

621.3
M13

О.Г. Мазуренко
В.П. Шуліка
О.В. Журавков

Трансформатори та електричні машини

**NOVA KNYHA
PUBLISHERS**

УДК 621.314.21/26(075)

ББК 31.261.8я73

М 13

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. (Лист № 14/18.2-1715 від 16.07.04 р.)

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор,

член-кореспондент НАНУ

В. Ф. Резцов,

доктор технічних наук, професор

Г. Б. Іноземцев

Мазуренко О. Г., Шуліка В. П., Журавков О. В.

М 13 Трансформатори та електричні машини (Електротехніка. Частина 2). Навчальний посібник. – Вінниця: Нова Книга, 2005. – 176 с.

ISBN 966–8609–00–X

Даний посібник є складовою серії з трьох посібників: “Електричні та магнітні кола”, “Трансформатори та електричні машини” і “Електрообладнання та електропостачання підприємств харчової промисловості”. Містить основні теоретичні положення та відомості про будову і експлуатаційні особливості трансформаторів та електричних машин, які використовуються на підприємствах харчової та переробної промисловості.

Призначений не тільки для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів II–IV рівнів акредитації, а також являє певний інтерес для широкого кола спеціалістів в галузі електротехніки.

Національна бібліотека харчових технологій
НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
ІНВ. № 691832

ББК 31.261.8я73

М 13

ISBN 966–8609–00–X

© О. Г. Мазуренко, В. П. Шуліка,
О. В. Журавков, 2005

© Видавництво “Нова Книга”, 2005

ЗМІСТ

Передмова	6
3. ТРАНСФОРМАТОРИ	7
3.1. Будова трансформаторів	8
3.1.1. Магнітна система	8
3.1.2. Електрична система	9
3.1.3. Охолодження трансформаторів	13
3.2. Принцип дії та основні режими роботи трансформаторів	14
3.2.1. Принцип дії трансформатора	14
3.2.2. Режим холостого ходу	16
3.2.3. Робота трансформатора під навантаженням	18
3.3. Коефіцієнт корисної дії та досліди випробовування трансформатора	21
3.3.1. Коефіцієнт корисної дії	21
3.3.2. Дослід холостого ходу	24
3.3.3. Дослід короткого замикання	25
3.4. Трифазні силові трансформатори	26
3.4.1. Особливості трифазних трансформаторів	27
3.4.2. Розмітка затискачів та схеми ввімкнення трифазного трансформатора	31
3.4.3. Паралельна робота силових трансформаторів	36
3.4.4. Приклад розрахунку трифазного трансформатора	38
3.5. Автотрансформатори	41
3.6. Трансформатори для електрозварювання	45
3.7. Вимірювальні трансформатори	47
3.7.1. Трансформатори струму	48
3.7.2. Трансформатори напруги	50
3.8. Питання для самоперевірки за розділом “Трансформатори”	52
4. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	53
4.1. Асинхронні двигуни	54
4.1.1. Будова трифазного асинхронного двигуна	54

4.1.2. Принцип дії трифазного асинхронного двигуна	57
4.1.3. Ковзання та фізичні процеси у трифазному асинхронному двигуні	60
4.1.4. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна	62
4.1.5. Обертальний момент, механічна та робочі характеристики трифазного асинхронного двигуна	65
4.1.6. Паспортні характеристики трифазних асинхронних двигунів	70
4.1.7. Приклад спрощеного розрахунку механічної характеристики асинхронного двигуна	71
4.1.8. Схеми включення, розмітка затискачів статорних обмоток та реверс ротора трифазного асинхронного двигуна	74
4.1.9. Пуск трифазних асинхронних двигунів	76
4.1.9.1. Пуск двигуна з короткозамкненим ротором	76
4.1.9.2. Пуск двигуна з фазним ротором	80
4.1.10. Регулювання частоти обертання ротора трифазних асинхронних двигунів	82
4.1.10.1. Частотне регулювання	82
4.1.10.2. Поліусне регулювання	84
4.1.10.3. Регулювання частоти обертання фазного ротора	86
4.1.11. Гальмування асинхронного двигуна	87
4.1.12. Покращення коефіцієнта потужності мережі живлення трифазних асинхронних двигунів	88
4.1.13. Однофазний асинхронний двигун та схеми живлення трифазних асинхронних двигунів від джерела однофазного змінного струму	92
4.1.14. Загальні відомості про спеціалізовані асинхронні машини	95
4.1.15. Питання для самоперевірки за розділом “Асинхронні двигуни”	100
4.2. Синхронні машини	101
4.2.1. Будова трифазної синхронної машини	102
4.2.2. Принцип дії і робочі характеристики синхронного генератора	104
4.2.3. Паралельна робота синхронних генераторів	108

4.2.4. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії синхронного генератора	112
4.2.5. Принцип дії синхронного двигуна	114
4.2.6. Робота синхронного двигуна при сталій потужності	118
4.2.7. Робочі характеристики синхронного двигуна	120
4.2.8. Порівняння синхронних та асинхронних двигунів	123
4.2.9. Загальні відомості про спеціалізовані синхронні машини ...	124
4.2.10. Питання для самоперевірки за розділом “Синхронні машини”	127
4.3. Машини постійного струму	127
4.3.1. Будова машини постійного струму	128
4.3.2. Класифікація машин постійного струму за способом збудження	132
4.3.3. Принцип дії та фізичні процеси в машинах постійного струму	134
4.3.3.1. Електрорушійна сила якоря, робота і призначення колектора машини	134
4.3.3.2. Принцип дії генератора постійного струму	140
4.3.3.3. Принцип дії двигуна постійного струму	142
4.3.3.4. Реакція якоря, призначення додаткових полюсів машини	143
4.3.4. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії машини постійного струму	144
4.3.5. Генератори постійного струму	146
4.3.5.1. Характеристики генераторів постійного струму	146
4.3.5.2. Паралельна робота генераторів	152
4.3.6. Двигуни постійного струму	154
4.3.6.1. Спільні властивості двигунів постійного струму	154
4.3.6.2. Характеристики двигунів постійного струму	160
4.3.7. Загальні відомості про колекторні двигуни змінного струму та універсальні двигуни	164
4.3.8. Радіоперешкоди від колекторних машин та способи їх усунення	166
4.3.9. Питання для самоперевірки за розділом “Машини постійного струму”	167
Література	169

ПЕРЕДМОВА

Електротехніка – це наука про використання електричних та магнітних явищ для практичних цілей. Серед прикладних наук електротехніка є однією з наймолодших. Її історія почалась у XIX столітті, коли бурхливий розвиток промисловості примусив інженерів вирішувати ряд проблем, перед якими були безсилі існуючі на той час науки.

Сучасна електротехніка вимагає організації промислового життя як єдиного цілого. Впровадження електротехніки завжди несе з собою економію енергії, площ, зменшення вартості продукції і найголовніше – розвантажує людину фізично і психологічно. Для керування електрифікованим обладнанням потрібно менше людських сил, але потрібні знання, досвід і увага. Завжди потрібно пам'ятати, що керування тисячами кіловат – функція занадто відповідальна, і найменший допущений при цьому промах може спрямувати потік електричної енергії на шлях важких руйнувань. Тому сучасний інженер, навіть не електрик, обов'язково повинен добре знати основні закони електротехніки, будову та експлуатаційні особливості електротехнічного обладнання. Його час, витрачений на вивчення цієї науки, ніколи не буде даремним.

Вивчення розділів “Трансформатори” та “Електричні машини” є невід'ємною частиною загальної електротехнічної підготовки фахівців будь-якої з інженерно-технічних спеціальностей. Даний навчальний посібник є ланкою, що пов'язує посібник “Електричні та магнітні кола” (“Електротехніка”, частина 1) з посібником “Електрообладнання та електропостачання переробних підприємств” (“Електротехніка”, частина 3). Він складений у відповідності з робочими програмами підготовки фахівців неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів II–IV рівнів акредитації.

3. ТРАНСФОРМАТОРИ

Можливість передачі електричної енергії від однієї обмотки до іншої взаємоіндукцією, тобто через магнітне поле, була відкрита Фарадеєм у 1831 році, а у 1876 році був виготовлений перший трансформатор.

Трансформатором називають статичний електромагнітний апарат, призначений для зміни (трансформації) параметрів змінного струму – напруги і сили струму – без зміни їх частоти.

У наш час трансформатори використовують:

1. Для трансформації напруги в системах передачі і розподілу електричної енергії. Так, враховуючи те, що на електричних станціях електричну енергію виробляють з напругою 6–30 кВ, передають її на велику відстань при напрузі 330–1150 кВ, а основні приймачі споживають енергію при напрузі 220–660 В, виходить, що на шляху від виробника до споживача електрична енергія 3–5 разів піддається перетворенню у трансформаторах.

