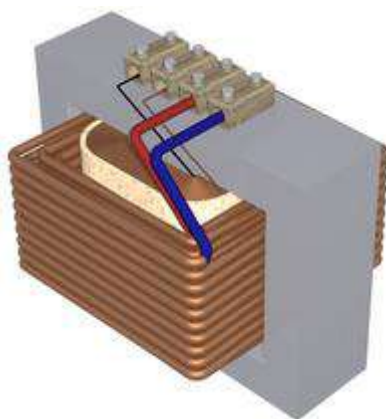


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Конспект лекцій (частина 1)

**Суми
2021**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра електротехнічних систем

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Конспект лекцій (частина 1)

для студентів 3 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання

програма підготовки 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка».

**Суми
2021**

УДК – 5150-(075.8)
Р-99

Укладачі: Рясна О.В., старший викладач кафедри електротехнічних систем СНАУ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ /Конспект лекцій (частина 1) для студентів 3 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання, напрям підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Суми, 2021 рік, 121 ст., рис. 94, табл. 4, бібл. 10

В конспекті лекцій (частина 1) наведені всі теми для вивчення дисципліни.

Конспект лекцій (частина 1) призначений для студентів 3 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання, напрям підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

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

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

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

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету. Протокол № 6 від « 24 » травня 2021 року

Тематичний план

№ п/п	Назва розділу, теми	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1	Лекції	18	4

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Лекційний матеріал	9
1.1 Лекція 1. Тема Призначення і види трансформаторів.....	9
1.2 Лекція 2. Тема Принцип дії трансформатора.....	27
1.3 Лекція 3. Тема Приведений силовий трансформатор.....	41
1.4 Лекція 4. Тема Схеми заміщення силового трансформатора.....	48
1.5 Лекція 5. Тема Методика визначення енергетичних показників силового трансформатора.....	53
1.6 Лекція 6. Тема Методика розрахунку і побудови графіка ККД силового трансформатора.....	63
1.7 Лекція 7. Тема Паралельна робота силових трансформаторів	70
1.8 Лекція 8. Тема Перехідні процеси в трансформаторі при вмиканні до мережі.....	86
1.9 Лекція 9. Тема Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів струму і напруги.....	
Список рекомендованої літератури.....	121

ВСТУП

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

Метою вивчення дисципліни «Електричні машини» є надання майбутнім магістрам досить глибоких знань і уявлень в галузі електричних машин, електромеханічного перетворення енергії та управління процесами такого перетворення, що повинно стати основою для практичної діяльності в галузі експлуатації електричних машин.

Предметом вивчення дисципліни є: основні фізичні закони, на яких базується принцип дії і процеси перетворення енергії набуття та свідоме застосування знань з електричних машин; взаємозалежності електричних і техніко-економічних характеристик електричних машин; будова та принцип дії електричних машин; загальні принципи їх будови; схеми, характеристики, способи пуску та властивості двигунів постійного та змінного струму; питання запуску та гальмування двигунів та їх вибір. Приділяється увага також вивченню електричних машин в АПК; орієнтувати студентів на оволодіння теорією електричних машин та практичним навичкам вирішення виробничих питань.

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

В сучасних електричних установках раціональне використання електричної енергії часто буває зв'язане не тільки з її перетворенням в механічну енергію, але й з необхідністю перетворення одного роду електричного струму в другий, наприклад змінного струму низької напруги в струм високої напруги, змінного струму – в постійний, трифазного – в двофазний та ін. Такі перетворювання виконуються при допомозі електричних машин, що називаються **перетворювачами електричного струму** або **електромашинними перетворювачами**.

Особливо широке використання в сучасній техніці одержали перетворювачі змінного струму однієї напруги в змінний струм другої напруги тієї ж частоти, що називаються трансформаторами.

Трансформатори широко застосовуються в системах передачі й розподілу електроенергії. Відомо, що передача електроенергії на далекі відстані здійснюється при високій напрузі (500 кВ та більше), завдяки чому значно зменшуються електричні втрати в лінії електропередачі. Одержати таку високу напругу в генераторі неможливо, тому електроенергія після генератора подається на підвищувальний трансформатор, у якому напруга збільшується до необхідного значення. Ця напруга повинна бути тим вища, чим більша довжина

лінії електропередачі та чим більша потужність, яка передається по цій лінії. Наприклад, при передачі електроенергії потужність 10^6 кВт на відстань 1000 км необхідна напруга 500 кВ. У місцях розподілу електроенергії між споживачами встановлюють понижуючі трансформатори, що знижують напругу до необхідного значення. І нарешті, у місцях споживання електроенергії напругу ще раз знижують за допомогою трансформаторів до 220, 380 або 660 В. При такій напрузі електроенергія подається безпосередньо споживачам – на робочі місця підприємств та в житлові приміщення. Таким чином, електроенергія змінного струму в процесі передачі від електростанції до споживачів піддається три-, а іноді чотири разовому трансформуванню. Крім цього основного застосування трансформатори використовуються в різних електроустановках (нагрівальних, зварювальних і т.п.), пристроях автоматики, зв'язку і т.д.

I. ЛЕКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

1.1 ЛЕКЦІЯ №1. ТЕМА ПРИЗНАЧЕННЯ І ВИДИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

План

1. Задачі і зміст курсу «Електричні машини».
2. Призначення і види трансформаторів.
3. Будова силових трансформаторів.

Задачі і зміст курсу «Електричні машини». Розвиток трансформаторобудування. Призначення і види трансформаторів. Будова силових трансформаторів. Основні конструктивні елементи трансформаторів. Номінальні величини.

Мета: знати призначення і види трансформаторів, будову силових трансформаторів

1. Задачі і зміст курсу «Електричні машини»

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

Основи дисципліни базуються на знаннях студентів з фізики, теоретичних основ електротехніки, електротехнічних матеріалів, математики та інших наук.

Електрична машина як перетворювач енергії являється одним із основних елементів кожної установки. Вона знаходить широке використання на електричних станціях, в промислових установках, на транспорті, в авіації, системах автоматичного управління та регулювання, провідному зв'язку та в ряді інших випадків.

При виробництві електроенергії на електричних станціях енергію палива, води або вітру перетворюють при допомозі паро-, тепло-, гідро- або вітро двигунів в механічну енергію обертання, а останню – в енергію електричного струму. На атомних електричних станціях внутрішньоядерну енергію за допомогою теплової також перетворюється в механічну, а потім в електричну енергію. В деяких випадках, наприклад в магнітогідродинамічних установках, частина теплової енергії безпосередньо перетворюється в електричну.

Перетворення механічної енергії в електричну виконується при допомозі електричних машин, що називається **генераторами** електричного струму. Використання електричної енергії в багатьох випадках зв'язано з перетворенням її в механічну енергію обертального або зворотно-поступального руху (привід різного роду машин та механізмів). Це перетворення виконується при допомозі електричних

машин, що називаються **електричними двигунами** або **електродвигунами**.

В сучасних електричних установках раціональне використання електричної енергії часто буває зв'язане не тільки з її перетворенням в механічну енергію, але й з необхідністю перетворення одного роду електричного струму в другий, наприклад змінного струму низької напруги в струм високої напруги, змінного струму – в постійний, трифазного – в двофазний та ін. Такі перетворювання виконуються при допомозі електричних машин, що називаються **перетворювачами електричного струму** або **електромашинними перетворювачами**.

Особливо широке використання в сучасній техніці одержали перетворювачі змінного струму однієї напруги в змінний струм другої напруги тієї ж частоти, що називаються **трансформаторами**.

Електромеханічне перетворення енергії супроводжується обов'язковим перетворенням електричної або механічної енергії в теплову. Перетворення енергії в тепло в електричних машинах прийнято називати втратами, так як теплова енергія при експлуатації електричних машин, як правило, не використовується в практичних цілях. В електричних машинах великої потужності в тепло перетворюється одиниці або навіть долі відсотків енергії, що підводиться до електричних виводів або валу машини. В машинах малої потужності в тепло може перетворюватись велика частина енергії, що підводиться до машини, тому ККД машини малої потужності невеликий.

Для загального уявлення про роботу машини як перетворювача енергії її можна представити у вигляді шестиполюсника (рис. В.1), у якого є два електричних виводи U , I , два механічні виводи M , n і два теплових Q , t . Електричні виводи зв'язані з електричною потужністю і характеризуються напругою U і струмом I ; механічні зв'язані з механічною потужністю і характеризуються моментом на валу машини M та частотою її обертання n ; теплові виводи зв'язані з втратами енергії, що виникають в процесі перетворення j , і характеризуються теплом Q , що виділяється при цьому, та температурою деталей електричної машини t . Внутрішній опір машини в самому загальному випадку можна охарактеризувати опором Z_{em} .

Робота електричної машини може відбуватися в двох основних режимах: сталому і динамічному або ж перехідному режимі. В **сталому** режимі всі вхідні величини на виводах шестиполюсника, що представляє електричну, і опір самої машини незмінні в часі. В **динамічному** режимі обов'язково змінюється одна, декілька або всі вхідні величини і параметри машини. В зв'язку з цим аналіз роботи машини в динамічних режимах значно складніший ніж в сталих.

При роботі електричної машини **генератором** механічна енергія підводиться до вала, тобто до механічних виводів M , n (рис. 1), а електрична енергія знімається з виводів U , I . При роботі **двигуном**

енергія подається на електричні виводи, а знімається з механічних. Крім режиму двигуна і генератора електричні машини можуть працювати також в гальмовім і трансформаторнім режимах.

Трансформаторний режим характерний для асинхронних машин з фазним ротором. Він виникає при загальмованому (нерухомому) роторі і підключеній обмотці статора до мережі. Перетворення електричної енергії в механічну не відбувається, так як частота обертання ротора дорівнює нулю. Електрична енергія, що підводиться до обмотки статора, перетворюється в електричну енергію, яка знімається з роторної обмотки. В цьому випадку механічні виводи шести полюсника, що розглядається, повинні бути замінені на електричні.

Спеціально розраховані електричні машини можуть довгий час працювати в трансформаторному режимі. При різних положеннях фазного ротора такої машини осі фаз обмотки ротора міняють своє положення відносно обмотки статора, що визиває зміну амплітуди і фази напруги на обмотці ротора. Цей принцип регулювання використовується в індукційних регуляторах та фазорегуляторах, які одержали розповсюдження в різних схемах регулювання, наприклад, в дослідних установках великої потужності.

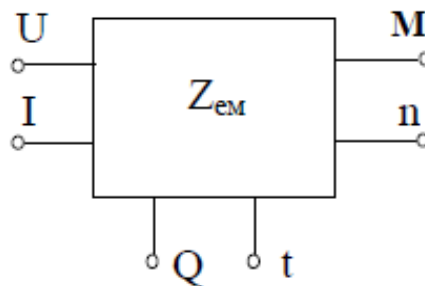


Рис. 1 Принцип роботи електричної машини

В **режимі гальма** напрямок обертання ротора протилежний напрямку обертання поля. При цьому машина отримує як електричну енергію зі сторони електричних виводів, так і механічну енергію зі сторони механічних виводів шести полюсника (рис. 1). Вся енергія, що споживається, перетворюється в теплову і витрачається всередині машини на нагрів його деталей, а також розсіюється в навколишній простір. Режими гальмування – самі важкі з точки зору нагріву деталей електричної машини, через це більшість електричних машин розраховується лише на короточасну роботу в режимах гальма.

Розрізняють два види електричного гальмування: динамічне та рекуперативне. При **динамічному** гальмуванні, що використовується, наприклад, в двигунах постійного струму, якір машини відключається від мережі і включається на резистор при включеній обмотці збудження. Машина працює як генератор постійного струму, споживаючи механічну

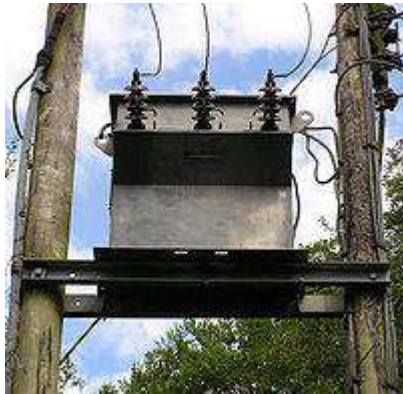
енергію обертових частин, генеруючи при цьому електричну енергію, яка витрачається на нагрів резистора.

При **рекуперативному** гальмуванні двигун також переходить в генераторний режим і енергія, що генерується, віддається в мережу. Рекуперативне гальмування характерне для асинхронних двигунів, наприклад, для двигунів приводу ліфтів, в яких шляхом переключення під час роботи машини статорної обмотки на більше число полюсів зменшується частота обертання поля. Ротор по інерції деякий час продовжує обертатись з колишньою частотою, більшою, чим частота обертання поля після переключення числа полюсів обмотки. В цей час машина працює в генераторному режимі і віддає електричну енергію в мережу, споживаючи кінетичну енергію рухомих частин приводного механізму. При зменшенні частоти обертання ротора до частоти нижчої, чим синхронна, машина знову переходить в режим двигуна і працює з частотою обертання, що відповідає новому числу полюсів обмотки статора.

Для синхронних машин важливим являється режим синхронного компенсатора, при якому активна електрична потужність, що отримується із мережі, витрачається тільки на втрати всередині машини, а синхронна машина генерує або використовує із мережі реактивну потужність. В режимі компенсатора можуть працювати всі синхронні машини. Для практичного використання виготовляють спеціальний тип машин – синхронні компенсатори, в яких генерація чи використання реактивної потужності відбувається з найменшими втратами активної енергії.

По характеру навантаження і частоті обертання ротора розрізняють також режими навантаження, холостого ходу і короткого замикання. При **холостому ході** навантаження на валу в режимі двигуна або електрична потужність на виводах в генераторному режимі дорівнює нулю. В режимі, близькому до холостого ходу, працюють багато електричних машин, в тому числі і цілий клас індикаторних машин, до яких відносяться тахогенератори, обертові трансформатори, сельсини та ін. В режимі **короткого замикання** генераторів опір навантаження дорівнює нулю, а в режимі короткого замикання двигунів частота їх обертання дорівнює нулю. Режим короткого замикання характерний для початкового моменту пуску двигунів із нерухомого стану. При включенні обмотки статора на номінальну напругу струм двигуна досягає великих значень. Через це довготривалий режим короткого замикання небезпечний для машин, не розрахованих на роботу в таких умовах. Коротке замикання двигунів і генераторів, що проводиться при пониженій напрузі, використовується при дослідженнях електричних машин для визначення ряду їх параметрів.

2. Призначення і види трансформаторів



Трифазний силовий трансформатор
110/35/10кВ



Силовий трансформатор
потужністю 63МВА

Трансформатор (від лат. transformo — перетворювати) — пристрій для перетворення параметрів (амплітуд і фаз) напруг і струмів

Трансформатор — статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму.

Трансформатори широко застосовуються в лініях електропередач, в розподільних та побутових пристроях. При високій напрузі й малій силі струму передача електроенергії відбувається з меншими втратами. Тому, зазвичай лінії електропередач є високовольтними. Водночас побутові й промислові машини вимагають великої сили струму й малої напруги, тому перед споживанням електроенергія перетворюється в низьковольтну. Трансформатори знайшли застосування також у різних випрямних, підсилювальних, сигналізаційних та інших пристроях.

Коефіцієнт корисної дії сучасних трансформаторів, особливо підвищеної потужності, вельми високий і досягає значень 0,95...0,996.

Історична довідка

У 1831 році англійським фізиком Майклом Фарадеєм при проведенні ним основоположних досліджень було відкрите явище електромагнітної індукції, що лежить в основі принципу роботи електричного трансформатора.

Вперше трансформатори, як такі були продемонстровані в 1882 році, хоча ще в 1876 році Яблочков П. М. запатентував (патент Франції № 115793 від 30 листопада 1876 року) аналогічний пристрій для створених ним освітлювальних пристроїв — «свічок Яблочкова». Це був трансформатор з розімкнутим сердечником, у вигляді стрижня, на який намотувались обмотки.

У 1885 р. угорські інженери фірми «Ganz factory» Отто Блаті, Карл Зіперновскі і Мікша Дері винайшли трансформатор із замкнутим магнітопроводом, що зіграло важливу роль у подальшому розвитку конструкцій трансформаторів.

Велику роль для підвищення надійності трансформаторів зіграло застосування масляного охолодження (кінець 1880-х років, Джордж Свінберн). Свінберн розташовував трансформатори у керамічних посудинах, заповнених оливою, що суттєво підвищувало надійність ізоляції обмоток.

Винахід трансформатора був важливим фактором у так званій війні струмів — конкурентній боротьбі за те, який електричний струм, постійний чи змінний ефективніший для масового користування.

З винайденням трансформатора виник технічний інтерес до змінного струму. Електротехнік російського походження М. О. Доліво-Добровольський у 1889 р. розробив для німецької фірми «Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft» перший трифазний трансформатор. На електротехнічній виставці у Франкфурті-на-Майні у 1891 р. Доліво-Добровольський демонстрував досліdну високовольтну електропередачу трифазного струму на відстань 175 км. Трифазний генератор мав потужність 230 кВт при напрузі 95 В.

У 1891 році Нікола Тесла винайшов резонансний трансформатор для генерування високої напруги при високій частоті.

Втрати енергії У реальних трансформаторах енергія не передається від первинного кола до вторинного без втрат. Існує низка фізичних причин, що їх зумовлюють.

Однією з причин втрат є активний опір обмоток. При протіканні струму через трансформатор, він нагрівається і віддає тепло оточенню. При високій частоті опір збільшується завдяки скін-ефекту та ефекту близькості, які зменшують площу перерізу провідника, через який протікає струм.

Ще одна причина втрат — перемагнічування осердя завдяки гістерезису. Ці втрати для конкретної речовини осердя пропорційні частоті й залежать від пікового потоку магнітного поля через осердя.

Інша причина втрат — струми Фуко. Змінне магнітне поле в осерді породжує змінне вихрове електричне поле, яке викликає додаткові вихрові струми, що теж призводять до нагрівання. Для зменшення струмів Фуко осердя виготовляють із тонких пластинок, оскільки втрати, пов'язані зі струмами Фуко, обернено квадратично залежать від товщини матеріалу.

Частина енергії втрачається на механічні коливання. Феромагнітний матеріал осердя розширюється і стискається у змінному магнітному полі завдяки явищу магнітострикції. Цим пояснюється гудіння трансформатора, що супроводжує його роботу. Додатково, первинна й

вторинна обмотка притягаються й відштовхуються у змінному магнітному полі, змушуючи також коливатися і корпус трансформатора.

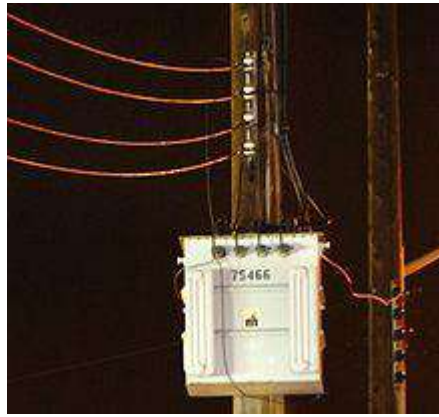
Магнітний потік, що виходить за межі осердя, сам по собі не призводить до втрати енергії, але він може призводити до появи вихрових струмів Фуко в металевих деталях корпусу й кріплення, що теж зумовлює невеликі втрати енергії.

Загалом, великі трансформатори мають коефіцієнт корисної дії, до 98%. Трансформатори з надпровідних матеріалів можуть збільшити цей коефіцієнт до 99,85%.

Втрати у трансформаторах залежать від навантаження. Втрати без навантаження зумовлені в основному опором обмоток, тоді як причиною втрат при повному навантаженні зазвичай є гістерезис та вихрові струми. Втрати при відсутності навантаження можуть бути значними, тому навіть, якщо до вторинної обмотки нічого не підключено, трансформатори повинні задовольняти умовам економної роботи. Конструювання трансформаторів із малими втратами вимагає великого осердя, високоякісної електротехнічної сталі, товстіших провідників, що збільшує початкові затрати, але окупається при експлуатації.

Застосування трансформаторів

Трансформатори широко застосовуються в системах передачі й розподілу електроенергії. Відомо, що передача електроенергії на далекі відстані здійснюється при високій напрузі (до 500 кВ та більше), завдяки чому значно зменшуються електричні втрати в лінії електропередачі. Одержати таку високу напругу в генераторі неможливо, тому електроенергія після генератора подається на підвищувальний трансформатор, у якому напруга збільшується до необхідного значення. Ця напруга повинна бути тим вища, чим більша довжина лінії електропередачі та чим більша потужність, яка передається по цій лінії. Наприклад, при передачі електроенергії потужністю 106 кВт на відстань 1000 км необхідна напруга 500 кВ. У місцях розподілу електроенергії між споживачами встановлюють понижуючі трансформатори, що знижують напругу до необхідного значення. І нарешті, у місцях споживання електроенергії напругу ще раз знижують за допомогою трансформаторів до 220, 380 або 660 В. При такій напрузі електроенергія подається безпосередньо споживачам – на робочі місця підприємств та в житлові приміщення. Таким чином, електроенергія змінного струму в процесі передачі від електростанції до споживачів піддається три-, а іноді і чотириразовому трансформуванню. Крім цього основного застосування трансформатори використовуються в різних електроустановках (нагрівальних, зварювальних і т.п.), пристроях автоматики, зв'язку й т.д.



Трифазний розподільний трансформатор

Найчастіше трансформатори застосовуються в електромережах та в джерелах живлення різних приладів.

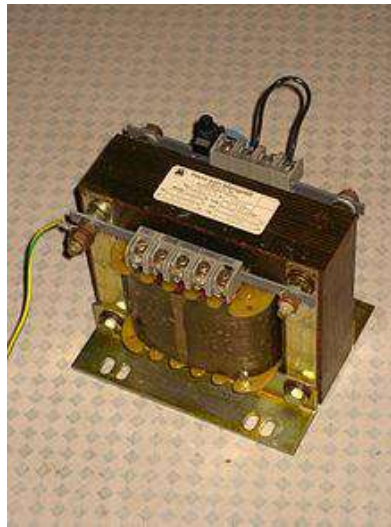
Застосування в електромережах

Оскільки втрати на нагрівання дроту пропорційні квадрату струму, що проходить через дріт, при передачі електроенергії на великі відстані вигідно використовувати дуже великі напруги і невеликі струми. З міркувань безпеки та для зменшення маси ізоляції в побуті бажано використовувати менші напруги. Тому для найбільш вигідного транспортування електроенергії в електромережі багаторазово застосовують силові трансформатори: спочатку для підвищення напруги генераторів на електростанціях перед транспортуванням електроенергії, а потім для зниження напруги лінії електропередач до прийнятного для споживачів рівня.

Оскільки в електричній мережі три фази, для перетворення напруги застосовують трифазні трансформатори, або групу з трьох однофазних трансформаторів, з'єднаних за схемою зірки або трикутника. У трифазного трансформатора сердечник для всіх трьох фаз загальний.

Незважаючи на високий ККД трансформатора (для трансформаторів великої потужності — понад 99%), в дуже потужних трансформаторах електромереж виділяється велика потужність у вигляді тепла (наприклад, для типової потужності блоку електростанції 1 ГВт на трансформаторі може виділятися потужність до декількох мегават). Тому трансформатори електромереж використовують спеціальну систему охолодження: трансформатор поміщається в бак, заповнений трансформаторним маслом або спеціальною негорючою рідиною. Масло циркулює під дією конвекції або примусово між баком і потужним радіатором. Іноді масло охолоджують водою. «Сухі» трансформатори використовують при відносно малій потужності.

Застосування в джерелах електроживлення



Компактний мережевий трансформатор

Для живлення різних вузлів електроприладів потрібні найрізноманітніші напруги. Блоки електроживлення у пристроях, які потребують кілька напруг різної величини, містять трансформатори з декількома вторинними обмотками або містять у схемі додаткові трансформатори. Наприклад, в телевізорі за допомогою трансформаторів отримують напруги від 5 вольт (для живлення мікросхем і транзисторів) до декількох кіловольт (для живлення анода кінескопа через помножувач напруги).

У схемах живлення сучасних радіотехнічних та електронних пристроїв (наприклад в блоках живлення персональних комп'ютерів) широко застосовуються високочастотні імпульсні трансформатори. В імпульсних блоках живлення змінну напругу мережі спершу випрямляють, а потім за допомогою інвертора перетворюють на високочастотні імпульси. Система управління за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) дозволяє стабілізувати напругу. Після чого імпульси високої частоти подаються на імпульсний трансформатор, на виході з якого, після випрямлення і фільтрації отримують стабільну постійну напругу.

У минулому мережевий трансформатор (на 50-60 Гц) був однією з найважчих деталей багатьох приладів. Справа в тому, що лінійні розміри трансформатора визначаються його потужністю, причому виявляється, що лінійний розмір мережевого трансформатора приблизно пропорційний потужності в степені $1/4$. Розмір трансформатора можна зменшити, якщо збільшити частоту змінного струму. Тому сучасні імпульсні блоки живлення при однаковій потужності є значно легшими.

Трансформатори на 50-60 Гц, незважаючи на свої недоліки, продовжують використовувати в схемах живлення, в тих випадках, коли

необхідно забезпечити мінімальний рівень високочастотних перешкод, наприклад при високоякісному звуковідтворенні.

Зразок запису трансформатора:

- Трансформатор струму Т-0,66-1-УЗ ТУ УЗ1.1-30166330-002-2001;
- Трансформатор ОСМ1-2,5УЗ 380/5-22-110/24 ТУ (вказують номер технічних умов);
- Трансформатор ТТ-0,4 380/19 ТУ.

Асортимент трансформаторів, загальні відомості

Тип трансформатора

Загальні відомості

Трансформатор ТСЗИ 1,6 380 / 220/36В



Трифазні трансформатори, сухі, захищені, із природним повітряним охолодженням. Призначені для живлення електричного інструменту, ламп місцевого освітлення, електричних кіл керування та сигналізації. Їх застосовують для роботи в стаціонарному положенні в закритих приміщеннях. Нормальне положення в просторі – вертикальне, режим роботи під навантаженням – тривалий.

Трифазний силовий типу ТС ТС-10 380/220



Трансформатор силовий, сухий призначений для пониження напруги трифазного і однофазного змінного струму. Застосовують трансформатори типів ТС, ТСЗ, ОС, ОСЗ у електричних установках загального призначення, у стаціонарних напівпровідникових випростувачах, для гальванічних установок та в збуджуючих пристроях синхронних машин – типів ТСП, ТСЗП. Трансформатори розраховані на номінальні напруги від 0,22 ÷ 10 кВ.

Автотрансформатор АОСН-20 АОСН-20-220-75 УХЛ4



Призначений для плавного регулювання напруги від 0 ÷ 240 В під навантаженням без розриву електричного кола. Застосовують в різних електротехнічних пристроях та лабораторних установках. Номінальний струм навантаження

20А.

Трансформатори однофазні типу ОСМ1



Призначені для живлення електричних кіл керування місцевого освітлення, автоматики, сигналізації та застосовують їх схеми двопівперіодного випростувача. Випускають різного конструктивного виконання в залежності від їх функціонального призначення.

Тороїдні трансформатори типу ОСМ



Призначені для використання у складі різної апаратури, приладах (фільтрах, лінійних джерелах живлення та іншому електрообладнанні), а також застосовують для окремого спеціального використання. Випускають різного конструктивного виконання в залежності від їх функціонального призначення.

Трансформатор напруги типу НАМИТ НАМИТ-10-2У2



Трансформатор напруги анти резонансний – масштабний перетворювач. Призначений для контролю сигналу вимірювальної інформації та передачі його вимірювальним приладам обліку електроенергії, для захисту і сигналізації в мережах 6 і 10 кВ змінного струму промислової частоти з ізольованою або заземленою нейтраллю через дугогасний реактор. Трансформатор встановлюється в шафах КРУ(Н) і в закритих розподільчих пристроях РУ промислових підприємств. Номінальна напруга обмоток, кВ: первинної ($U_{1\text{ном}}$) – 6/10; вторинної – 0,1/3. Номінальна потужність обмоток від 200 ÷ 600 В·А.

Умовні позначення силових трансформаторів

Структурна схема умовної позначки силового трансформатора за ГОСТ 11677-85

Літерна частина умовного позначення повинна містити позначення у наступному порядку:



Структурна схема умовного позначення силового трансформатора за ГОСТ 11677-85

Призначення трансформатора (може бути відсутнім)

- А** — автотрансформатор
- Э** — електропічний
 - 1. Кількість фаз
- О** — однофазний трансформатор
- Т** — трифазний трансформатор
 - 2. Розщеплення обмоток (може бути відсутнім)
- Р** — розщеплена обмотка НН;
 - 3. Система охолодження

Сухі трансформатори

- С** — природне повітряне при відкритому виконанні
- СЗ** — природне повітряне при захищеному виконанні
- СГ** — природне повітряне при герметичному виконанні
- СД** — повітряне з дуттям

Масляні трансформатори

- М** — природне масляне
- МЗ** — з природним масляним охолодженням із захистом за допомогою захисної азотної подушки без розширника
- Д** — масляне з дуттям і природною циркуляцією масла
- ДЦ** — масляне з дуттям і примусовою циркуляцією масла

Ц — масляно-водяне з примусовою циркуляцією масла

З негорючим рідким діелектриком

Н — природне охолодження негорючим рідким діелектриком

НД — охолодження негорючим рідким діелектриком з дуттям

Особливість трансформатора (може бути відсутнім)

Л — виконання трансформатора з литою ізоляцією;

Т — триобмотковий трансформатор (Для двохобмоткових трансформаторів не вказують);

Н — трансформатор з регулюванням під навантаженням (РПН);

З — трансформатор без розширника, з природним масляним охолодженням або з охолодженням негорючим рідким діелектриком із захистом за допомогою азотної подушки;

Ф — трансформатор з розширником і виводами, змонтованими у фланцях на стінках бака;

Г — трансформатор у гофробаку без розширника — «герметичне виконання»;

Призначення (може бути відсутнім)

С — виконання трансформатора для власних потреб електростанцій

П — для ліній передачі постійного струму

М — виконання трансформатора для металургійного виробництва

ПН — виконання для живлення заглиблених електронасосів.

Для автотрансформаторів при класах напруги з боку *СН* або *НН* 110 кВ і вище після класу напруги з боку *ВН* через косу риску вказують клас напруги з боку *СН* або *НН*.

Примітка. Для трансформаторів, виготовлених до 01.07.87, допускається вказувати останні дві цифри року випуску робочих креслень.

Приклад умовних позначень:

- трансформатора трифазного сухого з природним повітряним охолодженням при захищеному виконанні, двохобмоткового, потужністю 100 кВ•А, класу напруги 10 кВ, виконання У категорії 3 за ГОСТ 15150:

ТСЗ-100/10-УЗ;

- трансформатора трифазного масляного з охолодженням з природним циркулюванням повітря або масла, двохобмоткового, з регульованою напругою під навантаженням, потужністю 2500 кВ•А, класу напруги 110 кВ, виконання У категорії 1 за ГОСТ 15150:

ТМН-2500/110-У1;

- автотрансформатора трифазного масляного з охолодженням при примусовому циркулюванні повітря і масла з не спрямованим потоком масла, триобмоткового, з регулюванням напруги під навантаженням,

потужністю 200000 кВ•А, класу напруги обмотки *ВН* — 330 кВ, класу напруги обмотки — *СН* — 110 кВ, виконання У категорії 1 за ГОСТ 15150: АТДЦТН-200000/330/110-У1.

Відповідність умовних позначок видів систем охолодження, прийнятих за <u>ГОСТ</u> та <u>ІЕС</u> .		
Умовна позначка виду охолодження		Вид системи охолодження трансформатора
ГОСТ 11677-85	ІЕС 60076-2:1993 ІЕС 60076-11:2004	
Сухі трансформатори		
С	AN	Природне повітряне при відкритому виконанні
СЗ	ANAN	Природне повітряне при захищеному виконанні
СГ		Природне повітряне при герметичному виконанні
СД	ANAF	Повітряне з примусовою циркуляцією повітря
Масляні трансформатори		
М	ONAN	Природна циркуляція повітря і масла
Д	ONAF	Примусова циркуляція повітря і природна циркуляція масла
МЦ	OFAN	Природна циркуляція повітря і примусова циркуляція масла з не спрямованим потоком масла
НМЦ	ODAN	Природна циркуляція повітря і примусова циркуляція масла із спрямованим потоком масла
ДЦ	OFAF	Примусова циркуляція повітря і масла з не спрямованим потоком масла
НДЦ	ODAF	Примусова циркуляція повітря і масла із спрямованим потоком масла
Ц	OFWF	Примусова циркуляція води і масла з не спрямованим потоком масла
НЦ	ODWF	Примусова циркуляція води і масла із спрямованим потоком масла
Трансформатори з негорючим рідким діелектриком		
Н	LNAF	Природне охолодження негорючим рідким діелектриком
НД	LNAF	Охолодження негорючим рідким діелектриком із примусовою циркуляцією повітря

ННД	LFAF	Охолодження негорючим рідким діелектриком із примусовою циркуляцією повітря і з спрямованим потоком рідкого діелектрика
-----	------	---

Типи трансформаторів

Якщо взяти за основу спільність конструктивного виконання, то можна виділити наступні типи трансформаторів:

- 1) силові трансформатори – (для перетворення електричної енергії в енергосистемах та живлення потужних споживачів);
- 2) силові трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням;
- 3) силові трансформатори спеціального призначення (зварювальні, пічні та ін.);
- 4) трансформатори для статичних перетворювачів;
- 5) випробувальні трансформатори (для одержання високих та надвисоких напруг);
- 6) вимірювальні трансформатори (трансформатори струму та трансформатори напруги);
- 7) трансформатори радіотехнічних пристроїв та пристроїв автоматики.

Робочий процес трансформатора. Трансформатори призначені для збільшення або зменшення напруги змінного струму, принцип дії трансформаторів ґрунтується на явищі електромагнітної індукції.

