

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Електричні машини, ч.1.

Трансформатори та синхронні машини

Література до теоретичного курсу.

- Яцун М.А. Електричні машини: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2001. – 428 с.
- Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. –360 с.
- Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. – 840 с
- Важнов А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. – 340 с.
- Токарев Б.Ф. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.

Література до лабораторних та практичних робіт

Електричні машини: Програма, методичні вказівки та контрольні завдання для студентів дистанційної форми навчання напряму підготовки 6.0906 «Електротехніка» /Укл.: Ю.І. Чучман, В.В. Попічко. – Серія «Дистанційне навчання». – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003.-48 с.

Трансформатори. Методичні вказівки з курсу “Електричні машини” для студентів базових напрямків “Електромеханіка” і “Електротехніка”/ О. В. Волошанський. – Львів, ДУЛП, 1996. – 90 с.

Синхронні машини. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу “Електричні машини” для студентів базових напрямків “Електромеханіка” і “Електротехніка”/ О. В. Волошанський, М. І. Скоклюк. – Львів, ДУЛП, 1994. – 107 с.

Дослідження параметрів, робочих і пускових характеристик асинхронного двигуна. Методичні вказівки до лабораторної роботи з курсу “Електричні машини”/ Ю. В. Осідач, В. В. Попічко. – Львів, ДУЛП, 1991. – 49 с.

Дослідження паралельної роботи синхронної машини з мережею нескінченної потужності. Програма та методичні вказівки до лабораторної роботи з предмету “Електричні машини”/ О. В. Волошанський. – Львів, ДУЛП, 1993. – 49 с.



1. Трансформатори

Загальні питання машин змінного струму. Призначення трансформаторів та область їх застосування. Короткий огляд будови трансформаторів. Електромагнітна схема та принцип дії трансформатора. Ідеалізований трансформатор: неробочий хід, робота під навантаженням. Реальний трансформатор. Намагнічування осердя реального трансформатора: характеристика намагнічування, складові струму неробочого ходу, зведений двохобмотковий трансформатор, його заступна схема та її параметри. Режими неробочого ходу та короткого замикання двохобмоткового трансформатора. Робота двохобмоткового трансформатора під навантаженням. Рівняння стану та векторні діаграми.

Енергетичні діаграми трансформатора. Коефіцієнт корисної дії (к. к. д.) трансформатора. Залежність к. к. д. від навантаження. Зміна напруги та зовнішня характеристика трансформатора. Способи регулювання напруги трансформатора. Однофазний автотрансформатор. Трифазні трансформатори: схеми та групи з'єднань обмоток. Паралельна робота трансформаторів: умови вмикання, розподіл навантаження.



2. Синхронні машини

Короткий огляд типів та конструкцій машин змінного струму та їх статорних обмоток. Схеми основних типів обмоток. Поняття про намагнічувальні сили обмоток змінного струму.

Е. р. с. статорної обмотки машини змінного струму змінного струму. Зведення намагнічувальної сили та струму якоря синхронної машини до її обмотки збудження. Вивчення синхронізуючої потужності, синхронізуючого моменту та статичної перевантаженості синхронної машини.

Магнітне поле та параметри обмотки збудження синхронної машини. Магнітне поле та параметри обмотки. Реакція якоря в явнополюсних і неявнополюсних СМ. Поняття про теорію двох реакцій. Намагнічувальні сили та е. р. с. реакції якоря.

Індуктивні опори реакції якоря. Векторні діаграми потокозчеплень та е. р. с. СМ. Індуктивні опори розсіяння обмотки якоря СМ. Синхронні індуктивні опори.

Характеристики синхронних генераторів. Відношення короткого замикання. Номінальна зміна напруги синхронного генератора. Паралельна робота синхронних генераторів: умови вмикання на паралельну роботу, способи синхронізації.

Синхронні режими паралельної роботи СМ: регулювання активної та реактивної потужностей. Поняття про статичну стійкість. Кутові характеристики активної та реактивної потужностей СМ. Режими роботи синхронного генератора при паралельній роботі з мережею. V-подібна характеристика синхронного генератора.

1. Вступ

1.1. Електричні машини – перетворювачі енергії. Основні типи електричних машин

У сучасній техніці під час виробництва і використання електричної енергії виникає необхідність у перетворенні механічної енергії в електричну, електричної енергії у механічну, а також у перетворенні електричної енергії з одними характеристиками в електричну енергію з іншими характеристиками. Всі ці перетворення здійснюються за допомогою електричних машин. Електрична машина як перетворювач енергії є одним з основних елементів кожного електромеханічного і електроенергетичного устаткування чи системи. Вона широко застосовується на електричних станціях, у промисловому устаткуванні, на транспорті, в авіації, у системах автоматичного керування і в ряді інших випадків.

Під час виробництва електричної енергії на електричних станціях енергію палива чи води перетворюють за допомогою теплових чи гідравлічних двигунів у механічну енергію обертання, а останню за допомогою електричних машин перетворюють в енергію електричного струму (електричну). На атомних електростанціях внутрішньоядерну енергію, яка переходить у теплову, перетворюють у механічну, а відтак – в електричну. Електричні машини, які перетворюють механічну енергію в електричну, називаються генераторами електричної енергії, або просто електричними генераторами.

Використання електричної енергії в багатьох випадках пов'язане з перетворенням її в механічну енергію. Таке перетворення здійснюється за допомогою електричних машин, які називаються електродвигунами.

У сучасному електроустаткуванні раціональне використання електроенергії часто буває пов'язане не тільки з її перетворенням у механічну енергію, але також з необхідністю перетворення одного роду електричного струму в інший: наприклад, змінного струму низької напруги у струм високої напруги, змінного струму у постійний, трифазного у двофазний та ін. Такі перетворення здійснюються за допомогою електричних машин, які називаються перетворювачами електричного струму. Особливо широке застосування в сучасній техніці одержали перетворювачі змінного струму однієї напруги у змінний струм іншої напруги, які називаються трансформаторами.

Залежно від роду струму (постійний, змінний) електромашини (генератори, двигуни, перетворювачі, регулятори, підсилювачі) поділяються на машини змінного і постійного струмів. Машини змінного струму в свою чергу діляться на дві великі групи: синхронні й асинхронні. Синхронні машини в основному використовуються як генератори змінного струму і рідше як двигуни. Асинхронні машини практично використовуються тільки як двигуни змінного струму. Машини постійного струму однаково використовуються як у ролі генераторів, так і двигунів. Ця загальна класифікація не вичерпує всіх типів електричних машин.

3. Трансформатори

3.1. Основні визначення. Принцип будови трансформатора

3.1.1. Основні визначення

Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну), що має інші характеристики, зокрема, іншу напругу та інший струм.

Трансформатори, які зазвичай застосовуються в техніці, складаються зі сталевого магнітопроводу (осердя) і двох або декількох обмоток, які електрично не зв'язані між собою.

Обмотка трансформатора, до якої підводиться енергія змінного струму, називається первинною обмоткою, а обмотка, від якої енергія відводиться, називається вторинною. Всі параметри і величини, які належать до кола первинної обмотки, називаються первинними і позначаються відповідними літерами з індексом 1, а всі параметри і величини, які належать до кола вторинної обмотки, називаються вторинними і позначаються відповідними літерами з індексом 2.

Якщо трансформатор має дві обмотки – обмотку вищої напруги (ВН), підімкнену до мережі більш високої напруги, і обмотку нижчої напруги (НН), підімкнену до мережі нижчої напруги, то він називається двообмотковим. Виконуються також триобмоткові трансформатори, які мають три обмотки вищої напруги (ВН), середньої напруги (СН) і нижчої напруги (НН).

Якщо первинною є обмотка ВН, а вторинною – обмотка НН, то такий трансформатор називається знижувальним. У протилежному випадку трансформатор називається підвищувальним.

Відповідно до кількості фаз розрізняють однофазні, трифазні і багатофазні трансформатори.

Якщо обмотки трансформатора мають спеціальні відгалуження для зміни співвідношення кількості витків, то такий трансформатор називається трансформатором з відгалуженнями.

Для поліпшення ізоляційних властивостей і умов охолодження трансформатора його магнітопровід разом з обмотками поміщають в бак, наповнений трансформаторним маслом. Такі трансформатори називаються масляними. Трансформатори, які не розміщені в маслі, називаються сухими.