2. Для забезпечення потрібної схеми вмикання, а також для узгодження напруг на вході та виході напівпровідникових перетворювачів та пристроїв. Наприклад, у пристроях, які перетворюють змінний струм у постійний (випрямлячі), чи навпаки, з постійного у змінний (інвертори), відношення напруг на вході і виході пристрою залежить від схеми вмикання вентилів. При цьому, якщо на вхід таких пристроїв підводиться стандартна напруга, то на їх виході отримують нестандартну напругу. Тому для забезпечення стандартних значень напруг на вході і виході вентильних перетворювачів у їх конструкцію додають спеціальні трансформатори. Потужність таких трансформаторів може сягати тисяч кВА.

3. Для здійснення різноманітних електротехнологічних процесів – електрозварювання (зварювальні трансформатори), живлення електротермічних установок (пічні трансформатори) і таке інше. Потужність таких трансформаторів сягає десятків тисяч кВА при напрузі до 10 кВ.

4. Для живлення радіо- та телевізійної апаратури. Тут використовують, як правило, малопотужні трансформатори.

5. Для вмикання електровимірювальних приладів в електричні кола високої напруги або в кола з великими струмами використовують так звані вимірювальні трансформатори.

Трансформатори, які використовують для цілей, вказаних у п. 1–3 і частково в п. 4, називають силовими. Силові трансформатори, що виготовляються вітчизняними підприємствами, поділяють на 8 груп (габаритів). Наприклад: потужністю до 100 кВА включно – 1-й габарит; від 100 до 630 кВА – другий габарит; до 6300 кВА – третій габарит і так далі.

3.1. Будова трансформатора

З курсу фізики відомо, що найпростіший трансформатор складається з сталюого осердя, на якому розташовані дві обмотки. Узагальнено можна сказати, що трансформатор складається з магнітної і електричної систем. Окрім цього, для відводу теплоти потужні силові трансформатори мають спеціальну систему охолодження.

3.1.1. Магнітна система трансформатора

За конфігурацією магнітопроводу (осердя) трансформатори (рис.3.1) поділяють на стержневі, броньові та тороподібні.

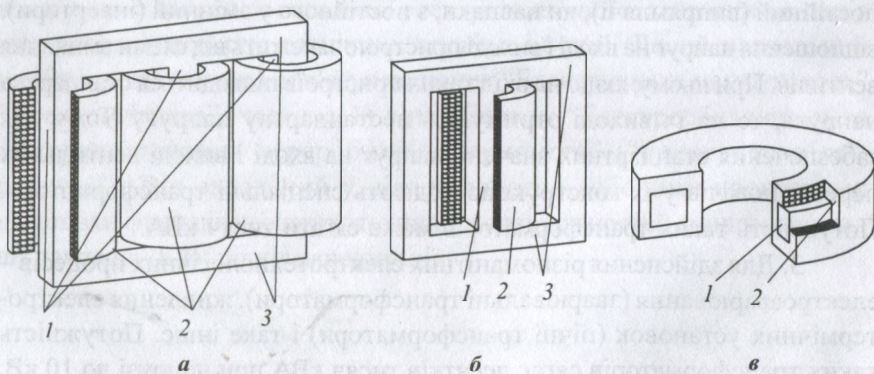


Рис. 3.1. Стержневий (а), броньовий (б), тороїдальний (в) трансформатори: 1 – стержень, 2 – обмотка, 3 – ярмо.

Частину осердя, де розташовані обмотки, називають стержнем; де обмоток немає – ярмом. Зауважимо, що у багатофазних трансформаторів ярма мають значно більший переріз, ніж стержні.

Стержневі трансформатори – це, як правило, апарати середньої та великої потужності. Вони мають кращі умови охолодження і меншу масу, ніж броньові. Броньові трансформатори – це в основному малопотужні апарати. Тороподібне осердя мають, як правило, спеціальні малопотужні апарати, наприклад, вимірювальні трансформатори.

При потужностях більше ніж 100 МВА на фазу використовують броньостержневі трансформатори. У цих апаратів крайні стержні осердя мають бокові ярма. У порівнянні зі стержневими трансформаторами така конструкція магнітопроводу дає змогу зменшити переріз верхнього та нижнього ярма, тобто висоту апарата.

Ще є багатостержневі трансформатори. Це найпотужніші апарати. Тут, щоб зменшити переріз верхнього і нижнього ярма, потужність кожної фази поділяють між двома або трьома різними стержнями, тобто обмотки кожної фази розміщують на двох або трьох стержнях, які включені у магнітному відношенні паралельно.

Щоб зменшити втрати від вихрових струмів, осердя трансформаторів набирають із пластин електротехнічної сталі товщиною 0,28–0,5 мм, електроізолюваних окалиною. За формою пластини можуть бути прямокутні або зі зрізаними кутами, а також у вигляді *Г*, *П*, *Т*, *Ш*, *О*-подібних штампованих елементів. За способом складання пластин розрізняють стикові та шихтовані магнітопроводи.

У стикових магнітопроводах стержні і ярма складають і скріплюють окремо. Потім їх встановлюють “в стик” і з’єднують між собою через ізоляційну прокладку. Виконані за такою технологією магнітопроводи мають відносно великий опір і тому її застосовують тільки при виготовленні осердь малопотужних трансформаторів.

Апарати середньої та великої потужностей мають виключно шихтовані магнітопроводи. Тут для зменшення опору магнітної системи ярма та стержні збирають в єдину конструкцію з взаємним перепльотом у місцях стику.

3.1.2. Електрична система трансформатора

Обмотку трансформатора, до якої підводиться електрична енергія (її підключають до джерела змінного струму), називають первинною.

Обмотку, від якої відводиться електрична енергія (до неї підключають споживач), називають вторинною.

Як бачимо, тут є подвійність. З одного боку, оскільки первинну обмотку підключають до джерела електричної енергії, трансформатор є споживачем, з іншого – до вторинної обмотки підключають споживач, і отже, трансформатор можна розглядати як джерело електричної енергії.

Вимірювати потужність трансформатора у Вт (кВт), як споживача, не можна, оскільки її величина залежить від характеру навантаження ($\cos\phi$), вторинної обмотки. Тому потужність трансформаторів, як і всіх інших джерел електричної енергії, вимірюють у ВА (кВА).

Потрібно зазначити, що оскільки один і той же трансформатор можна використовувати як для підвищення (підвищуючий трансформатор) так і для зменшення (понижуючий трансформатор) напруги змінного струму, то поділ його обмоток на первинну і вторинну є умовним. Більш об'єктивним є поділ на обмотку високої напруги (обмотка ВН) і обмотку низької напруги (обмотка НН). У понижуючого трансформатора обмотка ВН є первинною, а НН – вторинною. У підвищуючого трансформатора, навпаки, обмотка НН є первинною, а ВН – вторинною.

Державним стандартом передбачено початки обмоток ВН позначати прописними літерами латинського алфавіту A, B, C , а їх кінці відповідно X, Y, Z . Всі величини, які мають відношення до обмоток ВН, виділяти індексом 1. Наприклад: напруга U_1 , сила струму I_1 , електрорушійна сила E_1 , кількість витків W_1 обмотки ВН. Початки та кінці обмоток НН позначають відповідними малими літерами латинського алфавіту – a, b, c , та x, y, z . Всі величини, які мають відношення до обмотки НН, виділяють індексом 2. Наприклад: напруга U_2 , сила струму I_2 , електрорушійна сила E_2 , кількість витків W_2 обмотки НН.

Для того щоб був кращий магнітний зв'язок між обмотками трансформатора, обмотки ВН і НН однієї фази повинні бути розташовані як можна ближче одна до одної. Тому в сучасних трансформаторах їх розташовують на одному стержні концентрично – одна поверх другої. Причому, в зв'язку з меншими вимогами до низьковольтної ізоляції, ближче до магнітопроводу розташовують обмотку НН, а поверх неї намотують обмотку ВН.

Для зміни напруги в межах $\pm 5\% U_{\text{н}}$ обмотка ВН може мати кілька виводів. Так, на рис. 3.2 показані два трансформатори, один з яких – Т1 розташований на початку, а другий – Т2 – в кінці лінії електропередачі (ЛЕП). Внаслідок спаду напруги в ЛЕП напруга первинної обмотки

трансформатора T2 може бути нижче номінальної, і, отже, значення вторинної напруги цього трансформатора не буде відповідати стандарту.

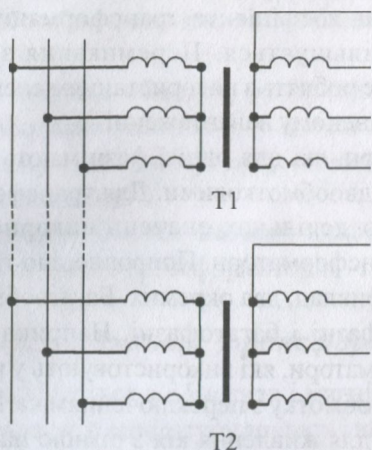


Рис. 3.2. Схема розташування трансформаторів в лінії електропередачі.

За таких умов виникає необхідність підвищення напруги трансформатора T2 до стандартного значення. Для цього на обмотці ВН роблять відгалуження, як показано на рис. 3.3.

