залежності від величини і знаку зовнішнього моменту, що діє на її вал з боку зв'язаного з ним механізму, може працювати в трьох режимах: руховому, гальмівному і генераторному.

При роботі двигуна без навантаження струм в колі якоря $I_{a,0}$ невеликий. При цьому частота обертання $n = n_0$ (точка А). Потім з появою на валу двигуна

навантажувального моменту, що протидіє обертовому, струм у колі якоря зростає, а частота обертання зменшується.

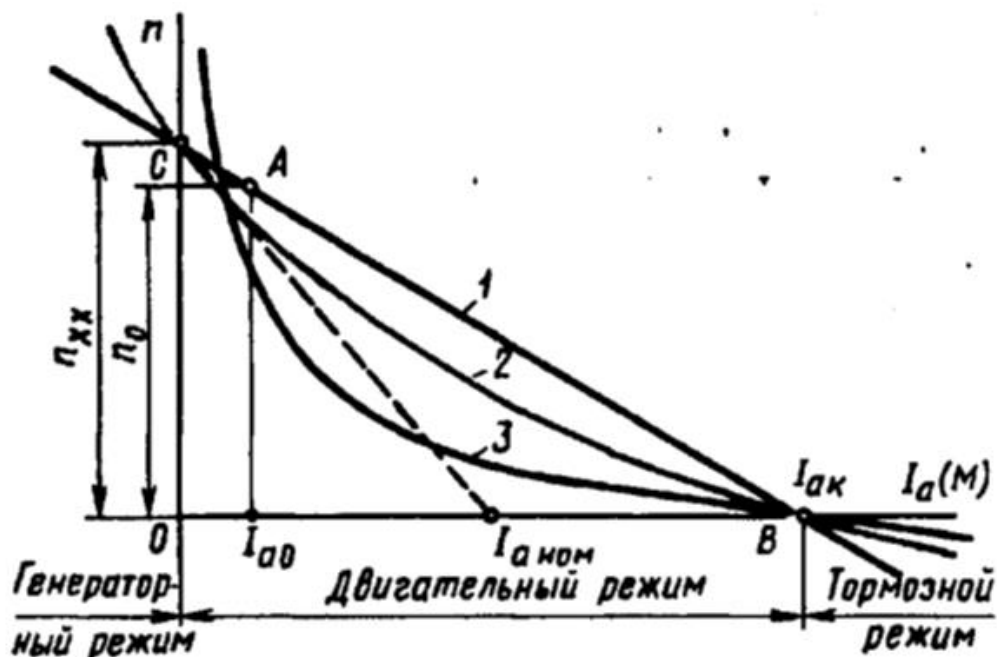


Рисунок 9.15 – Режимы работы машины постоянного струму:
1 – з паралельним (незалежним) збудженням; 2 – змішаним збудженням; 3 – послідовним збудженням

Якщо збільшити протидіючий момент до значення, при якому якір двигуна зупиниться (точка B), то ЕРС і струм короткого замикання двигуна досягають значень

$$E_a = 0, \quad I_{a.k} = \frac{U}{\sum r}.$$

Якщо двигун застосовують для приводу механізму, навантажувальний момент якого може бути більше крутного (наприклад, привід барабана, на який намотується трос з вантажем), то при подальшому збільшенні моменту навантаження цього механізму якір машини знову почне обертатися, але тепер уже в інший бік.

Тепер момент, діючий на вал електричної машини з боку навантажувального механізму, буде обертаючим, а електромагнітний момент машини - гальмуючим, тобто електрична машина перейде в *гальмівний режим*.

При роботі машини в цьому режимі ЕРС якоря діє узгоджено з напругою і струм якоря зростає $I_a > I_{a.k}$:

$$I_a = \frac{U + E_a}{\sum r}. \quad (9.45)$$

При використанні машини в гальмівному режимі необхідно вжити заходів для обмеження струму якоря. З цією метою в коло якоря включають додатковий

опір, величина якого забезпечує одержання штучної характеристики двигуна, що перетинаються з віссю абсцис при струмі якоря $I_{a.ном} < I_{ak}$ (штрихова пряма).

Якщо при роботі двигуна в режимі холостого ходу до його валу докласти момент, спрямований в бік обертання якоря, то частота обертання, а отже, і ЕРС почнуть зростати. коли ЄДС $E_a = U$, машина не буде споживати струму з мережі (точка C) і частота обертання якоря досягає значення, званого **приграничною частотою обертання**. n_{xx}

При подальшому збільшенні зовнішнього моменту на валу машини зростає частота обертання якоря $n > n_{xx}$, ЕРС E_a перевищить напругу U , а в колі якоря знову виникає струм, але іншого напрямку. При цьому машина перейде в *генераторний режим*: механічна енергія, що витрачається на обертання якоря, буде перетворюватися в електричну і надходити в мережу.

Переведення машини з рухового в генераторний режим використовують для гальмування двигуна, так як в генераторному режимі електромагнітний момент є гальмуючим (рекуперативне гальмування).

9.9 Режими гальмування машини постійного струму

Існує три способи гальмування машин постійного струму: 1) рекуперативне гальмування, 2) динамічне гальмування, 3) гальмування противмиканням.

Рекуперативне гальмування двигунів з незалежним, паралельним і змішаним збудженням відбувається в разі, коли $n > n_{xx}$ (рис. 9.15), при цьому збільшення швидкості відбувається за рахунок зовнішнього моменту на валу машини від приводного механізму і двигун починає працювати в генераторному режимі, віддаючи електричну енергію в мережу і створюючи гальмуючий електромагнітний момент, спрямований проти зовнішнього моменту.

На рис. 9.16, а показана схема динамічного гальмування двигуна постійного струму. У руховому номінальному режимі роботи в колі якоря протікає струм $I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}$, при якому крутний момент двигуна приводить у рух приводний механізм з частотою $n = n_{ном}$.

При перемиканні рубильника якір відключається від мережі і замикається на опір R . Це призводить до зміни напрямку струму якоря $I_a = \frac{-E_a}{R + \sum r}$, А, отже, і до зміни напрямку електромагнітного моменту двигуна, який стає гальмуючим по відношенню до напрямку обертання.