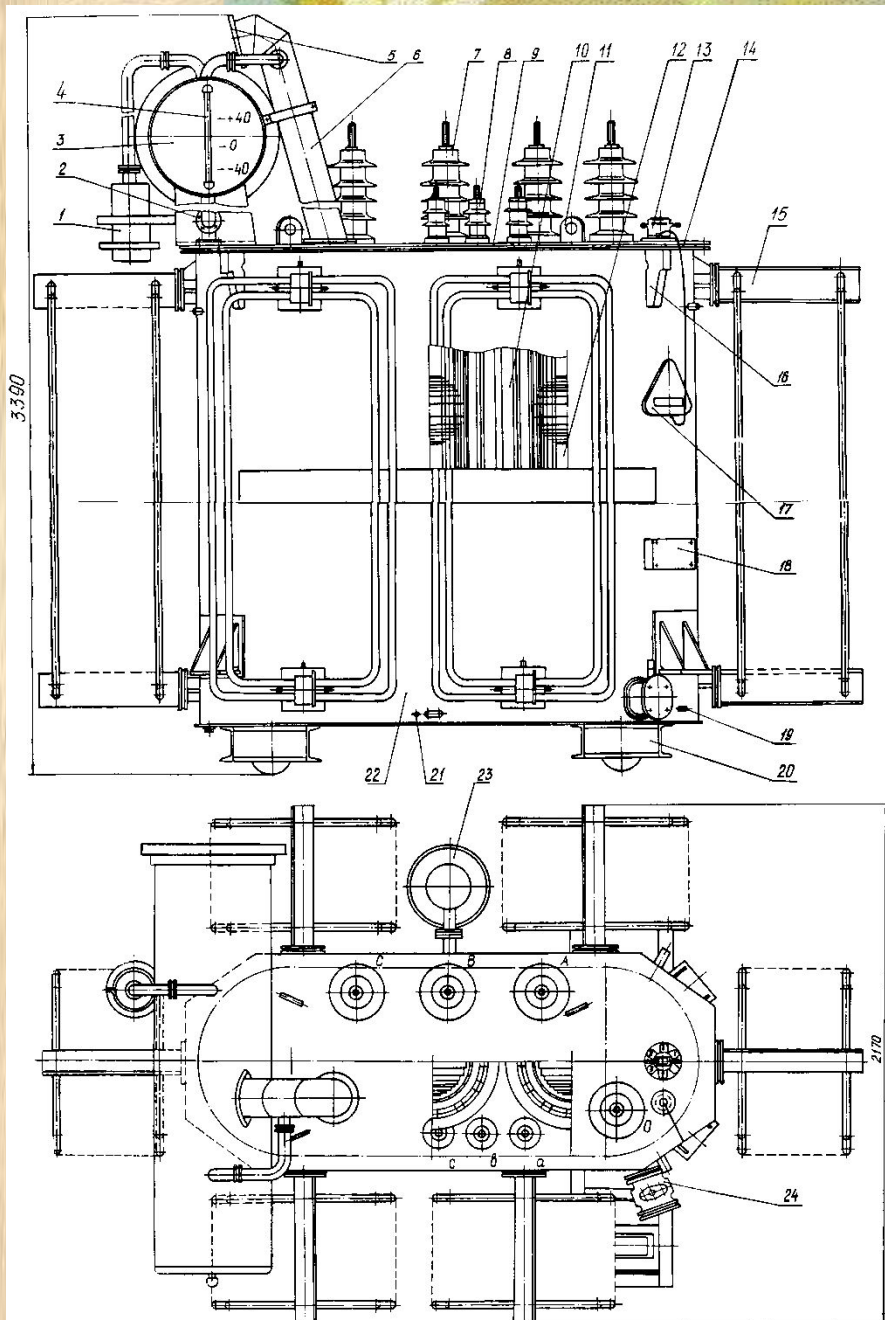
3.1.2. Основні типи трансформаторів

Найбільш поширені такі типи трансформаторів: силові – для передачі і розподілу електроенергії; автотрансформатори – для перетворення напруги в невеликих межах, для пуску вхід двигунів змінного струму тощо; індукційні регулятори – для регулювання напруги в розподільчих мережах; вимірні трансформатори – для вмикання у схеми вимірних приладів; трансформатори спеціального призначення – зварювальні, пічні, випробувальні, для випрямлячів, для використання в медицині тощо.

У майбутньому, говорячи про трансформатор, ми будемо мати на увазі його основний тип, тобто одно- і трифазний двообмотковий силовий трансформатор.

3.1.3. Номінальні величини

Номінальні величини трансформатора – потужність, лінійні напруги і струми кожної обмотки, частота (50 Гц), кількість фаз, схема і група сполучення обмоток, напруга короткого замикання, режим роботи, спосіб охолодження тощо – зазначаються на заводському щитку. Однак термін “номінальний” може стосуватися і величин, які не вказані на заводському щитку трансформатора, але належать до номінального режиму роботи: номінальний коефіцієнт віддачі, номінальні температурні умови охолоджуючого середовища.



3.1.4. Будова трансформаторів

Трансформатор (рис. 3.1) складається з великої кількості вузлів, деталей і металоконструкцій: 1 – повітросушник; 2 – газове реле; 3 – розширник; 4 – маслопоказчик; 5 – скляна заглушка; 6 – викидна (захисна) труба; 7 – вивід вищої напруги; 8 – вивід нижчої напруги; 9 – кришка; 10 – магнітопровід (осердя); 11 – кільце для піднімання виїмної частини; 12 – обмотка; 13 – привод перемикача напруги; 14 – гумова прокладка; 15 – радіатор; 16 – гак для піднімання трансформатора; 17 – термометричний сигналізатор; 18 – заводський щиток; 19 – кран для взяття проби масла; 20 – візок для переміщення; 21 – болт для заземлення; 22 – бак трансформатора; 23 – термосифонний фільтр; 24 – кран для спускання масла. Основними функціональними частинами трансформатора є магнітна система і обмотки.

Рис. 3.1. Загальний вигляд трифазного масляного трансформатора потужністю 2500 кВА і напругою 35 кВ типу ТМ – 2500/35

3.2. Принцип роботи і рівняння трансформатора зі сталевим осердям

Розглянемо принцип дії на прикладі однофазного двообмоткового трансформатора (рис. 3.2). Принцип роботи трансформатора витікає безпосередньо із закону електромагнітної індукції. Прийmemo, що на магнітопроводі однофазного трансформатора (рис. 3.2) розташовані дві обмотки (в дійсності первинна і вторинна обмотки розташовані на обох стрижнях). Якщо до первинної обмотки 1 підвести змінну напругу u_1 , то під дією цієї напруги в обмотці протікатиме змінний струм i_1 і довкола обмотки виникне змінне магнітне поле, яке наводить в обмотці 1 ЕРС самоіндукції e_1 . Переважна більшість ліній магнітної індукції замикається всередині магнітопроводу і становить основний магнітний потік трансформатора Φ_0 , який зв'язаний з усіма витками обох обмоток і наводить у вторинній обмотці 2 ЕРС взаємоіндукції e_2 . Якщо обмотка 2 замкнена на будь-який приймач електроенергії 3, то в колі, утвореному обмоткою 2 і приймачем 3, буде протікати струм i_2 , тобто відбувається трансформація електроенергії, що підводиться до обмотки 1, в електроенергію, яка використовується у приймачі 3. Отже, принцип дії трансформатора заснований на явищі взаємоіндукції.

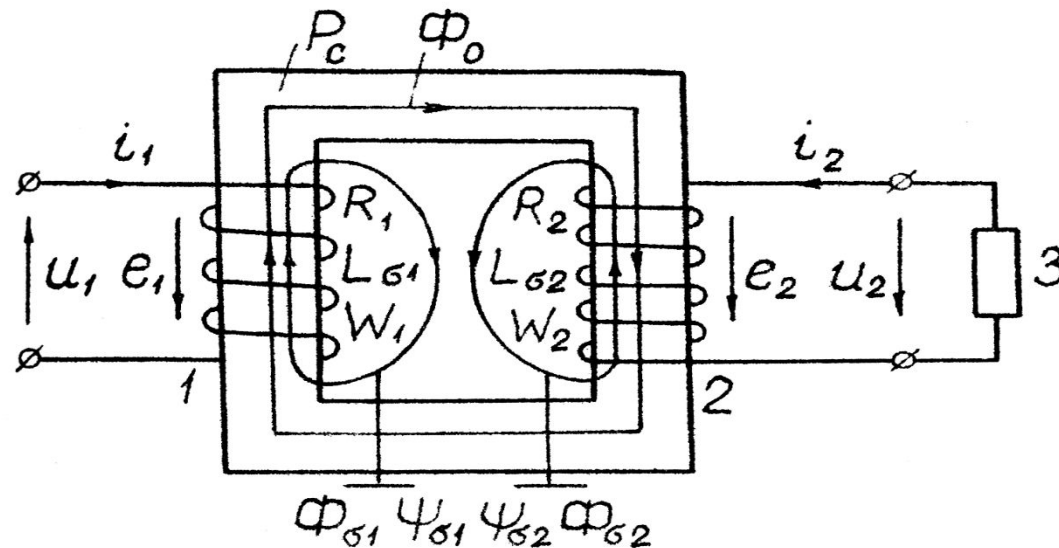


Рис. 3.2. Принципова схема двообмоткового трансформатора

За другим законом Кірхгофа для замкненого контура первинної обмотки можна записати:

$$u_1 + e_1 = i_1 R_1 ,$$

де R_1 – активний опір первинної обмотки.

Аналогічно для замкненого контура вторинної обмотки одержимо:

$$e_2 - u_2 = i_2 R_2 ,$$

де u_2 – напруга на навантаженні, R_2 – активний опір вторинної обмотки.

Основний магнітний потік трансформатора для всіх режимів між неробочим ходом і номінальним навантаженням залишається майже постійним, тобто $\Phi_{0x} \cong \Phi_{0н}$. Це означає, що ампервитки при неробочому ході і номінальному навантаженні рівні між собою. Тому $i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$, де $i_0 = i_{нх}$ – струм в первинній обмотці при неробочому ході. В загальному випадку під i_0 треба розуміти намагнічувальний струм трансформатора i_μ .

Перетворимо перші два рівняння, враховуючи, що

$$\begin{aligned} e_1 &= -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Psi_{10} - \Psi_{\sigma 1}) = -\frac{d}{dt}(w_1 \Phi_0 + L_{\sigma 1} i_1) = \\ &= -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} - L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} = e_{10} - L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_2 &= -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Psi_{20} - \Psi_{\sigma 2}) = -\frac{d}{dt}(w_2 \Phi_0 + L_{\sigma 2} i_2) = \\ &= -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} = e_{20} - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}, \end{aligned}$$

де w_1 , $L_{\sigma 1}$, w_2 , $L_{\sigma 2}$ – відповідно кількість витків і індуктивності розсіяння первинної і вторинної обмоток.

Після підставлення отриманих виразів у вихідні рівняння та деякого перегрупування отримаємо рівняння трансформатора у канонічній формі для миттєвих значень всіх величин:

$$\begin{cases} u_1 = -e_{10} + i_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \\ e_{20} = u_2 + i_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}; \\ i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2. \end{cases}$$

Прийmemo, що напруга, прикладена до первинної обмотки змінюється за синусоїдним законом, тобто $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_{u1})$.