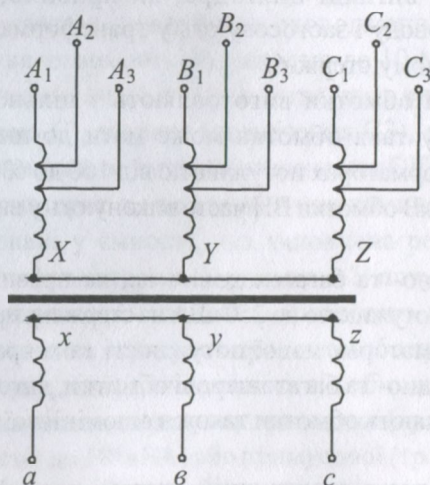


Рис. 3.3. Відгалуження обмоток трансформатора.

Відгалуження A_2, B_2, C_2 відповідає номінальній напрузі обмотки ВН. Якщо фактичне значення U_1 менше за $U_{1н}$, то для підключення трансформатора до лінії використовують затискачі A_3, B_3, C_3 . При цьому, внаслідок зменшення коефіцієнта трансформації, вторинна напруга трансформатора збільшується. Перемикання з затискачів одного відгалуження на інше роблять з використанням спеціального пристрою, як правило, при вимкненому навантаженні.

Трансформатори, які для однієї фази мають одну ВН і одну НН обмотки, називають двообмотковими. Для трансформування напруги з одного значення до декількох значень використовують так звані багатообмоткові трансформатори. Природно, що такий трансформатор дешевший, ніж, наприклад, два окремих. Багатообмоткові трансформатори бувають однофазні і багатофазні. Наприклад, багатообмоткові однофазні трансформатори, які використовують у радіотехніці, можуть мати одну первинну обмотку з переключенням на 127 або 220 В і кілька вторинних обмоток для живлення кіл з різною напругою. Потужність таких трансформаторів зазвичай не перевищує 100 ВА.

На електричних підстанціях потужністю 5600–60000 кВА для трансформації напруги з 10,5 кВ до 121 і 38,5 кВ використовують триобмоткові трифазні трансформатори.

За технікою виконання обмотки поділяють на циліндричні, безперервні та гвинтові.

Обмотки у вигляді циліндра, як правило, виготовляють з прямокутного проводу і застосовують у трансформаторах потужністю до 250 кВА на одному стержні.

Безперервні обмотки виготовляють з цільного, без розривів, проводу, причому така обмотка може мати до шести паралельних виводів. В трансформаторах потужністю від 160 до 630 кВА на стержень при напрузі 3–320 кВ обмотки ВН часто виконують у вигляді безперервної спіралі.

Гвинтові одно- та багатоходові – це, як правило, обмотки НН у трансформаторах потужністю до 250 кВА на стержень при напрузі до 15 кВ.

У трансформаторах малої потужності та мікротрансформаторах використовують одно- та багатошарові обмотки, виготовлені з круглого проводу. Виготовляють обмотки також з алюмінієвої фольги товщиною 30–40 мкм.

Важливе місце в електричній системі трансформатора посідає електроізоляція. Її поділяють на головну – це ізоляція обмоток НН від

магнітопроводу, а також ізоляція між обмотками НН і ВН; та поздовжню – це ізоляція між витками і шарами обмоток.

У якості головної ізоляції використовують жорсткі паперово-бакелітові циліндри або м'які циліндри, виготовлені з електроізоляційного картону.

Ізоляцію між шарами обмоток, як правило, забезпечують кабельним папером або лакотканиною. У якості міжвиткової ізоляції використовують власну ізоляцію проводу обмотки – лак, епоксидний компаунд, емаль, лакотканину.

Для виводу кінців обмоток назовні використовують прохідні фарфорові, а у малопотужних трансформаторів – полімерні ізолятори.

3.1.3. Охолодження трансформаторів

Теплота, яка виділяється в обмотках і магнітопроводі при роботі трансформатора, підвищує температуру апарата і викликає старіння його електроізоляції. Допустима температура, до якої можуть нагріватися обмотки і магнітопровід трансформатора, залежать від призначення, умов використання, конструктивного виконання апарата, виду застосованої електроізоляції і ряду інших факторів. Зазвичай, вона складає до 105 °С для обмоток і до 110 °С для магнітопроводу.

В силових трансформаторах для відводу теплоти застосовують повітряне або масляне охолодження.

Трансформатори з повітряним охолодженням, так звані сухі трансформатори, виготовляють потужністю до 10 МВА і напругою до 35 кВ. Конструктивно вони можуть мати таке виконання: відкрите (позначають буквою С), закрите (позначення С3), герметичне (позначення С2) та з примусовим дуттям (позначення СД).

У трансформаторах з масляним охолодженням магнітопровід і обмотки розташовані у ємності, яка заповнена ретельно очищеним мінеральним (трансформаторним) мастилом. У потужних трансформаторів ця ємність має розвинену зовнішню поверхню, відведення теплоти з якої може здійснюватися за рахунок природної або примусової конвекції повітря. В свою чергу, відведення теплоти від обмоток і магнітопроводу також може здійснюватися за рахунок природної (трансформатори типу М та МВ потужністю до 10⁴ кВА) або примусової (трансформатори типу МЦ) циркуляції мастила. При температурі оточуючого повітря до 35 °С температура мастила зазвичай складає до 95 °С.

3.2. Принцип дії та основні режими роботи трансформатора

Принцип дії і електромагнітні процеси, що відбуваються у трансформаторах, розглянемо на прикладі однофазного апарата, оскільки його основні режими роботи і електричні співвідношення можна вважати характерними для всіх видів трансформаторів.

Основними режимами роботи трансформатора вважаються: режим холостого ходу, режим роботи під навантаженням і режим короткого замикання. Останній – це аварійний режим. Його зазвичай розглядають при вивченні спеціальних курсів. Тому у цьому розділі ми обмежимося розглядом перших двох, найбільш поширених режимів роботи апарата.

3.2.1. Принцип дії трансформатора

Змінна напруга U_1 , що прикладена до затисків первинної обмотки трансформатора (рис. 3.4), створює в цій обмотці змінний струм I_1 .

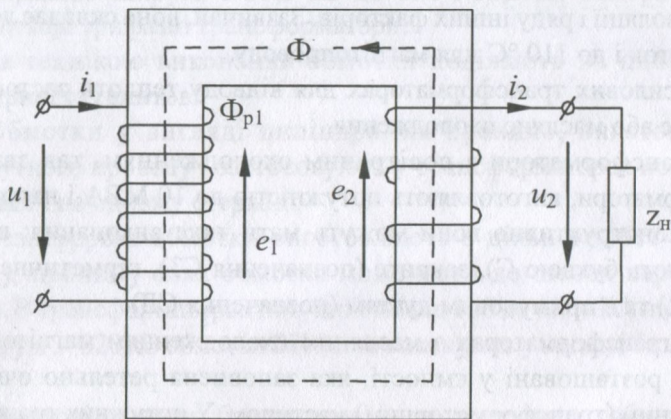


Рис. 3.4. Однофазний трансформатор.

Подібно до котушки зі сталевим осердям, цей струм збуджує в осерді трансформатора магнітний потік Φ .

Якщо U_1 і I_1 синусоїдні, то, нехтуючи насиченням магнітопроводу, можна вважати, що потік Φ також буде змінюватися за синусоїдним законом:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

Цей потік наводить у обмотках трансформатора синусоїдні ЕРС:

$$e_1 = -W_1 d\Phi / dt = \omega \Phi_m W_1 \sin(\omega t - \pi/2)$$

$$e_2 = -W_2 d\Phi / dt = \omega \Phi_m W_2 \sin(\omega t - \pi/2)$$

Оскільки $\omega \Phi_m = E_m$, то після здійснення переходу від амплітудних значень до діючих –

$$E_m / \sqrt{2} = \omega \Phi_m / \sqrt{2} = 2\pi f \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 f \Phi_m,$$

рівняння трансформаторних ЕРС будуть мати вигляд:

$$E_1 = 4,44 W_1 f \Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_m.$$

При замиканні вторинної обмотки трансформатора на навантаження z_n в обмотках будуть діяти синусоїдні струми I_1 та I_2 . При цьому навантаження буде знаходитися під напругою U_2 , значення якої визнається величиною ЕРС E_2 .

Трансформатор, у якого $W_1 > W_2$ і, отже, $E_1 > E_2$ та $U_1 > U_2$, називають понижуючим. Трансформатор, у якого $W_1 < W_2$ і відповідно $E_1 < E_2$ та $U_1 < U_2$, називають підвищуючим.