Найпростіший трансформатор складається з обмоток на спільному осердді замкнутої форми, виконаний з магнітом'якого матеріалу, на якому намотані дві обмотки: первинна та вторинна. Одна з обмоток під'єднана до джерела змінного струму. Ця обмотка називається **первинною**. Інша обмотка, **вторинна**, служить джерелом струму для навантаження. Створений струмом у первинній обмотці змінний магнітний потік викликає появу е.р.с. у вторинній обмотці, оскільки обидві обмотки мають спільне осердя. Співвідношення е.р.с. у вторинній обмотці й напруги на первинній залежить від кількості витків у обох обмотках. В ідеальному випадку

$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{I_P}{I_S},$$

де індексом P позначені величини, що стосуються первинної обмотки, а індексом S — відповідні величини для вторинної обмотки, U — напруга, N — кількість витків, I — сила струму.

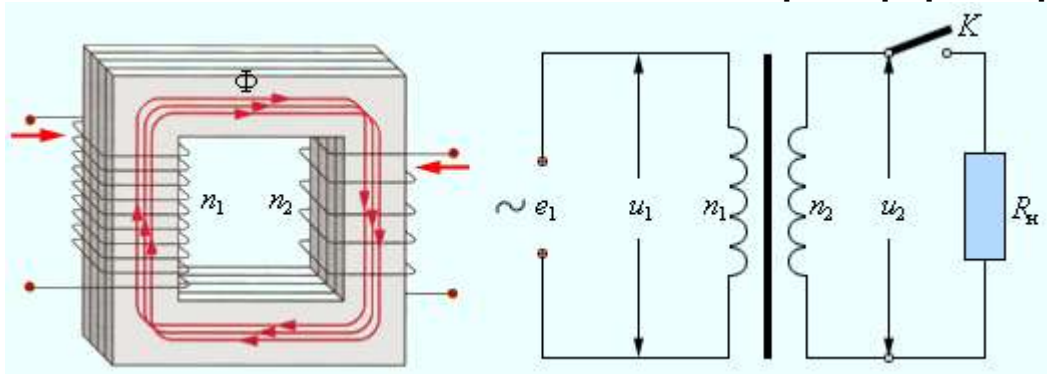
Таким чином, перетворення напруги й сили струму в трансформаторі визначається кількістю витків у первинній та вторинній обмотках. Напруга пропорційна кількості витків, тоді як сила струму обернено пропорційна їй.

Трансформатор і його умовне зображення в схемах

n_1 і n_2 — кількість витків в обмотках.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = K$$

- коефіцієнт трансформації
ідеального трансформатора



Ідеальний трансформатор – без втрат енергії. У реальних трансформаторах втрати енергії пов'язані з наявністю активного опору обмоток та виникненням струмів Фуко в осередді. Для зменшення струмів Фуко осереддя виконують з тонких ізольованих сталевих листів гістерезисні явища в осередді. При циклічному перемагнічуванні феромагнітних матеріалів виникають втрати електромагнітної енергії, прямо пропорційні площі петлі гістерезису.

У сучасних трансформаторів втрати енергії при навантаженнях, близьких до номінальних, не перевищує 1–2 %, тому до них наближено є застосовною теорія ідеального трансформатора.

Види трансформаторів

За призначенням: Силкові, які застосовуються в системах передавання та розподілу електроенергії;

1. Для установок із статичними перетворювачами (іонними або напівпровідниковими) при перетворенні змінного струму в постійний (випрямлячі) або постійного в змінний (інвертори);
2. Для підтримання необхідних напруг у мережах керування електроприводами і в мережах місцевого освітлення;
3. Силкові спеціального призначення — пічні, зварювальні і т. ін.;
4. Вимірювальні — для вмикання електричних вимірювальних приладів у мережі високої напруги;
5. Випробувальні — для отримання високих і надвисоких напруг, необхідних при випробуваннях на електричну міцність електроізоляційних виробів;
6. Радіо трансформатори.

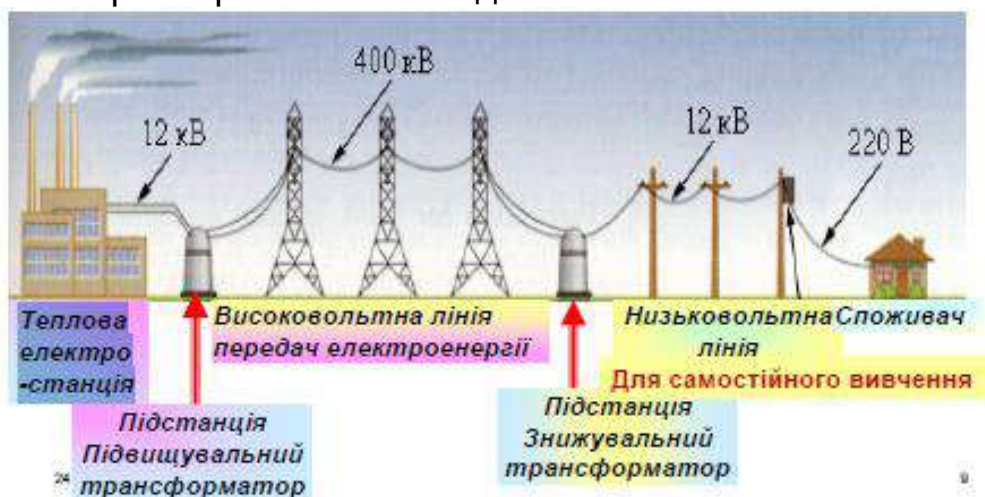
Види трансформаторів За видом охолодження: з повітряним (сухі трансформатори) і масляним (масляні трансформатори);

- За кількістю фаз — однофазні і багатофазні;
- За формою магнітопроводу — стрижньові, броньові, броньострижневі, торроїдальні;

- За кількістю обмоток – двообмоточні і багатообмоточні (одна первинна і дві або більше вторинних обмоток);
- За конструкцією обмоток — з концентричними та почерговими обмотками.

Передача електричної енергії

Потужні трьохфазні трансформатори використовуються в лініях передач електроенергії на великі відстані.



3. Будова силових трансформаторів.

Силові трансформатори:



Трифазний силовий трансформатор трансформаторної підстанції відкритого типу



Трифазний силовий масляний трансформатор з вирізом у баку для демонстрації конструкції

Силовий трансформатор (англ. *power transformer*) — стаціонарний прилад, трансформатор з двома або більше обмотками, який за допомогою електромагнітної індукції перетворює систему змінної напруги та струму в іншу систему змінної напруги та струму, як правило, різних значень при тій же частоті з метою передачі електроенергії та її використання.

За призначенням і конструкцією трансформатори різноманітні, але за своєю основою вони мають однакові фізичні процеси і принцип дії. Тому можна вивчати їх на прикладі простішого варіанта - однофазного двохобмоткового трансформатора, конструкція якого подана на рис. 9.1. Тут показані основні частини трансформатора: 1 і 2 - багатовиткові котушки з мідного ізольованого проводу, намотаного на каркаси; 3 - шихтоване осердя із тонколистової електротехнічної сталі (товщина пластин 0,2...0,5 мм).

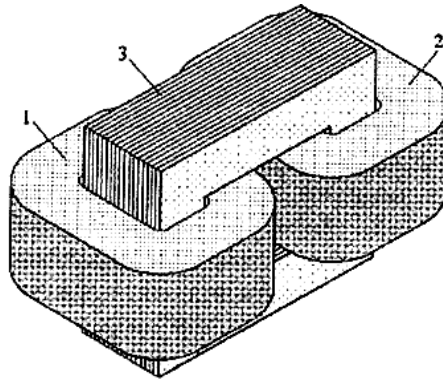


Рис. 9.1

Обмотки відрізняються кількістю витків. Обмотка з більшою кількістю витків $w_{ВН}$ - обмотка вищої напруги (ВН), з меншою кількістю витків $w_{НН}$ - обмотка нижчої напруги (НН).

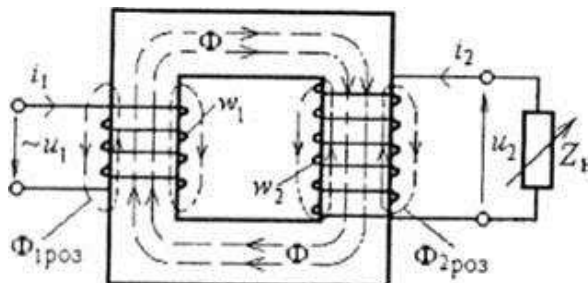


Рис. 9.2

Найважливіший параметр трансформатора - коефіцієнт трансформації - відношення кількості витків відповідних обмоток:

$$k = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}.$$

На рис. 9.2 зображена фізична модель трансформатора, де в обмотках показані умовні кількості витків, а реально кількості витків можуть обчислюватися в сотнях і тисячах.

Обмотка, яка включається в мережу або до джерела (винятково зі змінною напругою), називається первинною. Обмотка, до якої підключено навантаження (подано повним опором Z_H) - вторинна.

Величини, що відносяться до первинної обмотки - первинні: U_1, I_1, w_1 - напруга, струм, кількість витків та ін., що відносяться до вторинної обмотки - вторинні - відповідно U_2, I_2, w_2 та ін.

Якщо $w_1 > w_2$, то (як буде показано далі) $U_1 > U_2$, отже трансформатор понижує напругу, при цьому струми підпорядковані зворотному співвідношенню $I_1 < I_2$. Якщо $w_1 < w_2$, то $U_1 < U_2$ - трансформатор підвищує напругу, відповідно $I_1 > I_2$.

Трансформатори мають властивість оборотності - один і той же трансформатор можна використовувати як підвищувальний і знижувальний щодо напруги: все залежить від того, яка з обмоток приєднана до джерела. Тобто первинною може бути як обмотка ВН, так і обмотка НН.

Густина струму в обох обмотках приймається звичайно однаковою і на рівні 2...5 А/мм². Тому, чим більше струм, тим більший поперечний переріз провідника. І в підсумку в обмотці з меншою кількістю витків провід товщий і навпаки.

Контрольні запитання

1. При якій напрузі доцільно: а) передавати; б) споживати електричну енергію?
2. Вкажіть одне з найважливіших достоїнств кіл перемінного струму в порівнянні з колами постійного струму.
3. Який принцип роботи трансформатора?
4. Чому трансформатори не працюють від мережі постійного струму?
5. З яких частин складається активна частина трансформатора? Які їхні призначення та конструкція?
6. Як по зовнішніх ознаках відрізнити в трансформаторі обмотку ВН від обмотки НН?
7. Яке призначення трансформаторного масла?
8. Як визначити номінальні струми та номінальну вторинну напругу трансформатора?
9. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора та як вона позначається?

1.2 ЛЕКЦІЯ №2. ТЕМА ПРИНЦИП ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРА

План

1. Паспортні та номінальні дані.
2. Принцип дії трансформатора.
3. Схеми та групи з'єднання обмоток силових трансформаторів.

Мета: знати принцип дії трансформатора та схеми і групи з'єднання обмоток силових трансформаторів.

1. Паспортні та номінальні дані.

Основна увага приділяється вивченню силових трансформаторів. Номінальний режим роботи трансформаторів характеризується наступними номінальними даними:

Номінальна потужність S_H (кВА) – повна потужність трансформатора.

Номінальна первинна напруга U_{1H} (кВ) – напруга, що підводиться до первинної обмотки.

Номінальна вторинна напруга U_{2H} (кВ) – напруга на затискачах вторинної обмотки в режимі холостого ходу (х.х.) трансформатора (коли вторинна обмотка відключена від навантаження) при номінальній підведеній напрузі U_{1H} .

Первинні та вторинні напруги силових трансформаторів стандартизовані.

Цей ряд наступний:

Первинні обм.	кВ	0,22	0,38	0,66	3	6	10	20	35
Вторинні обм.	кВ	0,23	0,4	0,69	3,15	6,3	10,5	22	38,5

Номінальний первинний і вторинний струми, відповідно I_{1H} і I_{2H} [А] [кА] – ці струми визначаються значенням S_H і номінальною напругою U_{1H} і U_{2H}

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}}; \quad I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{2H}}. \quad \square(1.1)$$

Ці залежності дані для трифазних трансформаторів, причому враховано, що як U_H , так I_H представлені лінійними (а не фазними) величинами.

Номінальні дані трансформатора вказуються в паспорті трансформатора, який кріпиться на самому доступному місці трансформатора.

2. Принцип дії трансформатора.

Принцип дії трансформатора побудовано на явищі електромагнітної індукції (8.10). Розглянемо цей принцип як логічну структуру взаємного породження величин, використовуючи рис. 9.2.

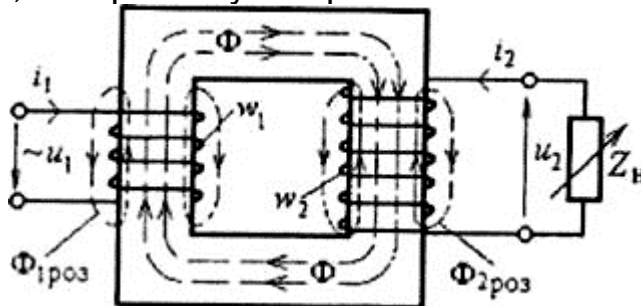


Рис. 9.2

При приєднанні первинної обмотки до джерела змінного струму під дією первинної синусоїдної напруги u_1 в первинній обмотці виникає

змінний струм i_1 . МРС цієї обмотки $F_x = i_1 w_1$ збуджує в осерді змінний магнітний потік, який, як і в котушці зі сталевим осердям (8.37), є синусоїдним: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, де $\omega = 2\pi f$; f - частота всіх величин у трансформаторі.

У відповідності із законом електромагнітної індукції змінний магнітний потік індукує у вторинній обмотці ЕРС (8.31) і (8.38):

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

діюче значення якої аналогічно (8.40):

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Вторинну обмотку тепер можна розглядати як вторинне джерело електроенергії. Під дією ЕРС e_2 на затискачах вторинної обмотки виникає змінна напруга u_2 , яка подається і на навантаження. У підсумку в контурі, що утворюється вторинною обмоткою і навантаженням, виникає змінний струм i_2 і навантаження отримує електроенергію.

Як впливає із формули (9.3), ЕРС E_2 залежить від кількості витків w_2 , тому, в принципі, її, а отже і вторинну напругу U_2 , можна отримати практично будь-якої величини: як більше первинної напруги U_1 так і менше. У цьому і полягає принцип дії трансформатора - підвищувати або знижувати напругу.

Описаний основний логічний ланцюжок процесу передачі електроенергії у трансформаторі супроводжується рядом неминучих супутніх явищ. Вони безпосередньо впливають на співвідношення величин у трансформаторі і визначають якість його роботи. Тому подамо і їх.

Основний магнітний потік індукує ЕРС і в первинній обмотці

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

з діючим значенням

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m.$$

Очевидно, що співвідношення ЕРС обмоток за (9.3) і (9.5)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_{12}$$

- це той же коефіцієнт трансформації, який може збігатися з поданим раніше (9.1), або бути зворотним щодо нього.

МРС вторинної обмотки $F_2 = i_2 \omega_2$ також створює магнітне поле, і, відповідно до правила Ленца, її магнітний потік спрямований проти потоку первинної обмотки. Тому основний потік Φ в трансформаторі є результатом спільної дії двох обмоток.

Крім того, кожна з обмоток створює пов'язаний тільки з нею магнітний потік розсіювання, відповідно $\Phi_{1\text{роз}}$ і $\Phi_{2\text{роз}}$ (див. рис. 9.2). Ці потоки індукують у своїх обмотках додатково ЕРС, аналогічно (8.31):

$$e_{1\text{роз}} = -w_1 \frac{d\Phi_{1\text{роз}}}{dt}; \quad e_{2\text{роз}} = -w_2 \frac{d\Phi_{2\text{роз}}}{dt}$$

з діючими значеннями $E_{1\text{роз}}$ і $-E_{2\text{роз}}$. Очевидно, що $E_{1\text{роз}} \nless E_1$ і $E_{2\text{роз}} \nless E_2$, тому що $\Phi_{1\text{роз}} \nless \Phi$ і $\Phi_{2\text{роз}} \nless \Phi$, що відповідає розглянутому в підрозділі 8.8.

Розгляд якісних сторін процесів у трансформаторі дозволяє перейти до подання співвідношень основних величин у ньому - напруг і струмів.

Рівняння напруг в обмотках трансформатора

Для ілюстрацій використаємо рис. 9.3, де умовно позначено трансформатор Т, а напруги, струми і ЕРС показано як діючі значення і вказано їхні умовні позитивні напрямки. Первинна обмотка має затискачі А і Х, вторинна – а і х.

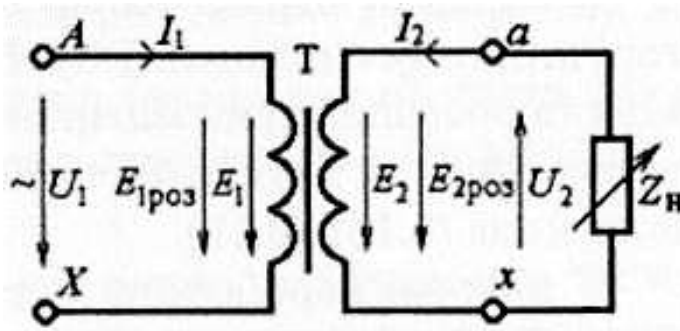


Рис. 9.3

З боку первинної обмотки трансформатор є приймачем енергії. У цій обмотці індукуються ЕРС E_x (9.5) - від основного потоку Φ і $\Phi_{1\text{роз}}$ (9.7) - від потоку розсіювання $\Phi_{1\text{роз}}$, зчепленого тільки з первинною обмоткою. Ці ЕРС є ЕРС самоіндукції, тому в контурі обмотки вони спрямовані проти первинної напруги і за другим законом Кірхгофа рівняння для первинної обмотки у векторній формі має вигляд:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{1\text{роз}} + \underline{I}_1 R_1,$$

де R_x - активний опір проводу обмотки; $I_1 R_1$ - спад напруги в первинній обмотці на цьому опорі.

У вторинному колі трансформатора ЕРС E_2 відіграє роль ЕРС джерела електроенергії. Відповідно до другого закону Кірхгофа вона

врівноважується напругою на навантаженні U_2 , ЕРС $-E_{2\text{роз}}$ (9.7) від потоку розсіювання $\Phi_{2\text{роз}}$ і спадом напруги $I_2 R_2$ на активному опорі проводу обмотки, тобто в векторній формі:

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 - \underline{E}_{2\text{роз}} + \underline{I}_2 R_2.$$

Рівняння (9.8) і (9.9) відповідають розглянутому рівнянню для котушки зі сталевим осердям (8.44) і мають ці ж властивості. Тому приблизно (з похибкою порядку 5%) можна записати для діючих значень, що $U_1 = E_1$ і $U_2 = E_2$. Це дає підстави для отримання співвідношення напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} \quad \text{або} \quad \boxed{\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k_{12}}.$$

Таким чином можна зробити висновок, що співвідношення діючих значень напруг обмоток підпорядковується коефіцієнту трансформації.

Рівняння струмів в обмотках трансформатора

Магнітний потік в осерді трансформатора визначається магніторушійними силами (МРС) обмоток. Трансформатор (див. рис. 9.2) можна розглядати як магнітне коло з однорідним осердям і визначати основний магнітний потік на підставі закону Ома для магнітного кола (8.18), (8.19).

У режимі неробочого ходу (НХ), коли навантаження відключене і $I_2 = 0$, діє тільки МРС первинної обмотки й амплітуда потоку в векторній формі (приблизно)

$$\underline{\Phi}_m = \frac{\sqrt{2} I_{10} w_1}{R_M}$$

де R_M - магнітний опір осердя; I_{10} - струм первинної обмотки в режимі НХ;

У режимі навантаження діють МРС обох обмоток і амплітуда потоку

$$\underline{\Phi}_m = \sqrt{2} \frac{\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2}{R_M}$$

Із формули трансформаторної ЕРС (9.5) можна виразити амплітуду магнітного потоку з урахуванням $U_1 \approx E_1$, отримаємо:

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4,44 f w_1}.$$

Діюче значення напруги джерела Щ (рис. 9.2) незмінне, тому амплітуда основного магнітного потоку (9.13) також повинна бути приблизно постійною ($\Phi_m = \text{const}$) в діапазоні від неробочого ходу до номінального навантаження. Тому прирівняємо вирази (9.11) і (9.12).

$$\frac{\sqrt{2}I_{10}w_1}{R_M} = \sqrt{2} \frac{I_1w_1 + I_2w_2}{R_M}$$

і після перетворення отримаємо спочатку рівняння МРС трансформатора

$$I_{10}w_1 = I_1w_1 + I_2w_2$$

з якого випливає, що сума МРС обмоток дорівнює постійній величині - МРС первинної обмотки в режимі неробочого ходу.

Із (9.15) виразимо струм первинної обмотки й отримаємо рівняння струмів:

$$\boxed{I_1 = I_{10} + \left(-I_2 \frac{w_2}{w_1}\right)} \quad \text{або} \quad I_1 = I_{10} + (-I'_2),$$

Тепер із рівняння струмів (9.16) очевидно, що будь-яка зміна струму у вторинній обмотці при зміні її навантаження супроводжується відповідною зміною первинного струму.

У реальних трансформаторах звичайно струм НХ по відношенню до номінального значення струму первинної обмотки є достатньо малим, приблизно I_{10} дорівнює (3...5)% від $I_{1\text{ном}}$. Це дає практичне співвідношення струмів в обмотках трансформатора:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k_{12}}$$

Таким чином можна зробити висновок, що співвідношення діючих значень струмів обмоток підпорядковане коефіцієнту трансформації, але у пропорції, зворотній напругам (9.10).

3. Схеми та групи з'єднання обмоток силових трансформаторів

Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів, паралельна робота трансформаторів Трансформування трифазного струму можна здійснювати трьома однофазними трансформаторами, які утворюють *трансформаторну групу*, або одним трифазним трансформатором, на кожному з трьох стрижнів магнітної системи якого розташовано по дві обмотки, що створюють відповідно три фази. Між собою обмотки фаз трансформаторної групи і трифазного трансформатора, з'єднуються за різними *схемами та групами*

Затискачі обмоток трансформаторів позначають літерами латинського алфавіту: початки обмоток першими, а кінці останніми; при цьому, обмотка ВН позначається великими літерами А, В, С, Х, У, Z, а обмотка НН малими а, в, с, х, у, z (рис. 2.18). Між собою обмотки фаз

трифазних трансформаторів з'єднують за такими схемами: зірка (рис. 2.18, а); зірка з нульовим виводом (вивід виконується від нульової точки сполучення - х, у, з; трикутник (рис. 2.18, б) та зигзаг (як правило, з нульовим виводом) (рис. 2.18, в).

- зірка (позначається літерою Y) – це таке сполучення, коли кінці обмоток з'єднують в загальну точку нуль, з цієї точки може виконуватись нульовий вивід. При такому сполученні лінійні напруги більші від фазних в $\sqrt{3}$, а лінійні струми рівні фазним. Нагадаємо, що лінійні напруги – це

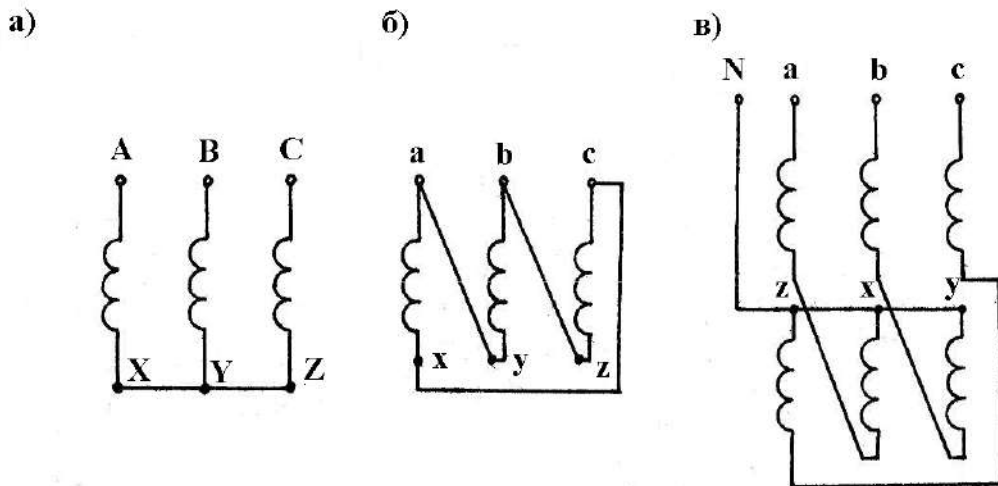


Рис. 2.18 - Схеми сполучення обмоток ВН в зірку (а) та в трикутник (б) і зигзаг (в) трансформатора

напруги між фазами - U_{AB} ; U_{BC} ; U_{CA} , а фазні – між початком та кінцем фази - U_{AX} ; U_{BY} ; U_{CZ} (рис. 2.18, а).

- трикутник (позначається літерою Δ) – це схема, за якою початок попередньої фази з'єднують з кінцем наступної. В трикутнику лінійні та фазні напруги рівні, а лінійні струми більші від фазних в $\sqrt{3}$ раз. Нагадаємо, що лінійні струми – це струми, які підтікають до точок а, в, с, а фазні – які з цих точок витікають (рис. 2.18, б). -Зигзаг (позначається літерою Z) – це схема, при сполученні за якою обмотка фази ділиться на дві частини, кожна з них розміщується на різних стрижнях, між собою ці частини вмикаються зустрічно, тому напруга фази виявляється в $\sqrt{3}$ більше напруги кожної частини (рис.2.19, в). Зигзаг називають рівноплечевим, якщо частини фази, що розміщені на різних стрижнях, рівні; і нерівноплечевим – якщо частини різні.

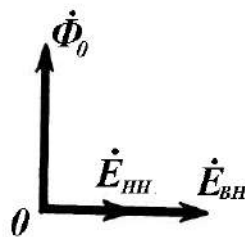
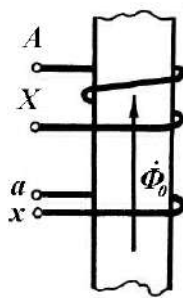
Схеми з'єднання обмоток трансформаторів позначають як дріб (Y/Y , Y/Δ і т.д.) Чисельник цього дробу позначає схему сполучення обмотки ВН, а знаменник – обмотки НН. При виборі схеми з'єднання обмоток враховують ряд обставин. При високих напругах перевагу віддають схемі сполучення зірка з заземленням нульової точки, що дозволяє знизити напругу проводів лінії електропередач відносно землі в $\sqrt{3}$ раз і знизити вартість ізоляції. Обмотки НН з'єднують в зірку і

виводять нульовий вивід (позначається Y_0) в тому випадку, коли необхідно живити змішане навантаження, наприклад, освітлення, яке вмикають на фазу і нуль та трифазні двигуни, що, звичайно, вмикають на лінійну напругу трьох фаз. Якщо напруга обмотки НН вище 400 В, перевагу віддають схемі сполучення трикутник, так як при цьому покращуються умови роботи трансформатора при несиметричному навантаженні і знижується вплив несинусоїдальності напруги.

Схема сполучення зигзаг використовується в спеціальних трансформаторах, які працюють з напівпровідниковими випрямлячами, або інверторами. Слід зазначити, що такі схеми вимагають в $2/\sqrt{3}$ раз більших затрат обмоточного дроту, в порівнянні зі схемою зірка.

В паспорті трансформатора після схеми сполучення обмоток указують через дефіс цифру, яка позначає групу сполучення ($Y/Y-0$; $Y/\Delta-11$). Під групою сполучення обмоток розуміють кут, на який лінійний вектор е.р.с. обмотки НН $\dot{E}_{НН}$, відстає від однойменного вектора обмотки ВН $\dot{E}_{ВН}$.

а)



б)

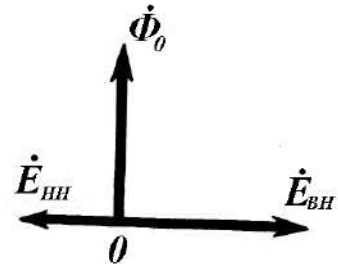
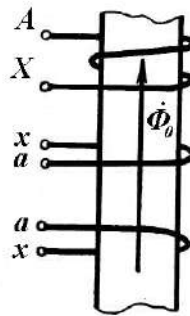


Рис. 2.19 - Схеми та векторні діаграми потоків і е.р.с. до визначення груп сполучення трансформаторів

У однофазного трансформатора фазні е.р.с. будуть одночасно і лінійними, тому е.р.с. обмоток ВН та НН або співпадають по фазі, якщо обмотки намотані однаково і мають однакове найменування затискачів (рис. 2.19, а), або будуть у проті фазі при різних намотках обмоток, чи не однойменній маркировці (рис. 2.19, б).

У відповідності до цього для однофазних трансформаторів визначають і дві групи з'єднання – 0 , якій відповідає кут в 0° і 6 – кут в 180° , тобто групі відповідає кут $n \times 30^\circ$, де n – номер групи.

Для розрахунку групи прийнято користуватись циферблатом стрілкового годинника: велику стрілку, яка вважається лінійним вектором обмотки ВН, ставлять на цифру 12, тоді номер групи укаже мала стрілка – лінійний вектор е.р.с. обмотки НН. Для трифазних трансформаторів, на відміну від однофазних, можна отримати (змінюючи не лише напрям намотки, чи назву затискачів, а і схеми сполучення обмоток) 12 різних груп: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. При цьому парні групи будуть при

однакових схемах сполучення (Y/Y; Δ/Δ), а непарні при різних (Y/ Δ ; Δ /Y). Щоб визначити яку групу сполучення має трифазний трансформатор при заданих схемах з'єднання, необхідно побудувати векторно-потенційну діаграму е.р.с. його обмоток. Для зручної взаємної орієнтації векторів е.р.с. обмоток ВН та НН два будь-які затискачі цих обмоток (наприклад, **A** та **a**) вважають електрично з'єднаними. При дослідному визначенні дійсно з'єднують електрично точки **a** і **A**.

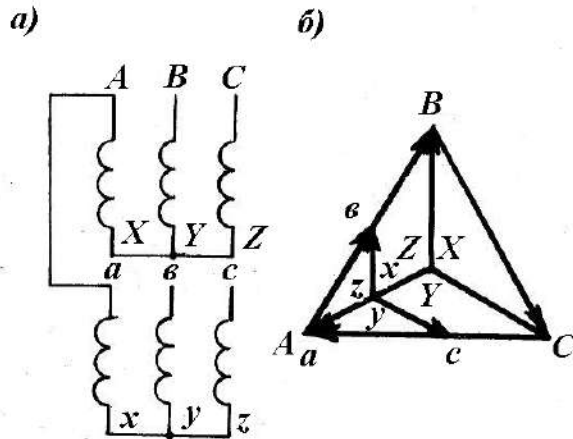


Рис. 2.20 - Схема сполучення Y/Y (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

На (рис. 2.20, а) подана схема сполучення Y/Y, а на (рис. 2.20, б) векторно-потенційна діаграма, на якій, у відповідності до з'єднаних затисків **A** та **a**, точки **A** і **a** суміщені. Так як обмотки **AX** та **ax** розташовані на одному стрижні осердя трансформатора, то їх відповідні фазні вектори E_{AX} і E_{ax} співпадають. Нульова точка **x**; **y**; **z** обмотки НН буде розташована на векторі E_{AX} , а вектор E_{by} , що відкладається з цієї точки, буде паралельним вектору E_{BY} і закінчиться на лінійному векторі E_{BA} , тому лінійний вектор E_{ba} співпадає з лінійним вектором E_{BA} (кут $\alpha = 0$), отже, це нулева група.

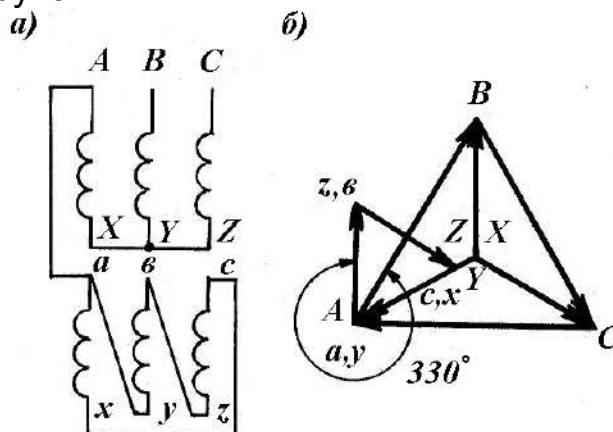


Рис. 2.21 - Схема сполучення Y/ Δ (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

На (рис. 2.21) зображені схема сполучення Y/ Δ , та векторно-потенційна діаграма, що відповідає цій схемі. Затискачі **A** і **a** обмоток ВН

та НН з'єднані – на діаграмі це точка ($A; a; y$), так як a та y з'єднані в трикутнику обмотки НН. Вектор E_{by} відкладають паралельно фазному вектору E_{BY} , тому що обмотки BY та by розташовані на одному стрижні і мають однакову намотку та однакове найменування затискачів, відповідно до (рис. 2.19, а). Таким чином, лінійний вектор E_{ab} (він одночасно є і E_{by}) відстає від однойменного вектора E_{AB} на кут 330° , а отже, це одинадцята група.