У першому і другому рівняннях трансформатора другий і третій члени в правій частині значно менші, ніж перший член. Тому при синусоїдній напрузі u_1 основний магнітний потік Φ_0 , ЕРС e_{10} і e_{20} , а також напруга u_2 при усталеному режимі також змінюються практично за синусоїдним законом. Струми i_1 і i_2 в режимах, далеких від неробочого ходу, теж є синусоїдними функціями від часу. Тільки струм i_0 може відрізнитися від синусоїди. Його заміняємо еквівалентною синусоїдою (першою гармонікою). Тоді всі величини в рівняннях трансформатора є синусоїдними функціями від часу, тому можна перейти до рівнянь трансформатора в комплексній формі:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{10} + \dot{I}_1 R_1 + L_{\sigma 1} j \omega \dot{I}_1; \\ \dot{E}_{20} &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + L_{\sigma 2} j \omega \dot{I}_2; \\ \dot{I}_0 w_1 &= \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \end{aligned}$$

Після зведення подібних членів отримуємо рівняння трансформатора в комплексній формі:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -\underline{E}_{10} + \underline{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \underline{E}_{20} = \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2; \\ \underline{I}_1 w_1 = \underline{I}_2 w_2, \end{cases}$$

де $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_{\sigma 1} = R_1 + jX_{\sigma 1}$ – комплексний опір первинної обмотки; $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_{\sigma 2} = R_2 + jX_{\sigma 2}$ – комплексний опір вторинної обмотки трансформатора.

Встановимо деякі співвідношення. Нехай основний потік $\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t$, де Φ_{0m} – його амплітуда, а $\omega = 2\pi f$. Початкова фаза основного потоку дорівнює нулеві, бо на векторній діаграмі напрям одного із векторів можна вибрати довільно, тобто комплексна амплітуда основного потоку $\underline{\Phi}_{0m}$ суміщається з віссю дійсних чисел. Тоді

$$e_{10} = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t = E_{10m} \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Аналогічно $e_{20} = E_{20m} \sin(\omega t - 90^\circ)$, де амплітуди ЕРС, які наводяться основним потоком $E_{10m} = \omega w_1 \Phi_{0m}$ і $E_{20m} = \omega w_2 \Phi_{0m}$.

Отже, ЕРС e_{10} і e_{20} відстають за фазою від основного потоку Φ_0 на 90° . Цю особливість ми пізніше врахуємо при побудові векторної діаграми. Діючі значення цих ЕРС

$$\begin{aligned} E_{10} &= \frac{E_{10m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_{0m} = \\ &= 4 \frac{\pi}{2\sqrt{2}} f w_1 \Phi_{0m} = 4K_\phi f w_1 \Phi_{0m}; \\ E_{20} &= 4K_\phi f w_2 \Phi_{0m}, \end{aligned}$$

де K_ϕ – коефіцієнт форми кривої ЕРС, який для синусоїди дорівнює:

$$K_{\phi c} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$




Отже, діючі значення ЕРС, що наводяться основним потоком, визначаються за виразами:

$$E_{10} = 4,44fw_1\Phi_{0m}; \quad E_{20} = 4,44fw_2\Phi_{0m}$$

або при частоті $f = 50$ Гц

$$E_{10} = 222fw_1\Phi_{0m}; \quad E_{20} = 222fw_2\Phi_{0m}.$$

Отримані формули використовуються при розрахунку трансформатора. Для малих трансформаторів магнітна індукція $B_{0m} = 1,2$ Тл. Для трансформаторів великої потужності $B_{0m} = 1,45$ Тл при виготовленні магнітопроводу з гарячевальцьованої (ізотропної) сталі і $1,65$ Тл при виготовленні його з холодновальцьованої (анізотропної) сталі. Тоді при заданому поперечному перерізі стрижня магнітопроводу можна визначити напругу, яка припадає на один виток (вольт на виток), і кількість витків обох обмоток, бо $U_1 \cong E_{10}$ і $U_2 \cong E_{20}$.



Під фазним коефіцієнтом трансформації n трансформатора розуміють відношення діючих (амплітудних) значень ЕРС або кількості витків обмоток вищої і нижчої напруги. Для знижувального трансформатора

$$n_{12} = n = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{w_1}{w_2}$$

а для підвищувального

$$n_{21} = n = \frac{E_{20}}{E_{10}} = \frac{w_2}{w_1}$$

В електроенергетиці за державним стандартом визначають коефіцієнт трансформації трансформатора через відношення номінальних (лінійних) напруг обмоток ВН і НН .

3.3. Зведення обмоток трансформатора до однієї кількості витків

Зазвичай коефіцієнт трансформації значно більший від 1, тому затруднене порівняння між собою параметрів і величин первинного і вторинного кіл трансформатора. Для зручності порівняння між собою згаданих параметрів і величин і магнітної розв'язки обмоток зводять обмотки трансформатора до однієї кількості витків.

Операція такого зведення полягає в тому, що одну із обмоток (зазвичай вторинну) заміняють еквівалентною їй обмоткою з кількістю витків, яка дорівнює кількості витків іншої (первинної) обмотки.

Параметри і величини зведеного вторинного кола називають зведеними і позначають тими ж літерами, що і незведеного, тільки зі штрихом. Тоді у зведеному трансформаторі у первинній обмотці з кількістю витків w_1 проходить струм i_1 , а у зведеній вторинній обмотці з кількістю витків w_2' проходить струм i_2' .

Зведення виконується так, щоб воно не впливало на режим роботи первинної обмотки. Це означає, що основний потік, а отже, і ампервитки вторинної обмотки після зведення повинні залишитись такими ж, як і до зведення: звідки випливає, що для знижувального трансформатора. Остаточне рівняння зведеного трансформатора для миттєвих значень величин набувають вигляду:

$$\begin{cases} u_1 = -e_{10} + i_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \\ e'_{20} = u_2' + i_2' R_2' + L_{\sigma 2}' \frac{di_2'}{dt}; \\ i_0 = i_1 + i_2'. \end{cases}$$

3.4. Заступна схема трансформатора

Із рівнянь зведеного трансформатора випливає, що його можна еквівалентувати певною комбінацією активно-індуктивних елементів, яка називається заступною схемою трансформатора (рис. 3.3).

У заступній схемі трансформатора активний опір R_1 відповідає втратам P_{m1} у первинній обмотці, активний опір R'_2 – втратам P_{m2} у вторинній обмотці, індуктивний опір $X_{\sigma 1}$ – потокові розсіяння первинної обмотки $\Phi_{\sigma 1}$, індуктивний опір $X'_{\sigma 2}$ – потокові розсіяння вторинної обмотки $\Phi_{\sigma 2}$, активна провідність G_0 – втратам в сталі P_c , індуктивна провідність B_0 – основному потокові Φ_0 . Гілка G_0 – B_0 називається гілкою намагнічування. Комплексна провідність цієї гілки

$$\underline{Y}_0 = G_0 - jB_0 = G_0 - \frac{j}{\omega L_0},$$

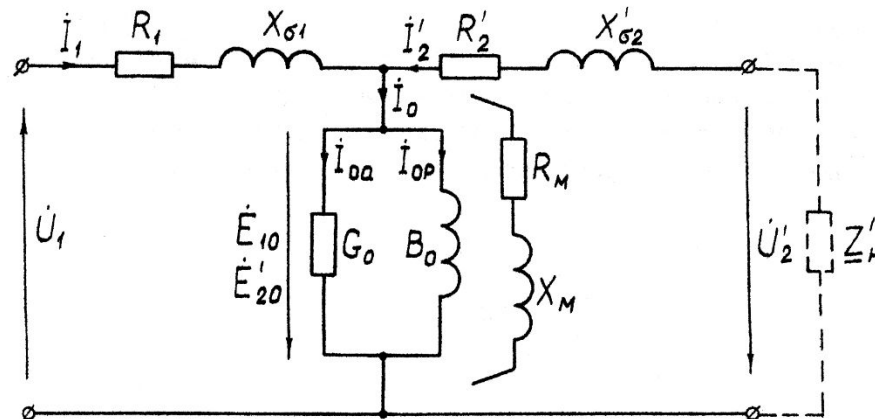
де активна провідність G_0 і основна індуктивність L_0 визначаються за виразами:

$$G_0 = \frac{P_c}{mE_{10}^2} = \frac{P_c}{mU_{10}^2} \cong \frac{P_c}{mU_1^2}; \quad L_0 = \frac{w_1\Phi_{0m}}{I_{0pm}} \cong \frac{w_1\Phi_{0m}}{I_{0m}}.$$

У відносних одиницях:

$$X_{\sigma 1}^* = X_{\sigma 2}^* = 0,03 - 0,07; \quad X_{\sigma 1}/R_1 \cong X'_{\sigma 2}/R'_2 = 3 - 10;$$

$$X_0^* = 1/B_0^* = 50 - 200; \quad R_0 = 1/G_0; \quad R_0/X_0 \cong 10.$$



3.6. Неробочий хід трансформатора

При неробочому ході вторинна обмотка розімкнена, а по первинній обмотці трансформатора під дією напруги \dot{U}_1 проходить струм \dot{I}_0 , який називається струмом неробочого ходу. При неробочому ході різниця між U_1 і ЕРС E_{10} зазвичай не перевищує 0,5 % і тому вважають, що $\dot{U}_1 = -\dot{E}_{10}$. Потужність неробочого ходу P_0 витрачається тільки на покриття втрат неробочого ходу, які практично зводяться до втрат в сталі P_c , бо втрати в первинній обмотці дуже малі внаслідок малої величини струму I_0 , а втрати у вторинній обмотці відсутні. Тоді $P_0 = P_c \cong B^2 \cong \Phi_{0m}^2 \cong E_{10}^2$. Втрати в сталі трансформатора визначаються за тією ж формулою, що і в сталі електричних машин, що вже розглянуто вище (п. 2.7.4). У силових трансформаторах малої потужності струм неробочого ходу не перевищує 10 % від номінального, а в трансформаторах великої потужності становить до 2–3 % . Експеримент неробочого ходу трансформатора здійснюють для визначення втрат у сталі, коефіцієнта трансформації і параметрів гілки намагнічування. Для знижувального трансформатора коефіцієнт трансформації $n = E_1/E_2 \cong U_1/U_{20}$. Параметри гілки намагнічування

$$G_0 \cong \frac{P_0}{mU_1^2}; \quad B_0 = \frac{1}{\omega L_0} = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2} = \sqrt{\left(\frac{I_0}{U_1}\right)^2 - \left(\frac{P_0}{mU_1^2}\right)^2},$$

3.7. Дослід короткого замикання трансформатора

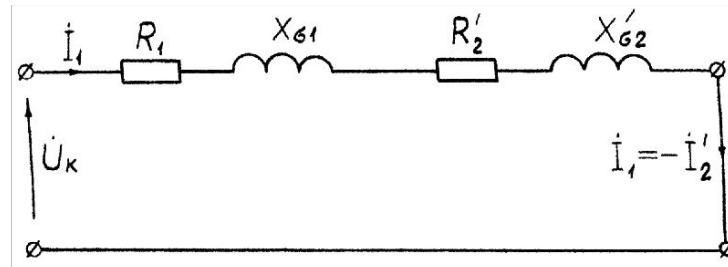
Коротке замикання трансформатора, яке настає під час замикання вторинної обмотки в процесі експлуатації, називають експлуатаційним. Воно становить велику небезпеку для трансформатора, бо при цьому виникають особливо великі механічні зусилля і надмірні підвищення температури обмоток.