Відношення E_1 до E_2 або W_1 до W_2 називають коефіцієнтом трансформації:

$$k = E_1 / E_2 = W_1 / W_2.$$

На практиці приблизне значення коефіцієнта трансформації розраховують за показами вольтметрів, приєднаних до затискачів обмоток ВН та НН при роботі трансформатора в режимі холостого ходу:

$$k \approx U_1 / U_{20}.$$

Напруги обмоток, виміряні у режимі холостого ходу, вказують у паспорті трансформатора як номінальні $U_1 = U_{1н}$, $U_{20} = U_{2н}$. Тут же у

паспорті апарата вказують номінальні струми обмоток ($I_{1н}$ та $I_{2н}$), визначені як відношення його номінальної потужності S_n (потужності вторинної обмотки) до відповідних номінальних напруг:

$$I_{1н} = S_n / U_{1н},$$

$$I_{2н} = S_n / U_{2н}.$$

Зазначимо, що при обчисленні коефіцієнта трансформації як понижуючого, так і підвищуючого трансформаторів у чисельник ставлять параметр ВН обмотки. Тобто, коефіцієнт трансформації силового трансформатора завжди більший від 1.

3.2.2. Режим холостого ходу

Холостим ходом називають режим роботи трансформатора, коли до його первинної обмотки підведена синусоїдна напруга $U_1 = U_{1н}$, а вторинна обмотка розімкнена $U_{20} = U_{2н}$ (рис. 3.5).

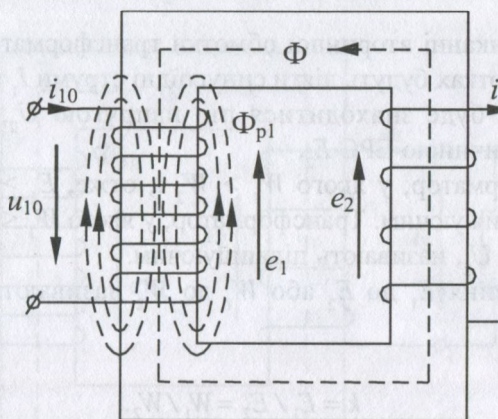


Рис. 3.5. Магнітні потоки трансформатора в режимі холостого ходу.

Таким чином, в режимі холостого ходу у первинній обмотці діє синусоїдний струм I_{10} , а струм у вторинній обмотці, оскільки вона розімкнена, –

$$I_{20} = 0.$$

Струм I_{10} своєю намагнічуючою силою

$$F = I_{10} W_1$$

збуджує синусоїдний магнітний потік Φ . Більша частина силових ліній цього потоку замикається в осерді трансформатора, а менша, $\Phi_{1p} < 0,1\Phi$ – через повітря. Частина потоку, що діє в осерді трансформатора, називають основним, чи головним потоком, а потік, що замикається через повітря, – потоком розсіювання. Відмітимо, що потік Φ перетинає витки первинної і вторинної обмоток апарата, в той час як Φ_{1p} перетинає витки тільки первинної обмотки.

Як вказувалося раніше, синусоїдний потік Φ індукуює у первинній і вторинній обмотках трансформатора синусоїдні ЕРС e_1 та e_2 . У свою чергу, потік Φ_{1p} індукуює у первинній обмотці апарата ЕРС розсіювання e_{1p} .

Якщо вважати, що струм I_{10} в первинній обмотці з опором r_1 визначається сумісною дією миттєвих значень напруги U_1 , ЕРС E_1 та E_{1p} , то його значення в символічній формі запису згідно закону Ома буде:

$$\dot{I}_{10} = (\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1p}) / r_1.$$

Після підстановки –

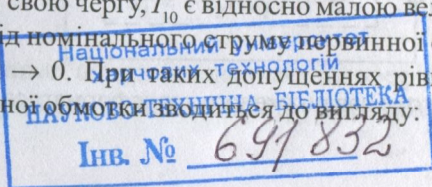
$$-\dot{E}_{1p} = \dot{I} j x_1,$$

де x_1 – індуктивний опір первинної обмотки, і виконання перетворень одержимо рівняння електричної рівноваги первинної обмотки трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} (r_1 + j x_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} \underline{Z}_{11}.$$

Зазначимо, що сучасні силові трансформатори проектують таким чином, щоб при роботі під навантаженням спад напруги за рахунок внутрішнього опору первинної обмотки був мінімальним: $I_{10} z_{11} = (0,02 \dots 0,03) U_1$, тобто z_{11} зводять до \min .

Оскільки, у свою чергу, I_{10} є відносно малою величиною і зазвичай складає 3–10 % від номінального струму первинної обмотки, то можна вважати, що $I_{10} z_{11} \rightarrow 0$. При таких допущеннях рівняння електричної рівноваги первинної обмотки зводиться до вигляду:



$$U_1 \approx E_1 = 4,44W_1f\Phi_m.$$

З результатів аналізу цього рівняння випливає, що при незмінній напрузі мережі $U_1 = const$, при будь-якому навантаженні на вторинну обмотку, ЕРС первинної обмотки і магнітний потік (його амплітуда) в осерді трансформатора будуть:

$$E_1 = const,$$

$$\Phi_m = U_1 / (4,44W_1f) = const.$$

Оскільки I_{10} створює в осерді трансформатора магнітний потік, величина якого не залежить від навантаження апарата, то струм холостого ходу часто називають струмом намагнічування.

З викладеного випливає, що оскільки при роботі трансформатора в режимі холостого ходу $E_1 \approx U_1$, а в силу того, що $I_{20} = 0$, і, отже, $E_2 \approx U_{20}$, значення коефіцієнта трансформації апарата можна розрахувати так:

$$k \approx U_1 / U_{20}.$$

3.2.3. Робота трансформатора під навантаженням

В робочому стані (рис. 3.6), коли первинна обмотка трансформатора

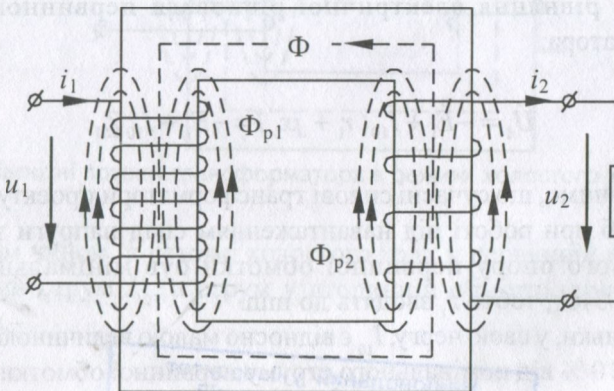


Рис. 3.6. Магнітні потоки навантаженого трансформатора.

підключена до джерела з синусоїдною напругою $U_{1н}$, а до його вторинної обмотки підключено навантаження $Z_{н}$, у вторинній обмотці апарата буде діяти синусоїдний струм I_2 . При цьому спад напруги на навантаженні – напруга вторинної обмотки – буде:

$$\dot{U}_2 = \underline{Z}_{н} \dot{I}_2.$$

Струм $I_{2н}$ своєю намагнічуючою силою

$$\dot{F}_2 = \dot{I}_{2н} W_2.$$

збуджує магнітний потік Φ_2 , силові лінії якого замикаються в осерді, і потік розсіювання $\Phi_{2р}$, силові лінії якого замикаються через повітря.

Потік Φ_2 спрямований назустріч основному потоку Φ і намагається його послабити, причому чим більший I_2 , тим більша розмагнічуюча дія Φ_2 . Але ж у разі зменшення Φ повинна зменшуватися E_1 і, отже, $U_{1н}$, тобто, як було показано вище – повинні зменшувати свої значення сталі величини. У підсумку, для виконання умови $\Phi = const$, щоб компенсувати дію F_2 , збільшується I_1 , і, як наслідок, збільшується $F_1 = I_1 W_1$.

Враховуючи, що струми в обмотках трансформатора і магнітні потоки, які створюють ці струми, є комплексними величинами, рівняння рівноваги магніторухливих сил трансформатора має вигляд:

$$\dot{F} = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{10} W_1 = const.$$

Таким чином, збільшення струму у вторинній обмотці трансформатора супроводжується збільшенням струму у його первинній обмотці.

Запишемо рівняння намагнічуючих сил трансформатора у вигляді:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 (W_2 / W_1),$$

і, враховуючи мале значення струму холостого ходу, одержимо:

$$\dot{I}_1 \approx -\dot{I}_2 (W_2 / W_1).$$

Звідси випливає, що приблизне значення коефіцієнта трансформації можна розраховувати як відношення струмів в обмотках апарата:

$$k = W_1 / W_2 \approx I_2 / I_1.$$

Зауважимо, що при розрахунку k за струмами апарату більший за значенням струм (параметр обмотки НН) знаходиться у чисельнику дробу, а менший (струм обмотки ВН) – у знаменнику. Далі покажемо, що цю обставину використовують у вимірювальних трансформаторах струму.

Нагадаємо, що у навантаженому трансформаторі струм I_2 створює потоки Φ_2 і Φ_{2p} , які індукують у вторинній обмотці E_2 і ЕРС розсіяння E_{2p} . Таким чином, струм у вторинній обмотці, яка замкнена на опір Z_n , згідно закону Ома буде:

$$\dot{I}_2 = (\dot{E}_2 + \dot{E}_{2p}) / (r_2 + Z_n),$$

де r_2 – активний опір вторинної обмотки.