Схема гальмування противмиканням (рис. 9.16, б) також реалізує зміну напрямку струму якоря за рахунок зміни полярності напруги джерела. Після перемикання рубильників ток якоря $I_a = \frac{-U - E_a}{R_d + \sum r}$ змінює напрямок і

електромагнітний момент двигуна стає гальмуючим. Для обмеження величини струму і моменту використовується додатковий опір R_D .

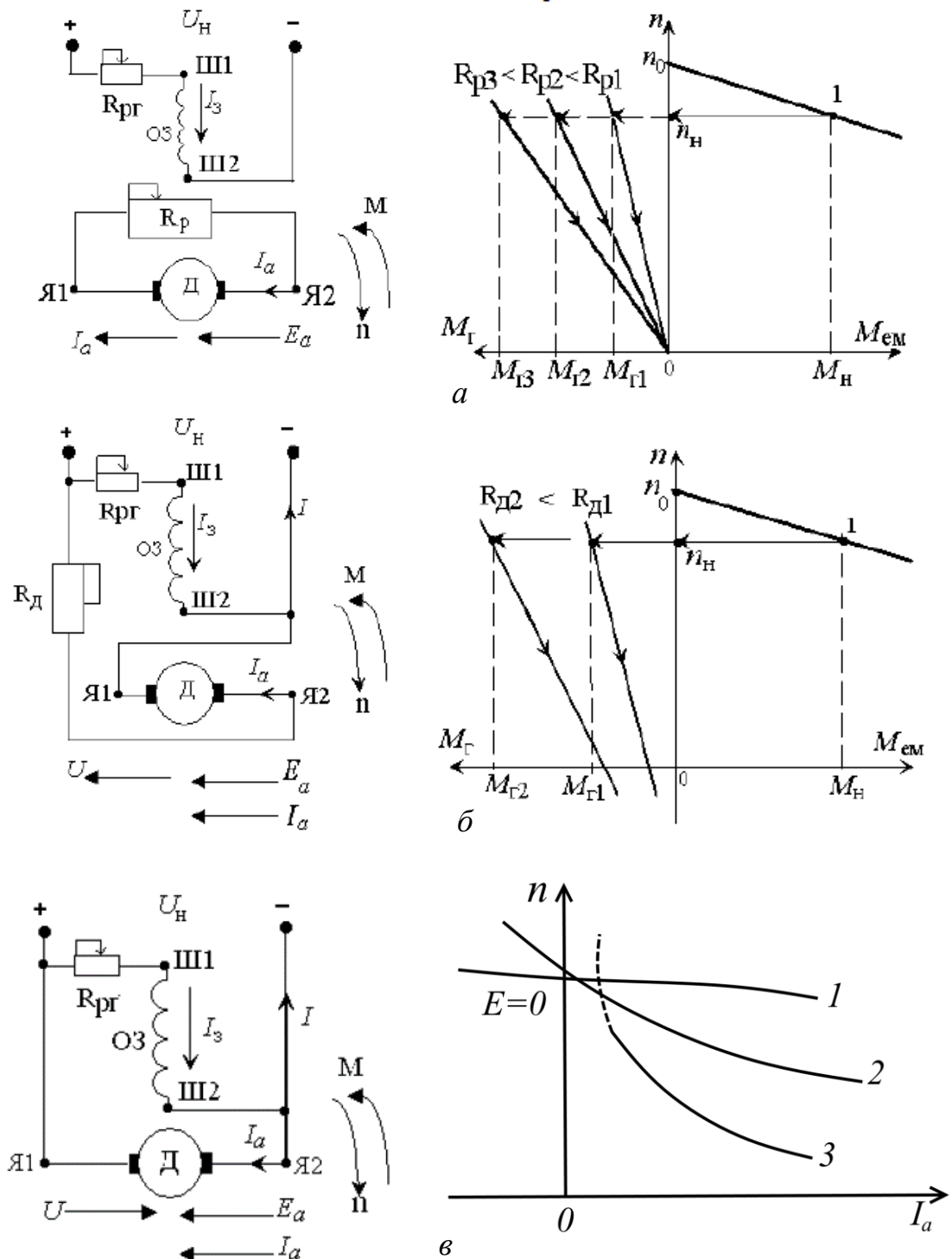


Рисунок 9.16 – Режими гальмування двигунів постійного струму: а – динамічне гальмування; б – гальмування противмиканням; в - рекуперативне гальмування (1 - паралельне(незалежне); 2 – змішане; 3 – послідовне збудження)

Література: [2],[1],[5]

ТЕМА 10

КОМУТАЦІЯ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

- 10.1 Причини, що викликають іскріння на колекторі
- 10.2 Прямолінійна комутація
- 10.3 Криволінійна уповільнена комутація
- 10.4 Способи поліпшення комутації
- 10.5 Круговий вогонь по колектору
- 10.6 Машини постійного струму спеціального призначення

10.1 Причини, що викликають іскріння на колекторі

При роботі машини постійного струму щітки і колектор утворюють ковзний контакт. Площа контакту щітки вибирають за значенням робочого струму машини, що припадає на одну щітку, відповідно до припустимою щільністю струму для обраної марки щіток. Якщо з якоїсь причини щітка прилягає до колектора не всієї поверхнею, то виникають надмірні місцеві щільності струму, що призводять до іскріння на колекторі.

Причини, що викликають іскріння на колекторі, поділяють на механічні, потенційні і комутаційні.

Механічні причини іскріння - слабкий тиск щіток на колектор, биття колектора, його еліптичність або негладка поверхню, забруднення поверхні колектора, виступання міканітової ізоляції над мідними пластинами, нещільне закріплення траверси, пальців або щіткотримачів, а також інші причини, що викликають порушення електричного контакту між щіткою і колектором.

Потенційні причини іскріння з'являються при виникненні напруги між суміжними колекторними пластинами, що перевищує допустиме значення. В цьому випадку іскріння найбільш небезпечне, так як воно зазвичай супроводжується появою на колекторі електричних дуг.