Іншим видом короткого замикання трансформатора є експеримент короткого замикання, який проводиться для визначення втрат в обмотках, параметрів трансформатора, коефіцієнта трансформації та зміни його вторинної напруги залежно від навантаження. Такий вид короткого замикання називають випробувальним. Тоді до трансформатора підводять таку знижену напругу $U_{кн}$, при якій в обмотках трансформатора проходять номінальні струми. У відсотковому відношенні до номінальної напруги відповідної обмотки ця напруга називається напругою короткого замикання

$$U_K^* = \frac{U_{кн}}{U_n} 100.$$

Напряга короткого замикання вказується на щитку трансформатора. Вона знаходиться в межах від 4–5 % для трансформаторів малої потужності до 12 % і вище для трансформаторів великої потужності.

При короткому замиканні $U_2 = 0$ і основний потік $\Phi_{0к}$ становить не більше 5 % від магнітного потоку при неробочому ході. Тому при короткому замиканні намагнічувальним струмом можна нехтувати і вважати, що $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1$ і $I_1/I_2 = w_2/w_1 = 1/n$ (для знижувального трансформатора). Тоді гілку намагнічування в заступній схемі трансформатора можна не враховувати (рис. 3.6).



Опори $R_k = R_1 + R'_2$ і $X_k = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}$ називаються активним і індуктивним опорам короткого замикання трансформатора, або, коротко, параметрами короткого замикання. Переважно $R_1 \cong R'_2 \cong R_k/2$ і $X_{\sigma 1} \cong X'_{\sigma 2} \cong X_k/2$. $\text{tg}\varphi_k = X_k/R_k$ залежить від потужності трансформатора: для $S_n = 5\text{--}50$ кВА $\text{tg}\varphi_k = 1\text{--}2$; для $S_n = 50\text{--}5600$ кВА $\text{tg}\varphi_k = 2\text{--}7$; для $S_n > 5600$ кВА $\text{tg}\varphi_k = 7\text{--}10$.

3.10.1. Схеми і групи сполучень двообмоткових трансформаторів

Стандартизовані такі схеми сполучень трифазних двообмоткових трансформаторів: зірка – зірка з виведеною нульовою точкою; зірка – трикутник; зірка з виведеною нульовою точкою – трикутник; зірка – зигзаг з виведеною нульовою точкою; трикутник – зірка з виведеною нульовою точкою і трикутник – трикутник.

Сполучення зіркою і трикутником відомі з курсу теоретичної електротехніки. Сполучення зигзагом зустрічається рідко. При такому сполученні відповідна обмотка на кожному стрижні складається з двох половин і в кожен фазу вмикається одна половина обмотки на одному стрижні і друга половина на сусідньому стрижні, що зображено на рис. 3.10.

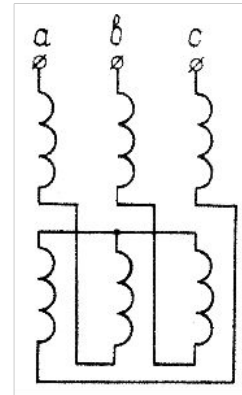


Рис. 3.10. Схема сполучення обмотки зигзагом

При умовних позначеннях схем сполучень трифазних двообмоткових трансформаторів через риску (дефіс) ставляться цифри (від 0 до 11), які визначають групу трансформатора. Група трансформатора визначається кутом зсуву за фазою лінійної напруги обмотки ВН відносно лінійної напруги обмотки НН за циферблатом годинника, коли хвилинна стрілка годинника суміщена з вектором лінійної напруги обмотки ВН і разом встановлені на цифрі 12 годинника, а годинна (мала) стрілка годинника суміщена з вектором лінійної напруги обмотки НН. Кут зсуву фаз лінійних напруг залежить від способу намотування обмоток, способу позначення затискачів обмоток (маркування) і способу сполучення обмоток трансформаторів.

3.10.3. Паралельна робота трансформаторів

Паралельною роботою двох (або більше) трансформаторів називається робота їх за схемою ввімкнення, в якій їх первинні обмотки ввімкнені на спільну первинну мережу (первинні шини), а вторинні обмотки – на спільну вторинну мережу (вторинні шини).

Для того, щоб трансформатори могли працювати паралельно, необхідно дотримуватись таких умов:

1. Первинні і окремо вторинні напруги всіх трансформаторів повинні бути однакові, тобто

$$U_{11} = U_{12} = \dots = U_{1n} \text{ і } U_{21} = U_{22} = \dots = U_{2n},$$

що зводиться до рівності коефіцієнтів трансформації, тобто

$$n_1 = n_2 = \dots = n_n.$$

2. Активні і індуктивні спади напруг в усіх трансформаторах повинні бути однакові, що зводиться до вимоги рівності напруг короткого замикання, тобто

$$U_{к1}^* = U_{к2}^* = \dots = U_{кn}^*.$$


3. Трансформатори повинні належати до однієї групи.

При паралельній роботі трансформаторів як первинні, так і вторинні ЕРС одного трансформатора діють у контурах одноіменних обмоток назустріч до відповідних ЕРС другого трансформатора, але відносно зовнішнього кола обидві вторинні ЕРС діють паралельно (згідно).

3.14.4. Інші типи трансформаторів

Зварювальні трансформатори мають різне конструктивне виконання залежно від того, який характер має зварювальна операція – дугова, стикова, шовна чи точкова.

Зварювальний трансформатор для зварювання дугою повинен мати напругу неробочого ходу близько 60–70 В, достатню для запалювання дуги, і стрімкоспадну зовнішню характеристику, для отримання якої його виконують з відносно великим розсіянням у самому трансформаторі (переміжні обмотки), або з окремим реактором (трансформатор СТ-2). Регулювання зварювального струму може здійснюватися східцями шляхом перемикання секцій одної або декількох обмоток, або плавно шляхом зміни магнітного опору трансформатора чи послідовно сполученого з ним реактора.



Вимірні трансформатори. При напругах, вищих за 250 В, та струмах, що перевищують декілька десятків ампер, всі вимірні прилади змінного струму вмикаються через вимірні трансформатори. Розрізняють вимірні трансформатори струму і вимірні трансформатори напруги.

Первинна обмотка трансформатора струму складається з одного або декількох витків відносно великого перерізу і вмикається послідовно в коло, струм в якому вимірюється. Вторинна обмотка має більшу кількість витків порівняно малого перерізу і вмикається на прилади з дуже малим опором – амперметри, послідовні обмотки ватметрів, лічильників. Отже, трансформатор струму працює в режимі короткого замикання. За величиною похибки трансформатори струму поділяються на п'ять класів точності: 0,2; 0,5; 1; 3 і 10. Трансформатори струму виготовляються на номінальні первинні струми в межах від 5 до 15000 А і мають, як правило, номінальний вторинний струм 5 А. З метою безпеки вторинна обмотка повинна бути надійно заземлена. При вмиканні і роботі трансформатора її в жодному разі не можна розмикати, бо тоді стрибки напруги на ній можуть досягати декількох тисяч вольт, що небезпечно для обслуговуючого персоналу. Крім того, перегрів осердя міг би пошкодити ізоляцію обмоток.

Трансформатори напруги працюють в режимі неробочого ходу. Їх осердя виготовляють із сталі високої якості і відносно слабо насичують (0,6–0,8 Тл) з метою зменшення похибки. За величиною допустимої похибки трансформатори напруги поділяються на чотири класи точності: 0,2; 0,5; 1 і 3. Вони виготовляються однофазними на номінальні потужності до 1000 ВА і трифазними на потужності до декількох кВА з первинною напругою 3, 6 і 10 кВ (у сухому виконанні) і вторинною напругою 110 В.

Трансформатори для регулювання напруги. Тепер набувають все більшого значення трансформатори зі східчастим регулюванням напруги в межах до $\pm 15\%$ під навантаженням (трансформатори з РПН). Для обмеження струму в короткозамкненій ділянці при переході з одного відгалуження на інше використовують реактори або резистори.



4. Загальні питання машин змінного струму

4.1. Класифікація і загальна характеристика машин змінного струму

Машини змінного струму знаходять широке застосування в усіх галузях техніки. Вони поділяються на дві основні групи: синхронні і асинхронні. Синхронні і асинхронні машини відрізняються за своїми властивостями. Синхронні машини збуджуються постійним струмом і обертаються із постійною частотою n , яка дорівнює частоті обертання поля n_1 , тобто синхронно з полем, і тоді $n = n_1 = 60f/p$, де f – частота змінної напруги і p – кількість пар полюсів машини. Вони використовуються як генератори, двигуни та компенсатори. Асинхронні машини збуджуються змінним струмом, можуть працювати з частотою обертання як нижчою, так і вищою від синхронної, тобто $n \neq n_1 = 60f/p$. Вони використовуються переважно як двигуни.