Звідси, враховуючи, що

$$\dot{E}_{2p} = -\dot{I}_2 jx_2,$$

де x_2 – реактивний опір вторинної обмотки після підстановки і перетворення, одержимо рівняння електричної рівноваги вторинної обмотки трансформатора:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_n.$$

З результатів аналізу рівняння випливає, що при незмінному значенні ЕРС вторинної обмотки, вторинна напруга трансформатора є функцією струму навантаження. Залежність U_2 від I_2 при $\cos\varphi_2 = const$ має назву – *зовнішня характеристика трансформатора*. Її якісний вигляд показано на рис. 3.7. Зазначимо, що зовнішню характеристику трансформатора часто показують як залежність вторинної напруги від коефіцієнта завантаження $\beta = S_2 / S_{2н}$ апарата.

Як бачимо, в режимі холостого ходу напруга на вторинній обмотці трансформатора максимальна. Зі збільшенням активного ($\cos\varphi_2 = 1$) або активно-індуктивного ($\cos\varphi_2 > 0$) навантаження напруга на вторинній обмотці трансформатора зменшується і при $I_2 = I_{2н}$ досягає номінального значення напруги навантаження $U_2 = U_{2н}$. При виключно ємнісному ($\cos\varphi_2 < 0$) навантаженні, що на практиці буває надзвичайно рідко, зі збільшенням I_2 напруга на вторинній обмотці зростає.

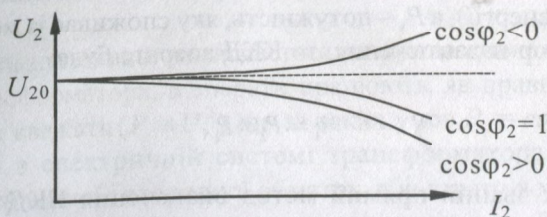


Рис. 3.7. Зовнішня характеристика трансформатора.

В сучасних трансформаторах відносна зміна напруги вторинної обмотки

$$\Delta U \% = 100(U_{20} - U_2) / U_{20}$$

при $I_2 = I_{2н}$ і $\cos \varphi_2 = 1$ звичайно складає 2–5 %.

3.3. Коефіцієнт корисної дії та випробовування трансформатора

3.3.1. Коефіцієнт корисної дії

Принципово, коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора, як і будь-якого іншого електричного апарата, може бути визначений за показами двох ватметрів (рис. 3.8).

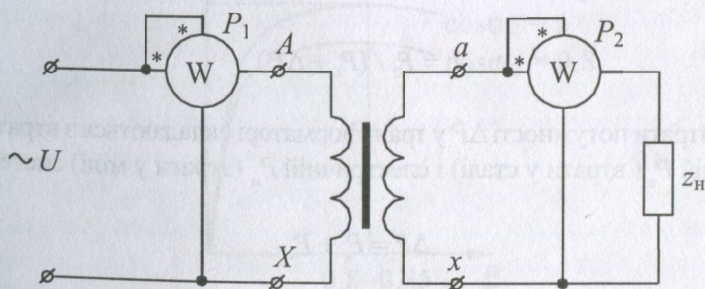


Рис. 3.8. Схема визначення коефіцієнта корисної дії трансформатора прямим методом.

Оскільки P_2 – активна потужність навантаження (споживача електричної енергії), а P_1 – потужність, яку споживає із мережі система трансформатор-навантаження, то ККД апарата буде:

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Це так званий прямий метод визначення ККД електричних апаратів. Він простий у реалізації, але не завжди може бути використаний. Покажемо перешкоди, які мають місце при визначенні ККД потужних силових трансформаторів прямим методом.

Перша з них полягає у створенні потрібного навантаження. Так, на практиці номінальна потужність трансформатора, від якого здійснюється живлення споживачів, наприклад, цеху (підприємства), з урахуванням подальшого збільшення числа споживачів, є завищеною. За таких умов випробовувати, як працює трансформатор при номінальному навантаженні та при перевантаженні, або просто неможливо, або дорого.

По-друге, на підприємствах, як правило, виникають труднощі, пов'язані з класом точності вимірювальних приладів, необхідних для реалізації прямого методу визначення ККД потужного трансформатора.

Так, сучасні потужні трансформатори мають ККД близько 98%. При застосуванні для випробовування таких апаратів широко розповсюджених у промисловості приладів з класом точності гірших за 0,5, у підсумку можна отримати, що ККД апарата, наприклад, більше ніж 100%.

На практиці для визначення ККД потужних електромагнітних пристроїв звичайно застосовують побічні методи випробовування.

Запишемо рівняння визначення ККД трансформатора так:

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P).$$

Втрати потужності ΔP у трансформаторі складаються з втрат у його магнітній P_c (втрати у сталі) і електричній P_m (втрати у міді) системах –

$$\Delta P = P_c + P_m.$$

Втрати у магнітопроводі, або так звані втрати у сталі, у свою чергу, складаються з втрат від вихрових струмів P_v і втрат на гістерезис P_r :

$$P_c = P_{\text{в}} + P_{\text{г}}.$$

Оскільки значення P_c визначається напругою живлення первинної обмотки трансформатора, а апарати працюють, як правило, при $U_1 = U_{1\text{н}}$, то можна вважати ($P_c \equiv U_1^2$), що за таких умов $P_c = \text{const}$.

Втрати в електричній системі трансформатора – втрати на нагрівання первинної і вторинної обмоток, або втрати в міді, залежать від струмів, що діють в обмотках апарата, і опорів цих обмоток:

$$P_{\text{м}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2.$$

Оскільки навантаження трансформатора (I_1 та I_2) може змінюватися, то величина $P_{\text{м}}$ є змінною.

Враховуючи викладене, а також те, що по відношенню до споживача трансформатор є джерелом електричної енергії, рівняння розрахунку ККД апарата буде мати вигляд:

$$\eta = \beta P_{2\text{н}} / (P_2 + P_c + \beta^2 P_{\text{м}}) = \beta S_{2\text{н}} \cos \varphi_{2\text{н}} / (\beta S_{2\text{н}} \cos \varphi_2 + P_c + \beta^2 P_{\text{м}}).$$

Для розрахунку ККД трансформатора за формулою, що наведена вище, значення P_c та $P_{\text{м}}$, а також ряду інших параметрів, які відображують у паспорті трансформатора, визначають у досліді холостого ходу і короткого замикання. Якісна залежність ККД від коефіцієнта завантаження трансформатора при $0 < \cos \varphi_2 < 1$ показана на рис. 3.9.

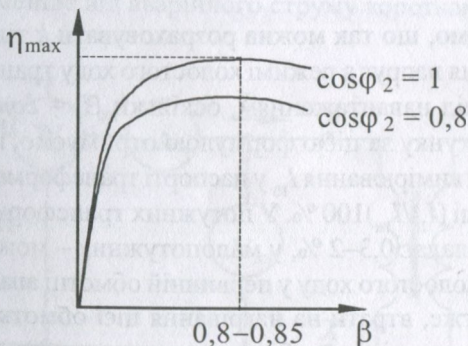


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнта корисної дії від завантаженості трансформатора.

3.3.2 Дослід холостого ходу

Для проведення дослід холостого ходу схему, що наведена на рис. 3.10, підключають до джерела, напруга якого відповідає робочій напрузі U_1 первинної обмотки трансформатора. При цьому $U_1 = U_{1н}$.

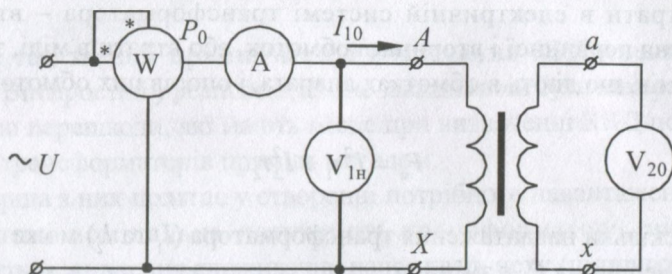


Рис. 3.10. Електрична схема дослід холостого ходу трансформатора.

У досліді холостого ходу вимірюють і відображають у паспорті трансформатора такі величини:

1. Напругу первинної $U_{1н}$ і вторинної U_{20} обмоток.
2. Струм холостого ходу I_{10} , він же струм намагнічування.
3. Потужність холостого ходу P_0 .

За результатами вимірювання напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора розраховують коефіцієнт трансформації апарата:

$$k = U_{1н} / U_{20}.$$

Підкреслимо, що так можна розраховувати k тільки за результатами вимірювання напруг в режимі холостого ходу трансформатора. При роботі апарата під навантаженням, оскільки $U_1 = const$, а $U_2 = f(I_2)$, в результаті розрахунку за цією формулою отримуємо, що $k \neq const$.

Результати вимірювання I_{10} у паспорті трансформатора, як правило, подають у вигляді $(I_{10} / I_{1н}) 100 \%$. У потужних трансформаторах значення цієї величини складає 0,3–2 %, у малопотужних – може сягати 7–15 %.