Комутаційні причини іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при переході секцій обмотки якоря з однієї паралельної гілки в іншу.

Іноді іскріння викликається цілим комплексом причин. З'ясування причин іскріння слід починати з механічних, так як їх виявляють оглядом колектора і щіткового пристрою. Важче виявити і усунути комутаційні причини іскріння.

*При випуску готової машини з заводу в ній налаштовують **темну** комутацію, яка виключає будь-яке іскріння. Однак в процесі експлуатації машини, у міру зносу колектора і щіток, можлива поява іскріння. У деяких випадках воно може бути значним і небезпечним, тоді машину необхідно зупинити для з'ясування і усунення причин іскріння. Однак невелике іскріння в машинах загального призначення зазвичай допустимо.*

Відповідно до стандарту, іскріння на колекторі оцінюється ступенем іскріння (класом комутації) під збігаючим краєм щітки.

- Ступінь 1 - іскріння немає (темна комутація).
- Ступінь 1.25 - слабе іскріння під невеликою частиною щітки, що не викликає почорніння колектора і появи нагару на щітках.
- Ступінь 1.5 - слабе іскріння під більшою частиною щітки, що приводить до появи слідів почорніння на колекторі, легко видаляється протиранням поверхні колектора бензином, і слідів нагару на щітках.
- Ступінь 2 - іскріння під усім краєм щітки. Допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженнях. Призводить до появи слідів почорніння на колекторі, що не усуваються протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.
- Ступінь 3 - значне іскріння під усім краєм щітки з появою великих іскор, що приводить до значного почорніння колектора, що не усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також до підгоряння 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 допустима ступінь іскріння в паспорті електричної машини не вказана, то при номінальному навантаженні вона не повинна перевищувати 1.5.

При обертанні якоря машини постійного струму колекторні пластини по черзі стикаються з щітками. При цьому перехід щітки з однієї пластини (збігає) на іншу (набігає) супроводжується перемиканням секції обмотки з однієї паралельної гілки в іншу і зміною як значення, так і напрямку струму в цій секції.

Процес перемикання секції з однієї паралельної гілки в іншу і явища, що його супроводжують називаються комутацією.

Секція, в якій відбувається комутація, називається комутуючою, а тривалість процесу комутації - *періодом комутації*:

$$T_k = \left(\frac{60}{K \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{b_{щ}}{b_k} \right), \quad (10.1)$$

де $b_{щ}$ - ширина щітки;

K - число колекторних пластин;

n - швидкість обертання якоря;

b_k - відстань між центрами сусідніх колекторних пластин (колекторним поділом).

Складність процесів комутації не дозволяє розглянути комутацію в загальному вигляді. Тому для отримання аналітичних і графічних залежностей, що пояснюють комутацію, допускають, що ширина щітки дорівнює колекторному поділу; щітки розташовані на геометричній нейтралі; електричний опір комутуючої секції та місць її приєднання до колектора в порівнянні з опором

перехідного контакту "щітка - колектор" дуже малий (зазвичай таке співвідношення зазначених опорів відповідає дійсності).

У початковий момент комутації (рис. 10.1) контактна поверхня щітки стосується лише плити 1, а комутуюча секція відноситься до лівої паралельної вітки обмотки і струм в ній дорівнює i_a . Потім пластина 1 поступово збігає зі щітки і на зміну їй набігає пластина 2. В результаті комутуюча секція виявляється замкнутою щіткою і струм в ній поступово зменшується до нульового значення.

В середині процесу комутації ($t = 0.5 \cdot T_k$) Контактна поверхня щітки рівномірно перекриває обидві колекторні пластини і струм в комутуючій секції відсутній.

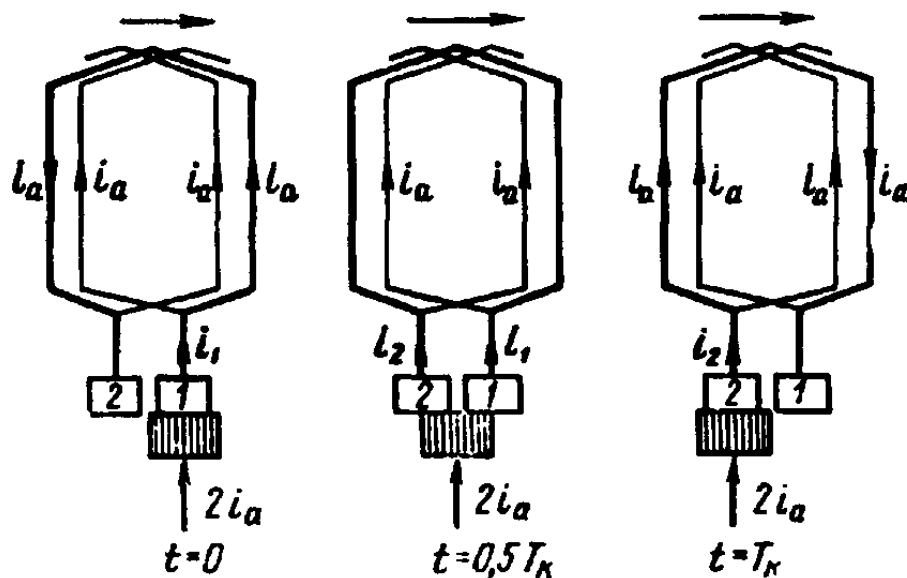


Рисунок 10.1 – Перехід комутуючої секції з однієї паралельної вітки в іншу

В кінці комутації ($t = T_k$) щітка повністю переходить на пластину 2 і позбавляється від контакту з пластиною 1, а струм в комутуючій секції стає рівним $-i_a$, тобто за значенням таким же, що і на початку комутації, а за напрямом - протилежним.

При цьому комутуюча секція виявилася в правій паралельній гілці обмотки.