4.2. Основні елементи конструкції і принцип дії машин змінного струму

Нерухома частина машини змінного струму називається статором, а рухома (обертюва) – ротором, чи бігуном. Частина машини, на якій укладена обмотка змінного струму, називається якорем, а інша частина машини, на якій розташована обмотка збудження, – індуктором (в синхронних машинах). Найбільше поширені такі машини змінного струму (синхронні), в яких якорем є зовнішня нерухома частина машини, тобто статор, а індуктором – ротор, що обертається чи рухається прямолінійно (в асинхронних машинах спеціального призначення). В машинах постійного струму обертається якір.

Принцип дії трифазного синхронного генератора (рис. 4.1) базується на законі електромагнітної індукції. Під час збудження і обертання ротора синхронної машини первинним двигуном (рушієм) створюється обертове магнітне поле ротора, яке наводить в обмотці статора трифазну систему ЕРС. Під час навантаження генератора в обмотці статора проходить трифазна система струмів, яка створює обертове магнітне поле статора, яке гальмує ротор. Відносно нерухомі поля ротора і статора становлять результативне поле машини, яке обертається синхронно з ротором. Якщо живити обмотку статора синхронної машини трифазною системою струмів від джерела електричної енергії і збудити ротор постійним струмом, то виникає обертове магнітне поле статора, яке умовно зображене обертовими полюсами, показаними на рис. 4.1 пунктиром. Вони взаємодіють з полюсами (електромагнітами) ротора, внаслідок чого на ротор діє електромагнітний момент і обертає його з частотою обертання поля статора. Тоді синхронна машина працює двигуном, перетворюючи підведену електричну енергію в механічну енергію на валу.

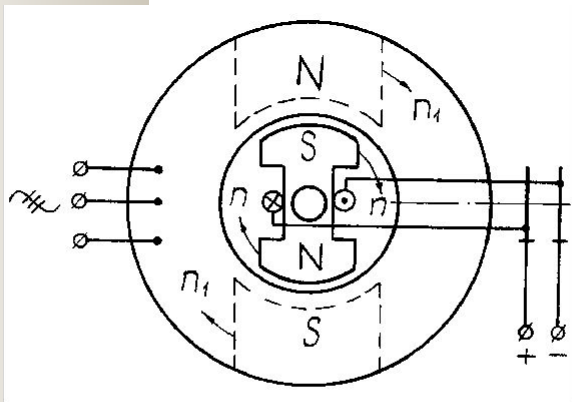


Рис. 4.1. До принципу дії синхронної машини: $n = n_1$

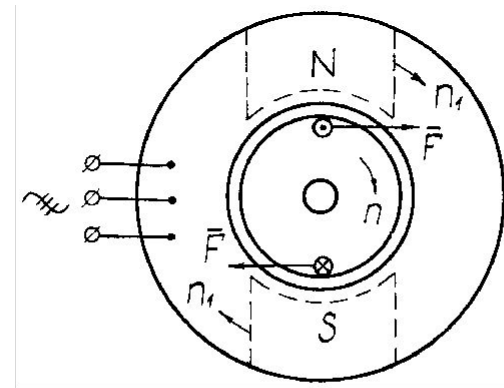


Рис. 4.2. До принципу дії асинхронної машини: $n \neq n_1$

6.2. Конструкції синхронних машин

Конструкція потужних синхронних машин у першу чергу визначається частотою обертання. Неявнополосні синхронні машини – турбогенератори (рис. 6.3) виготовляються з частотою обертання 3000 об/хв у двополосному виконанні ($p = 1$) і 1500 об/хв у чотириполосному виконанні ($p = 2$).

Ротор турбогенератора сполучається муфтою з ротором парової турбіни. Він виготовляється із суцільних поковок вуглецевої сталі (у менш відповідальних випадках), а у більш відповідальних випадках – зі спеціальної хромонікельмолібденової сталі, яка забезпечує добрі магнітні характеристики і механічну міцність при всіх режимах роботи турбогенератора. Ротор складається з потовщеної частини – бочки ротора і хвостовиків. На роторі містяться два контактні кільця, за допомогою яких на ротор подається постійний струм. На роторі закріплений також відцентровий вентилятор для охолодження лобових частин обмотки збудження. Лобові частини обмотки збудження закріплюються бандажами з міцної сталі. На зовнішній поверхні бочки ротора фрезуються пази прямокутної або трапеційної форми, в які вкладається розподілена обмотка збудження. Обмотка займає приблизно 2/3 поверхні ротора. Залишена частина зубцевої зони утворює великі зубці магнітопроводу. На великих зубцях можуть розміщуватися пази без обмотки або у цій зоні пази не фрезуються. Обмотка ротора складається з групи котушок різної довжини і ширини. Котушки намотуються смуговою міддю. У великих турбогенераторах застосовують мідь, леговану сріблом, яка має підвищену механічну міцність.

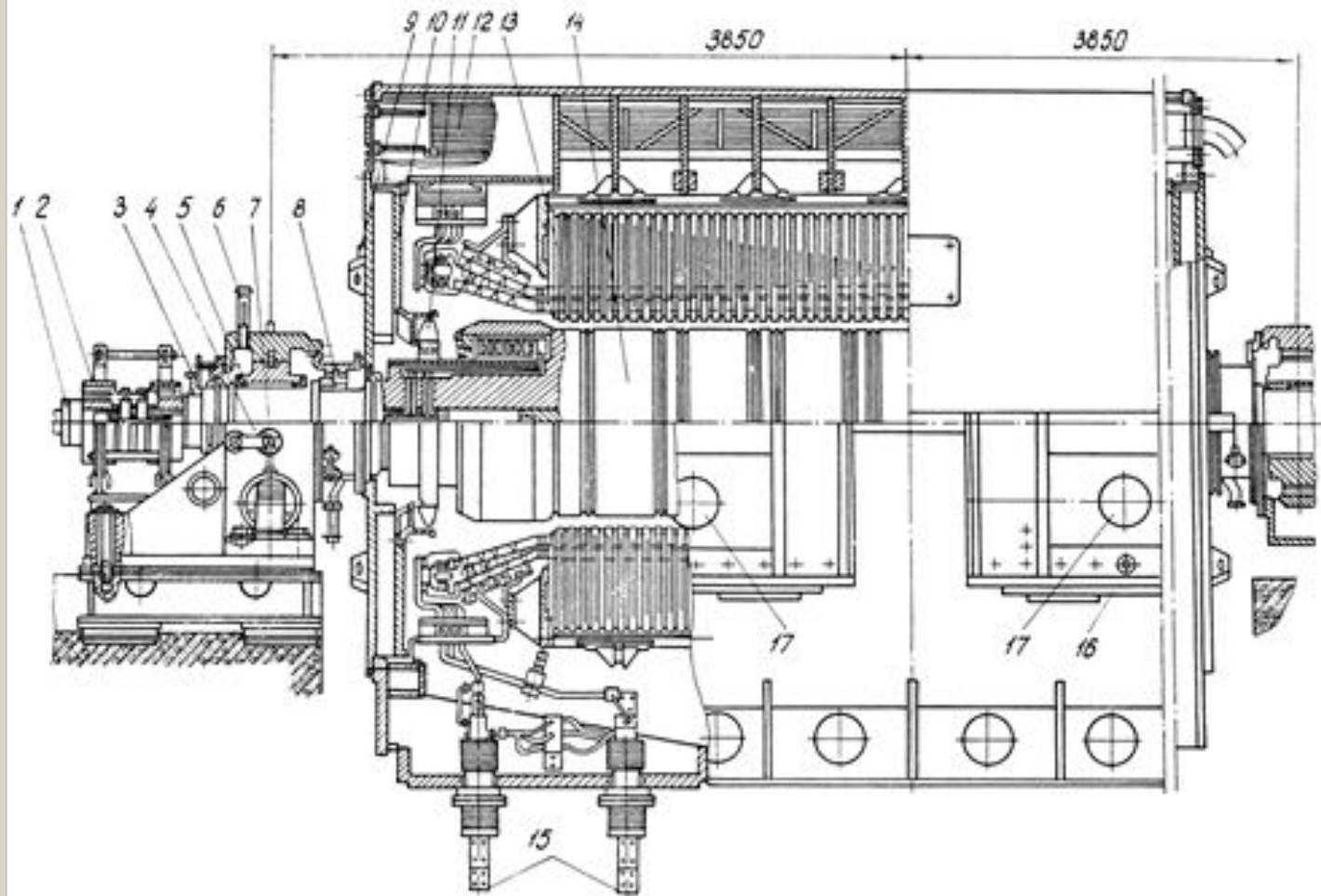


Рис. 6.3. Турбогенератор ТВВ-200-2:

1 – муфта; 2 – контактні кільця; 3 – струмознімач вала; 4 – корпус підшипника; 5 – вкладиш; 6 – термометр на підшипнику; 7 – термометр на зливі масла; 8 – ущільнення вала; 9 – щит зовнішній; 10 – щит вентилятора; 11 – вентилятор; 12 – газоохолоджувач; 13 – статор; 14 – ротор; 15 – високовольтні виводи; 16 – плити фундаментні; 17 – рим-лапи

Явнополосна конструкція ротора використовується у потужних багатополосних синхронних машинах – гідрогенераторах (рис. 6.5). Тепер найбільшими є гідрогенератори Красноярської ГЕС потужністю 500 МВт, напругою 15,75 кВ з частотою обертання 93,8 об/хв і коефіцієнтом потужності, який дорівнює 0,85, і Саяно-Шушенської ГЕС потужністю 640 МВт, напругою 15,75 кВ з частотою обертання 142,5 об/хв і коефіцієнтом потужності, який дорівнює 0,85.