В режимі холостого ходу у первинній обмотці апарата діє відносно малий струм. Отже, втрати на нагрівання цієї обмотки у порівнянні з втратами, які мають місце у обмотці навантаженого трансформатора, також малі. У вторинній обмотці при цьому втрат немає зовсім, оскільки вона розімкнена і там немає струму.

Струм холостого ходу, він же струм намагнічування, створює у осерді трансформатора магнітний потік, величина якого не залежить від навантаження апарата. Це дає підстави вважати, що втрати у магнітній системі трансформатора – втрати в сталі, в режимі холостого ходу такі ж як і при роботі апарата під навантаженням.

Таким чином, потужність в досліді холостого ходу буде:

$$P_0 = P_c + I_{10}^2 r_1.$$

Оскільки втрати на нагрівання первинної обмотки тут не перевищують 3–5 % від P_0 , то можна вважати, що $P_0 \approx P_c$. Це дає підстави у формулу розрахунку ККД трансформатора замість втрат у сталі підставляти потужність холостого ходу.

3.3.3. Дослід короткого замикання

Відразу підкреслимо, що дослід короткого замикання є стандартним дослідом випробовування електричних машин і апаратів, зокрема трансформатора, і не має ніякого відношення до аварійного режиму – короткого замикання. При проведенні цього досліді (рис. 3.11) вторинну обмотку трансформатора замикають коротко, а до його первинної обмотки з використанням регулятора або дільника напруги ДН підводять таку напругу $U_{кз}$, при якій $I_1 = I_{1н}$. За таких умов у вторинній обмотці апарата буде діяти струм $I_2 = I_{2н}$. Формально це струм короткого замикання, але оскільки $U_{кз} \ll U_{1н}$ і, отже, $E_2 \ll E_{2н}$, його значення набагато менше від аварійного струму короткого замикання.

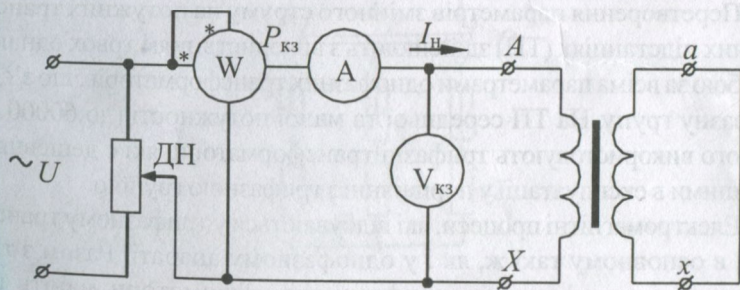


Рис. 3.11. Електрична схема досліді короткого замикання.

В досліді короткого замикання вимірюють і відображають у паспорті трансформатора:

1. Напругу короткого замикання $U_{кз}$.

2. Струм первинної обмотки $I_1 = I_{1н}$.

3. Потужність короткого замикання $P_{кз}$.

Наголосимо, що результати вимірювання $U_{кз}$ у паспорті апарата відображають у вигляді $(U_{кз}/U_{1н})100\%$. У потужних трансформаторів значення цієї величини звичайно складає 5–10 %, у малопотужних може сягати 18–20 %.

Оскільки у досліді короткого замикання до первинної обмотки трансформатора підводять напругу, значно меншу за номінальну, то в осерді апарата діє менший від номінального магнітний потік і втрати в сталі апарата будуть малими. При цьому в обмотках трансформатора діють номінальні струми. Отже, втрати на нагрівання обмоток трансформатора будуть такими, як при його роботі при номінальному навантаженні.

Таким чином, потужність в досліді короткого замикання буде:

$$P_{кз} = P_c + I_{1н}^2 r_1 + I_{2н}^2 r_2.$$

Оскільки P_c тут не перевищує 2–5 % від $P_{кз}$, то можна вважати, що $P_{кз} \approx P_m$. Це дає підстави у формулу розрахунку ККД трансформатора замість втрат у міді підставляти потужність короткого замикання.

3.4. Трифазні силові трансформатори

Перетворення параметрів змінного струму на потужних трансформаторних підстанціях (ТП) здійснюють з використанням трьох однакових між собою за всіма параметрами однофазних трансформаторів, що з'єднані у трифазну групу. На ТП середньої та малої потужності (до 60000 кВА) для цього використовують трифазні трансформатори, які є дешевшими і зручнішими в експлуатації у порівнянні з трифазною групою.

Електромагнітні процеси, які відбуваються у трифазному трансформаторі в основному такі ж, як і у однофазному апараті. Разом з тим, у порівнянні з однофазними, трифазні трансформатори мають певні конструкційні і експлуатаційні особливості.

3.4.1. Особливості трифазних трансформаторів

У трифазному трансформаторі (рис. 3.12) на кожному з трьох стержнів магнітопроводу розташовані обмотки ВН і НН тільки однієї фази. Причому всі фазні стержні, обмотки ВН і НН виконані, відповідно, однаково між собою за всіма параметрами і характеристиками. На відміну від рис. 3.12, де ВН і НН обмотки кожної з фаз умовно зсунуті по вісі свого стержня, у реального трансформатора вони виконані концентрично. Причому обмотка НН завжди знаходиться ближче до стержня, а поверх неї розташована ВН обмотка.

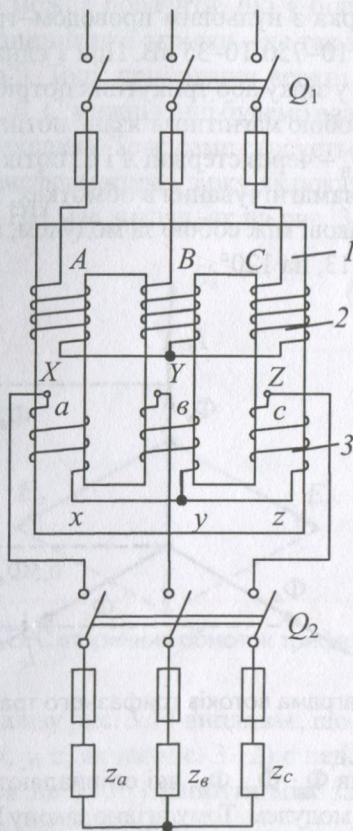


Рис. 3.12. Трифазний трансформатор: 1 – магнітопровід, 2 – обмотка ВН, 3 – обмотка НН.

Принципово, як ВН, так і НН обмотки трифазного трансформатора можуть бути з'єднані у зірку (Y) або трикутник (Δ). Таким чином, для трифазного трансформатора можливі такі комбінації схем з'єднання обмоток: Y/Y, Y/ Δ , Δ /Y, Δ / Δ . Зазначимо, що коли йде мова про схеми з'єднання обмоток трансформатора, то першою називають або показують у чисельнику дробу схему обмотки ВН, другою, або у знаменнику дробу – обмотки НН.

У промислових мережах розподіл електричної енергії з напругою 3–10/0,4 кВ в основному використовують схеми “зірка–зірка” з нульовим проводом (Y/Y₀) і “трикутник–зірка” з нульовим проводом (Δ /Y₀). Схему з'єднання “зірка–трикутник” (Y/ Δ) використовують у мережах з напругою 35/10 кВ, а схему “зірка з нульовим проводом–трикутник” (Y₀/ Δ) – у мережах з напругою 110–750/10–35 кВ. При з'єднанні обмоток трифазного трансформатора у зірку або трикутник потрібно пам'ятати, що всі обмотки апарата між собою магнітнозв'язані: потік Φ_A замикається через стержні B і C, потік Φ_B – через стержні A і C, потік Φ_C – через стержні A і B. Вектори струмів намагнічування в обмотках, наприклад, обмотках ВН – AX, BY, CZ, однакові між собою за модулем, але зсунуті за фазою, як показано на рис. 3.13, на 120°.

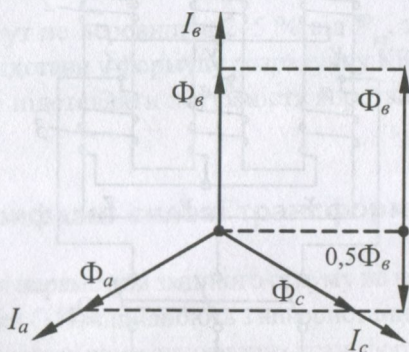


Рис. 3.13. Векторна діаграма потоків трифазного трансформатора.

Вектори потоків Φ_A , Φ_B , Φ_C , які співпадають зі струмами, також однакові між собою за модулем. Тому, згідно закону Кірхгофа, для кожного моменту часу маємо:

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0.$$

Зокрема, для конкретного моменту часу (рис. 3.13) маємо:

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = -0,5\dot{\Phi}_{Bm} + \dot{\Phi}_{Bm} - 0,5\dot{\Phi}_{Bm} = 0.$$

Ця умова виконується тоді, коли, наприклад, у зірку з'єднані тільки кінці X, Y, Z чи тільки початки A, B, C обмоток, і не виконується у випадку, коли з'єднані два кінці і один початок обмоток, або навпаки. Звідси випливає, що позначення початків і кінців обмоток трифазного трансформатора повинно бути конкретним, а не довільним, як для однофазних апаратів.