10.2 Прямолінійна комутація

Цей вид комутації має місце в машині тоді, коли в процесі комутації в комутуючій секції ЕРС не наводиться або, що більш реально, сума ЕРС в комутуючій секції дорівнює нулю. В цьому випадку для комутації секції,

замкнutoї щіткою ($t = 0.5 \cdot T_k$), відповідно до другого закону Кірхгофа можна записати:

$$i_1 \cdot r_1 - i_2 \cdot r_2 = 0 , \quad (10.2)$$

де r_1 і r_2 - перехідні опори між щіткою і збігаючою 1 і набігаючою 2 пластинами;
 i_1 і i_2 - струми, що переходять в обмотку якоря через пластини 1 і 2:

$$i_1 = i_a + i ; i_2 = i_a - i ; \quad (10.3)$$

де i - струм в комутуючій секції.

тоді:

$$(i_a + i) \cdot r_1 - (i_a - i) \cdot r_2 = 0 , \quad (10.4)$$

звідки струм в комутуючій секції:

$$i = i_a \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} . \quad (10.5)$$

Закон зміни струму комутуючій секції в функції часу визначається рівнянням:

$$i = i_a \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{T_k}\right) . \quad (10.6)$$

Це рівняння є лінійним, а тому графік являє собою пряму лінію, яка перетинає вісь абсцис в точці $t = 0.5 \cdot T_k$ (рис. 10.2).

Комутація, при якій струм в комутуючій секції змінюється за прямолінійним законом, називається *прямолінійною (ідеальною) комутацією*.

Дуже 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" протягом усього періоду комутації залишається незмінною ($j_1 = j_2 = \operatorname{const}$).

Фізично це пояснюється тим, що при прямолінійній комутації спадання струму, що проходить через збігаючу пластину колектора, супроводжується зменшенням площі контакту щітки з цієї пластиною, а наростання струму через набігаючу пластину відбувається при збільшенні площі контакту щітки з цією пластиною (щільність струму залишається незмінною).

З побудов, зроблених на рис. 10.2, випливає, що до моменту часу, коли щітка втрачає контакт зі збігаючою пластиною, струм через цю пластину зменшується до нуля. Таким чином, *при прямолінійній комутації пластина колектора виходить з-під щітки без розриву струму.*

Викладені властивості прямолінійної (ідеальної) комутації - *сталість щільності струму під щіткою і вихід пластины з-під щітки без розриву струму* - є основними, і завдяки їм цей вид комутації не супроводжується іскрінням на колекторі.

10.3 Криволінійна уповільнена комутація

Період комутації в сучасних машинах постійного струму дуже малий і становить приблизно $10^{-3} \div 10^{-6}$ с. При цьому середня швидкість зміни струму в

комутуючій секції $\frac{di}{dt} = \frac{2 \cdot i_a}{T_k}$ дуже

велика, що призводить до появи в комутуючій секції ЕРС самоіндукції:

$$e_L = -L_c \cdot \frac{di}{dt}, \quad (10.7)$$

де L_c - індуктивність секції; i - струм в комутуючій секції.

Зазвичай в кожному пазу якоря знаходиться кілька пазових сторін (не менше двох), що належать різним секціям. При цьому якщо крок обмотки повний ($y_1 = \tau$), То всі ці секції одночасно знаходяться в стані комутації, будучи замкнутими різними щітками

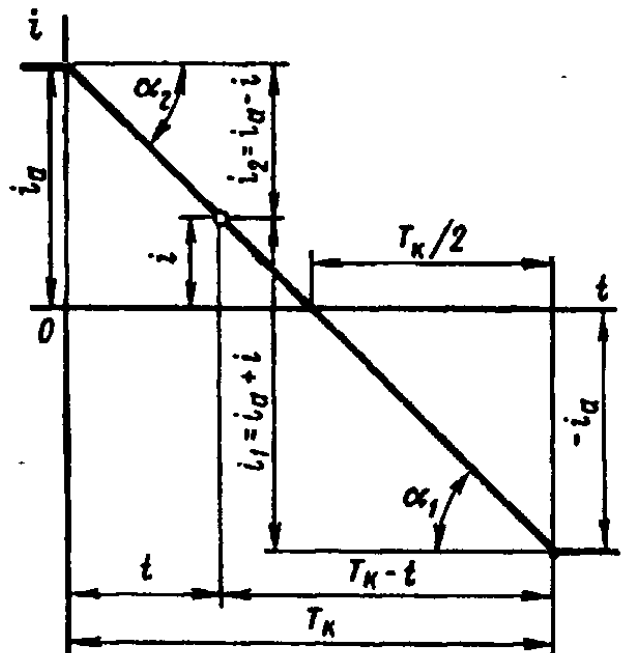


Рисунок 10.2 – Графік струму прямолінійної комутації

(Рисунок 10.3, *a*). Зазвичай ширина щітки більше колекторного поділу і кожна щітка замикає одночасно кілька секцій. Так як пазові частини комутуючих секцій лежать в різних пазлах, то змінюваний магнітний потік кожної з цих частин наводить в пазових частинах інших секцій ЕРС взаємоіндукції:

$$e_M = -M_c \cdot \frac{di}{dt}, \quad (10.8)$$

де M_c - взаємна індуктивність одночасно комутуючих секцій.

Обидві ЕРС створюють в комутуючій секції *реактивну (результуючу) ЕРС*

$$e_p = e_L + e_M = -(L_c + M) \cdot \frac{di}{dt}, \quad (10.9)$$

яка перешкоджає зміні струму в комутуючій секції. Крім того, під впливом реакції якоря магнітна індукція в зоні комутації (на геометричній нейтралі) набуває деяке значення B_k , Під дією якої в комутуючій секції наводиться *ЕРС обертання* $e_{вр} = B_k \cdot 2 \cdot l \cdot w_c \cdot v$,

де l - довжина пазових частин секції;

w - число витків в секції;

v - лінійна швидкість руху секції.