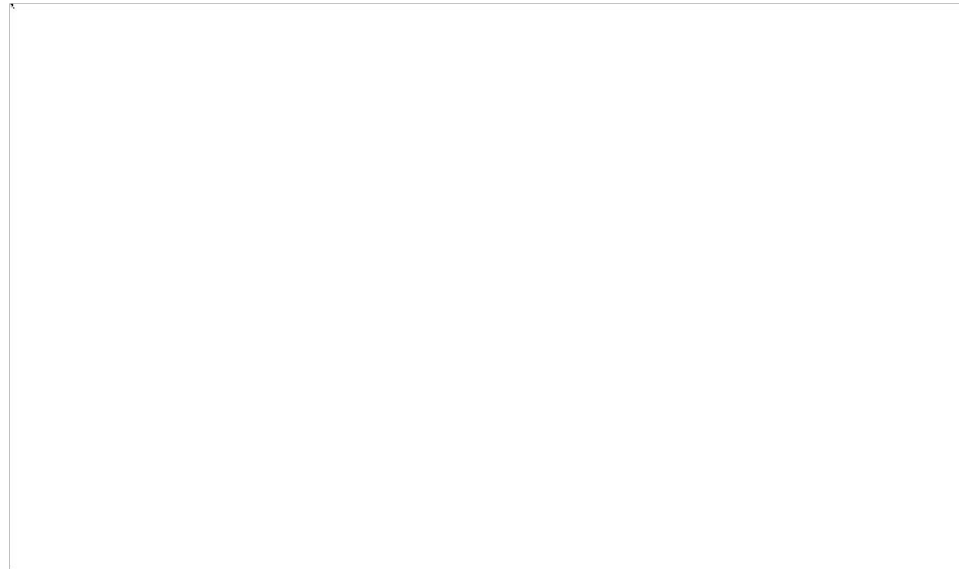


Рис. 6.5. Розріз гідрогенератора: 1 – статор гідрогенератора; 2 – корпус статора; 3 – вал; 4 – кістяк ротора; 5 – обід ротора; 6 – осердя полюса; 7 – котушка обмотки збудження

6.6. Характеристики синхронних генераторів

Під час випробування синхронного генератора знімають ті ж характеристики, що і під час випробування генератора постійного струму, тобто характеристику неробочого ходу, характеристику короткого замикання, навантажувальні, зовнішні і регулювальні характеристики. Сюди ж необхідно віднести і визначення коефіцієнта віддачі.

6.6.1. Характеристика неробочого ходу

Характеристика неробочого ходу показує залежність напруги неробочого ходу від струму збудження, тобто залежність $E_0 = U_0 = f(I_3)$ при $f = \text{const}$ ($n = \text{const}$) і $I_a = 0$. Вона знімається практично так само, як і для генераторів постійного струму, має аналогічний вигляд і однаковий зміст (рис. 6.14). Сучасні синхронні генератори мають нормальну характеристику неробочого ходу, подану у відносних одиницях у табл. 6.2.

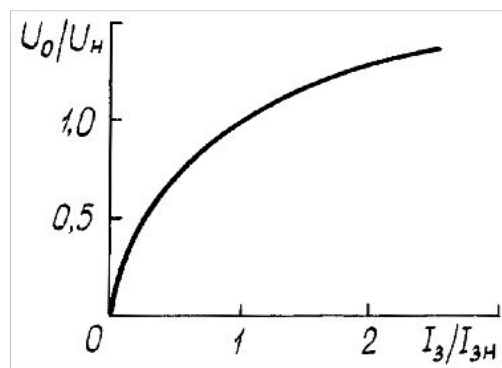


Рис. 6.14. Нормальна характеристика неробочого ходу

6.6.4. Зовнішня характеристика

Зовнішня характеристика показує залежність напруги від струму в статорі, тобто $U = f(I_a)$, при n , $f = \text{const}$, $I_s = \text{const}$ і $\cos \varphi = \text{const}$. Практичний інтерес становить зовнішня характеристика (рис. 6.19), знята при зміні навантаження від номінального до нуля при відстаючому $\cos \varphi_n = 0,8$ і номінальному струмі збудження, який відповідає номінальному режиму роботи. Зі зменшенням навантаження напруга U росте досить швидко, бо при цьому все більше зменшується розмагнічувальна дія поля якоря і спад напруги на активному опорі R_a і індуктивному опорі розсіяння X_{σ} . Тоді номінальна зміна напруги

$$\Delta U_n = \frac{AO - FG}{FG} 100\%.$$

При $\cos \varphi = 1$ зовнішня характеристика зростає повільніше при зменшенні навантаження, ніж при індуктивному навантаженні, а при ємнісному навантаженні вона падає, тобто зміна напруги ΔU_n стає від'ємною (рис. 6.19). На рис. 6.20 зображені зовнішні характеристики синхронного генератора при однаковій напрузі у режимі неробочого ходу.

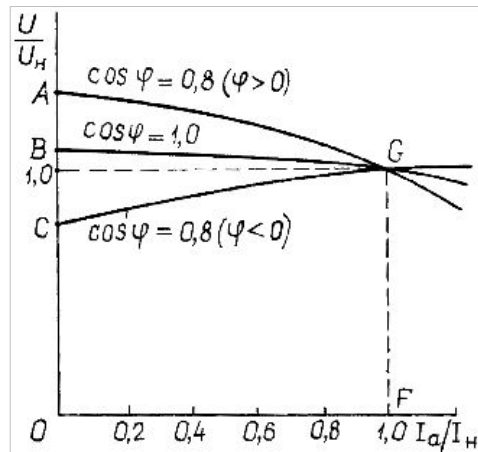


Рис. 6.19. Зовнішні характеристики синхронного генератора при однаковому значенні U_n

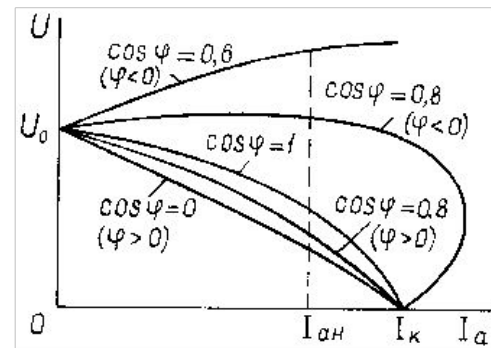


Рис. 6.20. Зовнішні характеристики синхронного генератора при однаковому значенні $U_0 = E_0$

6.6.5. Регулювальна характеристика

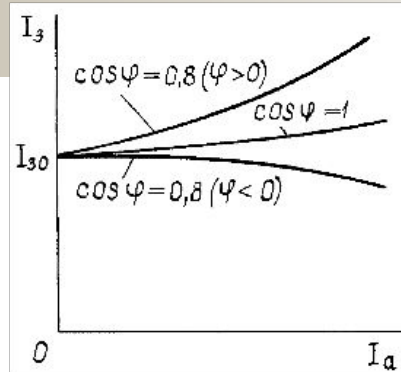


Рис. 6.21. Регулювальні характеристики синхронного генератора

Регулювальна характеристика показує залежність струму збудження від струму навантаження, тобто $I_3 = f(I_a)$, при $U = U_H = \text{const}$, $n, f = \text{const}$ і $\cos \varphi = \text{const}$.

За регулювальною характеристикою (рис. 6.21) можна судити про те, в яких межах необхідно змінювати струм збудження при зміні навантаження, щоб підтримувати номінальну напругу на генераторі. Характер кривих залежить від характеру навантаження.

6.6.6. Зміна напруги при навантаженні

Однією з важливих величин, які визначають роботу генератора, є зміна напруги на його затискачах при зміні навантаження генератора. Зазвичай під зміною напруги розуміють номінальну зміну напруги (якщо не зроблено застереження). Згідно з державним стандартом, номінальною зміною напруги синхронного генератора називається виражена у відсотках від номінальної напруги зміна напруги на затискачах окремо працюючого генератора при зміні його навантаження від номінального до нуля за умови, що частота обертання машини і її потік збудження залишаються незмінними, тобто

$$\Delta U_H^* = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100 = \frac{E_0 - U_H}{U_H} 100.$$

Цю зміну напруги часто називають відсотковим підвищенням напруги. Величина ΔU_H^* задається технічними умовами, але переважно намагаються, щоб $\Delta U_H^* \leq 30\text{--}50\%$, що може бути порушено під час раптового скидання навантаження.

Якщо $n = \text{const}$ і $I_3 = \text{const}$, то зміна напруги зумовлена реакцією якоря, яка впливає на основний потік машини, потоком розсіяння у статорі і активним опором обмотки статора. Останньою причиною часто нехтують.

Питання, пов'язані зі зміною напруги синхронного генератора, вивчаються і розв'язуються за допомогою векторних діаграм.



Паралельна робота синхронних генераторів

На сучасних електричних станціях, як правило, встановлюються декілька генераторів, увімкнених паралельно. Пояснюється це тим, що графік навантаження станції коливається як у різні пори року, так і протягом доби. Під час малого навантаження ряд генераторів може бути вимкнений, а решта будуть при цьому працювати з кращим використанням, що покращує коефіцієнт віддачі як самих генераторів, так і, особливо, первинних двигунів. Крім цього, під час аварії з одним генератором вибуває з ладу лише частина потужності, а не вся потужність станції.

Для безаварійного вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу і для більшої надійності при їх паралельній роботі необхідно виконати специфічні умови:

- 1) форми кривих ЕРС обох генераторів (ЕРС генератора і напруги мережі) повинні бути однакові;
- 2) діючі значення ЕРС обох генераторів (ЕРС генератора і напруги мережі) повинні бути однакові;
- 3) частоти обох генераторів (генератора і мережі) повинні бути однакові;
- 4) у момент вмикання повинні збігатися фази ЕРС генераторів (ЕРС генератора і напруги мережі);
- 5) послідовність чергування фаз обох генераторів (генератора і мережі) повинна бути однаковою.