Якщо подивитися на обмотки трифазного трансформатора (рис. 3.12) зверху, то можна побачити, що у більшості випадків вони намотані за рухом годинникової стрілки – це так звана “права” намотка (зустрічається і “ліва”). Тоді, прийнявши верхні кінці проводів таких обмоток за початки A, B, C , нижні кінці будемо вважати відповідно, X, Y, Z (можна зробити і навпаки). Те ж саме стосується і обмоток НН. При з'єднанні обмоток трансформатора у зірку, як показано на рис. 3.12, зірка фазних ЕРС обмоток НН має вигляд, як на рис. 3.14.

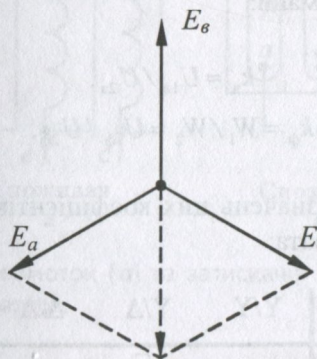


Рис. 3.14. Зірка фазних ЕРС вторинних обмоток трифазного трансформатора.

З результатів аналізу рис. 3.14 випливає, що з'єднання затискачів x, b, z разом (замість x, y, z , як на рис. 3.12) є недопустимим, оскільки вектор E_b повернеться на 180° і напруга між затискачами $a-c$ буде лінійною, а між $a-y$ та $c-y$ – фазною.

На щитку трифазного трансформатора за позначенням схем з'єднання його обмоток стоїть цифра: $Y/Y_0 - 12$, $Y/\Delta - 11$, $\Delta/Y_0 - 11$, $Y_0/\Delta - 11$. Цією цифрою умовно позначають так звану групу з'єднання.

Група з'єднання вказує кут α зсуву вектора лінійної ЕРС обмотки НН відносно вектора лінійної ЕРС обмотки ВН у напрямку обертання годинникової стрілки. Група з'єднання трансформатора залежить від техніки виконання і схеми з'єднання його обмоток.

Так, наприклад, якщо у однофазного трансформатора обмотки ВН і НН намотані в одному напрямку (за або проти руху годинникової стрілки), то кут між ЕРС обмоток буде дорівнювати 0° . Якщо ж одна з обмоток намотана за, а друга – проти руху годинникової стрілки, то $\alpha = 180^\circ$. Таким чином, однофазний трансформатор може мати дві групи з'єднання.

У трифазного трансформатора, враховуючи можливі варіанти схем (Y/Y, Y/ Δ , Δ / Δ , Δ /Y) з'єднання обмоток і техніку їх виконання, кут α , з кратністю 30° , може змінюватися від 0 до 360° . Взявши за аналог годинник із стрілками, прийняли, що трифазний трансформатор може мати 12 груп з'єднання обмоток, де основними є 11 і 12 (вона ж 0), а однофазний – 0 (стандартна) і 6.

Подібно тому, як у трифазних колах розрізняють лінійну і фазну напруги, для трифазного трансформатора розрізняють лінійний k_n і фазний k_ϕ коефіцієнти трансформації:

$$k_n \approx U_{1л} / U_{2л},$$

$$k_\phi = W_1 / W_2 \approx U_{1\phi} / U_{2\phi}.$$

Співвідношення значень цих коефіцієнтів залежить від схеми з'єднання обмоток апарата:

Схема	Y/Y	Y/ Δ	Δ / Δ	Δ /Y
k_n/k_ϕ	1	$\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$

З рівнянь розрахунку коефіцієнта трансформації трифазного трансформатора випливає, що k_ϕ є аналогом коефіцієнта трансформації однофазного трансформатора. Але оскільки у трифазних колах визначальною є лінійна напруга, то на практиці для трифазного трансформатора розраховують тільки k_n .

3.4.2. Розмітка затискачів та схеми увімкнення трифазного трансформатора

Обмотки ВН і НН трифазного трансформатора з'єднують зіркою за однаковими методиками. Таке ж справедливо і для з'єднання обмоток трансформатора у трикутник. Тому далі, на прикладі обмоток ВН, покажемо, як здійснюють з'єднання у зірку, а на прикладі обмоток НН – як у трикутник (рис. 3.15).

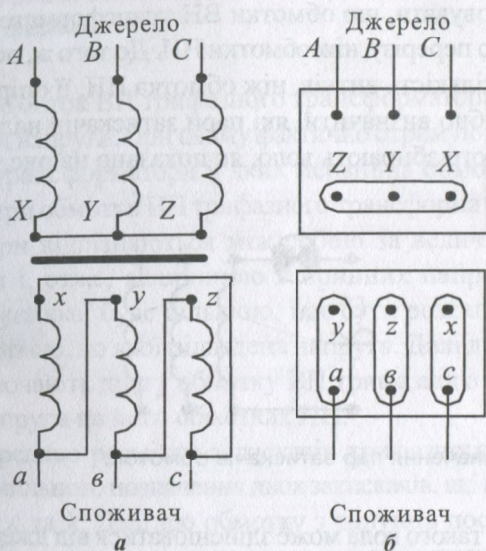


Рис. 3.15. З'єднання обмоток (а) та затискачів (б) на щитку трифазного трансформатора.

Відразу зазначимо, що порушення методики виконання схем призводить до зміни групи з'єднання обмоток трансформатора.

При увімкненні у зірку (рис. 3.15 а) кінці обмоток ВН (НН) з'єднують у спільну точку. Після цього початки обмоток ВН (НН) підключають до затискачів трифазного джерела (споживача) напруги. Для одержання з'єднання у трикутник початок першої обмотки НН (ВН) з'єднують з кінцем другої, початок другої – з кінцем третьої, початок третьої – з кінцем першої. Після цього початки обмоток НН (ВН) з'єднують з трифазним споживачем (джерелом) струму.

Для зручності виконання з'єднання обмоток, зокрема у трикутник, на щитку трансформатора під затискачем A (a) розміщують затискач Y (y), під B (b) – Z (z), а під C (c) – X (x). Увімкнення обмоток трансформатора у зірку (обмотки ВН) або трикутник (обмотки НН) здійснюють з використанням спеціальних перемичок, як показано на рис. 3.15 б.

Розглянемо тепер випадок, коли позначення затискачів обмоток трансформатора відсутні.

За таких умов перш за все потрібно з'ясувати, які три пари затискачів належать обмоткам ВН, а які три пари – обмоткам НН. При цьому слід враховувати, що обмотки ВН трансформатора виконують з провада меншого перерізу, ніж обмотки НН. До того ж, оскільки обмотка ВН має більшу кількість витків, ніж обмотка НН, її опір буде більшим.

Далі потрібно визначити, які пари затискачів належать до однієї обмотки. Для цього збирають коло, як показано на рис. 3.16.

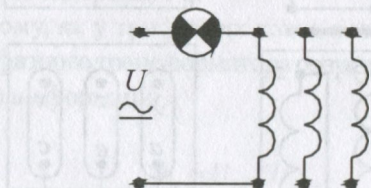


Рис. 3.16. До визначення пар затискачів обмоток.

Живлення такого кола може здійснюватися від джерела постійного або змінного струму з напругою, безпечною для життя людини. В якості сигнального пристрою може бути використано дзвоник, лампочку, амперметр тощо. При доторканні щупами до двох затискачів, які належать обмоткам ВН (чи НН), у колі може з'явитися або не з'явитися струм (спрацює або не спрацює сигнальний пристрій). Наявність струму означає, що між цими затискачами є обмотка, відсутність – що затискачі належать двом різним обмоткам і пошук треба продовжувати. В кінцевому рахунку отримуємо шість затискачів, між парами яких є три обмотки ВН, і шість затискачів, між парами яких є три обмотки НН.

На практиці часто доводиться визначати пари обмоток (ВН і НН), розташовані на спільному стержні магнітопроводу, тобто поділяти обмотки на відповідні фази. Роблять це так (рис. 3.17).

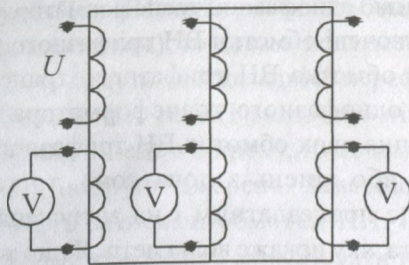


Рис. 3.17. До визначення розподілу обмоток трифазного трансформатора між фазами.

Одну з обмоток ВН трифазного трансформатора підключають до джерела змінної напруги. При цьому фактично отримують три однофазних понижуючих трансформатори у яких первинна обмотка є спільною, а вторинними – три обмотки НН трифазного трансформатора. Ці однофазні трансформатори відрізняються між собою за величиною магнітного потоку систем і, отже, величиною вторинних напруг. Таким чином, обмотка, напруга якої буде більшою, має бути розташована на одному стержні з обмоткою, до якої підведена напруга. Далі до джерела змінної напруги підключають другу обмотку ВН трифазного трансформатора і вимірюють напруги на його обмотках НН.