Електрорушійна сила обертання на відміну від реактивної ЕРС може мати різне спрямування в залежності від полярності зовнішнього магнітного поля в зоні комутації. Якщо машина не має додаткових полюсів, то ЕРС обертання спрямована погоджено з реактивної ЕРС. В цьому випадку в контурі комутуючої секції діє сума ЕРС:

$$\sum e = e_p + e_{вр} \quad (10.10)$$

З урахуванням викладеного, рівняння за другим законом Кірхгофа для комутуючої секції, замкнутої щіткою при $t = 0.5 \cdot T_k$, Має вигляд:

$$i_1 \cdot r_1 - i_2 \cdot r_2 = \sum e, \quad (10.11)$$

або, використовуючи вираз для струму в комутуючій секції для прямолінійної комутації, запишемо вираз струму в комутуючій секції при криволінійній сповільненій комутації:

$$i = i_a \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} + \frac{\sum e}{r_2 + r_1} = i_{\text{ПР}} + i_{\text{Д}} \quad (10.12)$$

Перший доданок правої частини отриманого виразу являє собою струм прямолінійної комутації: $i_{\text{ПР}} = i_a \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$.

Другий доданок правої частини попереднього виразу визначає значення додаткового струму комутації, що виникає в контурі комутуючої секції під дією

$$\text{ЕРС } \sum e : i_D = \frac{\sum e}{r_2 + r_1}.$$

Характер зміни струму $i_{\text{ПР}}$ визначається графіком у вигляді прямої лінії. Що ж стосується додаткового струму комутації i_D , то для визначення характеру його зміни 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 $(r_1 + r_2)$.

Якщо в машині немає додаткових полюсів і магнітна індукція в зоні комутації B_k невелика, то ЕРС $\sum e$ визначається головним чином реактивною

$$\text{ЕРС: } e_p = e_L + e_M = -(L_c + M) \cdot \frac{di}{dt}.$$

При прямолінійному законі зміни струму $\frac{di}{dt} = \text{const}$, а отже, $\sum e = e_p = \text{const}$.

ЕРС обертання $e_{\text{вр}} = B_k \cdot 2 \cdot l \cdot w_c \cdot v$ також є практично постійною величиною.

На початку комутації ($t=0$) і в її кінці ($t=T_k$) $r_1 + r_2 = \infty$, при $t=T_k/2$ сума опорів $r_1 + r_2 = 4 \cdot R$ (рис. 10.3, а).

R - опір перехідного контакту "щітка - пластина", коли пластина колектора повністю перекрита щіткою.

Цьому закону зміни суми опорів і сталості ЕРС відповідає крива 1 зміни додаткового струму комутації $i_D(t)$ (рис. 10.3, б)

Графік зміни результуючого струму комутації $i(t)$, отриманий складанням ординат графіків струму прямолінійної комутації $i_{\text{ПР}}(t)$ (рис. 10.2) і додаткового струму комутації $i_D(t)$ (рис. 10.3, графік 1), представлений на рис. 10.4.

Криволінійний вид цього графіка обумовлений криволінійністю графіка $i_D(t)$.

Фізично це пояснюється реактивною дією сумарної ЕРС $\sum e$, що наводиться в комутуючій секції, що перешкоджає змінам струму в цій секції від i_a на початку комутації до $-i_a$ в її кінці. З цієї причини в середині періоду комутації (точка а) струм в комутуючій секції $i_a = i_D$, тобто він не дорівнює нулю, як це мало місце при прямолінійній комутації, а дорівнює

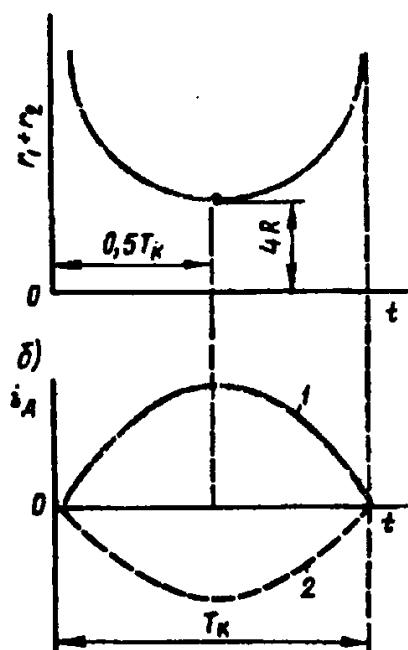


Рисунок 10.3 – Графіки зміни опорів $r_1 + r_2$ і струму i_A

додатковому току комутації i_D , який в цей момент часу ($t = 0.5 \cdot T_k$) має найбільше значення (рис. 10.3, б, графік 1).

Зменшення струму i до нуля і зміна його напрямку наступають у другій половині періоду комутації в момент часу $t > 0.5 \cdot T_k$ (точка b), тобто в порівнянні з прямолінійною в розглянутому виді комутації процес зміни напрямку струму в комутуючій секції затягується в часі.

В результаті графік комутації набуває криволінійний вид. З цієї причини таку комутацію називають *криволінійною уповільненою*. Характерна ознака цього виду комутації - неоднакова щільність струму під щіткою на початку і в кінці періоду комутації.

Середнє значення щільності струму під набігаючим краєм щітки j_2 , який має контакт з пластиною 2 (Рисунок 10.3, а), менше середнього значення щільності струму j_1 під збігаючим краєм щітки, який має контакт з пластиною 1 (рис. 10.5, а).

При криволінійній сповільненій комутації площа S_1 дотику пластини 1 з щіткою зменшується швидше, ніж струм $i_1 = i_a + i_D$. А тому щільність струму під збігають краєм щітки підвищується.

До кінця періоду комутації ця щільність струму досягає максимального значення $j \equiv \tan \alpha_1$, де α_1 відповідає $t \approx T_k$.