Перша умова забезпечується конструкцією сучасних синхронних машин, а решта умов залежать від операцій, які проводяться під час вмикання генератора на спільні шини. Остання умова стосується тільки трифазних генераторів. Розглянемо, до чого призводить невиконання кожної з цих умов.

6.12.3. Кутова характеристика активної потужності синхронного генератора

Розглянемо умови паралельної роботи з мережею безмежної потужності неявнополюсного синхронного генератора, для якого $X_d = X_q$. Тоді

$$P_{ем} = m \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta .$$

За умовою $U = \text{const}$ і $I_s = \text{const}$. Остання умова означає, що $\Phi_{зд} = \text{const}$ і, відповідно, ЕРС $E_0 = \text{const}$. Тому в цьому випадку $P_{ем}$ змінюється тільки пропорційно до $\sin \theta$ (рис. 6.32). Залежність $P_{ем} = f(\theta)$ називається кутовою характеристикою активної потужності синхронної машини.

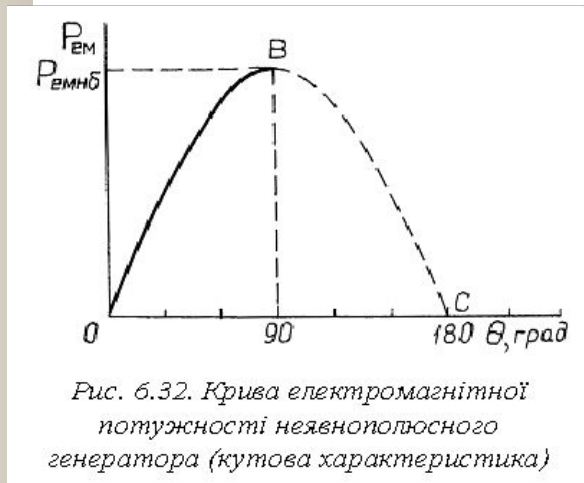


Рис. 6.32. Крива електромагнітної потужності неявнополюсного генератора (кутова характеристика)

Кут θ – це кут розхилу між віссю основного потоку ротора $\Phi_{зд}$, який наводить ЕРС E_0 , і віссю результативного магнітного потоку машини Φ , який відповідає напрузі U . При роботі синхронної машини генератором вісь основного потоку (полюсів ротора) випереджує на кут θ вісь результативного поля, відповідно до чого вектор ЕРС E_0 випереджує на векторній діаграмі вектор напруги U . Якщо генератор не навантажений ($P_{ем} = 0$), то кут $\theta = 0$. На синусоїді електромагнітної потужності (рис. 6.32) цьому режиму роботи відповідає точка 0. При збільшенні обертового

моменту M_1 на валу первинного двигуна збільшується підведена до генератора механічна потужність P_1 , що призведе до збільшення кута θ . Таке збільшення кута θ буде продовжуватися, поки гальмівний електромагнітний момент генератора M разом з моментом неробочого ходу M_0 не буде дорівнювати за величиною обертовому моменту M_1 . З синусоїди електромагнітної потужності видно, що ця потужність зростає тим повільніше, чим більший кут θ . При зміні кута θ від 75° до 90° потужність $P_{ем}$ зростає ледь помітно. При $\theta = 90^\circ$ генератор розвиває найбільшу електромагнітну потужність $P_{емнб} = mE_0U/X_d$. При подальшому зростанні моменту M_1 і кута θ генератор вийде з синхронізму, тобто перестане працювати паралельно з мережею, що зазвичай призводить до розладу роботи всієї системи і становить небезпеку аварії. Отже, частина 0В синусоїди електромагнітної потужності є областю стійкої роботи генератора, а за точкою В починається область нестійкої роботи, що показано пунктиром (рис. 6.32).

6.13. Робота синхронної машини в режимі двигуна

6.13.1. Конструкційні особливості синхронного двигуна

Синхронні двигуни виконуються, головним чином, явнополосними. У неявнополосному виконанні вони зустрічаються відносно рідко. Явнополосні синхронні двигуни випускаються на потужності від 40 до 7500 кВт включно, на всі стандартні напруги і для частот обертання від 1000 до 125 об/хв. Враховуючи цінну властивість синхронних двигунів – при перезбудженні працювати з випереджувальним $\cos \varphi$, – їх виготовляють для номінальної роботи при $\cos \varphi = 1$ і випереджувальним $\cos \varphi = 0,8$.

Статор синхронного двигуна має практично ту ж конструкцію, що і статор синхронного генератора. Із міркувань пуску двигуна в хід повітряний проміжок у синхронному двигуні роблять відносно меншим від проміжку в синхронному генераторі. При явнополосному виконанні у полюсні наконечники двигуна закладають спеціально розраховану пускову обмотку. При відсутності спеціальної пускової обмотки (у неявнополосних двигунах) її роль виконують бочка ротора, металеві клини у пазах ротора і бандажі, які позбавлені металевого контакту з осердям ротора.

Збудник зазвичай насаджується на вал двигуна, а в двигунах великої потужності виконується окремо.

6.13.2. Принцип зворотності синхронних машин

Синхронні машини, як і інші типи електричних машин, володіють принципом зворотності, тобто можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Щоб перевести синхронний генератор, який працює паралельно з мережею, у режим двигуна, необхідно припинити підводити механічну енергію від первинного двигуна і навантажити синхронну машину приводним механізмом. Тоді гальмівний електромагнітний момент, який розвивався генератором, перейде в обертовий момент двигуна, а вісь результативного потоку двигуна буде випереджувати вісь потоку ротора на кут θ . Відповідно до цього вектор підведеної до двигуна напруги \vec{U}_m випереджує на кут θ свою складову \vec{U} , яка зрівноважує ЕРС \vec{E}_0 , наведену основним потоком.

6.13.7. Асинхронний пуск синхронних двигунів

Синхронні двигуни, які передбачають асинхронний пуск, виготовляють з явновраженими полюсами, в полюсних наконечниках яких закладена спеціальна пускова обмотка, аналогічна до більшої клітки асинхронних короткозамкнених двигунів.

При асинхронному пуску синхронного двигуна підведена до нього напругу понижують за допомогою реакторів або автотрансформаторів до 1/3–1/4 від номінальної. Рідше здійснюють пряме вмикання синхронного двигуна в мережу, і лише у виключних випадках пускову напругу підвищують відносно номінальної за допомогою автотрансформатора.

Процес асинхронного пуску синхронного двигуна полягає в тому, що під дією підведеної до статора двигуна пускової напруги по обмотці статора проходить трифазний струм, який створює обертове магнітне поле. Під дією обертового магнітного поля в пусковій обмотці ротора індукуються струм, який взаємодіє з обертовим полем, внаслідок чого виникає обертовий асинхронний момент, і ротор розганяється до підсинхронної частоти обертання. При цьому обмотка ротора повинна бути замкнена на активний опір, який у 10–15 разів перевищує активний опір самої обмотки збудження, щоб уникнути перенапруги обмотки і пробивання ізоляції. Після того, як двигун досягне частоти обертання приблизно 95 % від номінальної, пусковий опір вимикається, в обмотку збудження подається постійний струм, і ротор втягується в синхронізм.

Критерій втягування синхронного двигуна у синхронізм

$$s_{кр} \leq 1,05 \sqrt{(M_m - 0,6M_c) / T_J}$$

визначає найбільше ковзання $s_{кр}$, при якому ще можливе втягування в синхронізм, через максимальний електромагнітний момент M_m , статичний момент M_c опору на валу і інерційну сталу T_J обертових мас.

4.3. Якірні обмотки машин змінного струму


4.3.1. Загальна характеристика якірних обмоток

Якірною обмоткою машин змінного струму називається обмотка, в якій індукується змінна ЕРС. До якірних обмоток належать обмотки статорів (якорів) асинхронних і синхронних машин і обмотки фазних роторів асинхронних машин. Трифазні (в загальному, m -фазні) симетричні якірні обмотки складаються з трьох (в загальному, m) фазних обмоток, які сполучені зіркою або трикутником (багатокутником). Обмотки фаз взаємно зміщені на кут 120 електричних градусів (в загальному, $360^\circ/m$). Симетрична обмотка характеризується тим, що ЕРС, наведені в усіх фазах обмотки, однакові за величиною, а ЕРС, наведені в кожній парі сусідніх фаз, зміщені за фазою на однаковий кут.

Якірна обмотка змінного струму характеризується: кількістю пар полюсів p , на яку вона виконана; кількістю фаз m ; кількістю пазів на полюс і фазу $q = Z/2pm$, де Z – кількість пазів на осерді якоря; кроком котушки (обмотки) y ; кількістю a паралельних гілок фази; кількістю послідовно сполучених витків w в паралельній гілці і схемою сполучення фаз.

Полюсною поділкою (кроком) називають дугу кола осердя якоря, яка припадає на один полюс основної гармоніки поля. Зубцева поділка – відстань між двома сусідніми зубцями осердя якоря, вимірена по поверхні осердя, зверненій до повітряного проміжку.

Обмотка фази складається з окремих котушкових груп, які сполучені між собою послідовно, паралельно або послідовно-паралельно, але так, що струм, який проходить в обмотці, створює магнітне поле із заданою кількістю періодів, тобто основна гармоніка магнітного поля обмотки повинна мати $2p$ полюсів (півперіодів).



Котушковою групою називають котушки однієї фази обмотки, розміщені в сусідніх пазах і зазвичай, послідовно сполучені між собою.

Котушкові групи або котушки сполучають у паралельні гілки фазної обмотки, які вмикають паралельно до її зовнішніх затискачів. Паралельна гілка може складатися з декількох або однієї котушкової групи (або однієї котушки). Паралельні гілки утворюються так, щоб їх опори (як активні, так і індуктивні) були однаковими, а їх ЕРС в кожний момент часу збігалися за величиною і напрямом.