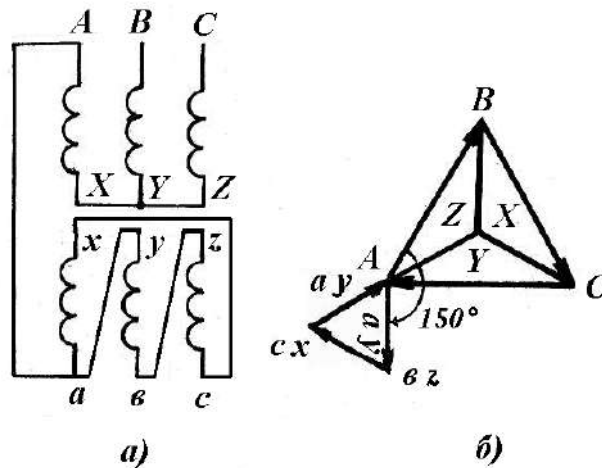


Рис. 2.23 - Схема сполучення обмоток Y/Δ - 5 (а) та відповідна векторно-потенційна діаграма (б)

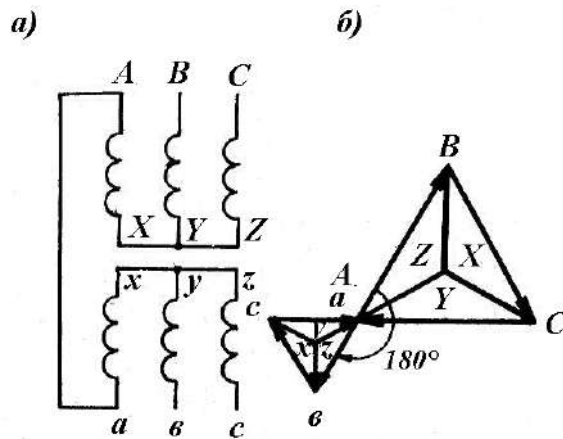


Рис. 2.22 - Схема сполучення Y/Y - 6 (а) та векторно-потенційна діаграма (б) цього сполучення

Як уже відзначалось, зміна назви затискачів обмотки, чи напрямку намотки, призведе до повороту фазного вектора даної обмотки е.р.с. на кут 180° , а отже, щоб з нульової групи отримати шосту, а з одинадцятої – п'яту, необхідно змінити назву затискачів обмотки НН a на x , b на y , c на z і навпаки (рис. 2.22 та рис. 2.23). Розглянуті вище групи отримують не змінюючи назву затискачів між стрижнями, тому ці чотири групи

сполучення називають *основними*. Якщо ж змінювати назви затискачів між стрижнями, можна отримати решту груп, які називають похідними.

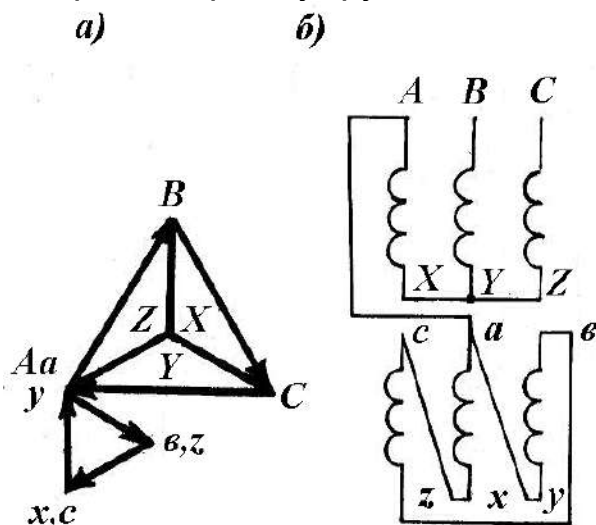


Рис. 2.24 - Векторно- потенційна діаграма (а) та схема сполучення обмоток Y/Δ -3 (б) трифазного трансформатора

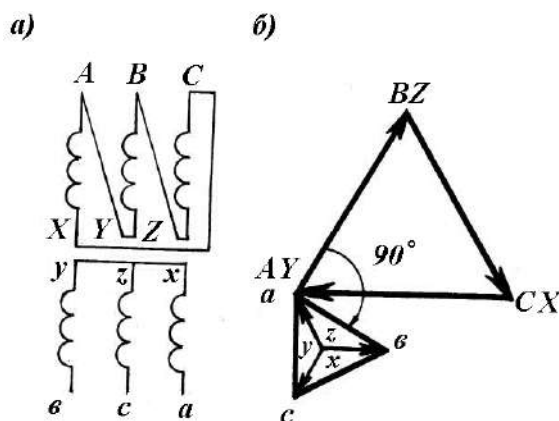


Рис. 2.25 - Схема сполучення обмоток Δ/Y - 3 (а) та векторно- потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

Розглянемо принцип побудови похідної групи. Наприклад, необхідно з'єднати трансформатор за третьою групою. Так як група 3 непарна, то схеми сполучення обмоток ВН та НН повинні бути різні, Y/Δ -3, або Δ/Y -3. Щоб провести з'єднання затискачів обмоток, спершу будують векторно-потенційну діаграму (рис. 2.24, а), на якій E_{ab} відкладають під кутом $3 \times 30^\circ = 90^\circ$ до вектора E_{AB} , тобто повертають трикутник abc за годинниковою стрілкою, відносно трикутника ABC , на кут 90° . В результаті такого повороту фазні вектори е.р.с. обмотки НН стали паралельними фазним векторам обмотки ВН інших фаз: так вектор E_{ax} паралельний вектору E_{BY} ; $E_{by} - E_{CZ}$; $E_{cz} - E_{AX}$. На (рис.2.24, б), у відповідності до цього, позначені і з'єднані затискачі обмотки НН. Аналогічно поступають і при схемі Δ/Y -3 (рис.2.25).

Основні групи мають перевагу перед похідними, так як передбачають однойменну маркировку затискачів обмоток, що розташовані на одному стрижні, а це, в свою чергу, зменшує вірогідність помилки при з'єднанні схеми. Слід також відзначити, що на групу з'єднання зважають лише при паралельній роботі трансформаторів.

Паралельною називають таку роботу двох, чи більше, трансформаторів, коли їх вторинні обмотки увімкнені на спільне навантаження, при цьому первинні обмотки можуть живитись як з однієї мережі (рис. 2.26, а), так і з різних (рис. 2.26 б).

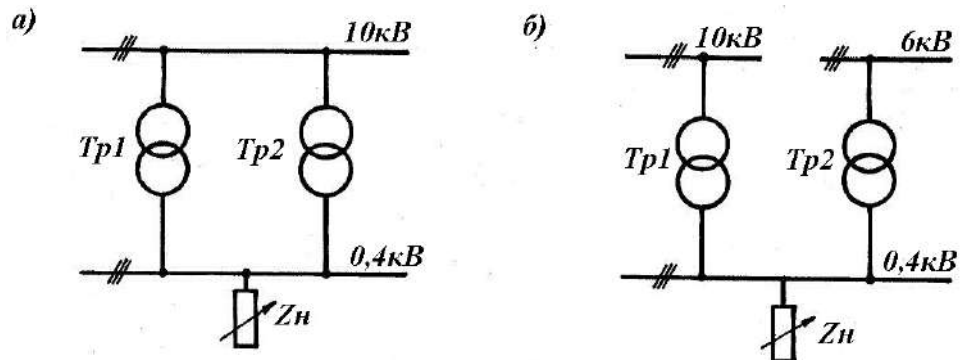


Рис. 2.26 - Схеми паралельної роботи трифазних трансформаторів з однією мережею живлення (а), та з двома (б)

Необхідність в паралельній роботі трансформаторів виникає в таких випадках:

- потужність навантаження більша від потужності одного трансформатора;
- споживач першої категорії, що не допускає перерви в електропостачанні, якщо така перерва пов'язана з виробничим браком чи з загрозою для здоров'я людей;
- різке коливання навантаження на протязі часу дозволяє вимкнути кілька паралельно-працюючих трансформаторів при зниженні навантаження, і тим самим підвищити експлуатаційні показники решти;
- коли необхідно вивести на поточний ремонт чи профілактику трансформатор, наприклад, дільничної підстанції, без перерви в електропостачанні дільниці.

Увімкнення на паралельну роботу трансформаторів можливе лише за дотримання певних умов. По-перше, вторинні напруги паралельно-працюючих трансформаторів повинні бути однакові; якщо у них однакові і первинні напруги (рис. 2.26, а), то повинні бути рівні коефіцієнти трансформації: $K_I = K_{II} = K_n$. По-друге, напруги КЗ трансформаторів, що працюють паралельно, повинні бути рівними: $U_{KI} = U_{KII} = U_{Kn}$. По-третє, паралельно-працюючі трансформатори повинні мати ідентичні схеми та групи з'єднання обмоток. Крім цього, потужності трансформаторів, що вмикаються на паралельну роботу, не повинні відрізнятися більше ніж в

три рази. Перед вмиканням трансформаторів на паралельну роботу їх обмотки повинні бути сфазовані, що означає увімкнення однойменних затисків усіх паралельно-працюючих трансформаторів лише на "свою" шину. Якщо на паралельну роботу увімкнено два, чи більше, трансформаторів з ідеально виконаними умовами паралельної роботи, то навантаження між ними розподілиться пропорційно їх потужностям. На практиці, підібрати кілька трансформаторів, які б ідеально підходили для паралельної роботи, досить складно, тому допускаються деякі відхилення від перерахованих вище умов.

Паралельна робота двох трансформаторів при різних коефіцієнтах трансформації. Допускається паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації, якщо:

$$\Delta K = (K_I - K_{II}) 100 / \sqrt{K_I - K_{II}} \leq 0,5 \% \quad (2.73)$$

нерівність між коефіцієнтами трансформації ΔK не перевищує 0,5% від їх середньо-геометричного значення ($\sqrt{K_I - K_{II}}$). Таке незначне розходження між коефіцієнтами трансформації, яке допускається, пояснюється тим, що в цьому випадку, навіть в режимі холостого ходу, між трансформаторами, що увімкнені паралельно, виникає зрівняльний струм, зумовлений різницею вторинних напруг

$$\Delta U = /U_1/K_I - U_1/K_{II} /. \quad (2.74)$$

$$I_{зр} = \Delta U / (Z_{kI} + Z_{kII}), \quad (2.75)$$

де Z_{kI} ; Z_{kII} - опори КЗ відповідно першого та другого трансформаторів.

Зрівняльний струм буде співпадати зі струмом навантаження того трансформатора, у якого менший коефіцієнт трансформації, перевантажуючи його, і розвантажуючи трансформатор з більшим коефіцієнтом трансформації. Враховуючи, що перевантаження трансформатора недопустимо, необхідно знижувати загальну потужність навантаження.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами КЗ. Така робота допускається лише тоді, коли різниця між напругами КЗ не перевищує 10% від їх середньоарифметичного значення:

$$\Delta U_K = (U_{kI} - U_{kII}) 100 / U_{\text{ср}} \leq 10 \% \quad (2.76)$$

де $U_{\text{ср}} = (U_{\text{кI}} + U_{\text{кII}})/2$ - середньоарифметичне значення напруг КЗ.

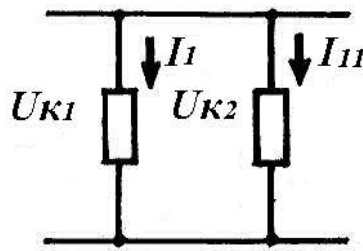


Рис. 2.27 - До поняття розподілу струмів при паралельній роботі трансформаторів з різними напругами КЗ

Напругу КЗ трансформатора можна розглядати як опір трансформатора у відносних одиницях, тому схему заміщення паралельної роботи трансформаторів можна зобразити у вигляді паралельно увімкнених опорів, (рис. 2.27). Отже, струм навантаження буде більшим через трансформатор, у якого менший опір, тобто напруга КЗ.

Виходячи з цього, навантаження при різних напругах КЗ розподіляється зворотнопропорційно напругам КЗ паралельно увімкнених трансформаторів за такою формулою:

$$S_i = S_{\text{заг}} S_{\text{ном}i} / U_{ki} \sum (S_{\text{ном}i} / U_{ki}), \quad (2.77)$$

де S_i – навантаження i -того трансформатора; $S_{\text{заг}}$ – загальне навантаження трансформаторів; $S_{\text{ном}i}$, U_{ki} – номінальна потужність та напруга КЗ i -того трансформатора. У виразі (2.77)

$$\sum (S_{\text{ном}i} / U_{ki}) = (S_{\text{номI}} / U_{кI}) + (S_{\text{номII}} / U_{кII}) + \dots \quad (2.78)$$

Паралельна робота трансформаторів при різних схемах та групах сполучення. Така робота не допускається, тому що зрівняльні струми, які виникають через фазовий зсув вторинних напруг, досить значні – такі, що іноді перевищують струми аварійних КЗ у відповідності з (2.75). При цьому

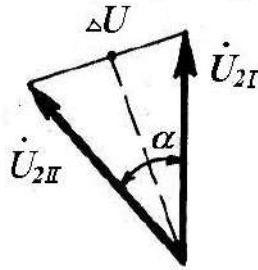


Рис. 2.28 - До визначення ΔU при різних групах з'єднання обмоток

$$\Delta U = 2U_{2\phi} \sin(\alpha/2), \quad (2.79)$$

де α - кут зсуву між фазними вторинними напругами (рис.2. 28). Якщо потужності трансформаторів відрізняються більше ніж у 3 рази, то паралельна робота між ними не має сенсу, тому що трансформатор меншої потужності, маючи менше значення напруги КЗ, може виявитись майже вдвічі перевантаженим і на величину його потужності слід буде знизити загальне навантаження.

Контрольні запитання

1. При якій напрузі доцільно: а) передавати; б) споживати електричну енергію?
2. Вкажіть одне з найважливіших достоїнств кіл перемінного струму в порівнянні з колами постійного струму.
3. Який принцип роботи трансформатора?
4. Чому трансформатори не працюють від мережі постійного струму?
5. З яких частин складається активна частина трансформатора? Які їхні призначення та конструкція?
6. Як по зовнішніх ознаках відрізнити в трансформаторі обмотку ВН від обмотки НН?
7. Яке призначення трансформаторного масла?
8. Як визначити номінальні струми та номінальну вторинну напругу трансформатора?
9. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора та як вона позначається?

1.3 ЛЕКЦІЯ №3. ТЕМА ПРИВЕДЕНИЙ СИЛОВИЙ ТРАНСФОРМАТОР

1. Основні рівняння трансформатора у векторній і диференціальній формі.

2. Приведений силовий трансформатор

Мета: вивчити основні рівняння трансформатора у векторній і диференційній формі та рівняння приведенного силового трансформатора

1. Основні рівняння трансформатора у векторній і диференційній формі.

Миттєві значення ЕРС, наведені в первинній та вторинній обмотках основним магнітним потоком Φ , за законом електромагнітної індукції дорівнюють:

$$e_1 = -W_1 d\Phi / dt, \quad e_2 = -W_2 d\Phi / dt,$$

а їх діючі значення :

$$E_1 = 4,44W_1 f \Phi_m; \quad E_2 = 4,44W_2 f \Phi_m.$$

Враховуючи магнітні потоки розсіювання одержимо два основні рівняння трансформатора і третє рівняння намагнічувальних сил:

$$u_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} - L_{\Sigma 1} \frac{di_1}{dt} - R_1 i_1;$$

$$W_1 i_1 + W_2 i_2 = W_1 i_{\Sigma}$$

Рівняння трансформатора у комплексній формі :

$$I_1 = -\dot{E}_1 + I_1 R_1 + jI_1 X_{p1};$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - I_2 R_2 - jI_2 X_{p2};$$

$$I_1 = I_{10} - \frac{W_2}{W_1} I_2$$

У режимі навантаження вторинна напруга U_2 незначною мірою залежить від струму навантаження. Ця залежність ($U_2 = f(I_2)$), наведена на рисунку 4, називається **зовнішньою характеристикою**. Вона визначається при $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$. У стандартах щодо трансформаторів нормується спад напруги U_2 при номінальному струмі навантаження

$$I_2 = I_{2H}.$$

Для побудови векторної діаграми навантаженого трансформатора (рисунок 5) необхідно використати основні рівняння трансформатора. Порядок побудови векторної діаграми такий:

1. Будується вектор магнітного потоку.
2. Вектор струму неробочого ходу випереджає вектор потоку на кут

магнітного запізнення (а) і розпадається на активну та реактивну складові:

$$I_0 = \sqrt{I_{0P}^2 + I_{0Q}^2}$$

3. Будуються вектори $\dot{E}_1$ та $\dot{E}_2$, що відстають від потоку на кут 90° .

4. Визначається зсув фаз між струмом $\dot{I}_2$ та ЕРС $\dot{E}_2$.

$\psi_2 = \arctg \frac{X_{P2} + X_H}{R_2 + R_H}$, та будується вектор струму $\dot{I}_2$.

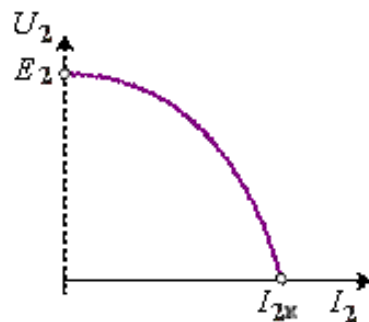


Рис. 9.5

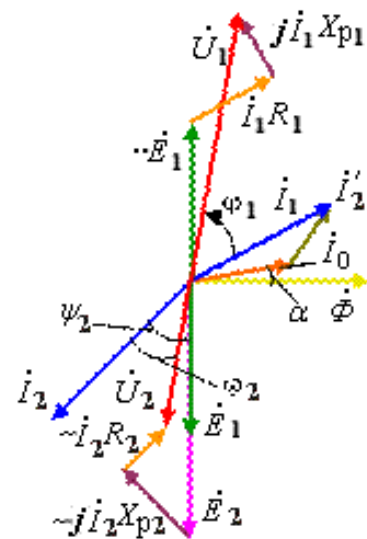


Рис. 9.6

5. За співвідношенням струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$ будується вектор первинного струму $\dot{I}_1$.

6. За рівнянням вторинного кола $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j \dot{I}_2 X_{p2}$ будується вектор вторинної напруги $\dot{U}_2$.

7. За рівнянням первинного кола $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_{p1}$ будується вектор напруги первинного кола $\dot{U}_1$.

8. Визначаються зсуви фаз φ_1 , та φ_2 між струмами та напругами.

Режим навантаження (рис. 6. – показана електрична схема) здійснюється, коли у вторинну обмотку увімкнено навантаження $\underline{Z}_H$. У вторинному колі протікає струм $\dot{I}_2$. У цьому разі маємо три потоки:

Φ – основний магнітний потік,

Φ_{P1} – потік розсіяння первинної обмотки,

Φ_{P2} – потік розсіяння вторинної обмотки.

На рис. 7 наведено залежність первинного струму від навантаження трансформатора.

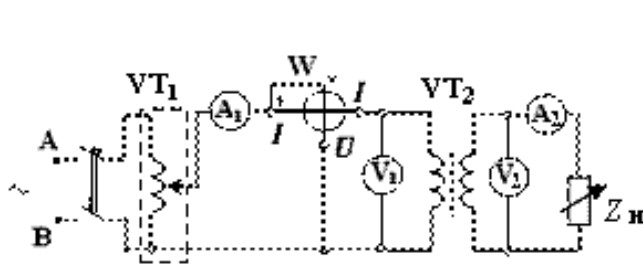


Рис. 6

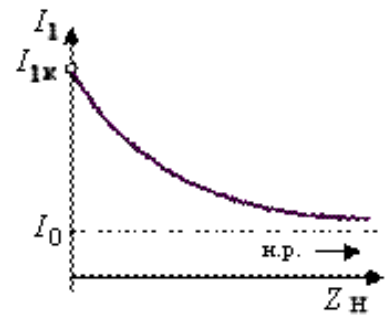


Рис. 7

2. Приведений силовий трансформатор



Рис. 1.18 Силовий трансформатор

Приведений трансформатор та схема заміщення приведенного трансформатора Як правило, у трансформатора $w_1 \neq w_2$, отже діючі значення ЕРС

$$E_1 \neq E_2$$

Це створює певні труднощі при побудові векторних діаграм у різних режимах роботи трансформатора, тому що вектори E_1 і E_2 необхідно представляти різними довжинами. Щоб уникнути цих незручностей параметри вторинної обмотки трансформатора приводять до числа витків первинної обмотки.

Приведеною вторинною обмоткою трансформатора називають таку умовну обмотку, що має те ж число витків, що і первинна обмотка. При цьому енергетичні співвідношення в трансформаторі повинні залишатися незмінними.

Приведені параметри вторинної обмотки трансформатора через дійсні величини визначаються у такий спосіб. Приведена ЕРС вторинної обмотки

$$E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k = E_1. \quad (1.19)$$

Приведений струм вторинної обмотки I'_2 знаходять за умови, що повна потужність вторинної обмотки залишається незмінною

$$I'_2 E'_2 = I_2 E_2 ;$$

$$I'_2 = \frac{I_2 E_2}{E'_2} = \frac{I_2 E_2}{k E_2} = \frac{I_2}{k} . \quad (1.20)$$

Приведений активний опір вторинної обмотки r'_2 визначають за умови, що електричні втрати в обмотці не залежать від її приведення, тобто

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 = r_2 k^2 . \quad (1.21)$$

Приведений індуктивний опір x'_2 знаходиться аналогічно 2

$$x'_2 = x_2 k^2 . \quad (1.22)$$

З урахуванням приведених співвідношень, основні рівняння приведенного трансформатора запишуться у такий спосіб.

Рівняння МРС

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}'_2 w_1 = \dot{I}'_0 w_1 ;$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}'_0 . \quad (1.23)$$

Рівняння напруг

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 ;$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_2 + \dot{U}'_2 , \quad (1.24)$$

де $U_{\square\square 2\square} = \square / \square_2 Z_H \quad \square \quad (1.25)$

При аналізі режимів

При аналізі режимів роботи трансформатора представляє певні труднощі той факт, що первинна та вторинна обмотки трансформатора зв'язані електромагнітно. Тому доцільно одержати схему заміщення трансформатора, в якій всі елементи зв'язані електрично. Представимо

спочатку реальний однофазний трансформатор у такий спосіб (рис. 1.19).

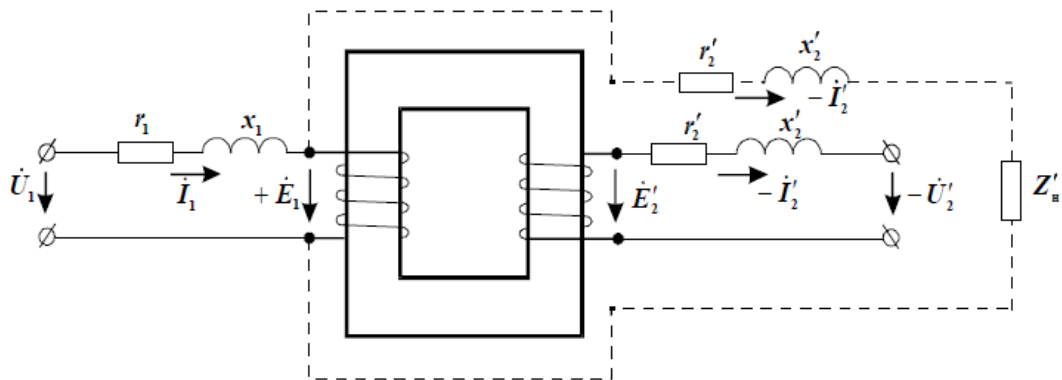


Рис. 1.19 До обґрунтування електричної схеми заміщення приведенного трансформатора

Використаємо основне рівняння трансформатора, враховуючи що

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m \quad (1.26)$$

де $Z_m = r_m + jx_m$ – опір кола намагнічування;

$$U_2 \phi = I_2 \phi Z_n \phi \text{ \& \& ,} \quad (1.27)$$

де $Z_n = r_n \phi + jx_n \phi$ – приведений опір навантаження.

З рівняння МРС приведенного трансформатора випливає

$$I_1 + I_2 = I_0 \text{ \& ,}$$

або

$$I_1 = -I_2 + I_0 \text{ \& } \quad (1.28)$$

Оскільки

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{E}_2'}{Z_2' + Z_n'} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2' + Z_n'} \text{ ,} \quad (1.29)$$

що випливає з рівняння для вторинної обмотки трансформатора

$$E_2 \phi = I_2 \phi Z_2 \phi + U_2 \phi \text{ .}$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' Z_2' + \dot{U}_2' \text{ .}$$

$$\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m} \text{ .} \quad (1.30)$$

З урахуванням приведенного виразу для струмів можна записати

$$\dot{I}_1' = \frac{-\dot{E}_1}{Z_2' + Z_n'} + \frac{-\dot{E}_1}{Z_m} = -\dot{E}_1 \left(\frac{1}{Z_2' + Z_n'} + \frac{1}{Z_m} \right) \text{ .}$$

Звідси

$$-\dot{E}_1 = \frac{\dot{I}_1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{1}{Z_m}} \quad (1.31)$$

Підставляючи це значення в рівняння рівноваги напруг для первинної обмотки трансформатора одержимо &

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{I}_1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{1}{Z_m}} + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_1 \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{1}{Z_m}} \right) = \dot{I}_1 Z_e, \quad (1.32)$$

де

$$Z_e = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{1}{Z_m}} \quad \text{— еквівалентний опір схеми}$$

заміщення трансформатора

З цього виразу випливає, що схему заміщення однофазного двообмоточного трансформатора можна представити електричним колом

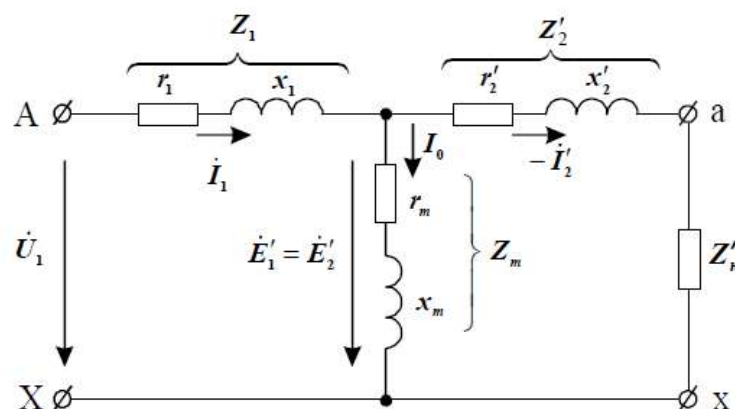


Рис. 1.20. Схема заміщення приведенного трансформатора

Наявність опорів r_m і x_m в схемі заміщення фізично пояснюється у такий спосіб:

- r_m — опір, що відповідає активним втратам в сталі сердечника трансформатора;
- $x_m = M_w$ — опір взаємної індуктивності (оскільки Φ_0 в однаковій степені зчеплений як з первинною, так і з вторинною обмотками).

При розрахунках і моделюванні режимів роботи трансформатора ця схема заміщення зручна тим, що в ній всі елементи зв'язані електрично. Вона справедлива також для кожної фази трифазного трансформатора, якщо цей трансформатор навантажений по фазах рівномірно.

Контрольні запитання

1. При якій напрузі доцільно: а) передавати; б) споживати електричну енергію?
2. Вкажіть одне з найважливіших достоїнств кіл перемінного струму в порівнянні з колами постійного струму.
3. Який принцип роботи трансформатора?
4. Чому трансформатори не працюють від мережі постійного струму?
5. З яких частин складається активна частина трансформатора? Які їхні призначення та конструкція?
6. Як по зовнішніх ознаках відрізнити в трансформаторі обмотку ВН від обмотки НН?
7. Яке призначення трансформаторного масла?
8. Як визначити номінальні струми та номінальну вторинну напругу трансформатора?
9. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора та як вона позначається?

1.4 ЛЕКЦІЯ №4. ТЕМА СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

План

1. Схеми заміщення силового трансформатора.
2. Методика визначення параметрів схем заміщення за паспортними даними.
3. Енергетичні діаграми перетворення потужності в силовому трансформаторі.

Мета: вивчити схеми заміщення силового трансформатора та енергетичні діаграми перетворення потужності в силовому трансформаторі.

1. Схеми заміщення силового трансформатора.

Оцінимо вплив реальних параметрів обмоток трансформатора на його роботу. Еквівалентна схема реального трансформатора наведена на рис. 5.9.

вона враховує як активні опори первинної і вторинної обмоток (r_1, r_2), так і їх магнітні потоки розсіювання, які враховуються індуктивними опорами x_1 і x_2 .

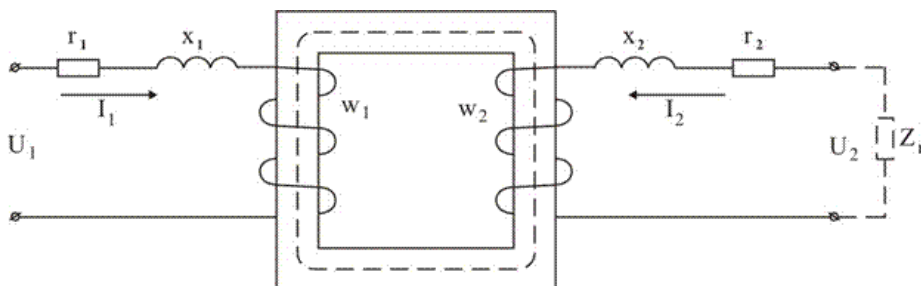


Рис. 5.9

Накреслимо схему заміщення такого трансформатора (рис. 5.9).
 Накреслимо схему заміщення такого трансформатора (рис. 5.10).

В наведеній схемі магнітний зв'язок між первинним і вторинним колами заміняється електричним зв'язком, що значно спрощує розрахунок та аналіз електричної схеми трансформатора.

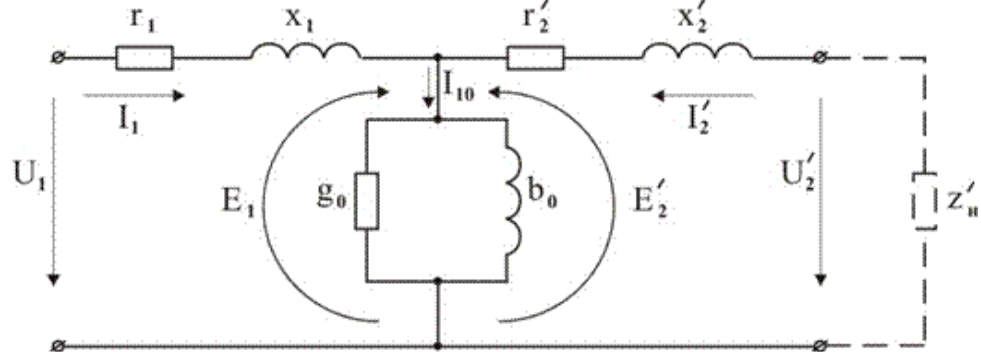


Рис. 5.10

Призначення елементів схеми:

$r_2', x_2', I_2', z_n', U_2'$ - зведені величини, які характеризують електричне коло навантаження вторинної обмотки, приведене до первинної напруги U_1 ;

r_1, r_2' – опір мідного проводу первинної і вторинної обмоток;

x_1, x_2' – відображає наявність потоку розсіювання в первинній і вторинній обмотці;

g_0, b_0 – відображають наявність сталюого осердя (реальні втрати в осерді ми замінили еквівалентними втратами в активному опорі $1/g_0$, b_0 – реактивна складова);

I_{10} – струм холостого ходу в первинній обмотці.

Середня частина цієї схеми заміщення відповідає ідеальному трансформатору при розімкненому вторинному колі.

Зв'язок між реальними та зведеними величинами:

$$r_2' = r_2 k_{mp}^2, x_2' = x_2 k_{mp}^2, z_n' = R_n \pm j x_n', R_n' = R_n k_{mp}^2, \\ x_n' = x_n k_{mp}^2, U_2' = U_2 k_{mp}, E_2' = E_2 k_{mp}, I_2' = I_2 / k_{mp}$$

Приведення величин здійснюється для виконання законів Кірхгофа, так як схема заміщення не відображає передачу енергії за допомогою магнітного поля.

Рівняння електричної рівноваги записуємо на основі схеми заміщення трансформатора за законами Кірхгофа.

Рівняння електричного стану в комплексному вигляді для кола первинної обмотки згідно з другим законом Кірхгофа має вигляд:

$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + r_1 \vec{I}_1 + j x_1 \vec{I}_1,$$

де r_1 , x_1 – індуктивний і активний опір індуктивності розсіяння первинної обмотки.

Рівняння рівноваги для кола вторинної обмотки за другим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + r_2' \dot{I}_2 + jx_2' \dot{I}_2, \\ \text{або } \dot{U}_2' &= \dot{E}_2 - r_2' \dot{I}_2 - jx_2' \dot{I}_2. \end{aligned}$$

Крім того, зі схеми заміщення для вузла “а” згідно з першим законом Кірхгофа одержуємо:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2' \quad \text{або} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (-\dot{I}_2').$$

2. Методика визначення параметрів схем заміщення за паспортними даними.

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.

Дій такої побудови виведемо ще два допоміжних рівняння; оскільки $E_2 = E_1$, рівняння (8.23) можна записати так:

$$-\dot{E}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{I}_2' \underline{Z}_2') \quad (8.24a)$$

а для приведенного трансформатора рівняння дістає вигляд $\dot{U}_2' = \dot{I}_2' \underline{Z}_2'$.
Тоді

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_2' (\underline{Z}_2' + \underline{Z}_m') \quad (8.24b).$$

Рівняння (8.23) описують електричне коло на рис. 8.5а. Дійсно, напруга U_1' врівноважується ЕРС самоіндукції і падінням напруги $\dot{I}_1' Z_1$; до вузла струмів а протікає струм $\dot{I}_2'$ який напрямлений назустріч струму $\dot{I}_1'$. Величина $(-E_1)$ чисельно може бути представлена падінням напруги в деякому повному $I_0 Z_m$ опорі

$$Z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2} \quad (8.25)$$

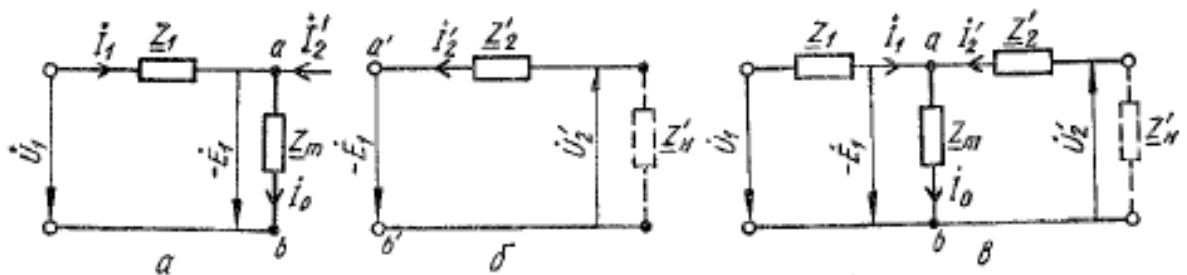


Рис. 8.5 Елемент схеми (а, б) і повна схема заміщення (в) трансформатора

Рівняння (8.24) описує електричне коло на рис.8.5б. Дійсно, якщо до електричного кола, яке має два послідовно з'єднані резистори, прикласти різницю потенціалів рівну $(-E_1)$, то у вказаному напрямку потече струм I_2'' . Видно, що на схемах рис. 8.5а і б точки a і a' , і b і b' є відповідно точками рівного потенціалу, що дозволяє їх об'єднати і отримати повну схему заміщення (рис. 8.5в).