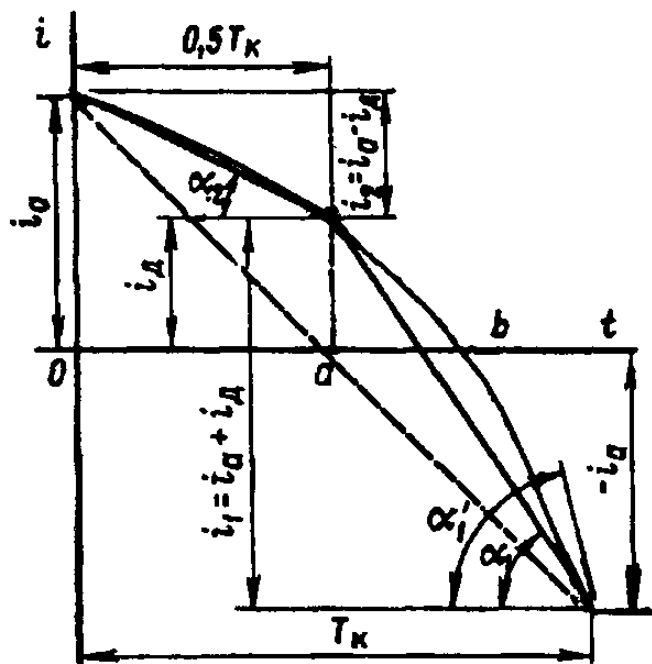


Рисунок 10.4 – Графік струму криволінійної уповільненої комутації

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 і при невеликих навантажувальних токах в 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.

Викладені вище властивості криволінійної сповільненої комутації

- підвищення щільності струму під збігаючим краєм щітки і вихід збігаючої пластини з-під щітки з розривом кола струму комутації - створюють умови для виникнення іскріння на колекторі під збігаючими краями щіток.

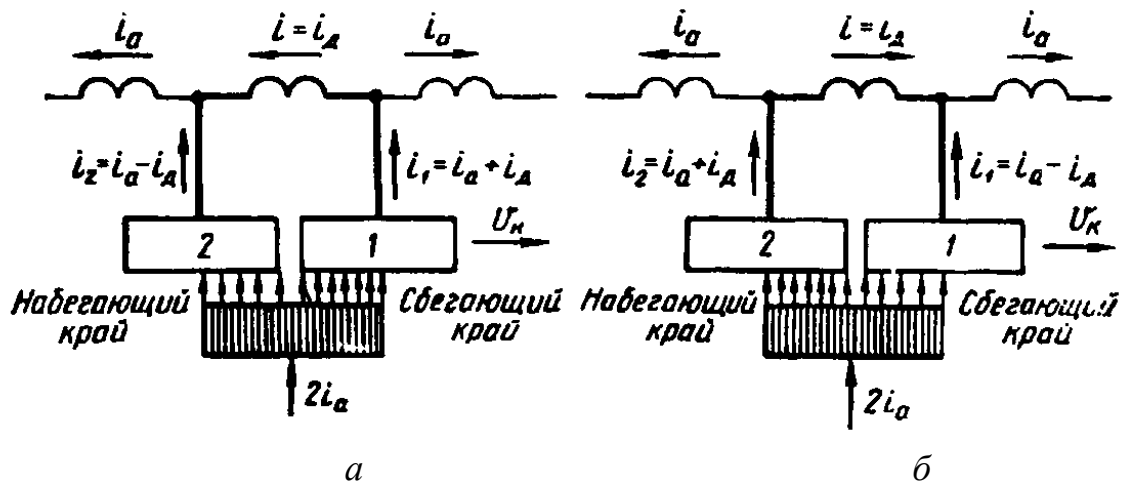


Рисунок 10.5 – Розподіл щільності струму під щіткою при крилінійній уповільненій (а) і прискореній (б) видах комутації

10.4 Способи поліпшення комутації

Основна причина незадовільної комутації в машинах постійного струму - додатковий струм комутації: $i_D = \frac{\sum e}{r_2 + r_1}$. Цей струм можна зменшити за рахунок збільшення опорів і зменшення ЕРС.

Вибір щіток. З точки зору забезпечення задовільної комутації доцільно застосовувати щітки з великим перехідним падінням напруги в перехідному контакті і власне щітці, тобто щітці з великим опором.

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

Додаткові полюси. Призначення додаткових полюсів - створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб ЕРС обертання $e_{вр}$, що наводиться цим полем в комутуючій секції компенсувала реактивну ЕРС e_p .

У машині постійного струму без вжиття заходів щодо поліпшення комутації ЕРС e_p і $e_{вр}$ спрямовані в одну сторону, тобто діють згідно: $\sum e = e_p + e_{вр}$.

Сумарна ЕРС в комутуючій секції дорівнюватиме нулю, якщо за допомогою додаткових полюсів створити в зоні комутації магнітне поле з магнітною індукцією B_k такої величини і напрямку, щоб ЕРС обертання $e_{вр}$ змінила свій напрямок на протилежний, а значення її було б так само реактивним ЕРС e_p .

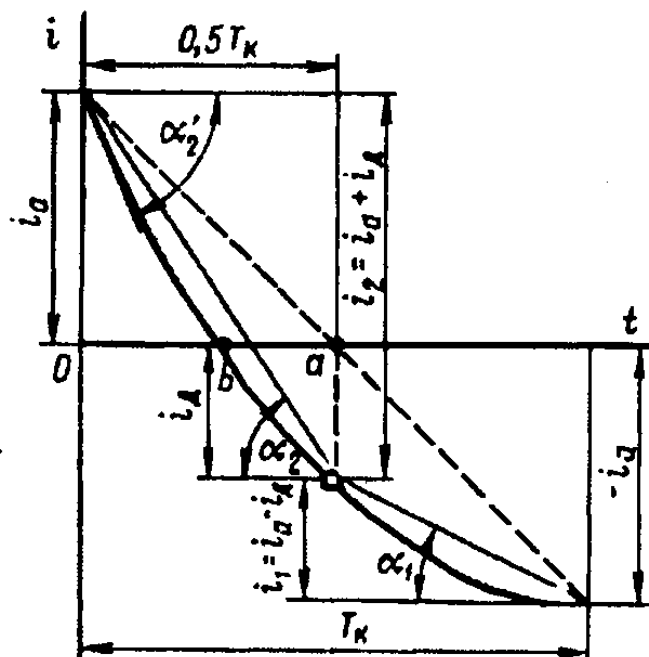
В цьому випадку: $\sum e = e_p - e_{вр} = 0$ і комутація стає прямолінійною (ідеальною).