Котушка становить декілька послідовно сполучених витків, які розміщені в одних і тих же пазах і мають спільну ізоляцію від стінок паза. Котушка може складатися і з одного витка.

Прямолінійні частини котушок, які закладаються в пази, називаються пазовими (активними) частинами, або котушковими сторонами. Бокові частини котушок, які розміщені поза пазами, називаються лобовими частинами обмотки.

Крок котушки – відстань між її активними сторонами, яка вимірюється в частках полюсної поділки (кроку) або в зубцевих поділках. Крок, який дорівнює полюсному, називається повним. Крок, більший або менший від полюсного, називається неповним (видовженим або вкороченим).

Котушки обмотки вкладаються у пази, виштамповані в осерді (магнітопроводі) якоря. Пази бувають напівзакриті, напіввідкриті і відкриті.

Витком обмотки називаються два активні провідники, в яких індукуються ЕРС і які вкладені у два пази і сполучені послідовно зустрічно між собою.

4.3.2. Класифікація обмоток

Обмотки класифікують за ознаками, які визначають їх електромагнітні, конструктивні і технологічні властивості:

за кількістю фаз m – на однофазні і багатофазні;

за кількістю шарів у пазу – на одношарові і двошарові. Найбільш широко застосовуються двошарові обмотки. Практично всі електричні машини змінного струму середньої і великої потужностей виконуються з двошаровими обмотками. Основні переваги двошарової обмотки перед одношаровою полягають у можливості суттєво впливати на форму поля обмотки вибором (вкороченням) її кроку і у більшій технологічності (всі котушки мають однакові розміри). Форма кривої магнітного поля майже всіх типів одношарових обмоток не залежить від кроку котушок. Одношарові обмотки бувають концентричні, концентричні в розвалку і рівносекційні;

за кількістю пазів на полюс і фазу q – на цілі (q – ціле число) і дробові (q – дробове число). Найбільшого поширення набули цілі обмотки, особливо в асинхронних машинах (для статорів і роторів) і в турбогенераторах. Дробові обмотки, форма ЕРС яких краща (ближча до синусоїдної), ніж у цілих обмотках, застосовуються переважно у багатополосних синхронних генераторах (гідрогенераторах) і двигунах. Одношарові обмотки виконуються, як правило, з цілим числом q , а двошарові обмотки виконуються і з цілим, і з дробовим числом q ;

за формою котушок (двошарові обмотки) – на петльові і хвильові. При обході фази петльової обмотки за її схемою виконуються рухи у формі петлі, а при обході фази хвильової обмотки – рухи у формі хвилі. Найбільше поширені петльові обмотки;

за конструкцією котушки (двошарові обмотки) – на котушкові і стрижневі. Котушкові обмотки мають багатовиткові котушки, а стрижневі – одновиткові котушки. Котушка стрижневої обмотки виготовляється з двох півкотушок (стрижнів), які закладаються в паз і після цього з одного боку з'єднуються між собою. Котушкові обмотки виконуються петльовими, а стрижневі – в основному хвильовими. Стрижневі обмотки застосовуються для якорів великих синхронних машин, а також для роторів середніх і великих асинхронних машин з фазним ротором;

за технологією виготовлення котушок (петльові обмотки) – на м'які і тверді. М'які (всипні) обмотки виготовляються з проводу круглого перерізу і вкладаються (всипаються) у напівзакриті пази по одному провіднику. Вони застосовуються в електричних машинах малої і середньої потужностей (приблизно до 100 кВт). Тверді обмотки виготовляються з проводу прямокутного перерізу, повністю формуються до вкладання в паз (відкриті або напіввідкриті). Останні обмотки використовуються в електричних машинах середньої і великої потужностей низької і високої напруги;

за кроком обмотки – з повним і неповним кроком. Двошарові обмотки зазвичай виконуються з укороченим кроком ($y \cong 0,8\tau$). Найпоширеніші одношарові обмотки хоч і мають котушки з кроком, відмінним від повного, але в електромагнітному відношенні є обмотками з повним кроком.

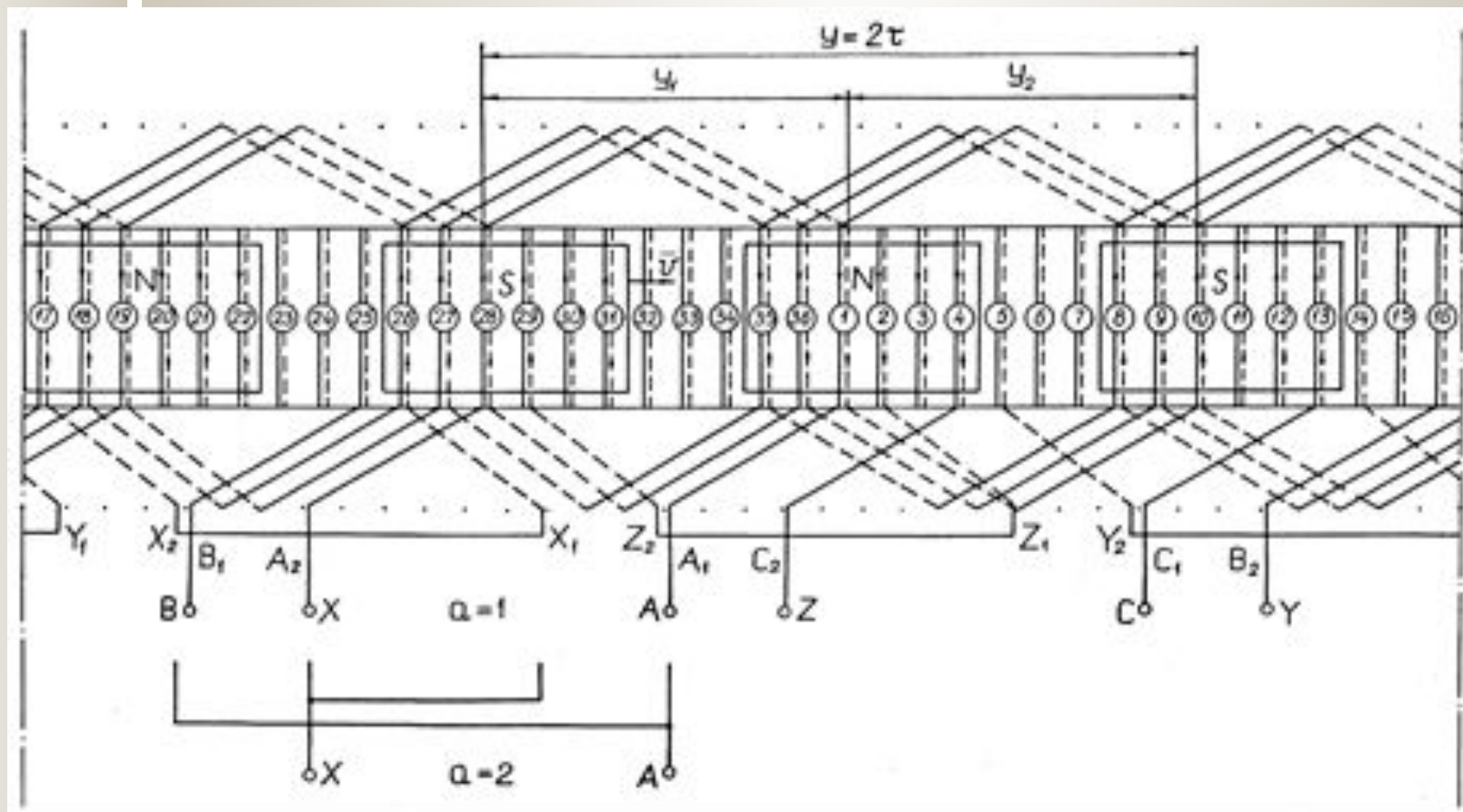


Рис. 4.9. Розгорнута схема трифазної двошарової хвильової обмотки:
 $Z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $a = 1 (2)$; $y_1 = y_2 = \tau = 9$; $y = 18$

6.14. Синхронний компенсатор

Синхронним компенсатором називається синхронний двигун, який працює тільки в режимі неробочого ходу при незмінному струмі збудження. Синхронні компенсатори є генераторами реактивної потужності. В перезбуджених синхронних компенсаторах струм у статорі \dot{I}_a випереджує за фазою напругу мережі \dot{U}_m , тобто є ємнісним, а в недозбуджених – індуктивним. Зазвичай в мережах, які живляться від синхронних генераторів, переважає індуктивне навантаження, бо трансформатори і поширені асинхронні двигуни споживають намагнічувальні індуктивні струми. Тоді зі збільшенням реактивної складової струму зменшуються $\cos \varphi$, активна потужність генератора і пропускна здатність лінії електропередачі, трансформаторів і апаратури. У зв'язку з цим розвантаження лінії передачі, трансформаторів і генераторів від надмірно великих реактивних струмів є особливо актуальним. Тому в більшості випадків синхронні компенсатори працюють в режимі перезбудження і служать для компенсації індуктивних струмів у лінії і генераторах з метою покращання $\cos \varphi$ на ділянці лінії, яка знаходиться між синхронним генератором і компенсатором.

У великих мережах з довгими лініями синхронні компенсатори використовуються для регулювання напруги на споживачах. При великому індуктивному навантаженні напруга на споживачах значно менша від напруги на генераторах. Тоді синхронні компенсатори працюють з перезбудженням, звільнюють лінію від реактивних струмів, що зменшує спад напруги в лінії. При малому навантаженні напруга на споживачі може навіть підвищитися, бо довгі лінії володіють ємністю. Тоді синхронний компенсатор працює з недозбудженням, забирає з мережі індуктивні струми, які зрівноважують ємнісні струми в лінії.

Переважно синхронні компенсатори передбачають асинхронний пуск, і тільки машини дуже великої потужності запускаються додатковими пусковими двигунами. Синхронні компенсатори мають полегшену механічну конструкцію (вал), бо вони не виконують механічної роботи.