Ця електрична схема повністю, як і трансформатор з магнітним зв'язком, описується рівнянням (8.23); отже, вона представляє модель трансформатора, зібравши і дослідивши яку можна вивчати всі явища, які проходять в трансформаторі. Через особливості графічного позначення схема отримала назву Т-подібної

3. Енергетичні діаграми перетворення потужності в силовому трансформаторі.

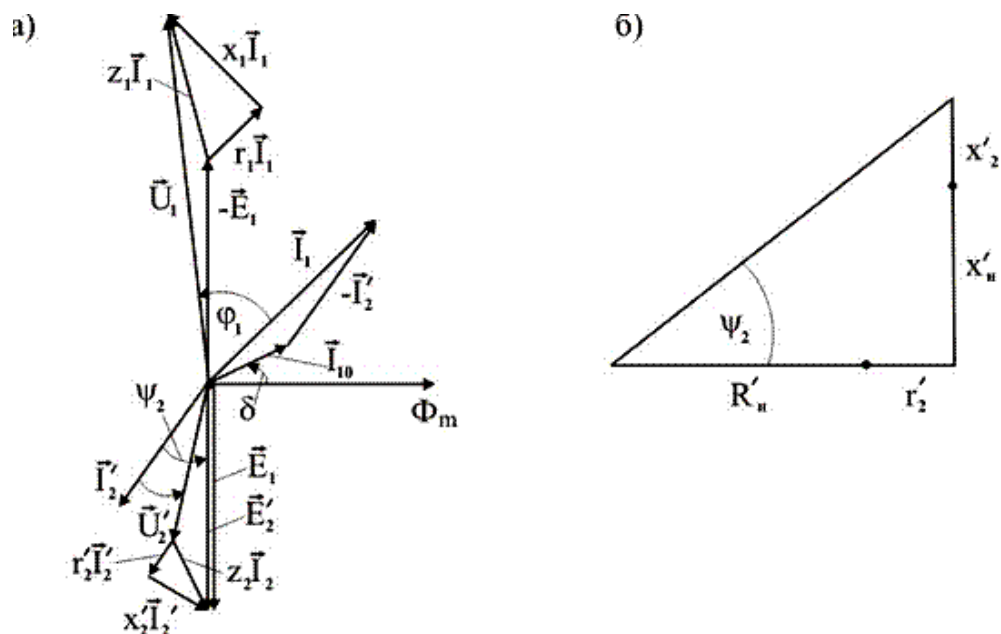


Рис. 5.11

Рівняння електричної рівноваги використовують для побудови векторної діаграми трансформатора (рис. 5.11,а), при цьому всі комплексні величини зображуємо відповідними векторами. Послідовність побудови векторної діаграми наступна:

а) відкладаємо вздовж дійсної осі вектор амплітуди $\vec{\Phi}_m$ магнітного потоку Φ ($\Phi = \Phi_m \sin \omega t$);

б) відкладаємо вектор струму холостого ходу $\vec{I}_{10}$. Струм холостого ходу випереджає $\vec{\Phi}_m$ на кут δ , де δ - кут магнітних втрат - визначається з режиму холостого ходу трансформатора: $\delta = 90^\circ - \varphi_{10}$. Зсув фаз φ_{10} між напругою $\vec{U}_{10}$ та струмом $\vec{I}_{10}$ визначаємо з формули для коефіцієнта

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}}$$

потужності для кола первинної обмотки:

в) потік $\vec{\Phi}_m$ наводить ЕРС $\vec{E}_1$ та $\vec{E}_2$, які однакові за модулем і відстають від потоку на 90° . Враховуючи це, відкладаємо вектори $\vec{E}_1$ та $\vec{E}_2$.

г) з трикутника опорів (рис. 5.11,б) вторинного кола трансформатора

знаходимо зсув фаз між $\vec{E}_2$ та $\vec{I}_2'$: $\psi_2 = \arctg \frac{r_2' + x_2'}{x_2' + x_2'}$, і під цим кутом до $\vec{E}_2$ відкладаємо струм $\vec{I}_2'$.

д) знаходимо струм первинної обмотки: $\vec{I}_1 = \vec{I}_{10} + (-\vec{I}_2')$. Для цього відкладаємо спочатку з протилежним знаком вектор $(-\vec{I}_2')$, а потім складаємо його вектор з $\vec{I}_{10}$.

е) в протилежному напрямку до $\vec{E}_1$ рисуємо вектор $\vec{U}_{10} = -\vec{E}_1$ - це є частина напруги $\vec{U}_1$, яка йде на компенсацію ЕРС самоіндукції $\vec{E}_1$.

д) до $(-\vec{E}_1)$ додаємо спади напруг на резистивному $r_1 \vec{I}_1$ та індуктивному $x_1 \vec{I}_1$ опорах (вектор $r_1 \vec{I}_1$ повинен бути паралельним до $\vec{I}_1$ а $x_1 \vec{I}_1$ - перпендикулярно до $\vec{I}_1$).

ж) знаходимо зсув фаз φ_1 між $\vec{U}_1$ та $\vec{I}_1$: $\varphi_1 = \arctg \frac{x_1'}{r_1'}$. Відкладаємо під кутом φ_1 відносно вектора $\vec{I}_1$ вектор $\vec{U}_1$.

з) далі додаємо до $\vec{U}_1$ спад напруг на резистивному $r_1 \vec{I}_1$ та індуктивному $x_2 \vec{I}_1$ опорах (вектор $r_1 \vec{I}_1$ повинен бути паралельним до $\vec{I}_1$, а $x_2 \vec{I}_1$ - перпендикулярно до $\vec{I}_1$). В результаті сума трьох векторів напруг дає ЕРС $\vec{E}_1$ згідно рівнянню рівноваги: $\vec{E}_1 = \vec{U}_1 + r_1 \vec{I}_1 + x_2 \vec{I}_1$.

Контрольні запитання

1. При якій напрузі доцільно: а) передавати; б) споживати електричну енергію?
2. Вкажіть одне з найважливіших достоїнств кіл перемінного струму в порівнянні з колами постійного струму.
3. Який принцип роботи трансформатора?
4. Чому трансформатори не працюють від мережі постійного струму?
5. З яких частин складається активна частина трансформатора? Які їхні призначення та конструкція?
6. Як по зовнішніх ознаках відрізнити в трансформаторі обмотку ВН від обмотки НН?
7. Яке призначення трансформаторного масла?
8. Як визначити номінальні струми та номінальну вторинну напругу трансформатора?
9. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора та як вона позначається?
12. Як зміниться відношення лінійних напруг трансформатора, якщо нульову групу з'єднання змінити на 11-ту?
13. Що таке приведений трансформатор?
14. Що таке рівняння електричної рівноваги з боку первинної обмотки?
15. Що таке рівняння електричної рівноваги з боку вторинної обмотки?

1.5 ЛЕКЦІЯ №5. ТЕМА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Дослід холостого ходу і аналіз характеристик холостого ходу.
2. Дослід короткого замикання і аналіз характеристик короткого замикання.
3. Методика визначення енергетичних показників силового трансформатора за паспортними даними.

Мета: провести дослідження холостого ходу, короткого замикання і аналіз характеристик, та вивчити методику визначення енергетичних показників силового трансформатора за паспортними даними.

1. **Дослід холостого ходу і аналіз характеристик холостого ходу.**

Холостим ходом (х.х.) трансформатора називають такий режим його роботи, коли до первинної обмотки підведена визначеної величини змінна напруга (як правило, номінальна), а вторинна обмотка розімкнута ($I_2 = 0$). Фізичні умови роботи трансформатора в цьому режимі розглянемо на прикладі однофазного двохобмоткового трансформатора (рис.2.1).

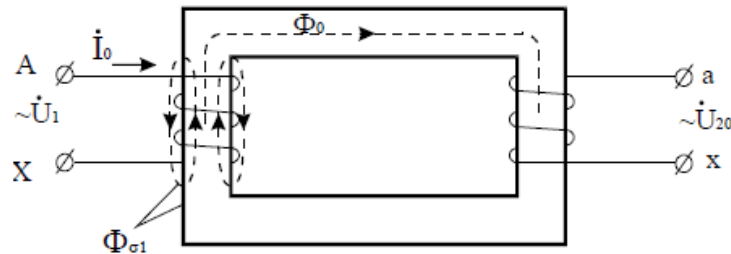


Рис. 2.1 Однофазний двохобмотковий трансформатор

Якщо до первинної обмотки трансформатора підвести синусоїдальну напругу U_1 , при розімкнутій вторинній обмотці, то трансформатор буде споживати з мережі струм I_0 . Під дією МРС первинної обмотки $F_1 = I_0 w_1$ в трансформаторі утвориться магнітне поле, яке представляємо потоками: Φ_0 – основний магнітний потік; $\Phi_{\sigma 1}$ – магнітний потік розсіювання первинної обмотки.

Потік Φ_0 індукуює у первинній обмотці ЕРС E_1 , у вторинній обмотці – E_2 .

$\Phi_{\sigma 1}$ – індукуює у первинній обмотці ЕРС E_1 . Враховуючи ЕРС, що діють в контурах первинної і вторинної обмоток, а також схему включення трансформатора при холостому ході, запишемо основні рівняння рівноваги напруг для первинної і вторинної обмоток у комплексній формі, тобто за умови, що ЕРС, струм і напруги змінюються по синусоїдальному закону

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 ; \quad (2.1)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_{20} , \quad (2.2)$$

де U_{20} – вихідна напруга режиму холостого ходу трансформатора.

Для приведеної вторинної обмотки трансформатора

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_{20}' .$$

Струм холостого ходу трансформатора $I_{\square 0}$ має дві складові:

I_{0a} – активна складова струму холостого ходу, що співпадає по напрямку з вектором напруги U_1 ;

I_{0m} – реактивна (намагнічуюча) складова, ампервитки якої йдуть на створення основного магнітного потоку, співпадає по напрямку з вектором магнітного потоку Φ_0 .

Струм холостого ходу через складові

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2} . \quad (2.3)$$

Так як $I_{0m} \gg I_{0a}$, то в силових трансформаторах часто приймають

$$I_{0\mu} = I_0 ; \quad \frac{I_{0a}^2}{I_0^2} \leq 0,1$$

При наявності насичення магнітних кіл трансформатора, крива зміни струму холостого ходу в часі містить крім основної також вищі гармонійні непарного порядку: 3, 5, 7, ...

Фазові співвідношення між ЕРС, струмами і напругами встановлюємо шляхом побудови векторної діаграми.

При побудові векторної діаграми враховуємо знання фізичних процесів, режиму холостого ходу (при цьому враховуємо: параметри вторинної обмотки трансформатора приведені до первинної обмотки; тільки першу гармонійну струму холостого ходу).

При побудові векторної діаграми (рис.2.2) спочатку відкладаємо вектор основного магнітного потоку Φ_0 . Намагнічуюча складова струму холостого ходу I_{0m} збігається по напрямку з вектором магнітного потоку Φ_0 . ЕРС E_{01} і E_{02} , що індукуються в первинній і вторинній обмотках основним магнітним потоком, відстають від нього по фазі на кут 90° . Відповідно до рівняння рівноваги напруг для вторинної обмотки $E_2 = 2 \cdot U_2$, тобто ЕРС дорівнює вихідній напрузі трансформатора в режимі холостого ходу. Якщо до первинної обмотки трансформатора підведена номінальна напруга U_{01H} , то на виході трансформатора встановлюється також номінальна напруга (за номінальну вихідну напругу приймається напруга режиму холостого ходу).

Завершуємо побудову векторної діаграми визначенням вектора підведеної напруги U_{01} , шляхом підсумовування векторів відповідно до рівняння напруг для кола первинної обмотки (2.1).

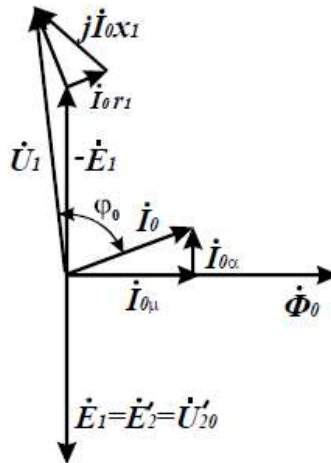


Рис. 2.2 Векторна діаграма трансформатора в режимі холостого ходу

Таким чином, в результаті побудови векторної діаграми визначаємо фазові співвідношення між напругою, ЕРС і струмом в режимі холостого ходу трансформатора.

Схему заміщення трансформатора для режиму холостого ходу одержуємо з розглянутої вище загальної схеми заміщення з огляду на те, що в режимі холостого ходу вторинне коло обмотки трансформатора розімкнуте і струм по ній не протікає. Схема заміщення трансформатора для режиму холостого ходу буде представлена колом (рис.2.3).

Відповідно до схеми заміщення, трансформатор в режимі холостого ходу має наступні параметри:

$r_0 = r_1 + r_m$ – активний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$x_0 = x_1 + x_m$ – індуктивний опір трансформатора в режимі холостого ходу.

Для силових трансформаторів справедливо, що $r_m \gg r_1$ і $x_m \gg x_1$, отже, для цих трансформаторів можна прийняти, що $r_0 \approx r_m$ і $x_0 \approx x_m$.

Дослід холостого ходу трансформатора Випробування трансформатора в режимі холостого ходу має на меті:

- визначити параметри схеми заміщення трансформатора;
- визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.

Принципова схема досліді холостого ходу для однофазного двохобмоткового трансформатора представлена на рис.2.4.

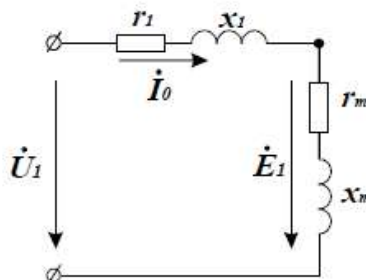


Рис. 2.4 Схема дослідження холостого ходу трансформатора
Вимірюють:

U_1 – підведена до трансформатора напруга;

I_0 – струм холостого ходу трансформатора;

P_0 – активна потужність, яку споживає трансформатор в режимі холостого ходу;

U_{20} – вихідна напруга трансформатора в режимі холостого ходу.

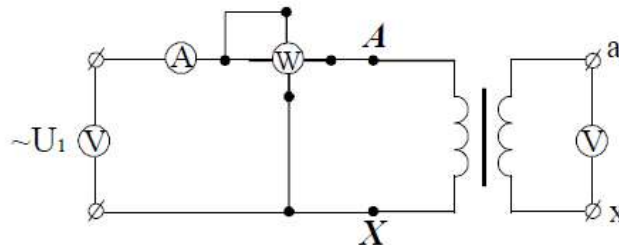


Рис. 2.3 Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Розраховують:

а) параметри холостого ходу:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \quad \text{– повний опір трансформатора в режимі холостого ходу;}$$

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2} \quad \text{– активний опір трансформатора в режимі холостого ходу;}$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \quad \text{– індуктивний опір трансформатора в режимі холостого ходу;}$$

б) коефіцієнт трансформації трансформатора

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} ; \quad (2.4)$$

в) коефіцієнт потужності холостого ходу трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0} . \quad (2.5)$$

При визначенні коефіцієнта трансформації має місце похибка, оскільки U_1 відрізняється від E_1 на величину $I_0 Z_1$.

Однак ця похибка невелика, оскільки в силових трансформаторах струм холостого ходу I_0 складає $I_0 = (3 \dots 8) \% I_{1н}$. Як правило, струм холостого ходу виражають у відсотках від номінального струму первинної обмотки

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100 \% . \quad (2.6)$$

Для трифазного трансформатора за показаннями трьох амперметрів і вольтметрів визначаються середні значення лінійного струму $I_{ол}$ і лінійної напруги $U_{1л}$, а за показаннями ватметрів – потужність холостого ходу трьох фаз $P_0 = P' + P''$. Фізичний зміст мають тільки значення опорів. Тому необхідно прийняти до уваги схему з'єднання обмоток. У випадку з'єднання первинних обмоток зіркою, а при з'єднанні їх трикутником

$$z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_{ол}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_{ол}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad (2.7)$$

$$z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{1л}}{I_{ол}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{ол}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт потужності холостого ходу

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1л}I_{ол}}. \quad (2.9)$$

З аналізу схеми заміщення трансформатора (див. рис.1.23) при $I_2 = 0$ впливає, що параметри холостого ходу z_0 , r_0 , x_0 являють собою суми наступних опорів:

$$z_0 = |Z_1 + Z_m|; \quad r_0 = r_1 + r_m; \quad x_0 = x_1 + x_m \quad (2.10)$$

В силових трансформаторах опори r_1 і x_1 в десятки і сотні разів менші опорів r_m і x_m . Тому з великою точністю можна вважати, що параметри холостого ходу дорівнюють параметрам намагнічуючого кола:

$$z_0 \approx Z_m; \quad r_0 \approx r_m; \quad x_0 \approx x_m. \quad (2.11)$$

Так як корисна потужність при роботі трансформатора в режимі холостого ходу дорівнює нулю, то потужність на вході трансформатора в цьому режимі витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі P_m (втрати на перемагнічування магнітопроводу і вихрові струми) і електричні втрати $I_0^2 r_1$ (втрати на нагрівання обмотки) однієї лише первинної обмотки. Однак через невелике значення струму I_0 електричними втратами $I_0^2 r_1$ можна зневажити і вважати, що вся потужність холостого ходу являє собою потужність магнітних втрат в сталі магнітопроводу. Тому магнітні втрати в трансформаторі прийнято називати втратами холостого ходу.

Ці втрати не залежать від навантаження. Вони пропорційні квадрату магнітної індукції (B_2), тому що частота в мережі постійна.

Примітка: Для трифазних трансформаторів параметри схеми заміщення визначаються для однієї фази.

2. Дослід короткого замикання і аналіз характеристик короткого замикання.

Коротким замиканням (к.з.) трансформатора називається такий режим його роботи, коли до первинної обмотки підводиться визначеної величини перемінна напруга, а вторинна обмотка замкнута накоротко.

Розрізняють два види (режими) короткого замикання:

1. **Раптове коротке замикання**, яке має місце в умовах експлуатації трансформатора, тобто коли до трансформатора підводиться номінальна напруга. Це аварійний режим, оскільки за дуже короткий проміжок часу струми в обмотках можуть перевищити в десятки разів номінальні струми. При цьому порушується тепловий режим трансформатора і між обмотками діють значні динамічні зусилля. Цей режим тим небезпечніший, чим більша потужність і габарити трансформатора. Трансформатори мають максимальний струмовий захист від раптових коротких замикань.

2. Випробування трансформатора в режимі короткого замикання, тобто коли до трансформатора підводиться знижена напруга $U_{1к}$ такого значення, щоб струми в обмотках трансформатора були номінальними. Цю напругу називають **номінальною напругою короткого замикання** трансформатора. Її виражають у відсотках від номінального $U_{1н}$ і вказують в паспорті трансформатора

$$U_k \% = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100 \% . \quad (2.13)$$

В силових трансформаторах напруга к.з. складає $(2...10)\% U_{1н}$. Розглянемо фізичні умови роботи трансформатора в режимі короткого замикання на прикладі схеми однофазного двохобмоткового трансформатора (рис.2.7), коли до первинної обмотки підведена знижена напруга $U_{1к}$.

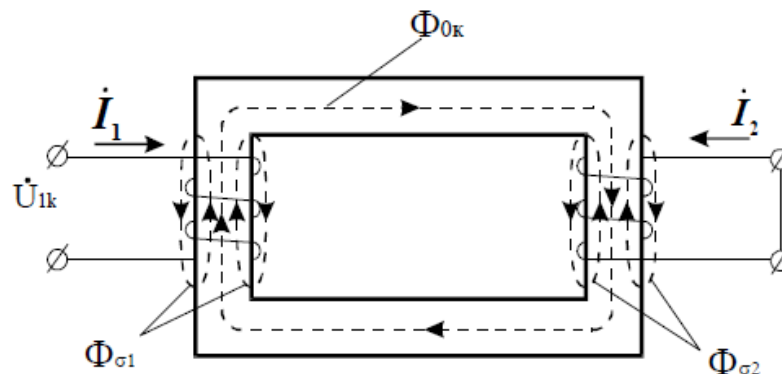


Рис. 2.7 Однофазний двохобмотковий трансформатор

Якщо до первинної обмотки підведена змінна напруга $U_{1к}$, а вторинна обмотка замкнута накоротко, то по обмотках будуть протікати струми I_1 і I_2 .

Під дією МРС первинної $I_1 W_1$ і вторинної $I_2 W_2$ обмоток в трансформаторі створюється магнітне поле, яке доцільно представити у виді магнітних потоків:

$\Phi_{ок}$ – основний магнітний потік при короткому замиканні; Φ_{s1} і Φ_{s2} – потоки розсіювання первинної і вторинної обмоток.

Потік $\Phi_{ок}$ індукуює в первинній обмотці ЕРС $E_{1к}$, у вторинній – $E_{2к}$.

Φ_{s1} – індукуює в первинній обмотці E_{s1} ;

Φ_{s2} – індукуює у вторинній обмотці E_{s2} .

Такі фізичні умови роботи трансформатора в режимі короткого замикання. Якщо до трансформатора підведене знижена синусоїдальна напруга, то магнітний потік $\Phi_{ок}$ незначний і насичення магнітної системи не настає, тому ЕРС і струми в трансформаторі змінюються по синусоїдальному закону. З урахуванням схеми включення обмоток при короткому замиканні, рівноваги напруг для контурів первинної і вторинної обмоток запишуться у виді

$$\dot{U}_{1к} = -\dot{E}_{1к} + \dot{I}_1 Z_1; \quad (2.14)$$

$$\dot{E}'_{2к} = \dot{I}'_1 Z'_2 + \dot{U}'_2, \quad (2.15)$$

де $\dot{U}'_2 = 0$.

Рівняння МРС для режиму короткого замикання записуємо з урахуванням наступної обставини: оскільки при номінальній підведеній напрузі, струм холостого ходу складає (3 ... 8)% від номінального струму $I_{1н}$, то при зниженій напрузі струм холостого ходу дуже малий і ним можна знехтувати. Отже в цьому випадку можна записати

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = 0; \quad \text{або} \quad \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2. \quad (2.16)$$

Використовуючи розглянуті основні рівняння і знання фізичних процесів, установимо фазові співвідношення між ЕРС, напругами і струмами в режимі короткого замикання шляхом побудови векторних діаграм (рис.2.8).

Відкладаємо вектор $\Phi_{ок}$. ЕРС $\dot{E}_{1к}$ і $\dot{E}'_{2к}$ відстають від $\dot{\Phi}_{ок}$ на кут $\pi/2$. Струм вторинної обмотки $\dot{I}'_{2к}$, що циркулює по замкнутому контурі, зустрічає на своєму шляху опори $r'_{2к}$ і $x'_{2к}$. Отже, цей струм буде відстаючим стосовно ЕРС $\dot{E}'_{2к}$.

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2}{r'_2} . \quad (2.17)$$

Згідно рівняння МРС (2.16) відкладаємо вектор струму первинної обмотки рівний по величині і протилежний вектору $\dot{I}'_2$. Згідно рівняння напруг для вторинної обмотки $\dot{E}'_{2к} = \dot{I}'_2 Z'_2$ (2.15), підсумуємо вектори спаду напруги $\dot{I}'_2 r'_2$ і $j\dot{I}'_2 x'_2$. Завершуємо побудову векторної діаграми визначенням вектора $U_{1к}$, відповідно до рівняння (2.14) для контуру первинної обмотки.

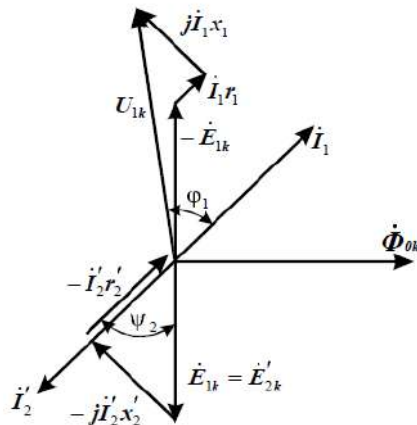


Рис. 2.8 Векторна діаграма трансформатора в режимі короткого замикання

Отримана векторна діаграма режиму короткого замикання має головним чином теоретичне значення з тієї причини, що в трансформаторі дуже складно одержати роздільно значення опорів x_1 і x'_2 , тобто в досвіді короткого замикання одержують суму опорів $x_1 + x'_2 = x_k$.

3. Методика визначення енергетичних показників силового трансформатора за паспортними даними.

Основні параметри. У процесі перетворення напруги в трансформаторі виникають втрати електричної енергії в обмотках і магнітопроводі, викликані нагріванням. Тривалий перегрів обмоток може викликати старіння і руйнування ізоляції, тому для забезпечення тривалої роботи силового трансформатора заводом-виготівником задаються показники, що називаються паспортними даними: повна потужність S_{jj} , коефіцієнт трансформації n , напруги $U_{1м}$ і $U_{2н}$, напруга короткого замикання $U_{кз}$, струми $I_{1н}$, $I_{2н}$ і струм холостого ходу $I_{10н}$, частота f_H , втрати в сталі магнітопроводу $AP_{0н}$ і в обмотках $AP_{мн}$ та i_n .

У процесі тривалої експлуатації властивості ізоляції погіршуються, зростають втрати енергії. Тому періодично перевіряють основні дані трансформатора, до яких належать $U_{кн}$ й $/10n$, що характеризують втрати енергії в обмотках, ізоляції і сталі магнітопроводу. Для цього проводять два досліді: дослід холостого ходу і дослід короткого замикання. На підставі цих дослідів визначають також параметри схем заміщення.

Схеми заміщення однофазного трансформатора: а- Т-подібна, б - Г-подібна, в - режиму к.з.

Зовнішня характеристика трансформатора. Робочі властивості трансформатора характеризують залежністю напруги на навантаженні U_2 і ККД η від струму I_2 . Залежність $U_2(I_2)$ при різному характері навантаження (активному, реактивному, ємнісному) називають зовнішньою характеристикою трансформатора.

Зовнішня характеристика трансформатора $U_2(I_2)$ і залежність $\eta(I_2)$ можуть бути отримані дослідним шляхом або розраховані за еквівалентною схемою заміщення. В останньому випадку рівняння електричного стану, отримане з Г-подібної схеми заміщення, має вигляд $U_2 = U - (r_k + jx_k)I_2$. (9.8) Вигляд залежності $U_2(I_2)$ визначається характером навантаження. Так, при ємнісному навантаженні ($\cos \varphi < 0$) із зростанням струму I_2 напруга U_2 підвищується, а при індуктивному ($\cos \varphi > 0$) - падає (рис. 9.5).

Коефіцієнт корисної дії трансформатора η дорівнює відношенню корисної активної потужності P_2 до всієї активної потужності, що надходить з мережі:

$$P_2 + \Delta P_c + \Delta P_m \quad (9.9)$$

втрати потужності в $\cos \varphi > 1$ $\cos \varphi = 1$ $\cos \varphi < 1$ и 2, де ΔP_c - втрати потужності в сталі магнітопроводу; ΔP_m міді обмоток.



Рис.9.5 - Залежність $U_2(I_2)$ при різному характері навантаження

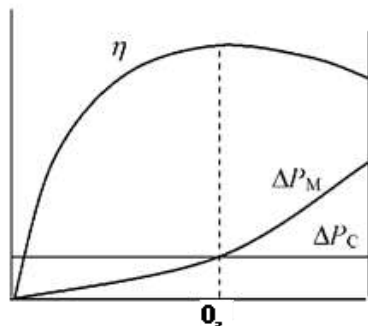


Рис. 9.6 - Залежності ΔP_c і η від коефіцієнта навантаження β

Корисна потужність трансформатора виражається залежністю

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = P_1 - \Delta P_c - \Delta P_m \quad (9.10)$$

де S_h - повна потужність трансформатора, ВА; $\nu = I_{2\text{ИЖ}}$ - коефіцієнт навантаження.

Втрати в сталі АРС не залежать від навантаження і дорівнюють втратам холостого ходу. Втрати в обмотках АРМ пропорційні квадрату струму

$\Delta P_M = R_{K122} = R_{K\text{ИН}} = \Delta P_{M\text{И}} p_2$, де R_K - активний опір обмотки.

Після підстановки вираз для ККД матиме вигляд

$$\eta = \frac{S_h \cos \phi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{M\text{И}} p_2}{S_h \cos \phi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{M\text{И}} p_2 + \Delta P_{\text{ИХ}}} \quad (9.11)$$

η - $S_h \cos \phi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{M\text{И}} p_2$ - залежності, ΔP_C і p від коефіцієнта навантаження в представленні на рис. 9.7. Залежність $\eta(\nu)$ має максимум. За допомогою підбору параметрів обмоток і магнітопроводу для силових трансформаторів вибирають η_{max} при $\nu = 0,6 - 0,7$.

Контрольні запитання

1. З якою метою використовують трансформатори?
2. На чому заснований принцип дії трансформатора; що таке коефіцієнт трансформації?
3. З яких елементів складається активна частина трансформаторів? Яке їх призначення?
4. Опишіть будову тягового трансформатора; яке призначення трансформаторного масла і для чого використовується розширювач?
5. Як виводяться рівняння ЕРС трансформатора?
6. Чому трансформатор не можна вмикати в мережу постійного струму?
7. Напишіть рівняння МРС трансформатора і поясніть роль кожної складової. Чи змінюється магнітний потік при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження?
8. Що таке приведений трансформатор? Для чого і при яких умовах робиться приведення?
9. Чому зі збільшенням вторинного струму зростає первинний струм?
10. Що називають схемою заміщення трансформатора? Як вона будується?
11. Що визначають при проведенні режимів холостого ходу і короткого замикання трансформатора?
12. Що називають напругою короткого замикання трансформатора і в яких одиницях вона вимірюється?
13. Зобразіть спрощену схему заміщення трансформатора в режимі навантаження і відповідну її векторну діаграму; покажіть, як буде змінюватись вторинна напруга при зміні величини і характеру навантаження?
14. Що називають номінальною зміною напруги трансформатора; покажіть її на зовнішніх характеристиках при різних характерах навантаження?

15. ЕРС у вторинній обмотці трансформатора 100 В , а число витків первинної і вторинної обмоток відповідно дорівнюють 300 і 60 , Чому дорівнює приведенне значення ЕРС?
16. В режимі короткого замикання вольтметр показує 50 В , амперметр - 10 А , ватметр - 300 Вт . Визначити параметри короткого замикання і номінальну зміну напруги при $\cos 0.8 = \phi_2$ (якщо і $\phi_2 < 0$) трансформатора, первинна, напруга якого дорівнює 1000 В . $\phi_2 > 0$

1.6 ЛЕКЦІЯ №6. ТЕМА: СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЯКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Мета: ознайомитись із статичними характеристиками і якостями асинхронних двигунів.

План

1. Статичні характеристики і якості асинхронних двигунів.
2. Розрахунок і побудова моментних і механічних характеристик за каталожними даними.

1. Статичні характеристики і якості асинхронних двигунів.

Робота будь-якого асинхронного двигуна починається з його пуску. Процес пуску є перехідним процесом. Однак його аналіз можна виконати за допомогою статичних характеристик $M = f(s)$ і $I = f(s)$, відповідних до установлених режимів роботи двигуна при різних ковзаннях. Це обумовлене швидким загасанням вільних складових струмів двигуна. Змушені складові можуть бути розраховані за схемою заміщення (рис. 4.8). При $s = 1$ струм двигуна визначається його опором короткого замикання. Величина цього опору у відносних одиницях $z_k^* = 0,15 \pm 0,2 \text{ о.в.}$, тому початковий пусковий струм становить $I_n^* = (5 \div 7)I_n$. У міру розгону двигуна струм повільно зменшується (рис. 4.24). Для успішного пуску двигуна початковий пусковий момент M_n повинен бути більше зовнішнього M_{en} . На початку розгону момент двигуна трохи зменшується до величини $M_{\min}$, а потім росте до $M_{\max}$. При пуску потужних двигунів великий пусковий струм може викликати значне зниження напруги мережі U_1 і тим самим погіршити або навіть повністю порушити нормальну роботу суміжних електроприймачів.

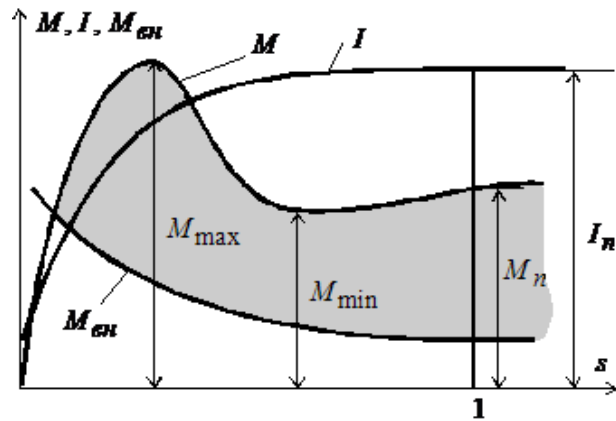


Рис. 4.24

Підвищений пусковий струм становить небезпеку й для самого двигуна внаслідок збільшення електродинамічних зусиль у лобових частинах обмотки **статора** й підвищення температури обмоток. При частих або затяжних пусках температура обмоток може перевищити припустимі межі. Сучасні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором проектується із таким розрахунками, щоб вони витримували прямий пуск від потужної мережі. Якщо напруга **мережі** при пуску знижується більш ніж на 10-15%, то застосовують реакторний або автотрансформаторний пуск.