Група щіток, позначення	Перехідне падіння напруги на пару щіток при номінальному струмі, В	Омінальна щільність струму, А/мм ²	Область застосування
Графітні Г; 611М	1,9 – 2,0	0,11 – 0,12	Для машин з полегшеними умовами комутації
Електрографітні ЕГ	2,0 – 2,7	0,1 – 0,15	Для машин із середніми та ускладненими умовами комутації та для контактних кілець
Вугільно-графітні УГ; Т	2,0	0,06 – 0,07	Для машин із середніми умовами комутації
Мідно-графітні М; МГ	0,2 – 1,5	0,15 -0,2	Для низьковольтних (до 48 В) машин і контактних кілець

Якщо МДС додаткових полюсів зробити більше необхідного значення, то ЕРС обертання стане більше за реактивну ЕРС. В цьому випадку сумарна ЕРС $\sum e$ змінить свій знак, а додатковий струм комутації i_d - свій напрям (рис. 10.3, б - крива 2) в порівнянні з тим, яке він мав при криволінійній сповільненій комутації (рис. 10.3, б - крива 1).

Графік зміни результуючого струму комутації $i(t)$ в цьому випадку приймає вид, представлений на рис. 10.6, тобто комутація стає *криволінійною прискореною*, через те що струм в комутуючій секції досягає нульового значення за час $t < 0.5 \cdot T_k$ (точка b).

Для криволінійної прискореної комутації характерно підвищення щільності струму під набігаючим краєм щітки (рис. 10.5,б). Пояснюється це тим, що при цьому виді комутації площа зіткнення пластини 2 з щіткою зростає повільніше, ніж збільшується струм $i_2 = i_a + i_d$.



Найбільше значення щільності струму 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 збігаючої пластини з-під щітки відбувається з розривом кола додаткового струму комутації, який має напрям, протилежний струму сповільненої комутації.

Для забезпечення компенсації реактивної ЕРС при різних

Рисунок 10.6 – Графік струму криволінійної прискореної

навантаженнях машини обмотку додаткових полюсів включають послідовно з обмоткою якоря. В цьому випадку МДС додаткових полюсів F_D при різних навантаженнях машини змінюється пропорційно струму якоря, тобто пропорційно МДС якоря F_a .

Полярність додаткового полюса в генераторі повинна бути такою ж, як і у наступного за напрямком обертання головного полюса, а в двигуні - як у попереднього полюса (див. рисунок).

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині тільки в межах номінального навантаження. При перевантаженні машини відбувається насичення магнітного кола додаткових полюсів.

10.5 Круговий вогонь по колектору

При значних перевантаженнях або при раптовому короткому замиканні машини постійного струму комутація набуває різко уповільнений характер. У цьому випадку між збігаючою колекторною пластиною і збігаючим краєм щітки виникає електрична дуга. Так як колектор обертається, то дуга механічно розтягується (рис. 5.7, а).

Поряд з цим перевантаження машини супроводжується посиленням реакції якоря, під дією якої розподіл індукції в повітряному зазорі машини стає нерівномірним.

В результаті напруга між сусідніми колекторними пластинами збільшується, перевищуючи допустимі межі. Це, з одного боку, може привести до виникнення

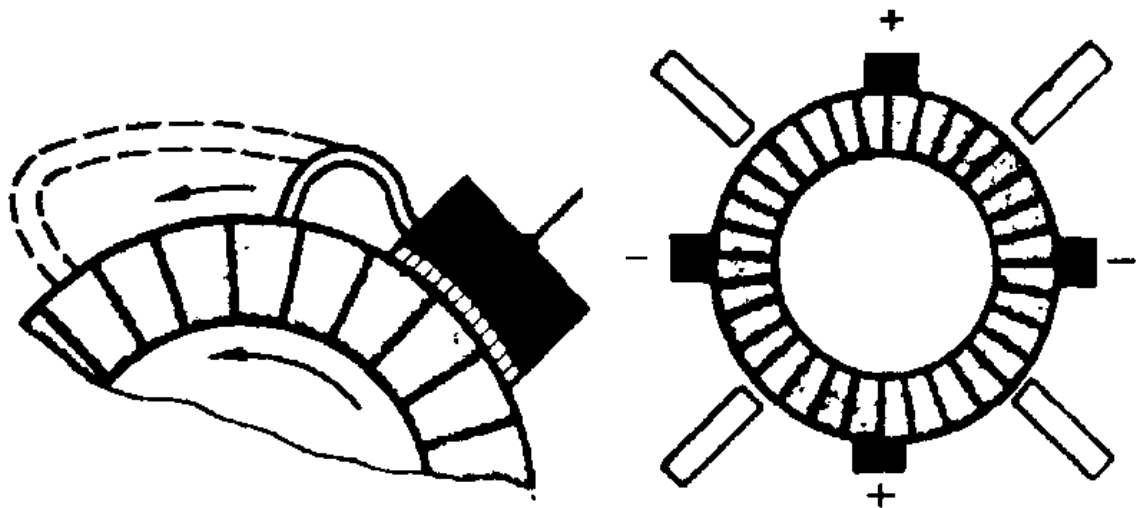


Рисунок 10.7 – Розтягування електричної дуги на колекторі, що обертається (а) та розташування бар'єрів між щітками (б)

електричних дуг між суміжними пластинами, а з іншого боку, поява високого потенціалу на деяких пластинах викликає різке підвищення напруги між щіткою і колекторними пластинами у міру їх 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, яка може перекинутися також і на корпус машини. Описане явище називається *круговим вогнем по колектору*.

Круговий вогонь дуже небезпечний, оскільки може привести до важкої аварії машини, включаючи виникнення в машині пожежі.

Додаткові полюси і компенсаційна обмотка хоча і послаблюють небезпеку виникнення кругового вогню, але повністю її не усувають.

Тому для захисту обмотки якоря від пошкоджень електричною дугою в разі виникнення кругового вогню в електричних машинах, що працюють в умовах частих перевантажень, між колектором і обмоткою на якорі встановлюють ізолюючий екран.

У деяких машинах застосовують повітряне дуття, що здуває дугу в бік підшипника, захищеного теплостійкою ізоляційною перегородкою. Для створення перешкоди на шляху поширення дуги між щітками різної полярності встановлюють бар'єри з ізоляційного матеріалу.