Реакторний пуск

Схема реакторного пуску представлена на рис. 4.25. Після розгону двигуна реактор шунтується вимикачем **B2**. Величина індуктивного опору реактора вибирається так, щоб пусковий струм двигуна $I_{пд}$ знизився в $k_{pn} = 2 \div 2,5$ рази в порівнянні з пусковим струмом $I_{пн}$ при прямому пуску

від мережі,

$$I_{пс} = I_{пд} = \frac{I_{пн}}{k_{pn}}.$$

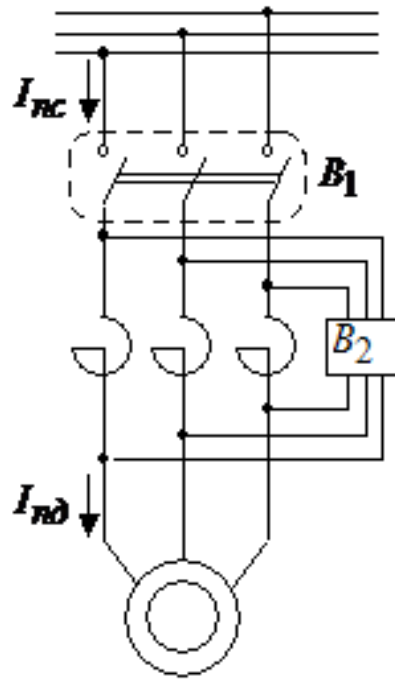


Рис. 4.25

При цьому пусковий момент двигуна згідно (4.8) знижується в k_{pn}^2 раз: $M_n = \frac{pm_1 r_2^2 I_{nm}^2}{2\pi f_1 k_{pn}^2}$. Тому реакторний пуск застосовується тільки в тих випадках, коли умови пуску не є важкими (пуск на холостому ходу або при малому навантаженні).

Автотрансформаторний пуск

При автотрансформаторному пуску (рис. 4.26) потрібно три вимикачі. На першому етапі пуску включаються вимикачі B_1 і B_3 . На двигун подається знижена напруга, обумовлене коефіцієнтом трансформації k_{tp} автотрансформатора (АТ): $U_d = U_1 / k_{tp}$, при цьому пусковий момент двигуна знижується в k_{tp}^2 раз:

$$M_n = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2^2}{k_{tp}^2}}{2\pi f_1 \left[(r_1 + c_1 r_2^2)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}^2)^2 \right]}$$

У стільки ж раз знизиться споживаний з мережі струм I_{nc} . Дійсно, згідно з балансом потужностей на вході й виході автотрансформатора

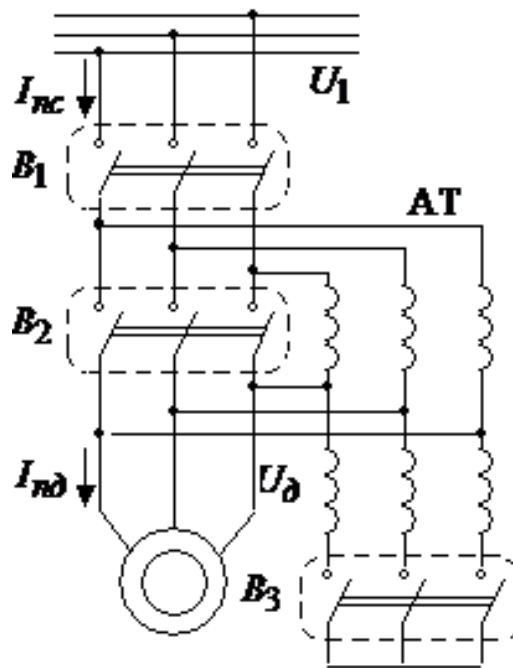


Рис. 4.26

маємо $U_1 I_{пс} = U_д I_{пд} = U_д \cdot U_д / z_k$. Звідси одержуємо

$$I_{пс} = \frac{U_1}{k_{п}^2 z_k} = \frac{I_{пд}}{k_{п}^2}$$

Таким чином, при автотрансформаторному пуску споживаний струм мережі $I_{пс}$ і пусковий момент двигуна $M_{п}$ знижуються однаково, що є перевагою автотрансформаторної схеми перед реакторною. Однак ця перевага досягається ціною значного подорожчання й ускладнення схеми. Тому автотрансформаторний пуск застосовується при тяжких умовах пуску для потужних двигунів. На заключному етапі автотрансформаторного пуску перед замиканням вимикача B_2 впливає щоб уникнути короткого замикання автотрансформатора відключити вимикач B_3 .

Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором

Для особливо тяжких умов пуску в електроприводах малої й середньої потужності застосовуються асинхронні двигуни з фазним ротором. У цих двигунах завдання зниження пускових струмів і підвищення пускового моменту вирішується шляхом введення в ланцюг ротора пускового реостата (рис. 4.27, а). Двигун пускається з повністю

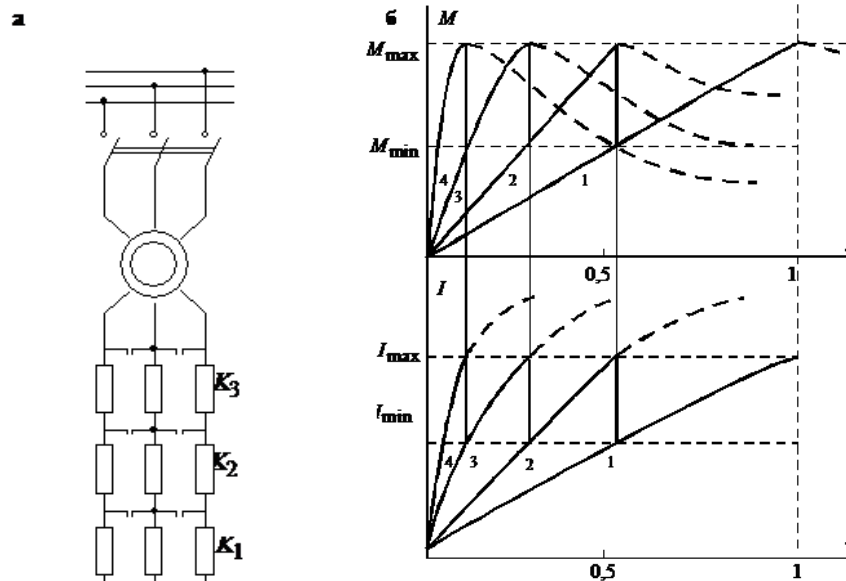


Рис. 4.27

введенням пусковим реостатом. При цьому пусковий момент $M_n \approx M_{\max}$, а пусковий струм $I_n \approx (0,4 \div 0,5)I_m$. Після досягнення ковзання $s = 0,5 \div 0,6$ замикається контактор K_1 і частина опору пускового реостата закорочується. Двигун переходить на характеристику 2 (рис. 4.27, б). Розгін триває знову з підвищеним моментом. При $s = 0,3 \div 0,4$ закорочується другий щабель пускового реостата, і двигун працює на характеристиці 3. Після закорочування останньому щабля пускового реостата двигун переходить на природню характеристику 4. Пускові характеристики асинхронного двигуна при реостатному пуску найбільш сприятливі, тому що високі значення моментів досягаються при невисоких значеннях пускових струмів. Однак двигуни з фазним ротором дорожче двигунів з короткозамкненим ротором і вимагають додаткової пуско-регулювальної апаратури.

3. Розрахунок і побудова моментних і механічних характеристик за каталожними даними.

Для АД, як й інших двигунів, до найважливіших відноситься *механічна характеристика* – залежність частоти обертання ротора від обертового моменту на валу: $n(M)$. Ця характеристика виявляє основні потенційні можливості двигунів: поєднання силових та швидкісних параметрів.

Пряме теоретичне визначення залежності $n(M)$ в АД вельми складне, тому спочатку розглядається залежність $M_{\text{ет}}(s)$, вимушено оперуючи з електромагнітним моментом $M_{\text{ет}}$ замість M (А.4).

Залежність $M_{\text{ет}}(s)$ теж називають механічною характеристикою, хоча більш доречна назва – *внутрішня механічна характеристика*, бо

ковзання s – чисто внутрішня величина АД, та й властива тільки йому, тоді як залежність $n(M)$, як поняття, властива усім обертовим двигунам і механізмам.

Типова залежність $M_{em}(s)$ для АД дана на рис.А.8 і має відомий вираз:

$$M_{em} = \frac{m_s R_r' I_r'^2}{\Omega_s s} = \frac{p m_s U_s^2 \frac{R_r'}{s}}{\omega_s \left[\left(R_s + c_1 \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left(X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2 \right]}. \quad (\text{A.26})$$

Тут можливо оперування з кутовою швидкістю обертання магнітного поля статора (рад/с):

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{\omega_s}{p}, \quad (\text{A.27})$$

або з кутовою частотою напруги і струму статора (с-1): $\omega_s = 2\pi f s$.

Вираз (А.26) отриманий на підставі схеми заміщення АД, перетворення якої з Т- подібної у Г-подібну враховано декілька спрощеним коефіцієнтом:

$$c_1 \approx 1 + \frac{R_s R_m + X_{\sigma s} X_m}{R_m^2 + X_m^2} \approx 1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}, \quad (\text{A.28})$$

де R_m , X_m – опори намагнічувальної вітки схеми заміщення двигуна.

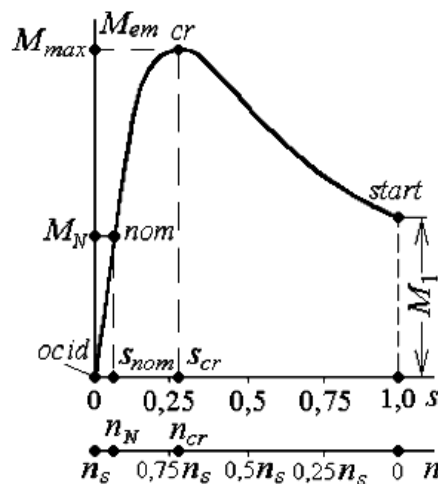


Рис. А.8 – Типова механічна характеристика АД (внутрішня)

На рис.А.8, як і на рис.А.6, позначені точки: «*nom*» – номінальний і «*start*» – пусковий режими. Першій відповідають номінальні ковзання s_{nom} і обертальний момент M_N ; другий – ковзання $s \approx 1$ і початковий

пусковий момент M_1 . Позначена також точка неробочого ходу ідеального «ос id»:

$s \ll 0$; $M_{em} \ll 0$ (для реального неробочого ходу «ос»: $s \ll s_0$; $M \ll 0$).

Для механічної характеристики визначальною є критична точка «cr», якій відповідають максимальний момент:

$$M_{max} = \frac{p m_s U_s^2}{2 \omega_s c_1 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + c_1 X'_{\sigma r})^2} \right]} \quad (A.29)$$

і критичне ковзання:

$$s_{cr} = \frac{c_1 R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + c_1 X'_{\sigma r})^2}}. \quad (A.30)$$

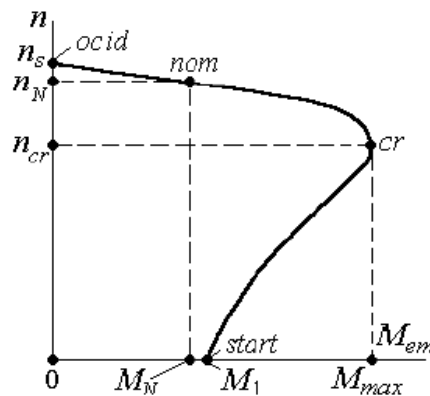


Рис. А.9 – Типова механічна характеристика АД

Для двигунного діапазону ($s = 0 \dots 1$) за формулою (А.6) можна визначити значення n в долях від n_s . На цій основі на рис.А.8 поєднаємо зі шкалою $s \ll 0 \dots 1$ шкалу $n \ll n_s \dots 0$. Зокрема, за (А.6) точці «nom» буде відповідати номінальна частота обертання ротора: $Nn \ll ns$ ($1 \ll snom$) .

Залишається розташувати вісь електромагнітного моменту M_{em} , як аргументу, горизонтально, вісь частоти обертання n , як функції – вертикально з її перевертанням за зростаючими значеннями $n \ll 0 \dots ns$. Разом з поворотом осей повернеться і графік, який тепер із залежності $M_{em}(s)$ на рис.А.8 перетвориться у залежність $n(M_{em})$, що зображена на рис.А.9. Тут також відмічені особливі точки, відповідні точкам, виділеним раніше на рис.А.6 і рис.А.8. Це і є графічний вигляд механічної характеристики.

Додамо: на механічній характеристиці (рис.А.9) ділянка від «start» до «cr» відповідає нестійкому стану, ділянка від «cr» до «oc id» – стійкій роботі.

Зауважимо, що на підставі паспортних даних АД можна отримати

$$M_N = 9,549 \frac{P_N}{n_N}$$

номінальні ковзання s_{nom} і обертальний момент безпосередньо – перевантажувальну здатність АД з обертального моменту k_{Mm} . Тоді маємо $M_{max} \leq k_{Mm} M_N$ (за визначенням $k_{Mm} \leq M_{max} / M_N$). Вважаючи, що M_N відповідає електромагнітному моменту, можна отримати залежність $M_{em}(s)$ за

$$M_{em} = \frac{2M_{max}}{\frac{s_{cr}}{s} + \frac{s}{s_{cr}}},$$

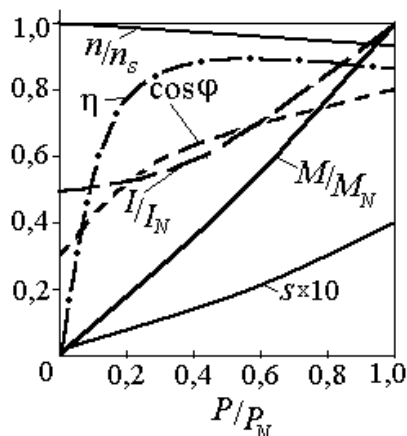
відомою формулою Клосса:

де $s_{cr} = s_{nom} \left(k_{Mm} + \sqrt{k_{Mm}^2 - 1} \right)$ (походження цієї формули див. у [1]).

Хоча відомо, що більш – менш достовірні дані за формулою (А.31) можна отримати лише у діапазоні від «oc id» до «cr» (рис.А.9).

В достатньо повній і наочній формі експлуатаційні властивості АД в пустимому діапазоні навантажень подаються його *робочими характеристиками*.

До них відносять залежності підведеної потужності P_{in} , струму статора I , обертального моменту на валу M , частоти обертання ротора n , ковзання s , ККД η , коефіцієнту потужності $\cos \phi$ від корисної потужності двигуна P . Примірний вигляд низки робочих характеристик поданий на рис.А.10 у безрозмірній формі (для величин $\cos \phi$, η і s це природно, а величини P , I і M віднесені до своїх номінальних значень P_N , I_N і M_N , n – до n_s).



Робочі характеристики АД можна отримати аналітично, використовуючи, наприклад, його Г-подібну схему заміщення. У лабораторних роботах застосований експериментальний метод на

основі безпосередніх випробувань АД при завантаженні від неробочого ходу до номінального режиму або трішки вище.

1.7 ЛЕКЦІЯ №7. ТЕМА ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

План

1. Паралельна робота силових трансформаторів.
2. Умови включення на паралельну роботу силових трансформаторів.
3. Зміна вторинної напруги силового трансформатора.
4. Принципи і способи регулювання напруги силового трансформатора.

Мета: розглянути паралельна роботу, умови включення на паралельну роботу, принципи і способи регулювання напруги силового трансформатора.

1.Паралельна робота силових трансформаторів.

На трансформаторних підстанціях зазвичай встановлюється декілька паралельно працюючих трансформаторів. Це обумовлено наступними причинами: - Умовами забезпечення надійності електропостачання шляхом резервування;- Необхідністю розширення підстанції; - Зменшенням втрат при малих навантаженнях шляхом відключення частини паралельно працюючих трансформаторів.

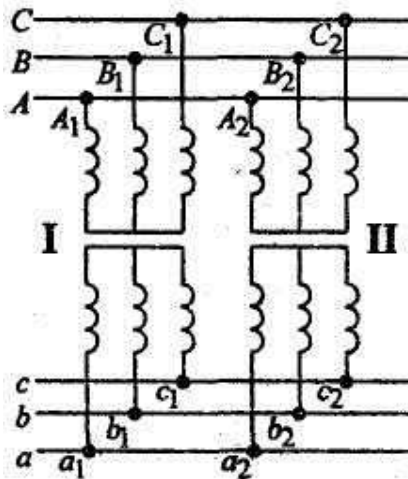


Рис.2.29

Паралельне включення трифазних трансформаторів здійснюється за схемою, наведеною на рис. 2.29. При паралельній роботі трансформаторів виникає проблема забезпечення рівномірного розподілу навантаження між ними. Рівномірність розподілу навантаження забезпечується в тому випадку, якщо трансформатори мають - Однакові групи з'єднання обмоток; - Рівні коефіцієнти трансформації; - Рівні напруги короткого замикання. Якщо перші дві умови дотримані, то вторинні ЕРС паралельно включених

трансформаторів будуть рівні за величиною і по фазі в тому будуть врівноважувати один одного. В іншому випадку, вже на холостому ходу виникає зрівняльний струм I_y . Цей струм, складаючись з струмом навантаження, викликає нерівномірний розподіл навантаження, а також додаткові втрати і нагрівання трансформаторів. При великій різниці ЕРС струм I_y може бути небезпечним для трансформаторів. Дотримання третьої умови забезпечує рівномірний розподіл струмів між трансформаторами при навантаженні. Аналіз особливостей паралельної роботи двох трансформаторів можна виконати за допомогою спрощеної схеми заміщення (рис. 2.30). Трансформатори в цій схемі представлені внутрішніми опорами z_k^I і z_k^{II} . У ланцюг другого трансформатора включений джерело ЕРС $\Delta \dot{E}$, що враховує недотримання перших двох умов паралельної роботи трансформаторів,

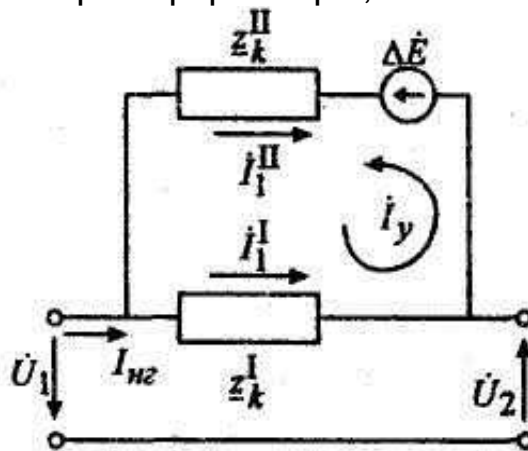


Рис.2.30

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_2^{II} - \dot{E}_2^I.$$

Якщо $\Delta E = 0$, то струм навантаження $I_{н2}$ розподіляється між трансформаторами обернено пропорційно їх внутрішнім опорам:

$$i_{н2}^I = i_{н2} \cdot \frac{z_k^{II}}{z_k^I + z_k^{II}}; \quad i_{н2}^{II} = i_{н2} \cdot \frac{z_k^I}{z_k^I + z_k^{II}}$$

Якщо $\Delta E \neq 0$, то в замкнутому контурі, утвореному опорами z_k^I і z_k^{II} ,

$$i_y = \frac{\Delta \dot{E}}{z_k^I + z_k^{II}},$$

потече зрівняльний струм

викликаючи нерівномірний розподіл струму навантаження між трансформаторами:

$$I_1^I = I_{HT}^I + I_y;$$

$$I_1^{II} = I_{HT}^{II} - I_y.$$

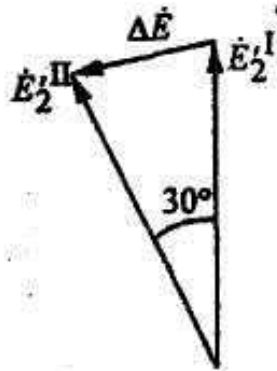


Рис.2.13

Зважаючи малого внутрішнього опору трансформатора рівень струму I_y може бути досить значним. Наприклад, при включенні на паралельну роботу трансформаторів з групами з'єднань обмоток $Y/Y-0$ і $Y/\Delta-11$ вторинні ЕРС будуть зрушені по відношенню один до одного на 30° (рис. 2.31). Беручи модулі наведених значень ЕРС E'_2 і E''_2 однаковими і рівними 1 о.е., знайдемо з рис. 2.31 модуль ЕРС $\Delta E = 2 \sin 15^\circ = 0,518$ о.е. При $z_k^I = Z_k^{II} = 0,05$ о.е. модуль зрівняльного струму I_y , викликаного цією ЕРС, перевищить п'ятикратне значення $I_y = 0,518 / (0,05 + 0,05) = 5,18$ о.е. що неприпустимо. Тому на паралельну роботу включаються трансформатори тільки з однаковими групами з'єднань обмоток. Якщо трансформатори мають різні коефіцієнти трансформації, то величина ЕРС ΔE може бути наближено обчислена за висловом

$$\Delta E = E'_2 - E''_2 \approx -U_1 \frac{k_{TP}^I}{k_{TP}^{II}} + U_1 = \left(1 - \frac{k_{TP}^I}{k_{TP}^{II}} \right) \cdot U_1.$$

Прийнемо для визначеності до $k_{TP}^I / k_{TP}^{II} = 1,05$, тоді ЕРС $\Delta E = -0,05 U_1$ перебуватиме в протифазі з напругою U_1 . При $z_k^I = Z_k^{II} = 0,05$ о.е. модуль зрівняльного струму, викликаного цією ЕРС, складе $I_y = 0,05 / (0,05 + 0,05) = 0,5$ О.Е.,

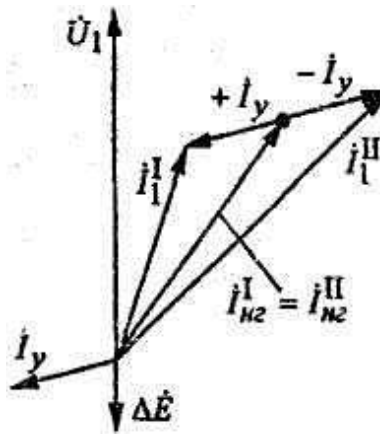


Рис.2.32

а його фаза буде визначатися аргументами комплексних опорів

$\underline{z}_k^I = z_k^I \cdot e^{j\varphi_k^I}$ і $\underline{z}_k^{II} = z_k^{II} \cdot e^{j\varphi_k^{II}}$. Поява зрівняльного струму призведе до зменшення навантаження першого трансформатора і її збільшення в другого (рис. 2.32). Для того, щоб не викликати серйозного порушення паралельної роботи трансформаторів, відмінність в коефіцієнтах трансформації не повинно перевищувати 0,5%. При рівності коефіцієнтів трансформації $\Delta E = 0$, і струм навантаження розподілятиметься назад

$$\frac{i_{n2}^I}{i_{n2}^{II}} = \frac{z_k^{II} \cdot e^{j\varphi_k^{II}}}{z_k^I \cdot e^{j\varphi_k^I}}.$$

пропорційно опорам z_k

У загальному випадку ці струми не збігаються по фазі. Однак фазовий зсув $\varphi_k^{II} - \varphi_k^I$ незначний і його можна не враховувати, тоді

$$\frac{i_{n2}^I}{i_{n2}^{II}} = \frac{z_k^{II}}{z_k^I}. \quad (2.26)$$

Висловимо опору короткого замикання через їх значення у відносних одиницях:

$$z_k^I = \frac{z_k^{*I} \cdot U_{1H}}{I_{1H}^I} = \frac{u_k^I \cdot U_{1H}}{I_{1H}^I};$$

$$z_k^{II} = \frac{z_k^{*II} \cdot U_{1H}}{I_{1H}^{II}} = \frac{u_k^{II} \cdot U_{1H}}{I_{1H}^{II}}.$$

Підставами ці вирази у формулу (2.26): Так як напруги паралельно працюючих трансформаторів однакові, відносини струмів можна замінити відношенням потужностей

$$\frac{S^I}{S^{II}} = \frac{u_k^{II} \cdot S_H^I}{u_k^I \cdot S_H^{II}}$$

Якщо $u_k^I = u_k^{II}$, то трансформатори будуть навантажуватися пропорційно їх номінальним потужностям. Очевидно, що при цьому умови паралельної роботи є найкращими. Якщо ж u_k не рівні, то сильніше буде навантажуватися той трансформатор, у якого u_k менше. Допускається включати на паралельну роботу трансформатори, у яких u_k відрізняється від середньоарифметичного не більше ніж на $\pm 10\%$.

2. Умови включення на паралельну роботу силових трансформаторів.

Паралельна робота трансформаторів - умови застосування

Енергетика - вже давно невід'ємна частина цивілізації. Без неї уявити собі життя просто неможливо. Саме тому питання про безперебійності енергопостачання споживачів ставиться все більш гостро. Паралельна робота трансформаторів - один з таких способів. Однак чи тільки для резервування використовують даний метод, і які вимоги висувають до обладнання?



Навіщо необхідна паралельна робота трансформаторів?

Як вже говорилося вище, спочатку погоджена робота була викликана необхідністю підвищити надійність електропостачання. Однак є й інші, не менш важливі особливості, коли паралельна робота трансформаторів необхідна. До таких моментів відносять:

- швидке зростання навантаження, яка в найближчому майбутньому буде перевищувати (або вже перевищує) потужність одного працюючого трансформатора;
- недолік місця (висоти, ширини) може не дозволити встановити один великий трансформатор, однак можна розташувати два невеликих і включити їх в паралель;
- природно, заходи безпеки відіграють важливу роль, тому що ймовірність відмови відразу обох трансформаторів вкрай мала, проте вона є, тому в додаток до такого заходу, як паралельна робота трансформаторів, використовують і інші методи резервування.



Введення в експлуатацію двох трансформаторів

Включення трансформаторів на паралельну роботу забезпечує резервування особливо відповідальних приймачів електричної енергії, що має на увазі безперебійність електропостачання. На більшості підстанцій застосовують два або більше трансформаторів (виключення складають малопотужні підстанції прохідного типу). Робота в паралель допускається, якщо обидва трансформатора відповідають певному набору вимог, які називаються «Умови паралельної роботи трансформаторів»:

- групи обмоток повинні бути тотожні один одному;
- коефіцієнти трансформації повинні бути рівні один одному, допускається несуттєве відхилення в допустимих нормованих границях;
- напруги коротких замикань повинні бути рівні один одному, допускається несуттєве відхилення в допустимих нормованих границях;

- паралельні трансформатори зобов'язані харчуватися від єдиної мережі;
- вторинні кабелі, необхідні для з'єднання трансформаторів в точці, повинні мати приблизно рівні характеристики і довжину;
- зсув фаз між напругою первинної та вторинної обмотки повинен бути однаковий.



Необхідність попереднього розрахунку

При пошкодженні одного з двох трансформаторів не завжди можливо підібрати абсолютно такий же, який повністю відповідав би пошкодженому за умовами і режимам роботи. У цих випадках вибір трансформатора обґрунтовується по складних попередніми розрахунками, які показують, що обмотки обох трансформаторів будуть завантажені рівномірно, і жодна з них не буде по навантаженню перевищувати навантажувальну здатність кожного окремо взятого трансформатора.



Напруга короткого замикання

Паралельна робота трансформаторів можлива при відносному рівні значень напруг коротких замикань на обмотках. Якщо ж значення КЗ різні, то перед включенням у спільну роботу необхідно попередньо змінити коефіцієнт трансформації одного трансформатора з допомогою спеціального перемикача. Таким чином можна досягти компенсації перерозподілених навантажень, які виникають через відмінності напруг короткого замикання. Виникаючі завдяки такому невідповідності зрівняльні струми НЕ будуть перевантажувати трансформатор з меншим значенням напруги КЗ.

Природно, необхідно врахувати навантажувальні здібності - як окремо у кожного електроприладу, так і під час такого заходу, як паралельна робота силових трансформаторів. На режимі холостого ходу, проте, відмінність у значеннях напруги короткого замикання абсолютно не позначається, тому що коефіцієнти трансформації зрівнюються і стають однаковими. Під навантаженням ж вторинні напруги будуть різними, так як нерівні падіння напруги можуть призвести до протікання зрівняльних струмів по обмотках, при цьому в одного трансформатора зрівняльний струм буде підсумовуватися з основним, а у другого відніматися. Рекомендоване співвідношення потужностей найбільш потужного трансформатора до самого малопотужного має становити не більше трьох до одного.

Допустимі умови

Можлива паралельна робота трансформаторів трьохобмоткових, двообмоткових на всіх обмотках. Необхідно пам'ятати, що у електроприладів, включених в паралель, навантаження розподіляється

обернено пропорційно напрузі короткого замикання і прямо пропорційно потужності кожного окремо взятого трансформатора. Паралельна робота трансформаторів, якщо групи з'єднання обмоток різні, можлива на всіх непарних групах. Якщо включення не узгоджені, то з-за рогу зсуву між зажимами вторинних обмоток з'являється напруга, яка викликає неприпустимий зрівняльний струм.

3.3 зміна вторинної напруги силового трансформатора.

Величину вторинної напруги U_2 навантаженого трансформатора іноді зручніше визначати не за розглянутою в прикладі методикою, а за готовою формулою.

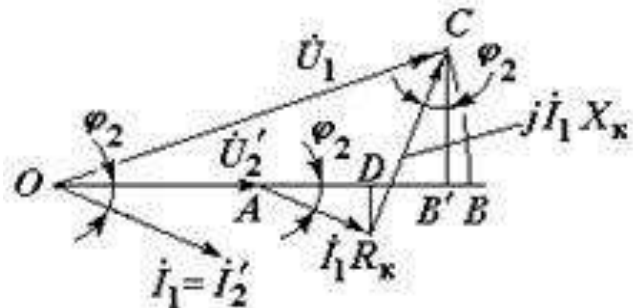
Позначимо арифметичну різницю між значеннями напруги на клеммах вторинної обмотки трансформатора при х.х. і при навантаженні через DU_2 :

$$DU_2 = U_{20} - U_2$$

Зміна DU_2 напруги U_2 на клеммах вторинної обмотки навантаженого трансформатора в порівнянні з напругою U_{20} при х.х. має назву **зміна вторинної напруги трансформатора**.

Якщо відоме значення DU_2 , напругу на клеммах вторинної обмотки можна визначити за формулою $U_2 = U_{20} - DU_2$.

Попередньо знайдемо приведене до первинної обмотки значення $DU_2\phi = DU_2 \times k$. Враховуючи, що $k = U_1 / U_{20}$ і $DU_2 = U_{20} - U_2$, можна записати

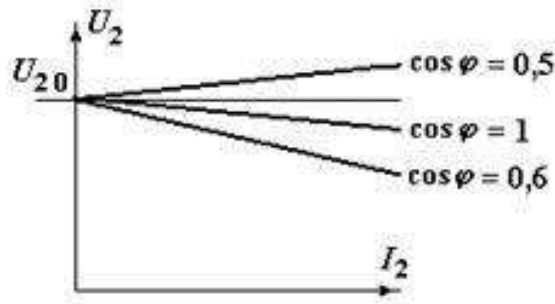


$$DU_2\phi = DU_2 \times k = (U_{20} - U_2) \times k = U_1 - U_2\phi$$

Із спрощеної векторної діаграми випливає $DU_2\phi = OC - OA = AB \approx AB\phi = AD + DB\phi = I_1 R_k \times \cos j_2 + I_1 X_k \times \sin j_2 = I_1 \times (R_k \times \cos j_2 + X_k \times \sin j_2)$

Вводячи поняття про **коефіцієнт завантаженості трансформатора** $b = I_2 / I_{2H} \approx I_1 / I_{1H}$ останній отриманий вираз для $DU_2\phi$ буде мати вигляд: $DU_2\phi = b I_{1H} \times (R_k \times \cos j_2 + X_k \times \sin j_2)$.

Фактичне значення напруги на клеммах вторинної обмотки трансформатора визначаємо з виразу $U_2 = U_{20} - DU_{2\phi}/k$.



Залежність напруги U_2 від струму навантаження I_2 називається **зовнішньою характеристикою трансформатора**.

Зовнішні характеристики трансформатора в залежності від $\cos \varphi$ можуть мати вигляд:

Відзначимо, що при ємкісному навантаженні напруга U_2 навантаженого трансформатора може бути вищою за напругу U_{20} при холостому ході.

4. Принципи і способи регулювання напруги силового трансформатора

Спад напруги в трансформаторі і живильній мережі, коливання навантажень споживачів викликають коливання вторинної напруги трансформатора. Тому виникає необхідність регулювання напруги трансформаторів, що можна здійснити шляхом зміни коефіцієнта трансформації $k = w_1/w_2$, шляхом зміни числа витків первинної чи вторинної обмоток трансформатора. Для цієї мети обмотка виконується

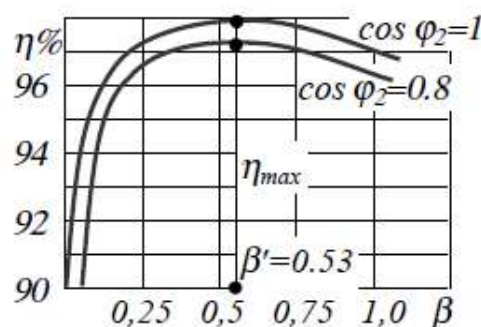


Рис. 3.9 Графік залежності ККД трансформатора від навантаження

з відгалуженнями, а регулювання напруги виконується з допомогою відповідного перемикаючого пристрою.

Перемикання відгалужень обмотки може виконуватися при відключенні трансформатора від мережі, або без відключення - під навантаженням.

При першому способі перемикаючий пристрій простіший і дешевший, однак перемикання пов'язане з перервою енергопостачання споживачів і не може виконуватися часто. Тому цей спосіб застосовується головним чином для корекції вторинної напруги мережі понижуючих трансформаторів в залежності від рівня первинної напруги на даній ділянці мережі, а також при сезонних змінах напруги мережі в зв'язку із сезонною зміною навантаження.

Переключення під навантаженням вимагає більш складного і дорогого перемикаючого пристрою і використовується в потужних трансформаторах при необхідності частого або безперервного регулювання напруги. Застосування трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням усе більш поширюється.

Трансформатори з перемиканням числа витків у відключеному стані (система перемикання без збудження (ПДВ)) виготовляються, відповідно до ДСТ 401-41, з регулюванням напруги щодо номінального на $\pm 5\%$ (силові трансформатори малої і середньої потужності) або на $\pm 2,5\%$ і $\pm 5\%$ (трансформатори великої потужності). У першому випадку трансформатор має три ступеня, а в другому п'ять ступеней напруги. Відгалуження доцільно виконувати на тій стороні, напруга на якій в процесі експлуатації піддається змінам. В трансформаторах, що експлуатуються при незмінній первинній напрузі $U_1 = const$ варіюють число витків w_2 у вторинній обмотці, тому що при збереженні $w_1 = const$ магнітний потік трансформатора, магнітні втрати і намагнічуючий струм залежать від відношення $U_1 w_1$ і залишаються майже постійними.

В трансформаторах, що експлуатуються при постійному навантаженні ($I_2 = const$) і первинній напрузі, що змінюється ($U_1 = var$), краще змінювати число витків у первинній обмотці так, щоб відношення U_1/w_1 підтримувалося приблизно постійним. При цьому магнітний потік трансформатора $\Phi \propto U$ при роботі на різних ступенях (відгалуженнях) міняється мало. Як правило це сторона вищої напруги. Виконання відгалужень на стороні вищої напруги має також ту перевагу, що при цьому через велику кількість витків добір (2,5% і 5%) кількості витків може бути зроблений з великою точністю. Крім того, струм на стороні вищої напруги менше і перемикач виходить більш компактним.

Ділянки обмотки, що переключаються, між відгалуженнями, доцільно розташовувати у вікні трансформатора по висоті обмотки в середній її частині, щоб розподіл частин обмотки, навантажених струмом, було стосовно ярем при роботі на різних відгалуженнях по можливості симетричним. У протилежному випадку магнітне поле розсіювання сильно спотворюється, що приводить до збільшення індуктивних опорів розсіювання і до різкого збільшення зусиль, що діють на обмотки при коротких замиканнях. З іншого боку, відгалуження краще виконувати з боку заземленої нейтралі (нульової точки) обмотки, тому що ізоляція перемикача при цьому полегшується.

На рис. 3.10 показані найбільш характерні схеми виконання обмоток з відгалуженнями. Схема рис. 3.10, а застосовується у випадку багат шарової циліндричної обмотки, і відгалуження розташовуються в верхньому шарі циліндричної обмотки. В схемі рис. 3.10, б обмотки виконуються з двох частин, намотаних у різні сторони, щоб ЕРС і МДС обмоток склалися, а не віднімалися.

В схемах рис. 3.10, а і б застосовується загальний перемикач для трьох фаз (рис. 3.11, а), а в схемах рис. 3.10, в и г кожна фаза має свій перемикач (рис. 3.11, б), тому що в цьому випадку між відгалуженнями різних фаз існує напруга $U \approx 0,5U_n$. Перемикачі розташовуються всередині бака трансформатора, а кінці осей перемикачів виводяться на кришку бака.

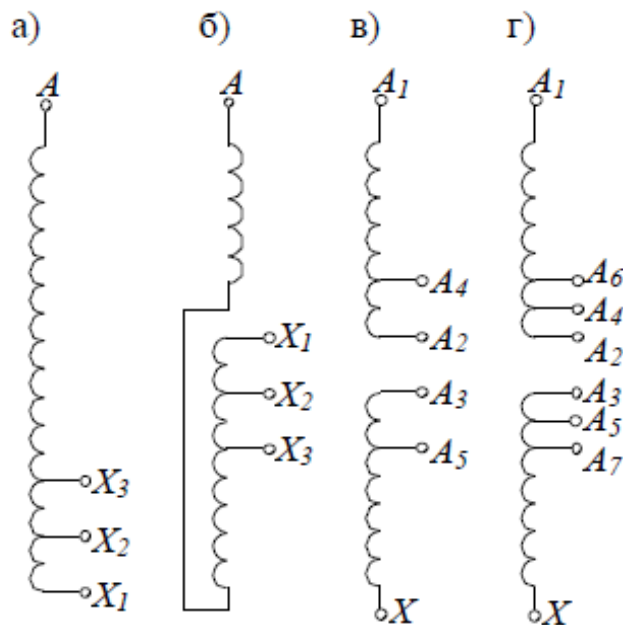


Рис. 3.10. Схеми обмоток з відгалуженнями для регулювання напруги

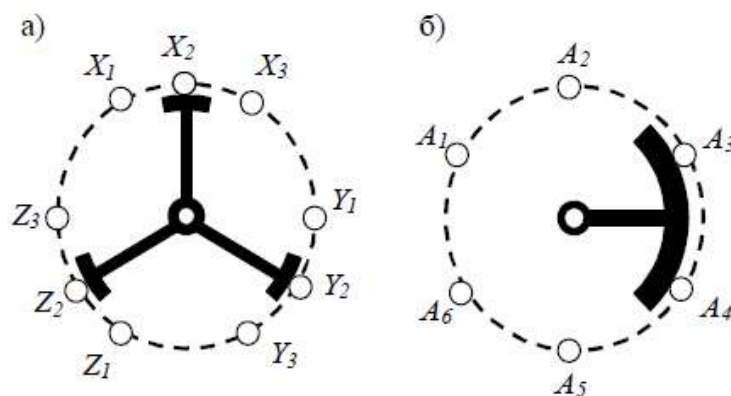


Рис. 3.11. Схеми перемикачів для регулювання напруги

Трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН), як правило, розраховані для регулювання напруги в межах $\pm 10\%$

через 1%. У цих трансформаторах перехід з однієї ступені на іншу повинний відбуватися без розриву кола струму. Тому в проміжному положенні включені два сусідніх відгалуження обмотки і частина обмотки між ними виявляється замкнутою накоротко. Для обмеження струму короткого замикання застосовуються струмообмежуючі реактивні або активні опори.

На рис. 3.12 приведена схема перемикачання з струмообмежуючим реактором P і показано п'ять послідовних позицій при переході з відгалуження X_1 (позиція а) на відгалуження X_2 (позиція д). У кожній із двох віток схеми перемикача є контактори (K_1 , K_2) для вимикання струму з даної вітки перед її перемиканням і рухливі контакти перемикача (Π_1 , Π_2), що розраховані для перемикачання віток без струму.

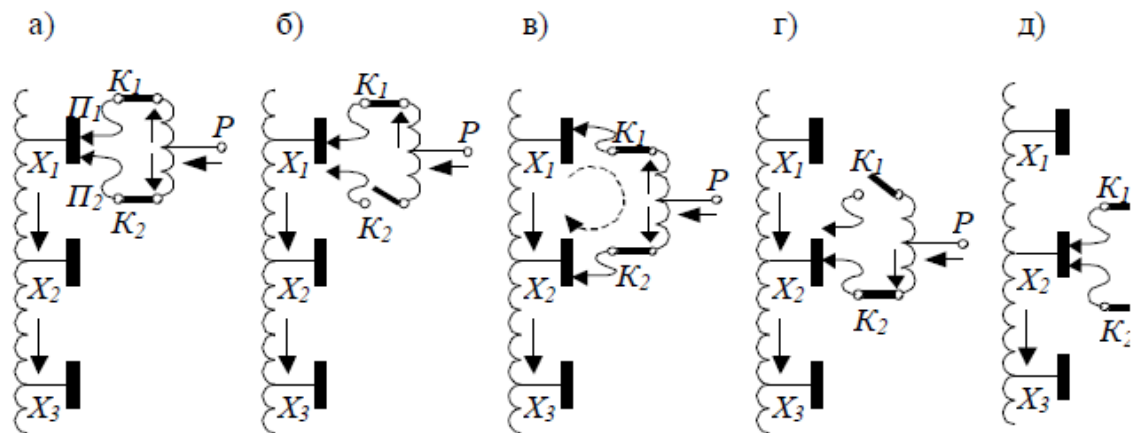


Рис. 3.12 Схеми регулювання напруги під навантаженням з використанням струмообмежуючого реактора

У нормальному робочому положенні (позиції а і д) струми двох віток схеми обтікають дві половини обмотки реактора в різних напрямках. Тому потік у сердечнику реактора практично відсутній і індуктивний опір реактора малий. Навпаки, струм короткого замикання ступені, що виникає при проміжному положенні перемикача і показаний на рис. 3.12, в переривчасту лінію, обтікає всю обмотку реактора в однаковому напрямку, при цьому сердечник реактора намагнічується й опір реактора стосовно цього струму великий.

Реактор P и перемикач Π містяться всередині бака трансформатора, а контактори K – у спеціальному додатковому баці, що монтується на бічній стінці бака трансформатора. При такому пристрої масло в баці трансформатора захищено від забруднення, викликуваного роботою контакторів при розриві ними ланцюга струму.

Найбільше поширення для регулювання напруги під навантаженням одержав **перемикаючий пристрій з струмообмежувачами резисторами**, схема якого для однієї фази показана на рис. 3.13. Перемикачання під навантаженням виконується за допомогою швидкодіючого перемикача Π і двох перемикачів Π_1 , Π_2 .

Швидкодіючий перемикач Π разом з струмообмежуючими резисторами R_1 і R_2 встановлюється в окремому баці, заповненому маслом. Він розраховується на струм, що з'являється при замиканні сусідніх відгалужень. Перемикачі Π_1 і Π_2 можуть переводитися з одного відгалуження на інше при відсутності струму в їхньому колі. На рис. 13.3 показано положення перемикачів Π і Π_1 , при якому трансформатор працює на відгалуженні X_2 . Для переходу на відгалуження X_1 попередньо на це відгалуження переводять перемикач Π_1 , а потім перемикач Π під дією відповідного механізму швидко перекидається в положення, в якому він приєднується до контактів 1 і 2. Послідовність розмикання контактів 3 і 4 і замикання контактів 1 і 2 при цьому розраховано так, що коло робочого струму I не розривається.

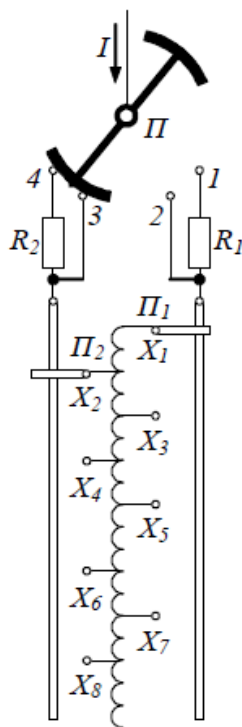


Рис. 3.13. Схема регулювання напруги під навантаженням з використанням активних струмообмежуючих резисторів

Швидко, за соті долі секунди, перемикання необхідне для того, щоб резистори R_1 і R_2 не перегрілись.

Контрольні питання

1. Які фізичні процеси відбуваються в трансформаторі, що працює під навантаженням?
2. Рід навантаження трансформатора?
3. Чому із збільшенням струму навантаження трансформатора збільшується струм в його первинній обмотці?

4. Що називають зовнішньою характеристикою трансформатора і як її одержати?
5. Залежність зміни вихідної напруги трансформатора від величини і роду навантаження?
6. Електрична схема заміщення трансформатора, фізичний зміст її параметрів і дослідне їх визначення.
7. Пояснити порядок побудови векторної діаграми трансформатора при різного роду навантаженнях.
8. При яких умовах і чому вторинна напруга трансформатора стає більше ЕРС?
9. Регулювання напруги зміною числа витків вторинної обмотки.
10. Регулювання напруги зміною магнітного потоку?
11. Фізичні процеси при зміні числа витків первинної (вторинної) обмотки трансформатора.
12. Електричні схеми переключення регулювальних відпайок в трансформаторах з ПБЗ; діапазон зміни напруги.
13. Електрична схема переключення регулювальних відпайок в трансформаторах із РПН і принцип їхньої роботи з індуктивним струмообмежуючим опором.
14. Що називають ККД трансформатора?

1.8 ЛЕКЦІЯ №8. ТЕМА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ТРАНСФОРМАТОРІ ПРИ ВМИКАННІ ДО МЕРЕЖІ

План

1. Перехідні процеси в трансформаторі при вмиканні до мережі.
2. Раптове коротке замикання в силових трансформаторах.
3. Ударний струм короткого замикання.
4. Призначення, особливості конструкції і властивості автотрансформаторів і багатообмоточних трансформаторів.

Мета: дослідити перехідні процеси, коротке замикання в трансформаторі та вивчити призначення, особливості конструкції і властивості автотрансформаторів і багатообмоточних трансформаторів; треба знати значення змущеної та вільної складової струму к.з. , ударний струм, діюче значення та еквівалентну постійну часу.

1.Перехідні процеси в трансформаторі при вмиканні до мережі.

Розглянемо перехідний процес при включенні однофазного трансформатора в мережу з напругою $u_1 = U_{1m} \cos(\omega t + \psi)$. Вторинну обмотку для простоти будемо вважати розімкнутою (рис. 2.47). При цих умовах процеси в трансформаторі описуються рівнянням

$$u_1 = r_1 i_\mu + w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.28)$$

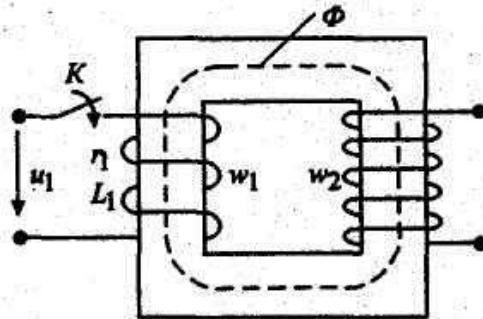


Рис.2.47

Зв'язок потоку взаємної індукції Φ із струмом i_μ визначається нелінійної магнітної характеристикою $\Phi(i_\mu)$ тому рівняння (2.28) не має строгого аналітичного рішення.

Враховуючи, що в силових трансформаторах падіння напруги $r_1 i_\mu$ незначно через малість активного опору r_1 , замінимо струм i_μ ,

$$i_\mu \cong \frac{w_1 \Phi}{L_1},$$

використовуючи лінеаризовану магнітну характеристику де L_1 - статична індуктивність первинної обмотки, відповідає середньому значенню потоку в перехідному процесі. Така заміна

$$\frac{u_1}{w_1} = \frac{r_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}.$$

дозволяє лінеаризувати рівняння (2.28): (2.29)

Рішення даного рівняння записується у вигляді суми двох складових потоку:

$$\Phi = \Phi_{уст} + \Phi_{св} \quad (2.30)$$

Стале значення потоку $\Phi_{уст}$ визначається з (2.29) при $d/dt = j\omega$

$$\Phi_{уст} = \frac{U_{1m} \cos(\omega t + \psi - \varphi)}{w_1 \sqrt{\left(\frac{r_1}{L_1}\right)^2 + \omega^2}} \approx \frac{U_{1m} \cos(\omega t + \psi - 90^\circ)}{\omega w_1}.$$

Вільна складова $\Phi_{св} = C e^{-\frac{r_1}{L_1} t}$

являє собою рішення однорідного

$$\frac{d\Phi_{св}}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \Phi_{св} = 0.$$

диференціального рівняння:

Постійна

інтегрування C визначається з початкових умов: $\Phi(0) = 0$.

Підставляючи це умова в (2.30), отримаємо звідси $C = -\Phi_m \sin \psi$, де

$$\Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega w_1}$$

З урахуванням отриманих співвідношень рішення рівняння (2.29) можна представити у вигляді

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \psi) - \Phi_m \sin \psi \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t}$$

Характер перехідного процесу залежить від початкової фази ψ напруги мережі в момент включення. При $\psi = \pm 90^\circ$ вільна складова має найбільше значення (рис. 2.48). У цьому випадку потік Φ через півперіоду після включення ($\omega t = \pi$) має максимальне значення $\Phi_{\max} = 2\Phi_m$, так як вільна складова затухає дуже повільно через малість r_1 . Майже подвоєне значення потоку призведе до сильного насичення магнітопроводу. При цьому струм включення може перевищити його стале значення в 100 і більше разів (рис. 2.49). Це явище необхідно враховувати при налаштуванні струмового захисту трансформатора.

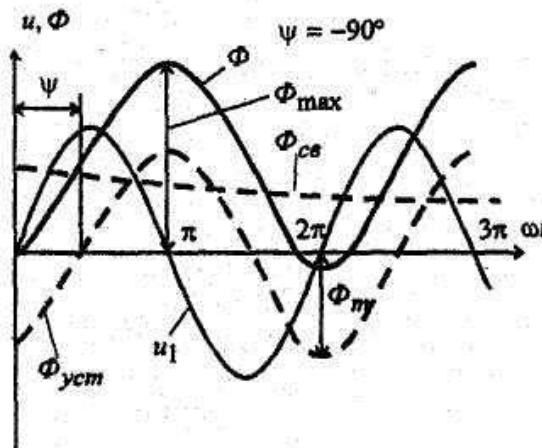


Рис. 2.48

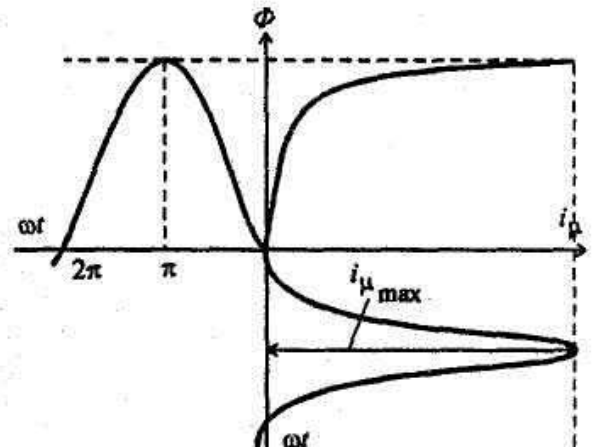


Рис. 2.49

Перехідний процес при короткому замиканні трансформатора

В умовах експлуатації короткі замикання зазвичай виникають раптово в результаті різного роду аварій в електричних мережах. При цьому в трансформаторі відбувається перехідний процес, що супроводжується великими значеннями струмів в обмотках. Аналіз перехідного процесу дозволяє при раптовому короткому замиканні оцінити рівень цих токів в залежності від різних факторів, що

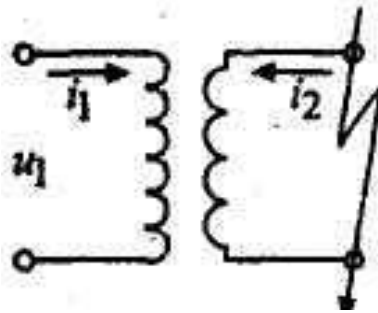


Рис. 2.50

впливають. Обмежимося розглядом процесу короткого замикання однофазного трансформатора, який працював до цього в режимі холостого ходу (рис. 2.50). Прийmemo допущення, що напруга мережі $U_1 = U_{1m} \cos(\omega t + \psi)$ не залежить від режиму роботи трансформатора, а також будемо вважати, що магнітопровід трансформатора під час короткого замикання не насичений, оскільки потік взаємоіндукції Φ при короткому замиканні знижується майже вдвічі із-за сильної розмагнічуючої дії струмів вторинної обмотки (див. п. 2.5.2). Це допущення дозволяє знехтувати струмом намагнічування і покласти в основу розрахунку струму раптового короткого замикання спрощену схему заміщення (рис. 2.51). Процеси в цій схемі описуються лінійним диференціальним рівнянням

$$u_1 = r_k i_1 + L_k \frac{di_1}{dt}. \quad (2.31)$$

Рішення даного рівняння має вигляд

$$i_1 = i_{1уст} + i_{1св} \quad (2.32)$$

Встановлена складова $i_{1уст}$ являє собою приватне рішення рівняння (2.31):

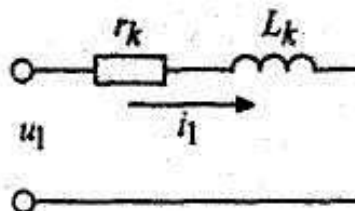


Рис.2.51

$$i_{1_{уст}} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \cos(\omega t + \psi - \varphi_k) = I_{km} \cdot \cos(\omega t + \psi - \varphi_k),$$

а вільна складова $i_{1_{св}} = C e^{-\frac{r_k}{L_k} t}$ визначається з однорідного

диференціального рівняння $r_k i_{1_{св}} + L_k \frac{di_{1_{св}}}{dt} = 0$. Для знаходження постійної інтегрування Задамо початкові умови в момент виникнення короткого замикання: $i_1(0) = 0$. Підставляючи цю умову в (2.32),

отримаємо $0 = I_{km} \cos(\psi - \varphi_k) + C$. Звідси $C = -I_{km} \cos(\psi - \varphi_k)$. З урахуванням отриманих співвідношень вираз для струму короткого замикання можна представити у вигляді

$$i_1 = I_{km} \cdot \cos(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{km} \cdot \cos(\psi - \varphi_k) \cdot e^{-\frac{r_k}{L_k} t}.$$

Вираз (2.33) показує, що вільна складова струму короткого замикання має максимальне значення при $\psi = \varphi_k$ і $\psi = \varphi_k - \pi$. За цих умов ударне значення струму короткого замикання $i_{1_{max}}$ майже в два рази перевищує його сталє значення. Зміна струму i_1 для випадку $\psi = \varphi_k - \pi$ показано на рис. 2.52. Струм короткого замикання досягає максимального значення $i_{1_{max}}$ через полперіода після початку аварії,

$$i_{1_{max}} = I_{km} \left(1 + e^{-\frac{r_k}{\omega L_k} \pi} \right).$$

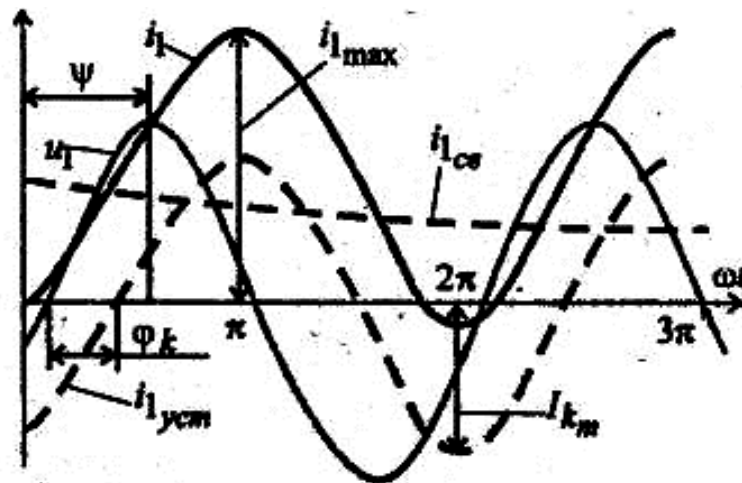


Рис. 2.52

Ток I_{km} , можна виразити через напругу короткого замикання

$$I_{km} = \frac{\sqrt{2} I_{1n}}{u_k^*},$$

трансформатора,

а коефіцієнт загасання $r_k / \omega L_k$

$$\frac{r_k}{\omega L_k} = \frac{u_{ka}^*}{u_{kr}^*}.$$

через його складові,

$*_k = 0,05 + 0,1$; $u_{ka}^* / u_{kr}^* = 0,15 - 0,2$. При цих параметрах максимальний струм короткого замикання може досягати значень

$$\frac{u_1}{w_1} = \frac{r_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}.$$

Для силових трансформаторів і Для цього струму виражається у збільшенні нагріву обмоток і в значному зростанні електромагнітних сил, що діють на обмотки. У сучасних енергосистемах застосовують швидкодіючий релейний захист, що відключає аварійну ділянку за 0,3 - 0,5 с. За цей час трансформатор не встигне нагрітися до гранично допустимої температури.

Більш небезпечною є дія електромагнітних сил. Походження цих сил обумовлено взаємодією поля розсіювання обмоток трансформатора з струмом, що протікає по цих обмоткам. Сила, яка припадає на одиницю довжини провідника, визначається добутком

індукції поля розсіювання на струм: $F = B \cdot i, \text{H/м}.$

У нормальних режимах ця сила невелика. Наприклад, при струмі $i = 100 \text{ A}$ та індукції $B = 0,1 \text{ Тл}$ сила $F = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ Н/м}$. Така сила не представляє небезпеки для провідника. Під час короткого замикання I зростає пропорційно квадрату струму, тому електромагнітні сили перевищують їх значення в робочих режимах в сотні разів. Ці сили пульсують з частотою 100 Гц, викликаючи вібрацію і деформацію обмоток. При механічних напругах, що перевищують 50-60 Н/мм², деформації стають незворотними і обмотка руйнується.

2. Раптове коротке замикання в силових трансформаторах.



Коротке Замикання Трансформатора. Загальні Відомості.

Короткі замикання в електроустановках виходить, як правило, унаслідок яких-небудь несправностей у електромережах (електричному пробії її в результаті перенапруг, механічне пошкодження ізоляції і т. д.) або при неправильних діях робочого персоналу. Коротке замикання трансформатора дуже небезпечно, оскільки при цьому з'являється досить велика сила струму, яка здатна зруйнувати діючий електричний пристрій.

При виникненні короткого замикання на затискачах вторинної обмотки трансформатора опір електричного навантаження Z_n майже дорівнює 0 і, отже напруга на затискачах робочої вторинної обмотки трансформатора U_2 також дорівнює 0. Внаслідок цього, електрична напруга U_1 , яке додано до діючої первинної обмотці, буде збалансовано загальним падінням напруги в повних електричних опорах первинної і вторинної робочих обмоток $Z_k = Z_1 + Z_2$

Рівняння балансу електрорушійної сили робочої первинної обмотки силового трансформатора при виникненні короткого замикання вторинної обмотки трансформатора запишеться в такому вигляді: $U_1 = I_k Z_k$

Рівняння балансу електрорушійної сили робочої первинної обмотки силового трансформатора при виникненні короткого замикання вторинної обмотки трансформатора запишеться у такому вигляді: $U_1 = I_k Z_k$; де I_k - це струм короткого замикання трансформатора. Оскільки падіння електричної напруги в наявному повному опорі діючих обмоток трансформатора при нормальному робітнику струмі складає близько 5-7% від номінальної електричної напруги, тобто струм короткого замикання трансформатора виявиться більше номінального робітника те

Оскільки падіння електричної напруги в наявному повному опорі діючих обмоток трансформатора при нормальному робітнику струмі складає близько 5-7% від номінальної електричної напруги, тобто струм короткого замикання трансформатора виявиться більше номінального робочого струму в стільки разів в скільки ця сама номінальна електрична напруга більше діючого падіння напруги в повний електричний опір робочий обмоток при номінальній силі струму.

Така сила струму (коротке замикання трансформатора), у багато разів буде більше робочого номінального струму. Вона тектиме в робочих обмотках електричного трансформатора впродовж усього часу дії короткого замикання, яке б велике воно не було. Хоча у безпосередній момент короткого замикання трансформатора наявна кратність сили струму короткого замикання може бути ще вища. Тобто,

залежно від миттєвої величини підключеної напруги миттєва сила струму короткого замикання трансформатора в деякій мірі

Сила струму короткого замикання трансформатора різко збільшує температуру робочої обмотки, що негативно впливає на цілість її ізоляції. Втрати в електричних дротах робочих обмоток силового трансформатора пропорційні силі струму в другому ступені. З цієї причини у разі, коли сила струму короткого замикання трансформатора виявиться, приміром, в двадцять разів більше номінального значення робочого струму, існуючі втррати в дротах робочих обмоток будуть приблизно в 400 разів більшими, ніж у разі, коли сила струму була в номінальному значенні.

Надмірне виділення надмірної потужності в електричних дротах робочих обмоток викликає дуже різке збільшення їх температури, внаслідок чого відбувається порушення колишньої цілості діелектричної ізоляції і подальший вихід з ладу силового трансформатора. З цієї причини усі силові електричні трансформатори своєчасно забезпечуються швидкодіючим захистом, завдання якого являється відключення того, що діє трансформатор у разі виникнення короткого замикання

Коротке замикання трансформатора дуже небезпечне, оскільки легко може сприяти його руйнуванню. Як ми знаємо, між електричними дротами, по яких протікає певна сила струму, виникає деяка механічна дія. Якщо в двох дротах, що паралельно йдуть, йдуть струми, які спрямовані в однакову сторону, то такі дроти будуть взаємно притягуються один до одного, ну, а якщо електричні струми спрямовані протилежно один відносно одного, електричні дроти будуть взаємно відштовхуються.

Оскільки сили, що впливають на електричні дроти із струмом, сильно залежать від твору сили струмів, то і самі сили F , що впливають на робочі обмотки силових трансформаторів при виникненні короткого замикання, також будуть у багато разів сильніші. Під впливом досить значимих механічних сил робочі обмотки силового трансформатора деформуються настільки, що починає порушуватися діелектрична ізоляція, а це веде до різкого зниження її електричної міцності.

3. Ударний струм короткого замикання.

Режим короткого замикання в електротехніці — стан двополюсника, при якому його електричні виводи сполучені провідником з близьким до нульового електричним опором (тобто, іншими словами, з'єднані коротко). *Режим короткого замикання (кола або генератора)* — робота у ненавантаженому стані, коли вихідна напруга дорівнює нулю, а вихідні затискачі коротко з'єднані. Часто замість терміну «режим короткого замикання» використовується скорочення *режим КЗ* або просто *КЗ*.

Застосування

Розгляд режиму короткого замикання застосовується при аналізі електричних кіл. За допомогою дослідження режиму КЗ трансформатора можна визначити втрати корисної потужності на нагрівання проводів в колі трансформатора.

Небезпека короткого замикання

Зазвичай, термін коротке замикання несе негативний зміст, оскільки для реальних пристроїв коротке замикання може бути небажаним чи навіть небезпечним. Коротке замикання може привести до виходу з ладу для більшості джерел електроживлення: силової мережі, електричних акумуляторів, блоків електроживлення, генераторів тощо. При цьому струм при короткому замиканні може у десятки разів перевищити номінальний. Тому слід відрізнати режим короткого замикання від дослідів короткого замикання.

Дослідження режиму короткого замикання трансформатора

При дослідженні режиму короткого замикання, на первинну обмотку трансформатора подається змінна напруга невеликої величини, виводи вторинної обмотки закорочують. Величину напруги на вході встановлюють такою, щоб струм короткого замикання дорівнював номінальному (розрахунковому) струму трансформатора. У таких умовах величина напруги короткого замикання характеризує втрати в обмотках трансформатора, втрати на омичний опір. Потужність втрат можна обчислити помноживши напругу короткого замикання на струм короткого замикання.

Ударний струм КЗ

Визначення: ударний струм КЗ - це максимальне миттєве значення повного струму КЗ при найбільш несприятливих умовах. Якщо КЗ виникає у активно-індуктивних схемах із $L \gg R$ (), які працюють у режимі холостого ходу, то найбільш несприятливим для початку КЗ буде момент переходу напруги мережі через нуль. У цьому випадку початкове значення періодичної складової струму $I_{\text{по}}$ рівне її амплітудному значенню $I_{\text{пmax}}$.

За умовою незмінності струму в перший момент КЗ початкові значення аперіодичної складової, виявляються максимально можливими і дорівнюють амплітудному значенню періодичної складової струму КЗ. Через півперіоду з моменту виникнення КЗ ($t=0.01$ сек) миттєві значення струму КЗ виявляються максимально можливими і рівними: Для чисто активних ланцюгів $t=0$ k не дорівнює $0^* T = 0$, $k = 1$. Для чисто індуктивних ланцюгів $t=0$ k не дорівнює $0^* T = 8$, $k = 2$.

визначення. - це ударний коефіцієнт показує перевищення ударного струму над амплітудою періодичної що складає. Його величина міняється від 1 до 2. Чим вище відношення x/r ланцюга, тим більше постійна часу T і тим повільніше згасає аперіодична складова, і тим

вище. У практичних розрахунках ударний струм $K3$ (i_y) визначають по формулі

i_y - це показник, що визначає механічну міцність струмоведучих частин, які повинні витримувати ударний струм.

4. Призначення, особливості конструкції і властивості автотрансформаторів і багатообмоточних трансформаторів.

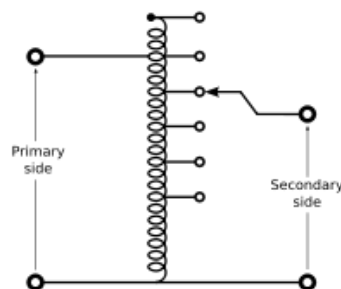
Автотрансформатор



Лабораторний автотрансформатор (ЛАТР)



Умовне графічне позначення автотрансформатора



Однофазний автотрансформатор з вихідною напругою з трьома виводами, що може змінюватись в діапазоні 40%...115% від вхідної

Автотрансформатор — трансформатор, дві або більше обмоток якого мають спільну частину. Це є варіант виконання силового трансформатора, в якому первинна і вторинна обмотки сполучені безпосередньо, і мають за рахунок цього не тільки електромагнітний зв'язок, а й електричний. Обмотка автотрансформатора має декілька виводів (як мінімум 3), при підключенні до яких, можна отримувати різні напруги.

Види автотрансформаторів

Автотрансформатори можуть бути понижувальними і підвищувальними, однофазними і трифазними. У трифазного трансформатора обмотки фаз з'єднують зіркою.