10.6 Машини постійного струму спеціального призначення

10.6.1 Тахогенератор постійного струму

Тахогенератори постійного струму служать для вимірювання частоти обертання за значенням вихідної напруги, а також для отримання електричних сигналів, пропорційних частоті обертання валу в схемах автоматичного регулювання.

Тахогенератор постійного струму являє собою генератор малої потужності з електромагнітним незалежним збудженням (Рисунок 10.8, *а*) або зі збудженням постійними магнітами.

З огляду на те, що при постійному струмі збудження $I_B = const$ магнітний потік Φ практично не залежить від навантаження, вихідна ЕРС тахогенератора $U_{ВЫХ}$ прямо пропорційна частоті обертання:

$$U_{ВЫХ} = C_e \cdot \Phi \cdot n = C'_e \cdot n, \quad (10.13)$$

де $C'_e = C_e \cdot \Phi = const$.

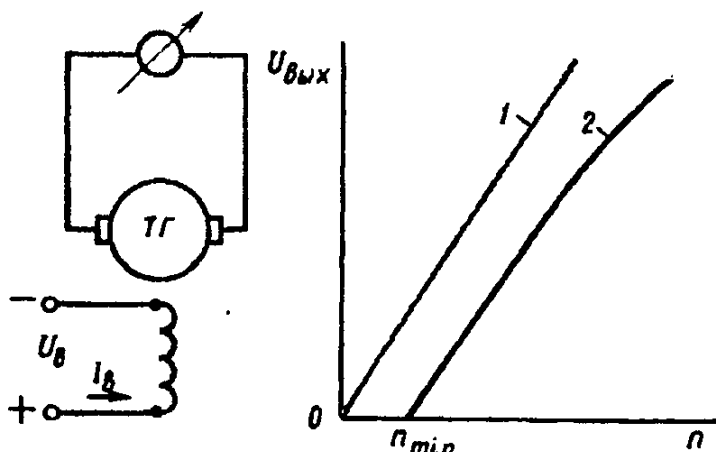


Рисунок 10.8 – Принципова схема (а) і вихідна характеристика (б) тахогенератора постійного струму

Остання формула справедлива і для тахогенератора зі збудженням постійними магнітами, де $\Phi = const$. Для вимірювання частоти обертання тахогенератором вал останнього механічно з'єднують з валом механізму, частоту обертання якого потрібно виміряти. На виводи тахогенератора підключають вимірювальний прилад зі шкалою, градуйованою в одиницях частоти обертання.

Точність роботи тахогенератора визначається його *вихідною характеристикою*, що являє собою залежність вихідної напруги від частоти обертання n при незмінному значенні опору навантаження. Найбільш точна робота тахогенератора відповідає прямолінійній вихідній характеристиці (рис. 10.8, б, пряма 1).

Однак в реальних тахогенераторах вихідна характеристика непрямої (графік 2) і до того ж вона виходить не з початку осей координат.

Основна причина криволінійності характеристики - реакція якоря, тому зменшенню криволінійності цієї характеристики сприяє включення на вихід тахогенератора приладів з великим внутрішнім опором, так як при зменшенні струму якоря послаблюється дія реакції якоря.

В сучасних тахогенераторах відхилення вихідної характеристики від прямої становить від 0,5 до 3%.

Падіння напруги в щітковому контакті $\Delta U_{щ}$ створює в тахогенераторі *зону нечутливості*.

Це діапазон частот обертання від 0 до n_{min} , в якому напруга на виході тахогенератора дорівнює нулю. Границя зони нечутливості визначається виразом:

$$n_{min} = \frac{\Delta U_{щ}}{C_e \cdot \Phi}, \quad (10.14)$$

Широке застосування отримали тахогенератори постійного струму, що збуджуються постійними магнітами. Ці тахогенератори не мають обмотки збудження, і тому вони простіші за конструкцією і мають менші габарити.

10.6.2 Виконавчі двигуни постійного струму

Виконавчі двигуни постійного струму застосовуються в системах автоматики для перетворення електричного сигналу в механічне переміщення. Крім звичайних вимог, що пред'являються до електродвигунів загального

призначення до виконавчих двигунів пред'являється ряд специфічних вимог, з яких основними є відсутність самоходу і мала інерційність (висока швидкодія).

Майже всі виконавчі двигуни (виняток становлять лише двигуни з постійними магнітами) мають дві обмотки. Одна з них постійно підключена до мережі і називається *обмоткою збудження*, на іншу - *обмотку керування* - електричний сигнал подається лише тоді, коли необхідно викликати обертання валу. Від напруги керування залежать частота обертання і крутний момент виконавчого двигуна, а отже, і розвивана їм механічна потужність.

Виконавчі двигуни постійного струму по конструкції відрізняються від двигунів постійного струму загального призначення тільки тим, що мають шихтовані (набрані з листів електротехнічної сталі) якір, станину і полюси, що необхідно для роботи виконавчих двигунів в перехідних режимах. Магнітне поле виконавчих двигунів ненасичене, тому реакція якоря практично не впливає на їхні робочі характеристики.

В якості виконавчих двигунів постійного струму в даний час використовують найчастіше двигуни з незалежним збудженням, рідше - двигуни з постійними магнітами. У двигунів з незалежним збудженням в якості обмотки керування використовують або обмотку якоря - двигуни з якірним керуванням, або обмотку полюсів - двигуни з полюсним керуванням.

У виконавчих двигунів з якірним керуванням обмоткою збудження є обмотка полюсів, а обмоткою керування - обмотка якоря.

Література:

[2],[1],[5]

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белікова Л. Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с.
2. Кацман М.М. Электрические машины. Учеб. для учащихся электротехн. спец. техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Высш. шк., 1990. – 463 с.
3. Электрические измерения. Общий курс, под ред. А. В. Фремке, 2 изд., М. — Л., 1954.
4. Арутюнов В. О., Электрические измерительные приборы и измерения, М. — Л., 1958.
5. Яцун М.А. Електричні машини – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 428 с.