Значного поширення набули автотрансформатори зі змінним коефіцієнтом трансформації. Такі автотрансформатори оснащуються пристроєм, що дозволяє регулювати величину напруги на вторинній обмотці шляхом зміни числа витків. Це здійснюється завдяки ковзному контакту (щітки чи ролика), що переміщується безпосередньо по зачищеній від ізоляції поверхні витків обмотки. Такі автотрансформатори називають регуляторами напруги. Вітчизняною промисловістю виготовляються регулятори напруги невеликої потужності серії РНО (однофазні) і РНТ (трифазні). Автотрансформатори, що призначені для лабораторного використання називають *ЛАТР*.

Переваги та недоліки

Перевагою автотрансформатора є вищий ККД, оскільки лише частина потужності піддається перетворенню — це особливо суттєво, коли вхідна і вихідна напруги відрізняються незначно.

Недоліком є відсутність електричної ізоляції (гальванічної розв'язки) між первинним і вторинним колом. У промислових мережах, де наявність заземлення нульового проводу обов'язкова, цей чинник ролі не грає, зате суттєвою є менша витрата сталі для осердя, міді для обмоток, менша вага і габарити, і в результаті — менша вартість.

Застосування автотрансформаторів економічно виправдане замість звичайних трансформаторів для сполучення ефективно заземлених мереж з напругою 110 кВ і вище при коефіцієнтах трансформації не більших за 3...4.

Автотрансформатор являє собою трансформатор, у якого первинна й вторинна обмотки не ізолювані одна від одної й частково сполучені. У понижувального автотрансформатора обмотка низької напруги є частиною обмотки високої напруги (рис. 7, а). Якщо частину обмотки автотрансформатора зробити первинною, а всю обмотку - вторинною, то автотрансформатор буде підвищувальним (рис. 7, б).

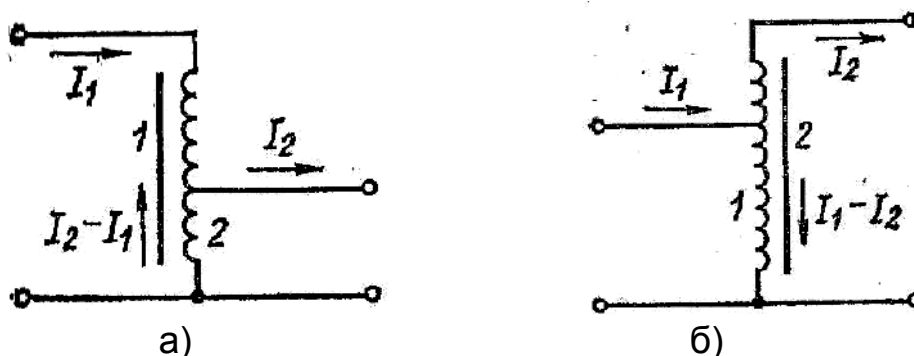


Рис. 7. Автотрансформатор: а) понижувальний; б) підвищувальний

У порівнянні зі звичайним трансформатором при одній і тій же потужності автотрансформатор має меншу площу перетину сердечника. Це пояснюється тим, що в автотрансформаторі не вся енергія передається через магнітний потік. Частина енергії передається за рахунок безпосереднього проходження струму з первинного ланцюга у вторинний, тому що вони з'єднані один з одним. Чим ближче коефіцієнт трансформації автотрансформатора до одиниці, тем менше енергії передається магнітним потоком. Якщо , то вся енергія переходить із первинного ланцюга у вторинну без допомоги магнітного потоку, і в цьому випадку автотрансформатор стає зайвим. $k=1$

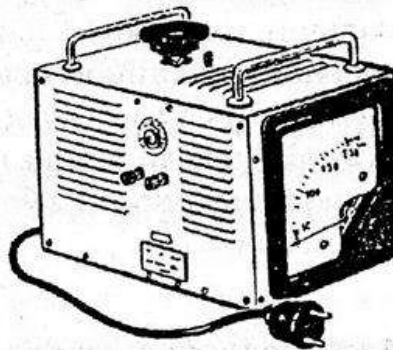


Рис. 8. Лабораторний автотрансформатор ЛАТР.

Оскільки формула трансформаторної ЕРС застосовна до обмоток автотрансформатора так само, як і до обмоток трансформатора, коефіцієнт трансформації автотрансформатора виражається відомими співвідношеннями

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (1)$$

Через те що частина витків автотрансформатора входить і в первинну й у вторинну обмотки, то кількість проводів для обмоток потрібна менше, чим у трансформаторі. Крім того, через загальну частину обмотки автотрансформатора проходить струм обох ланцюгів, рівний $I_2 - I_1$ (у підвищувальному автотрансформаторі $I_1 - I_2$). Чим ближче один до одного струми I_1 й I_2 , тем менше струм у загальній частині обмотки й тем менше може бути діаметр її проводу. Таким чином, при коефіцієнті трансформації, близькому до одиниці ($k = 0.5 \dots 1$ для понижувального автотрансформатора й $k = 1 \dots 2$ - для підвищувального) заощаджується значна кількість міді.

Найчастіше автотрансформатори виготовляють із ковзним контактом, що дозволяє плавно регулювати вихідну напругу в широких

межах. Прикладом може служити лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) (рис.8).



Трансформатори триобмоткові. Основні Відомості.

У разі, коли є необхідність отримати декілька різної напруги, то замість декількох окремих електричних силових двообмоточних трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації можна застосувати один силовий багатообмотковий трансформатор. Це дає можливість сильно здешевити і спростити електричну трансформаторну підстанцію.

Припустимо, електричний силовий трансформатор має деяке число обмоток. Для такого багатообмоткового силового трансформатора відповідні певні рівняння рівноваги електрорушійної сили і присутніх сил, що намагнічують. Визначимо їх як $I_1, I_2 - I_n$ струми, які течуть по обмоткам триобмоткового трансформатора, а через $w_1, w_2 - w_n$ означає кількість витків працюючих в триобмотковому трансформаторі.

Згідно відомому закону, електромагнітної рівноваги ми у результаті отримаємо: $I_1 w_1 + I_2 w_2 + I_3 w_3 + \dots + I_n w_n = I_0 w_1$, тобто, отримана сума сил усіх наявних робочих обмоток, що намагнічують, прирівняна загальній силі режиму холостого ходу, що намагнічує. Діюча сила первинної обмотки триобмоткового трансформатора, що намагнічує, створює електромагнітний потік в його магнітопроводі і тим самим компенсує діючу розмагнічуючу дію протікаючих струмів усіх інших електричних обмоток.

Давайте з Вами розглянемо триобмоткові трансформатори електричні силові, які мають досить широке своє практичне поширення. Робота холостого ходу триобмоткового трансформатора, у випадку якщо обидві вторинні обмотки трансформатора розімкнені, в принципі, нічим не відрізняється від роботи холостого ходу простого силового двообмоткового трансформатора електричного і дає нам деяку можливість точно визначити силу струму холостого ходу I_0 , а також наявні втрати холостого ходу P_0 і, звичайно ж, коефіцієнти трансформації.

У нашому випадку ми матиме 2 коефіцієнти трансформації k_{12} і k_{13} , існуючі між першою і другою і між першою і третьою робочими обмотками триобмоткового трансформатора. За наступним правилом $K_{12} = E_1/E_2 = w_1/w_2$; $K_{13} = E_1/E_3 = w_1/w_3$; а також по свідомо відомих 2 коефіцієнтам трансформації можливо буде визначити і третій k_{23} між, що є в другій і третій обмотці: $K_{23} = E_2/E_3 = w_2/w_3 = k_{13}/k_{12}$

Для безпосереднього визначення основних параметрів режиму короткого замикання роблять 3 досліди режиму короткого замикання : це між електричними обмотками триобмоткового трансформатора 1 і 2 при

розімкненій обмотці 3; далі між робочими обмотками 1 і 3 при розімкненій обмотці 2; і в третьому досвіді між обмотками 2 і 3 при електрично розімкненій обмотці 1. Допустимий r_1 , r_2 , r_3 - це у нас активні електричні опори і x_1 , x_2 , x_3 - індуктивні опори наявних обмоток в триобмотковому трансформаторі.

Як відомо в двообмоткових електричних силових трансформаторах, що діють індуктивні опори робочих обмоток визначаються деякими потоками розсіювання цих обмоток трансформатора. У разі триобмоткових трансформаторів індуктивні електричні опори обмоток трансформатора визначаються певним еквівалентним розсіювання, що діє потоком, таким, що підсумовується з потоком розсіювання цієї обмотки і діючих потоків розсіювання двох інших обмоток.

Широке застосування мають триобмоткові трансформатори електричні силові, які містять 1 первинну і 2 вторинні обмотки. Якщо поміняється електричне навантаження в одній з діючих електричних обмоток (припустимо, другій обмотці), то поміняється і напруга U_2 не лише цієї обмотки, але і електрична напруга U_3 іншої діючої вторинної обмотки.

Це відбувається через те, що зміна сили струму у будь-якій одній робочій вторинній обмотці обов'язково викликає визначені зміни сили струму в первинній діючій обмотці. Внаслідок подібної зміни напруги в повному електричному опорі первинної робочої обмотки змінюються як електрорушійна сила, так і саме напруга вторинних обмоток.

У своєму конструктивному відношенні електричні силові триобмоткові трансформатори схожі на двообмоткові. На їх магнітопроводі (триобмоткового трансформатора) розміщується 3 робочих обмотки - більшої напруги, середньої напруги і меншої напруги. На діючому стержні робочого магнітопроводу обмотки можуть встановлюватися різними способами. Ближче до безпосереднього стержня може бути укладена робоча обмотка "НН", "СН" або "ВН".

Триобмоткові трансформатори При передачі та розподілі електричної енергії іноді виникає необхідність в об'єднанні трьох, мереж, що працюють з різними напругами. Так, наприклад, передачу енергії двом споживачам, що знаходяться на різних відстанях від електричної станції, доцільно здійснювати на різних напругах. Для цього можна застосувати два двообмоткових трансформатора. Однак більш економічно завдання вирішується за допомогою одного триобмоткового трансформатора, що має одну первинну і дві вторинних обмотки (рис. 2.33).

Конструктивно триобмоткові трансформатори виконуються аналогічно двообмоткових (рис. 2.34). Первинна обмотка зазвичай розташовується в середині між двома вторинними. Вторинна обмотка з більш низькою напругою розташовується ближче до стержня. Якщо виконати

приведення вторинних обмоток триобмоткового трансформатора до первинної, то можна отримати електричну схему заміщення (рис. 2.35), за допомогою якої можна виконати розрахунок робочих режимів. Зі схеми заміщення видно, що при зміні навантаження в одній з вторинних обмоток змінюється напруга на обох обмотках, так як при цьому зростає струм первинної обмотки I_1 і збільшується падіння напруги на опорі z_1 . З метою зменшення впливу

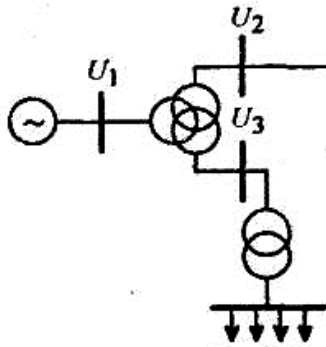


Рис. 2.33

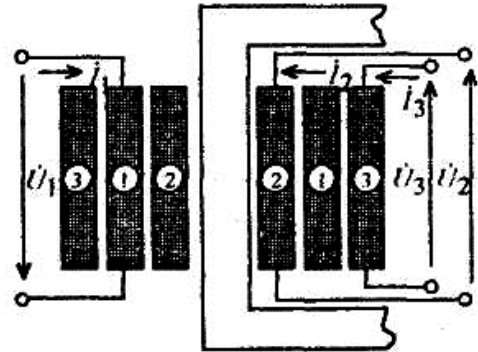


Рис. 2.34

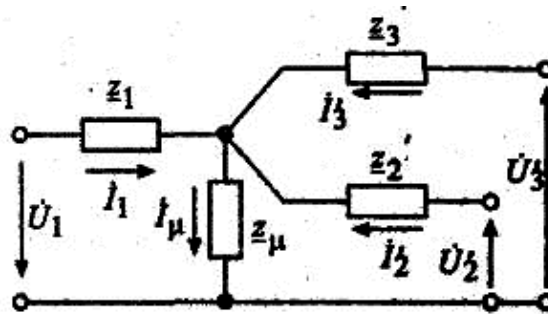


Рис.2.35

однієї вторинної обмотки на іншу прагнуть зменшити опір z_1 головним чином, за рахунок індуктивного опору розсіювання $x_{\sigma 1}$. Для цього первинну обмотку завадять між двома вторинними обмотками. Токи вторинної обмотки I'_2 і I'_3 не збігаються по фазі, так як коефіцієнти потужностей $\cos \varphi_2$ і $\cos \varphi_3$ звичайно різні (рис 2.36). Тому модуль первинного струму I_1 менше суми модулів струмів вторинних обмоток I'_2 і I'_3 , $I_1 < I'_2 + I'_3$

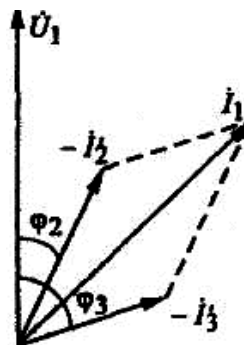


Рис.2.36

Отже, потужність первинної обмотки менше суми потужностей двох інших обмоток, $S_1 < S_2 + S_3$. В даний час випускаються триобмоткові трансформатори з рівними значеннями номінальних потужностей всіх трьох обмоток: 100%: 100%: 100%. При такому виконанні обмоток трансформатор може віддавати 100% потужності в одну з вторинних обмоток або сумарну потужність 100% - в обидва вторинні обмотки. Обмотки триобмоткових трансформаторів зазвичай з'єднують за схемами Y/Yn/Δ-0-11 або Yn/Δ/Δ-11-11.

Контрольні запитання

1. Принципова схема триобмоткового трансформатора, рівняння напруг і струмів.
2. Векторна діаграма і схема заміщення триобмоточного трансформатора.
3. Схеми дослідів короткого замикання триобмоточного трансформатора.
4. Які достоїнства триобмоточних трансформаторів?
5. Перелічіть достоїнства і недоліки автотрансформаторів.
6. Чи залежать достоїнства автотрансформатора від коефіцієнта трансформації? Поясніть, чому?
7. Принципова схема двообмоточного трансформатора з розщепленою вторинною обмоткою.

1.9 ЛЕКЦІЯ №9. ТЕМА ПРИЗНАЧЕННЯ, ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ І ВЛАСТИВОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ І НАПРУГИ

План

1. Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів струму і напруги.
2. Призначення особливості конструкції, схеми вмикання і принцип дії зварювальних трансформаторів.

Мета: розглянути особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів струму і напруги та особливості конструкції, схеми вмикання і принцип дії зварювальних трансформаторів

1. Призначення, особливості конструкції і властивості вимірювальних трансформаторів струму і напруги.

Вимірювальні трансформатори



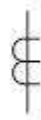
Використання трансформаторів струму у вимірювальному устаткуванні для вимірювання струму у трифазних лініях живлення зі струмом до 400А

Вимірювальний трансформатор (англ. *instrument transforme*) — трансформатор, призначений для пересилання інформаційного сигналу вимірювальним приладам, лічильникам, пристроям захисту і (або) керування. Вимірювальні трансформатори поділяються на:

- *трансформатори струму* (англ. *current transformer; CT*);
- *трансформатори напруги* (англ. *voltage transformer; VT*);
- *комбіновані трансформатори* (англ. *combined transformer*), що поєднують обидві властивості.

Трансформатор струму

Трансформатор струму — вимірювальний трансформатор, в якому за нормальних умов роботи вторинний струм практично пропорційний первинному і зсув фаз між ними близький до нуля.



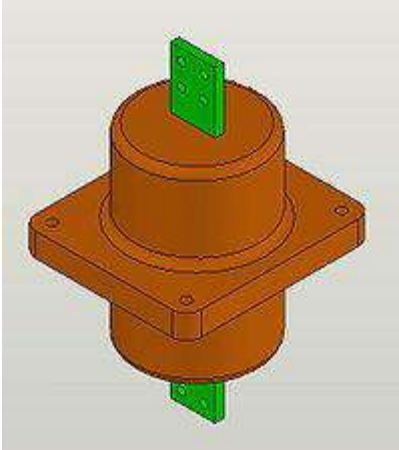
Умовна позначка трансформатора струму на електричних схемах

Вимірювальний трансформатор струму — трансформатор, який призначений для перетворення струму до значення, зручного для виміру. Первинна обмотка трансформатора струму включається послідовно у коло зі змінним струмом, що вимірюється. А у вторинну включаються вимірювальні прилади. Струм, що протікає по вторинній обмотці трансформатора струму, пропорційний струму, що протікає у його первинній обмотці.

Трансформатори струму широко використовуються для вимірювання електричного струму й у пристроях релейного захисту електроенергетичних систем, у зв'язку з чим на них накладаються високі вимоги по точності. Трансформатори струму забезпечують безпеку вимірювань, ізолюючи вимірювальні схеми від первинного кола з високою напругою, яка часто складає сотні кіловольт.

Зазвичай, трансформатор струму виготовляється з двома і більше групами вторинних обмоток: одна використовується для підключення пристроїв захисту, інша, точніша — для підключення засобів обліку і вимірювання (наприклад, лічильників електроенергії).

Трансформатор струму (англ. *current transformer*) — вимірювальний трансформатор, в якому вторинна напруга за нормальних умов застосування практично пропорційна первинній напрузі і для відповідного з'єднання відрізняється від неї за фазою на кут, що приблизно дорівнює нулю.



Вимірювальний трансформатор струму ТПОЛ-10



Елегазові трансформатори струму ТГФМ-110

Трансформатор струму призначений для перетворення струму до значення, зручного для вимірювання. Первинна обмотка трансформатора струму включається послідовно у коло зі змінним струмом, що вимірюється. А у вторинну включаються вимірювальні прилади. Струм, що протікає по вторинній обмотці трансформатора струму, пропорційний до струму, що протікає у його первинній обмотці.

Трансформатори струму широко використовуються для вимірювання електричного струму й у пристроях релейного захисту електроенергетичних систем, у зв'язку з чим на них накладаються високі вимоги по точності. Трансформатори струму забезпечують безпеку вимірювань, ізолюючи вимірювальні кола від первинного кола з високою напругою, яка часто складає сотні кіловольт. Зазвичай, трансформатор струму виготовляється з двома і більше групами вторинних обмоток: одна використовується для підключення пристроїв захисту, інша, більш точна — для підключення засобів обліку і вимірювання (наприклад, електричних лічильників).

Особливості конструкції

Вторинні обмотки трансформатора струму (не менше однієї на кожен магнітопровід) обов'язково навантажуються. Опір навантаження суворо регламентовано вимогами до точності коефіцієнта трансформації. Незначне відхилення опору вторинної обмотки від номіналу (зазначеного на табличці) за модулем повного Z або $\cos \phi$ (зазвичай $\cos \phi = 0,8$ індуктив.) Призводить до зміни похибки перетворення і можливо погіршення вимірювальних якостей трансформатора. Значне збільшення опору навантаження створює високу напругу у вторинній

обмотці, яка достатня для пробою ізоляції трансформатора, що приводить до виходу трансформатора з ладу, а також створює загрозу життю обслуговуючого персоналу. Крім того, через зростання втрат в осерді магнітопровід трансформатора починає перегріватися, що так само може привести до пошкодження (або, як мінімум, до зносу) ізоляції та подальшого її пробою.

Повністю розімкнена вторинна обмотка трансформатора струму не створює компенсуючий магнітний потік в осерді, що призводить до перегрівання магнітопроводу і його вигорання. При цьому магнітний потік, створений первинною обмоткою має дуже високе значення і втрати в магнітопроводі сильно нагрівають його.

Коефіцієнт трансформації вимірювальних трансформаторів струму є їх основною характеристикою. Номінальний (ідеальний) коефіцієнт вказується на шильнику трансформатора у вигляді відношення номінального струму первинної (первинних) обмоток до номінального струму вторинної (вторинних) обмоток, наприклад, 100/5 А чи 10-15-50-100/5 А (для первинних обмоток з декількома секціями витків). При цьому реальний коефіцієнт трансформації дещо відрізняється від номінального. Ця відмінність характеризується величиною похибки перетворення, що складається з двох складових — синфазної і квадратурної. Перша характеризує відхилення за величиною, друга відхилення за фазою вторинного струму реального від номінального. Ці величини регламентовані ГОСТами і служать основою для присвоєння трансформаторам струму класів точності при проектуванні і виготовленні. Оскільки у магнітних системах мають місце втрати пов'язані з намагнічуванням і нагріванням магнітопроводу, вторинний струм виявляється менше номінального (тобто похибка негативна) у всіх трансформаторів струму. У зв'язку з цим для поліпшення характеристик і внесення позитивного зсуву у похибку перетворення застосовують виткову корекцію. А це означає, що коефіцієнт трансформації у таких відкоригованих трансформаторів не відповідає звичній формулі співвідношень витків первинної і вторинної обмоток.

Схеми підключення вимірювальних трансформаторів струму



Два трансформатора струму в комірці КРУ — 10кВ

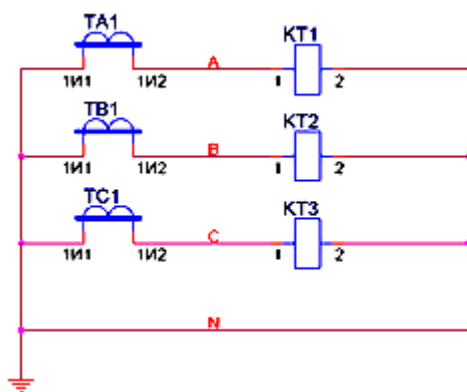


Рис 1

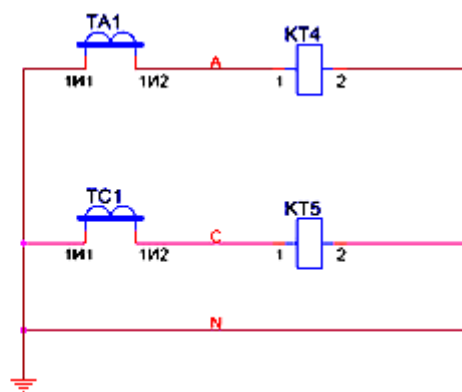


Рис. 2

У трифазних мережах з напругою 6-10 кВ встановлюються трансформатори як у всіх трьох фазах, так і тільки у двох (А і С). У мережах з напругою 35 кВ і вище трансформатори струму в обов'язковому порядку встановлюються у всіх трьох фазах. У разі встановлення у три фази вторинні обмотки трансформаторів струму з'єднуються в «зірку» (рис.1), у разі двох фаз — «неповну зірку» (рис.2). Для диференціальних захистів трансформаторів з електромеханічними реле трансформатори підключають за схемою «трикутника».

Класифікація трансформаторів струму

Трансформатори струму класифікуються за різними ознаками:

1. За призначенням трансформатори струму можна розділити на вимірювальні, захисні, проміжні (для включення вимірювальних приладів у струмові кола релейного захисту, для вирівнювання струмів у схемах диференціальних захистів і т. д.) і лабораторні (високої точності, а також з багатьма коефіцієнтами трансформації).
2. За родом установки розрізняють трансформатори струму:
 1. для зовнішньої установки (у відкритих розподільних пристроях);
 2. для закритої установки;
 3. вбудовані в електричні апарати та машини: вимикачі, трансформатори, генератори і т. д.;
 4. накладні — надіваються зверху на прохідний ізолятор (наприклад, на високовольтний ввід силового трансформатора);
 5. переносні (для контрольних вимірів і лабораторних випробувань).
3. За конструкцією первинної обмотки трансформатори струму діляться на:
 1. багатовиткові (катушкові, з петлевою обмоткою і з вісімокоподібною обмоткою);
 2. одновиткові (стрижневі);
 3. шинні.

4. За способом установки трансформатори струму для закритої і зовнішньої установки розділяються на:

1. прохідні;
2. опорні.
3. По виконанню ізоляції трансформатори струму можна розбити на групи:
4. із сухою ізоляцією (фарфор, бакеліт, лита епоксидна ізоляція і т. д.);
5. з паперово-масляною ізоляцією і з конденсаторної паперово-масляною ізоляцією;
6. газонаповнені (елегаз);
7. з заливкою компаундом.

5. За кількістю ступенів трансформації є трансформатори струму:

1. одноступінчасті;
2. двоступінчасті (каскадні).

6. За робочій напрузі розрізняють трансформатори:

1. на номінальну напругу понад 1000 В;
2. на номінальну напругу до 1000 В.

Зауваження Результуючий магнітний потік у магнітопроводі трансформатора струму дорівнює різниці магнітних потоків, що створюються первинною і вторинною обмотками. У нормальних умовах роботи трансформатора він невеликий. Однак при розмиканні ланцюга вторинної обмотки у сердечнику буде існувати тільки магнітний потік первинної обмотки, який значно перевищує різниці магнітних потоків. Втрати в осерді різко зростуть, трансформатор перегріється і вийде з ладу («пожежа заліза»). Крім того, на кінцях обірваного вторинного ланцюга з'явиться велика ЕРС, небезпечна для роботи оператора. Тому трансформатор струму не можна включати у лінію без приєднаного до нього вимірювального приладу. У разі необхідності відключення вимірювального приладу від вторинної обмотки трансформатора струму, її обов'язково потрібно закоротити.

Трансформатор напруги



Трансформатори напруги для високовольтних мереж

Трансформатор напруги — вимірювальний трансформатор, у якому за нормальних умов використання вторинна напруга пропорційна первинній напрузі та за умови правильного вмикання зміщена відносно неї за фазою на кут, близький до нуля.



Умовна позначка трансформатора напруги на електричних схемах

Трансформатор напруги використовується для перетворення високої напруги в низьку в колах релейного захисту та контрольно-вимірювальних приладів і автоматики. Застосування трансформатора напруги дозволяє ізолювати логічні кола захисту і кола вимірювання від кіл високої напруги.

Трансформатори напруги для мереж високих напруг — це апарати зовнішнього встановлення, які представляють собою герметичний, заповнений трансформаторним маслом або елегазом металевий бак на металевій основі, яка з'єднана з системою заземлення. Всередині баку змонтований сердечник трансформатора з первинною та вторинними обмотками. Ці трансформатори зазвичай мають один первинний термінал, який знаходиться на верхній частині прохідного ізолятора, прикріпленого до верхньої частини баку. Термінали вторинних обмоток розташовані в окремому боксі закріпленому на основі трансформатора.

Трансформатори, побудовані за такою схемою, застосовуються у мережах з номінальною напругою до 230 кВ. При вищих номінальних напругах застосовуються каскадні та ємнісні трансформатори напруги.

Трансформатор напруги (англ. *voltage transformer*; VT) — вимірювальний трансформатор, у якому за нормальних умов використання вторинна напруга є пропорційною до первинної напруги та за умови правильного вмикання зміщена відносно неї за фазою на кут, близький до нуля^{[1][2]}.

Трансформатор напруги використовується для перетворення високої напруги в низьку в колах релейного захисту та контрольно-вимірювальних приладів і автоматики. Застосування трансформатора напруги дозволяє ізолювати логічні кола захисту і кола вимірювання від кіл високої напруги.

Конструктивні особливості



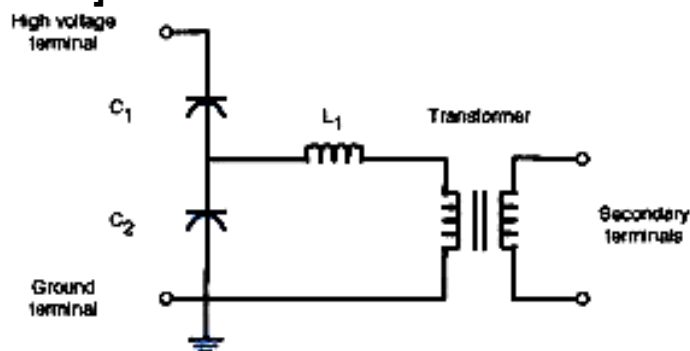
Умовна позначка трансформатора напруги на електричних схемах

Трансформатори напруги застосовуються у розподільних пристроях середньої та високої напруги й призначені для передачі інформаційних сигналів вимірювальним пристроям, лічильникам, а також пристроям захисту й керування, тому вони, як і трансформатори струму, мають декілька вторинних обмоток. Трансформатори напруги зазвичай є однофазними і застосовуються у розподільних пристроях комплектами з трьох трансформаторів, кожний з яких має тільки одну первинну обмотку з великою кількістю витків, набагато більшою, ніж кількість витків вторинних обмоток.

В одних конструкціях первинна обмотка може бути повністю ізольованою від системи заземлення: *незаземлюваний трансформатор напруги* (англ. *unearthed voltage transformer*) — трансформатор напруги, у якого всі частини первинної обмотки, включаючи виводи, ізольовані від землі на рівень, відповідний до нормованого рівня ізоляції. Інша конструкція: *заземлюваний трансформатор напруги* (англ. *earthed voltage transformer*) — однофазний трансформатор напруги, один кінець первинної обмотки якого призначений для глухого заземлення, або трифазний трансформатор напруги, у якого спільна точка з'єднаної у зірку первинної обмотки призначена для глухого заземлення.

Використовується також *трансформатор напруги нульової послідовності* (англ. *residual voltage transformer*) — трифазний трансформатор напруги або група з трьох однофазних трансформаторів напруги, які мають вторинні обмотки, з'єднані у розімкнений трикутник так, аби поміж відповідними виводами отримати напругу, яка відповідає напрузі нульової послідовності що існує у прикладеній до первинних виводів трифазній напрузі.

Види і застосування]



Спрощена принципова схема підключення трансформатора напруги з ємнісним подільником

Трансформатори напруги для мереж високих напруг — це апарати зовнішнього встановлення, які представляють собою герметичний, заповнений трансформаторним маслом або елегазом металевий бак на металевій основі, яка з'єднана з системою заземлення. Всередині баку змонтований сердечник трансформатора з первинною та вторинними обмотками. Ці трансформатори зазвичай мають один первинний термінал, який знаходиться на верхній частині прохідного ізолятора,

прикріпленого до верхньої частини баку. Термінали вторинних обмоток розташовані в окремому боксі закріпленому на основі трансформатора.

Трансформатори, побудовані за такою схемою, застосовуються у мережах з номінальною напругою до 230 кВ. При вищих номінальних напругах застосовуються каскадні та ємнісні трансформатори напруги.

В *каскадному (індуктивному) трансформаторі напруги* (англ. *Cascade (inductive) voltage transformer*) первинна обмотка рівномірно розподілена поміж двома або більше ізольованими магнітопроводами, що електромагнітно зв'язані відповідним чином. Потужність пересилається до вторинної обмотки, яка розташована на магнітопроводі з обмотками, котрі мають потенціали, найближчі до потенціалу землі.

В *ємнісному трансформаторі напруги* (англ. *capacitor voltage transformer; CVT*) ємнісний подільник і електромагнітний пристрій виконані та з'єднані таким чином, що вторинна напруга електромагнітного пристрою пропорційна первинній напрузі і відрізняється від неї за фазою на кут, близький до нуля в разі правильного з'єднання.

За призначенням трансформатор напруги буває:

- *трансформатор напруги для вимірювань* (англ. *measuring voltage transformer*) — трансформатор напруги, призначений для пересилання інформаційного сигналу до засобів вимірювань;
- *трансформатор напруги для захисту* (англ. *protective voltage transformer*) — трансформатор напруги, призначений для пересилання інформаційного сигналу пристроєм захисту та (або) керування;
- *трансформатор напруги подвійного призначення* (англ. *dual purpose voltage transformer*) — трансформатор напруги з одним магнітопроводом, що виконує дві функції — вимірювальну та захисну. У такого трансформатора може бути одна чи декілька вторинних обмоток;
- *узгоджувальний трансформатор напруги* (англ. *voltage matching transformer*) — трансформатор напруги для узгодження номінальної вторинної напруги основного трансформатора та номінальної напруги навантаження.

Основні характеристики Основними кількісними характеристиками трансформатора напруги є номінативна первинна напруга (англ. *rated primary voltage*), номінативна вторинна напруга (англ. *rated secondary voltage*), а також клас точності (англ. *accuracy class*), який визначає встановлені стандартом ДСТУ ІЕС 60044-2 межі похибки напруги та кутової похибки при визначених умовах роботи трансформатора.

2. Призначення особливості конструкції, схеми вмикання і принцип дії зварювальних трансформаторів.

1. Загальні відомості про трансформатори, призначення особливості конструкції

Трансформатор — статичний електромагнітний пристрій із двома або більшим числом індуктивно зв'язаних обмоток, який служить для перетворення за допомогою електромагнітної індукції змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги.

Класифікація та призначення

За призначенням трансформатори бувають: силові, узгоджувальні та імпульсні;

за потужністю — малої, середньої та великої потужності;

за кількістю обмоток — двообмоткові та багатообмоткові;

за способом охолодження — сухі і масляні;

за типом осердя — стержньові, броньові і тороїдні; а також — без осердя (повітряні);

за кількістю фаз — однофазні і трифазні.

Силові трансформатори призначені для перетворення електричної енергії в електричних мережах та в установках для її приймання і використання. Вони складають основну, найбільш численну групу.

Потужні силові трансформатори встановлюють на електростанціях для підвищення електричної енергії генераторів. Передача електроенергії по лінії електропередачі високою напругою і малими струмами значно зменшує втрати потужності, що дає можливість зменшити переріз проводів та істотно знизити витрати кольорового металу.

У кінці лінії електропередачі встановлюють трансформатори, які знижують напругу до рівня, необхідного для розподілу її між великими споживачами (міста, населені пункти, промислові підприємства, цехи підприємств та ін.).

У місцях споживання електроенергії встановлюють трансформатори, які знижують напругу до експлуатаційної. Більшість споживачів працюють при напрузі 220, 380 і 660 В.

Отже, електроенергія, яка передається від електростанції до електроприймачів, трансформується декілька разів. Спочатку підвищується, а потім знижується.

Трансформатори, призначені для підвищення напруги, називаються підвищувальними, а трансформатори, призначені для зниження напруги,— знижувальними.

Трансформатори широко використовують у радіо- і телеапаратурі, у вимірювальних пристроях, місцевому освітленні тощо.

Трансформатори, які використовуються для узгодження напруги або опорів між каскадами в радіопристроях, називаються узгоджувальними.

Трансформатори, призначені для передачі імпульсів напруги або струмів з однієї мережі в іншу, називаються імпульсними. Вони широко використовуються в імпульсній техніці.

Залежно від потужності трансформатори випускають з природним і масляним охолодженням. Активні частини трансформаторів у потужних

енергетичних установках занурюють в мінеральне трансформаторне масло для кращого відведення тепла і поліпшення ізоляції.

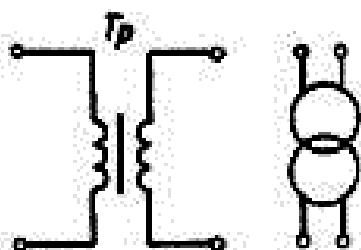
Трансформатори малої потужності випускають з повітряним охолодженням.

Схеми вмикання та принцип дії трансформатора

Магнітопровід - це феромагнітне осердя трансформатора, на якому розташовуються обмотки.

Обмотка – це провід, обмотаний навколо стержня магнітопроводу для створення магнітного поля під дією струму, що протікатиме обмоткою, або для зворотного явища (електромагнітної індукції).

Обмотка, до якої підводиться електрична енергія, називається первинною, а обмотка, від якої відводиться електрична енергія,— вторинною.



Умовне позначення однофазного трансформатора

В основі роботи будь-якого трансформатора лежить явище електромагнітної індукції.

Розглянемо принцип дії трансформатора на прикладі однофазного двообмоткового трансформатора.

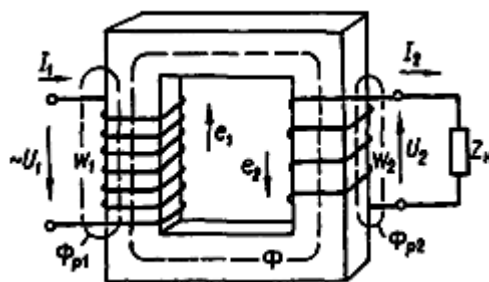


Рис. 1.1 Схема принципу дії однофазного двообмоткового трансформатора

Під час вмикання первинної обмотки трансформатора до мережі змінного струму з напругою U_1 у ній виникає струм I_1 , який збуджує в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ . Замикаючись по магнітопроводу, змінний магнітний потік перетинає витки обмоток та індукує в первинній обмотці (w_1) е.р.с. e_1 , а у вторинній обмотці (w_2) е.р.с. e_2 .

Під час вмикання вторинної обмотки до навантажування е.р.с. e_2 створить у ній струм I_2 .

Отже, у трансформаторі електрична енергія первинного кола з параметрами U_1 , I_1 та частотою f перетворюється в електричну енергію змінного струму з параметрами U_2 , I_2 та частотою f .

В електротехніці та радіотехніці широко використовують трансформатори, які служать для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої. Силкові трансформатори застосовують для живлення анодних кіл радіопристроїв, трансформаторних підстанцій, блоків живлення, живлення транзисторних схем тощо, а сигнальні трансформатори - в підсилювачах низької частоти.

Потужний трансформатор високої напруги - це пристрій, який складається з великої кількості конструктивних елементів, основними з яких є: магнітна система (магнітопровід), обмотки, ізоляція, виводи, бак, охолоджувальний пристрій, механізм регулювання напруги, захисні та вимірювальні пристрої, візок.

У трансформаторах невеликої потужності бак має верхню знімну кришку, тому під час ремонту необхідно зняти цю кришку, а потім підняти активну частину з бака.

Якщо маса активної частини перевищує 25т, вона встановлюється на донну частину бака, а потім накривається дзвоникоподібною верхньою частиною бака і заливається маслом. Такі трансформатори з нижнім рознімним дном не потребують вантажопідйомних пристроїв, щоб вийняти активну частину, тому що після зливання масла верхня частина бака піднімається, відкриваючи доступ до обмотки струму і магнітопроводу. Для зменшення втрат від струмів розсіювання сталі баки екрануються з внутрішньої сторони пакетами з електротехнічної сталі або пластинами з немагнітних матеріалів (мідь, алюміній).

У магнітній системі наявний магнітний потік трансформатора (звідси назва «магнітопровід»). Магнітопровід є конструктивною і механічною основою трансформатора. Слід зазначити, що якість електротехнічної сталі впливає на допустиму магнітну індукцію та втрати в магнітопроводі.

Протягом багатьох років застосовувалася гарячекатана сталь ЭЧ1, ЭЧ2 з товщиною листів 0,5-0,35мм, яка допускає індукцію 1,4—1,45Тл, з питомими втратами 2,5-3,5Вт/кг. Тепер використовують холоднокатану текстуровану сталь марок 3405, 3406, тобто сталь з певною орієнтованістю зерен, яка допускає індукцію до 1,7Тл, з питомими втратами 0,9-1,1Вт/кг. Використання такої сталі дало змогу значно зменшити переріз магнітопроводу за рахунок значної допустимої магнітної індукції, зменшити діаметр витків обмотки, зменшити масу і габарити трансформаторів. Маса трансформаторів на одиницю потужності в 1930 р сягала 3,33т/(МВА), а в теперішній час 0,74т/(МВА).

Зменшення питомих втрат в сталі, ретельна збірка магнітопроводу, використання безшпилевих конструкцій, з'єднання стержнів з ярмом за допомогою косої шихтовки дають змогу зменшити втрати холостого ходу та струм намагнічування трансформатора. В сучасних потужних

трансформаторах струм намагнічування становить 0,5-0,6% від $I_{ном}$ тоді як у трансформаторі з гарячекатаною сталлю струм сягав 3%, втрати холостого ходу зменшалося вдвічі

Листи трансформаторної сталі повинні бути ретельно ізолювані один від одного. Спочатку застосовувалася паперова ізоляція - листи оклеювалися з одного боку тонким шаром спеціального паперу. Хоча папір створює повну електричну ізоляцію між листами, але він легко пошкоджується при складанні та збільшує розміри магнітопроводу. Широко використовують ізоляцію листів лаком з товщиною шару 0,01мм. Лакова плівка створює достатньо міцну ізоляцію між листами, забезпечує добре охолодження магнітопроводу, володіє високою нагрівостійкістю і не пошкоджується під час збирання. Останнім часом все ширше застосовують двостороннє жаростійке покриття листів сталі, яке наноситься на металургійному заводі після прокату. Товщина покриття менше 0,01мм, що забезпечує кращі властивості магнітної системи. Стяжка стержнів здійснюється скло бандажами, ярем - сталевими напівбандажами і бандажами.

Магнітопровід і його конструктивні деталі є основою трансформатора, на якій встановлюють обмотки і кріплять провідники, що з'єднують обмотки з вводами, створюючи активну частину.

Магнітопровід з насадженими на його стержні обмотками - це активна частина трансформатора

Магнітопровід в трансформаторі виконує дві функції по-перше, він утворює магнітне коло, по якому замикається основний магнітний потік трансформатора, а по-друге, є основою для встановлення та кріплення обмотки струму, виводів, перемикачів.

2. Будова і принцип дії зварювальних трансформаторів

Джерела змінного струму широко використовують для ручного дугового зварювання покритими електродами, на автоматах для зварювання під флюсом, для зварювання неплавкими електродами в інертних газах (алюміній та його сплави), у спеціальних установках і при електрошлаковому зварюванні. Джерела змінного струму порівняно дешеві й надійні у роботі.

Зварювальні трансформатори призначені для зниження напруги з 220 або 380 В до безпечної напруги, але достатньої для легкого запалювання та стійкого горіння електричної дуги (не більше 80 В) регулювання сабо зварювального струму залежно від діаметра електродного дроту та товщини зварюваного металу.

Принцип дії трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Він складається з корпусу, в середині якого розміщений магнітопровід 1 (осердя), зібраний з тонких (0,5 мм) лакованих пластин електротехнічної сталі (рис. 2.1) і на якому розміщені первинна 3 та вторинна 2 обмотки. Для підвищення коефіцієнта трансформації в

трансформаторах ТСК використовують батарею конденсаторів 4, яку вмикають паралельно до первинної обмотки.

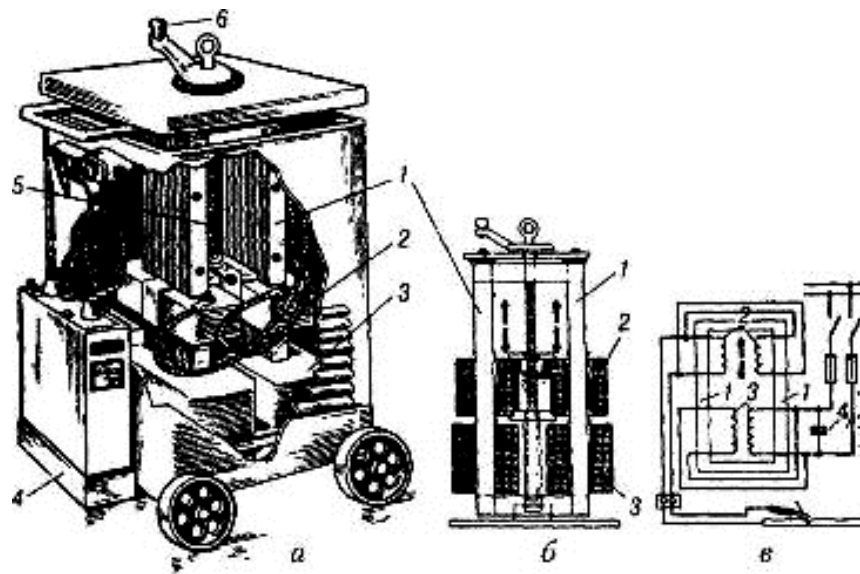


Рис. 2.1. Зварювальний трансформатор:

а — загальний вигляд; б — схема регулювання зварювального струму, в — електрична схема

Якщо по первинній обмотці з більшою кількістю витків пропустити змінний струм (напругою 220 або 380 В), то він буде намагнічувати осердя трансформатора, створюючи в ньому змінний магнітний потік. Впливаючи на вторинну обмотку з меншою кількістю витків цей магнітний потік буде створювати (індукувати) в ній змінний струм меншої напруги але більшої величини. Знижуючи за допомогою трансформатора напругу, у стільки ж разів збільшують струм у вторинному колі, який у 3-6 разів більший первинного.

Котушки первинної обмотки вмикають у мережу змінного струму, а від котушок вторинної обмотки зварювальний струм подається на електрод і виріб. У момент підключення первинної обмотки до електромережі (вторинна обмотка розімкнена) встановлюється режим холостого (неробочого) ходу трансформатора. Напруга вторинної обмотки при холостому ході максимальна; її називають напругою холостого ходу. Відношення напруги первинної обмотки до напруги вторинної при холостому ході називають коефіцієнтом трансформації. Він дорівнює відношенню кількості витків первинної обмотки до кількості витків вторинної. Таким чином у трансформаторах знижується напруга з 220 В або 380 до 60-90 В і їх називають знижувальними. Коли під час запалювання дуги коло вторинної обмотки замикається, то встановлюється режим навантаження.

Зварювальний струм регулюють зміною напруги холостого ходу й опором трансформатора.

Плавне регулювання струму можна забезпечити пересуванням рухомих обмоток струму за допомогою гвинтового механізму 5 (рис. 2.1.) і рукоятки 6, збільшуючи або зменшуючи відстань між первинною або вторинною обмотками. При збільшенні відстані магнітний зв'язок між обмотками зменшується (збільшується індуктивний опір) і, відповідно, зменшується зварювальний струм, а при зменшенні відстані між обмотками — зварювальний струм збільшується. Регулювання струму можна здійснювати за допомогою введення магнітного шунта між обмотками, що збільшить магнітний потік розсіювання і струм зменшиться. Змінюючи розташування шунта забезпечують плавне регулювання зварювального струму. Використовують також і нерухомий магнітний шунт, який підмагнічується обмоткою керування постійного струму. Якщо в цій обмотці струм збільшити, то магнітний опір шунта зросте, магнітний потік розсіювання зменшиться, а зварювальний струм збільшиться.

Змінюючи способи з'єднання обмоток, можна змінювати опір трансформатора ступінчасто. При послідовному з'єднанні первинних і вторинних обмоток опір трансформатора збільшується, а при паралельному з'єднанні первинних і вторинних обмоток загальний опір трансформатора зменшується. Коли використовується одна первинна і одна вторинна обмотки, то опір трансформатора стає рівним індуктивному опору. Таким чином, при зміні з'єднань обмоток, отримують три ступені регулювання, або чотирикратну зміну струму.

Для ручного дугового зварювання використовують трансформатори типу ТД, ТДП, ТСП із рухомими котушками; СТШ, ТДМ — із рухомими магнітними шунтами, а також ТСМ — із намоткою кабелю безпосередньо на кожух трансформатора для регулювання струму. Трансформатори деяких типів оснащують пристроями для зниження напруги холостого ходу із збудником-стабілізатором ВСД і конденсаторами для підвищення коефіцієнта потужності.

Для механізованого зварювання використовують трансформатори типу ТДФ, ТДФЖ із тиристорним регулюванням. Для електрошлакового зварювання застосовують трансформатори типу ГСШ, ТРМК.

ТРАНСФОРМАТОР ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ТДМ-401-1 У2

Зварювальний трансформатор ТДМ-401-1 У2 призначений для живлення одного зварювального поста однофазним змінним струмом частотою 50 Гц при ручному дуговому зварюванні, різанні і плавленні металів. Для підвищення електробезпеки при ручному зварюванні трансформатор має пристрій зниження напруги холостого ходу.

Трансформатор ТДМ-401-1 У2 призначений для роботи у районах помірного клімату на відкритому повітрі під навісом із дотриманням наступних вимог:

висота над рівнем моря не більше 1000 м;
 температура навколишнього середовища от 233 К до 313 К (от -40°C до +40°C);
 відносна вологість повітря не більше 80% при температурі 293 К С+20°C).

Таблиця 1. Технічна характеристика

Параметри	Норма
Номинальний зварювальний струм	400
Номинальна дія навантаження, %	60
Частота, Гц	50
Номинальна напруга мережі, В	220 або 380
Первинний струм розрахунковий, А:	120
При виконанні на 220 В	70
При виконанні на 380 В	
Напруга холостого ходу знижена, В не більше	12
Подібне в діапазоні великих струмів, В не більше	64
Подібне в діапазоні малих струмів, В не більше	80
Номинальна вторинна напруга під навантаженням, В	36
Вторинна напруга під навантаженням в залежності від величини зварювального струму I_2 , В	$20+0,04I_2$
Межі регулювання зварювального струму:	70 – 200
в діапазоні малих струмів, А	200 - 460
в діапазоні великих струмів, А	
Цикл зварювання, хв	5
Коефіцієнт корисної дії, %	84
Ступінь захисту	І Р 22
Маса трансформатора з пристроєм УСНТ-0,6 У2, кг не більше	158
Клас ізоляції	Н
Коди ОКП трансформатора:	34 4185 1123
При виконанні на 220 В 50 Гц код ОКП	
При виконанні на 380 В 50 Гц код ОКП	34 4185 1124

Трансформатор ТДМ-401 1 У2 представляє собою рухому установку в однокорпусному виконанні з природньою вентиляцією, що складається з зварювального трансформатора та обмежувача напруги холостого ходу УСНТ-06 У2 який навішений на кожух.

Трансформатором забезпечується перетворення електричної енергії напруги мережі в електричну енергію, яка потрібна для процесу дугового зварювання.

Режим роботи трансформатора повторно-короткочасний ПК — це відношення дії навантаження до дії цикла зварювання. Дія циклу зварювання дорівнює сумі його періоду й холостого ходу. Залежність допустимих значень ПН від величини зварювального струму показана на рис 2.3.

Під час роботи неможна допускати перевантаження трансформатора.

Кожний трансформатор виконується тільки на одну напругу мережі 220 або 380 В.

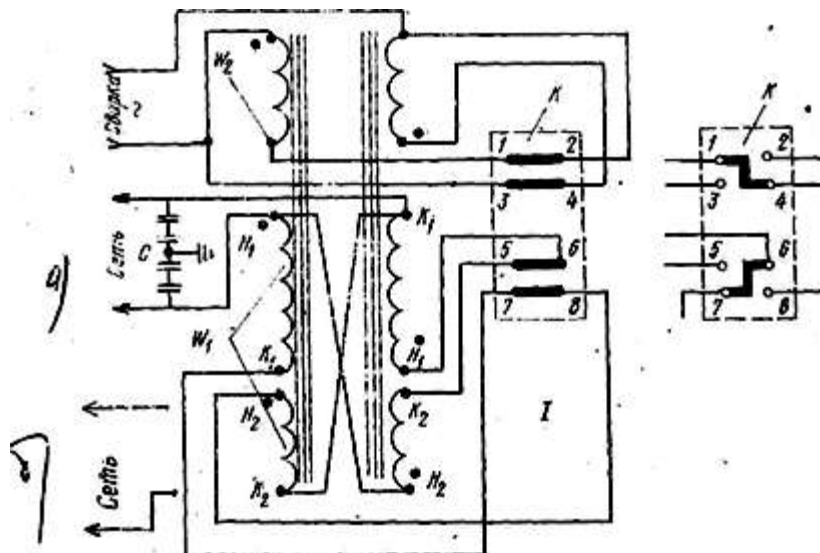


Рис. 2.3. Схема електрична принципова

С - фільтр захисту від радіо пошкоджень (конденсатори КБГ-И; 0,02 мкФ; $U_{роб.}=600$ В); К - перемикач діапазону струмів; W_1 — первинна обмотка, W_2 — обмотка вторинна;

I-з'єднання обмоток паралельне — великі зварювальні струми;

II — з'єднання обмоток послідовне — малі зварювальні струми

а — для трансформаторів на 220 В;

б — для трансформаторів на 380 В

Трансформатор складається з: магнітопровода-осердя, трансформаторних обмоток.

Трансформатор однофазний стержньового типу. Котушки первинної обмотки, нерухомі і закріплені біля нижнього яра. Котушки вторинної обмотки — рухомі.

Для ізоляції котушки застосовується склотканина. Поза зоною вікна котушки є ізоляційні рейки. Котушки вторинної обмотки намотані на «ребро» голої алюмінієвої шиною марки АДО. Витки вторинних котушок ізольовані скляною стрічкою.

Обмотки від осердя магнітопроводу ізольовані пресованими планками.

Обмоткові дані трансформатора наведені у таблиці 2.

Осердя трансформатора набрано з листів електромеханічної стали марки 3413 та виконане без шпилькової конструкції

Таблиця 2

Параметри	Первинна обмотка		Вторинна обмотка
Напруга живлячої мережі (частота 50-Гц), В	220	380	-
Число витків в шарі	2	2	2
Розміри головного проводу, мм	4,0X6,3	2,8X5,3	4,0X25
Марка дроту	АПСД	АПСД	АДО
Кількість паралельних проводів	1	1	1
Перетин витка, мм ²	24,34	14.29	100
Число шарів	8	11	1
Число витків в котушці	90	154	26
Відгалуження	0.72-90	0-126-154	0-26
З'єднання котушок	Паралельне або послідовне		
Опір котушок при паралельному з'єднанні при 293 До (+20° С)	0,0322	0.0935	0,00202
Маса обмотки (комплектів), кг	7,84	8,04	7,46

Через верхнє ярмо осердя трансформатора пропущений ходовий гвинт, який вгвинчується в ходову гайку, вмонтовану в обойму рухомих вторинних котушок. При обертанні ходового гвинта, за допомогою рукоятки, що знаходиться зверху трансформатора, переміщуються вторинні котушки и тим самим змінюється відстань між обмотками. Для виключення вібрації рухомих котушок обойма кріплення котушок обладнана плоскими пружинами, які при переміщенні ковзають по магнітопроводу.

Підключення мережних та зварних проводів до трансформатора відбувається через спеціальні роз'єми, що розміщені з лицьової сторони трансформатора.

Переключення діапазонів струму відбувається перемиканням, рукоятка якого виведена на кришу.

Відлік зварювального струму відбувається по шкалі, що розташована на боковині кожуха. Шкала градуйована для двох діапазонів струмів при номінальній напрузі живлячої мережі та при напрузі $U_2 = 20 + 0,04I_2$ у

вольтах на вихідних зажимах вторинної мережі. Точність показань шкали може у межах $\pm 7,5\%$ від значень максимального струму, що вказаний на шкалі, та являється орієнтовною як величина зварювального струму залежить від нульового. Тому при необхідності більш точної установки величини зварювального струму повинен застосовуватися амперметр.

Кінці шкали обладнані написами «Стоп», що попереджують про кінець ходу рухомих катушок.

Трансформатор обладнаний фільтром для зниження радіопошкоджень, що створює трансформатор при зварюванні. Фільтр складається з конденсаторів, підключених між кожним зажимом первинної обмотки та кожухом.

Для зручності переміщення трансформатор обладнано ручкою, а для підйому є скоби.

Захисний кожух трансформатора кріпиться гвинтами до візка.

Струм регулюється перемикачем обмоток чим досягається два діапазону регулювання струму, та зміною відстані між первинною і вторинною обмотками, що забезпечує плавне регулювання струму всередині кожного діапазону. Велика напруга холостого ходу має місце при здвинутих катушках, меншу — при роздвинутих.

Попарне паралельне з'єднання катушок обмоток дає діапазон більших струмів, а послідовне - діапазон малих струмів. При послідовному з'єднанні невелика частина витків первинної обмотки вимикається, і напруга холостого ходу підвищується. Це добре відбивається на стійкості горіння зварювальної дуги при зварюванні на малих струмах.

3. Підготовка трансформатора до роботи

Перед початком експлуатації новий трансформатор потрібно розконсервувати,

Перед першим пуском нового трансформатора, або перед пуском трансформатора, що довгий час не працював, а також при зміні місця установки трансформатора:

а) очистіть трансформатор від пилу або, продуваючи його стиснутим повітрям, у випадку необхідності підфарбуйте пошкоджені місця, попередньо очистивши від іржі та знежиривши;

б) перевірте мегомметром на 500 В опір ізоляції обмоток трансформатора, який повинен бути не нижче 10 Мом.

г) заземліть трансформатор.

Вмикати трансформатор без заземлення неприпустимо;

д) перевірте стан електричних проводів та контактів;

е) впевнитесь, що кінці робочого кабелю не торкаються один одного; приєднаний електротримач та кінець другого робочого проводу не торкаються одночасно металевих поверхонь;

ж) поставте перемикач діапазонів струмів на необхідний діапазон. Рукоятку перемикача переводить з одного крайнього положення в інше, обов'язково до упору;

з) перевірте відповідність напруги мережі напрузі, вказаній на заводській табличці трансформатора;

и) підключити зварювальний трансформатор до мережі через рубильник та запобіжники.

Рекомендований переріз мідних ізольованих проводів, підключаючи трансформатор до мережі, а також переріз зварних проводів для трансформатора приведений в табл.3,

Орієнтовний вибір зварювального режиму в залежності від товщини зварювального матеріалу відповідному розміру електрода.

4. Ремонт зварювального устаткування

Зварювальне устаткування є переносною апаратурою і тому при неакуратному поводженні при перевезеннях і переміщеннях, особливо на будівельних майданчиках, утворюються вм'ятини металевих оболонок, кришок, козирків, спостерігаються поломка колес, ручок, забоїни, задирки ходового гвинта, знос деталей і пошкодження інших деталей і елементів.

При роботі на повітрі без відповідного захисту від дощу і снігу, без періодичного просушування пристрою ізоляція обмоток і з'єднань відволожується і останні виходять з ладу. Часті і ненадійні підключення до мережі, бруд і пил приводять до підгоряння контактів.

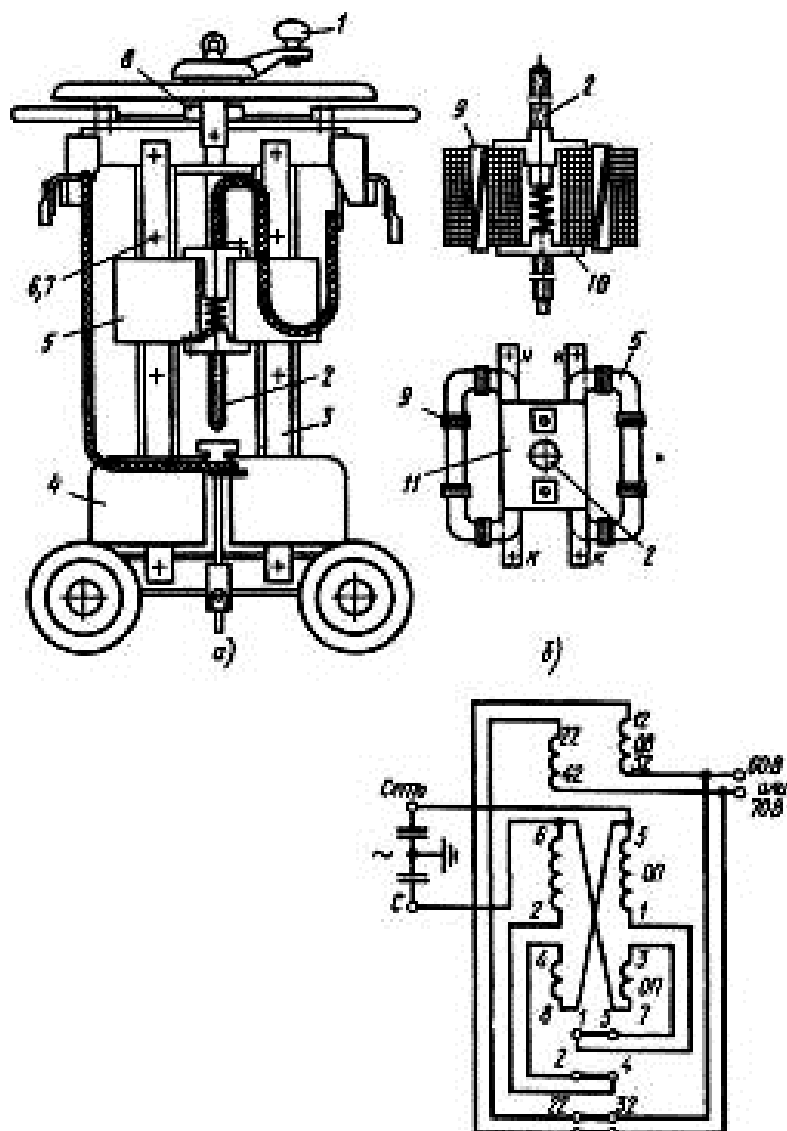


Рис. 4.1. Зварювальний трансформатор ТД-500:

а - загальний вигляд, б - група рухомої котушки, в - схема, ПД - перемикач діапазонів, З - конденсатори (захист від перешкод).

Ремонт зварювального трансформатора ТД-500

Трансформатор, який тривалий час не був у вживанні, а також якщо було змінено місце установки, необхідно очистити від пилу, продувши його сухим стислим повітрям і в доступних місцях протерши чистим, м'яким дрантям. Перевірити мегомметром на 500 В опір ізоляції обмоток, який повинен бути не нижче 1 Мом. У разі зниження опору ізоляції трансформатор слід просушити обдуванням теплого повітря. Перевірити наявність і цілісність заземляючих контактів. Включати трансформатор без заземлення не дозволяється!

Перевірити стан електричних проводів і контактів і у разі потреби підтягнути останні. Перевірити цілісність конденсаторів фільтру захисту від радіоперешкод. Перевірити і у разі потреби очистити контакти і ізоляційні частини перемикача діапазону струму ПД від пилу і нальоту. Контактні поверхні перемикача після очищення змастити мастилом ЦИАТИМ-201. Частини, що все труться, - ходовий гвинт 2, підп'ятники перемикача, поверхні магнітопроводу в місцях ковзання плоских пружин рухомих катушок 5 - кожні 6 місяців слід змащувати тугоплавким універсальним мастилом УТ-1.

Найчастіше при експлуатації ушкоджуються обмотки трансформатора 4 і 5 (первинна ОП, вторинна ОВ). Виткове замикання і пошкодження ізоляції між обмотками і корпусом супроводжуються сильним перегрівом трансформатора, підвищеним гудінням і великою величиною струму холостого ходу. Причиною гудіння трансформатора може бути також ослаблення болтів 6 і 7, що стягують осердя 3, ослаблення гвинтів, що кріплять кожух, порушення кріплення осердя і механізму переміщення катушок. Пошкодження ізоляції в місцях проходження шпильок, порушення ізоляції між листами осердя або порушення контакту в з'єднаннях приводять до місцевих перегрівів.

В більшості випадків для усунення вказаних вище пошкоджень потрібне повне або часткове розбирання трансформатора, яке виконується в такій послідовності: відключити трансформатор від мережі; вивернути гвинти кріплення і зняти рукоятки механізму регулювання і перемикача; вивернути болти кріплення і зняти кожух; зняти перемикач діапазонів струмів; зняти струмо вказівний механізм. Якщо необхідно зняти ходовий гвинт, треба вивернути гвинти, що кріплять траверсу з кутником, що стягує осердя магнітопроводу. Обертаючи рукоятку (тимчасово надітою), вивернути ходовий гвинт 2 з ходової гайки обойми 10 і разом з траверсою 8 вийняти з трансформатора. Щоб зняти катушки обмотки, скріплені бандажами 9, необхідно розібрати верхнє ядро осердя.

При незначних пошкодженнях ізоляцію обмоток відновлюють без знімання катушок з осердя. При значних пошкодженнях, наприклад при вигоранні ізоляції декількох витків, катушки слід виготовити знов, користуючись заводською документацією. Пружини струмопровідних шин, що лопнули, замінюють. Вм'ятини кожуха, зрив різьблення і інші механічні пошкодження усувають.

Збирати трансформатор слід в порядку, зворотному розбиранню. Після збірки трансформатор необхідно випробувати відповідно до ГОСТ 95-77Е. Відсутність пошкоджень і деформацій деталей перевіряють зовнішнім оглядом. Опір ізоляції обмоток на корпусі і між обмотками повинен бути не менше 2,5 Мом. Електричну міцність ізоляції обмоток трансформатора відносно корпусу і між обмотками перевіряють змінним

струмом напругою 2500 В протягом 1 м; міжвиткову ізоляцію перевіряють змінним струмом при частоті 50 Гц протягом 1 м.

Ремонт зварювального перетворювача ПСГ-500-1У3. Перетворювач (Рис.30,а) складається з генератора, асинхронного двигуна і розподільного пристрою з пускорегулюючою і контрольною апаратурою і ходовою частинами.

За допомогою роз'єму 1 (Рис.30,б) асинхронний двигун перетворювача приєднується до мережі змінного струму. Вимикачем 8 двигун 7 включається в роботу. Підстроєним опором 3 встановлюється режим роботи генератора 6. Регульовальним реостатом 10 регулюється зварювальний струм. Від колодки затисків 2 генератори подається живлення до зварювального поста. Вольтметр 9 контролює напругу зварювання.

Перед включенням в роботу оглядають перетворювач з метою виявлення і усунення випадкових пошкоджень; контакти заземлення; болтові з'єднання і струмопровідні частини, які у разі ослаблення підтягують. Колектор генератора повинен бути покритий політурою.

У разі виявлення на колекторі слідів нагару необхідно встановити причину їх виникнення, 8 колектор прошліфувати дрібнозернистою пресованою пемзою або дрібним скляним папером, натягнутим на дерев'яний брусок.

Контрольні запитання:

1. Як поділяють за принципом дії прилади прямої дії для вимірювання струмів і напруг?
 2. Чому виникає методична похибка при вимірюванні струму та напруги?
 3. Опишіть будову та принцип роботи електронних аналогових вольтметрів та амперметрів.
 4. Опишіть будову та принцип роботи цифрових вольтметрів та амперметрів.
- перетворювача?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Базова

1. Кислицын А. Л. Синхронные машины: Учебное пособие по курсу «Электромеханика»./ А.Л. Кислицын – Ульяновск: УлГТУ, 2000.–108 с.
2. Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
3. Кацман М. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие для электротехнических специальностей техникумов./ М.М. Кацман.– М.: ФОРУМ, ИНФРА – М, 2002. – 264 с. – (Серия «Профессиональное образование»).
4. Кацман М.М. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 2002. — 463 с.
5. Правила устройства электроустановок, 7-е издание, Издательство ДЕАН, 2006 г.
6. Справочник электромонтера. В.В. Москаленко. - М.:Академия», 2008. — 368 с.

Допоміжна

1. Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини): Лабораторний практикум з дисципліни «Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини) для студентів спеціальності 6.091901 – «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/Укл.: М.О. Чуєнко, Р.М. ЧуєнкоЮ, А.Г. Кушніренко. – Ніжин, 2009. – 276 с.
2. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
3. Партала О.И. Справочник радиокомпоненты и материалы. - М.,1990. — 416 с.
4. Березкина Т.Ф. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. - М.: Высшая школа, 1998. — 380 с.

Інформаційні ресурси

1. Вольдек А.И. Электрические машины, Учебник для вузов
http://techliter.ru/load/uchebniki_posobya_lekcii/ehlektrotekhnika/ehlektricheskie_mashiny_voldek_a_i_uchebnik_dlja_vuzov/57-1-0-1016
2. Электронный учебник по электрическим машинам
<http://www.studfiles.ru/dir/cat39/subj1378/file15278.html>
3. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов
<http://findknig.com/book.php?id=2439097>
4. Кацман М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу.
http://www.electrolibrary.info/bestbooks/b_uch.htm
5. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. <http://energo.ucoz.ua/load/1-1-0-51>

Рясна Ольга Василівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

конспект лекцій (частина 1)

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

Підписано до друку: ____ 2021 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman Суг
Тираж: 50 примірників Замовлення ____ № ____ Ум. друк. арк. 5,0