Безпосередньо розмітку затискачів трифазного трансформатора починають з довільного позначення двох затискачів, які належать до однієї обмотки ВН – A та X . Далі цю обмотку з'єднують послідовно з другою обмоткою ВН і підключають до джерела змінної напруги (рис. 3.18 *a*).

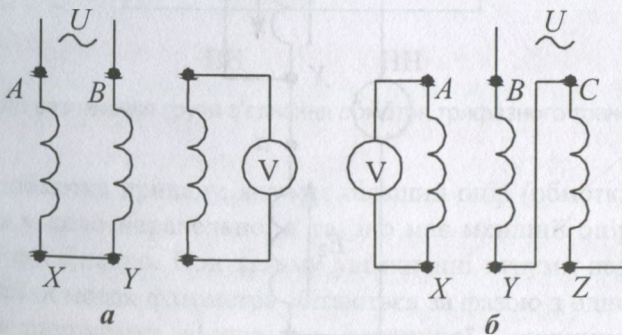


Рис. 3.18. До розмітки затискачів обмоток ВН трифазного трансформатора.

У підсумку маємо однофазний трансформатор, у якого первинною є дві послідовно включені обмотки ВН трифазного трансформатора, а вторинною – третя обмотка ВН трифазного трансформатора. Якщо первинна обмотка однофазного трансформатора утворена шляхом узгодженого з'єднання двох обмоток ВН трифазного трансформатора (початок з кінцем або кінець з початком), то такий однофазний трансформатор буде працездатним і на затискачах його вторинної обмотки буде напруга, яку покаже вольтметр. Якщо ж первинна обмотка однофазного трансформатора утворена шляхом зустрічного з'єднання двох обмоток ВН трифазного трансформатора (початок з початком або кінець з кінцем), то потоки створеного таким чином однофазного трансформатора будуть скомпенсовані і вольтметр покаже нуль. Залежно від цього позначають затискачі другої обмотки ВН трифазного трансформатора. Далі створюють інший однофазний трансформатор, як на рис. 3.18 б, і залежно від результатів його випробовування позначають затискачі останньої обмотки ВН трансформатора.

Позначення затискачів обмоток НН трансформатора повинно бути виконано з урахуванням позначення його обмоток ВН. Для цього обмотки ВН та НН, які розташовані на одному стержні, вмикають між собою послідовно і підключають до джерела змінної напруги U , як показано на рис. 3.19.

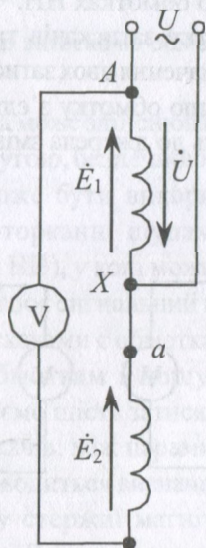


Рис. 3.19. До розмітки затискачів обмоток ВН трифазного трансформатора.

Якщо обмотки ВН та НН включені між собою узгоджено (початок з кінцем або кінець з початком), то покази вольметра, увімкненого, як показано на рис. 3.19, будуть майже вдвічі перебільшувати напругу джерела. Якщо обмотки ВН та НН включені між собою зустрічно (початок з початком, або кінець з кінцем), то покази вольметра будуть значно меншими від напруги джерела. Залежно від показів цього вольметра позначають затискачі обмотки НН. Подальшу розмітку обмоток НН трансформатора можна здійснювати таким же чином, або ж за методикою розмітки затискачів обмоток ВН.

Для визначення групи з'єднання обмоток трансформатора на практиці звичайно застосовують метод фазометра, який ще називають прямим методом.

Фазометр – це прилад призначений для вимірювання $\cos\phi$ кола. Подібно до ватметра, він має дві різні за опором обмотки. При вимірюваннях збирають схему, що показана на рис. 3.20.

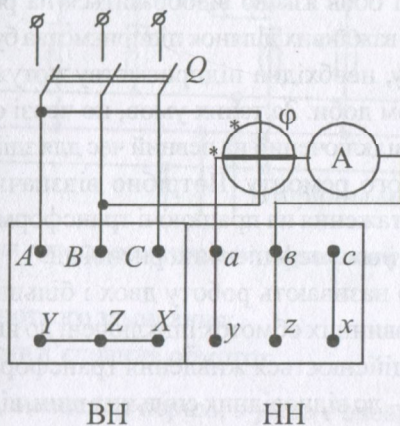


Рис. 3.20. До визначення групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора.

Тут обмотка приладу, яка має більший опір (обмотка напруги), увімкнена у коло паралельно, а та, що має менший опір (обмотка струму) – послідовно. При такому увімкненні струми паралельної і послідовної обмоток фазометра збігаються за фазою з однойменними лінійними напругами, відповідно, первинної і вторинної обмоток трансформатора, і прилад відразу показує зсув фаз між цими напругами.

Щоб не припуститися помилки, вимірювання виконують для двох будь-яких пар затискачів трансформатора. При цьому в обох дослідах покази фазометра повинні бути однаковими.

3.4.3. Паралельна робота силових трансформаторів

Для збільшення надійності електропостачання, а також з метою покращення умов експлуатації і обслуговування трансформаторів їх часто вмикають на паралельну роботу. Пояснимо це на прикладах.

Припустимо, трансформаторна підстанція (ТП) підприємства має один трансформатор, потужність якого відповідає піковій потужності споживачів електричної енергії підприємства. При виході з ладу цього трансформатора робота підприємства буде паралізована.

Тепер розглянемо випадок, коли на ТП підприємства встановлено два або більше трансформаторів, сумарна потужність яких відповідає піковій потужності підприємства. За таких умов вихід з ладу одного з трансформаторів ТП обов'язково відобразиться на роботі підприємства, але робота найбільш важливих ділянок підприємства буде продовжуватися.

З іншого боку, необхідна підприємству потужність, як правило, змінюється протягом доби. За таких умов, по черзі один з трансформаторів ТП може бути відключений на певний час для здійснення, наприклад, його профілактичного ремонту. Потрібно відзначити, що при цьому збільшується навантаження на працюючі трансформатори ТП, що часто сприяє підвищенню його коефіцієнта корисної дії.

Паралельною називають роботу двох і більше трансформаторів, коли затискачі їх первинних обмоток підключені до відповідних спільних шин фаз, від яких здійснюється живлення трансформаторів, а затискачі вторинних обмоток – до відповідних спільних шин, від яких здійснюється розподіл енергії до споживачів.

Увімкнення трансформаторів на паралельну роботу – це відповідальна операція, яку здійснюють у відповідності зі спеціальною інструкцією. Електрична схема увімкнення двох трансформаторів на паралельну роботу наведена на рис. 3.21.

Трансформатори, які вмикаються на паралельну роботу, повинні мати однакові:

1) номінальні значення відповідно первинних і вторинних напруг і, як наслідок, однакові коефіцієнти трансформації;

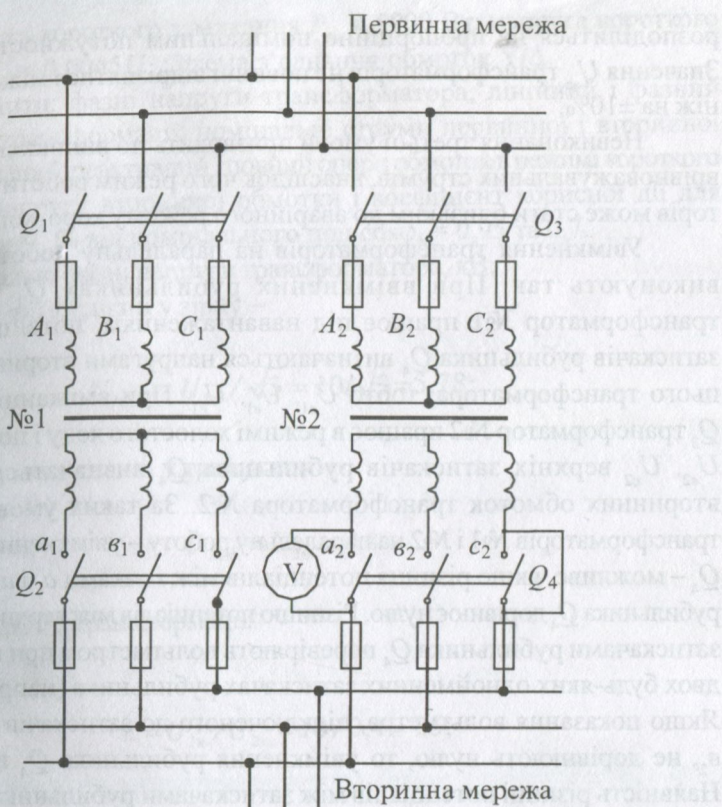


Рис. 3.21. Увімкнення трансформаторів на паралельну роботу.

- 2) напруги короткого замикання;
- 3) групи і схеми з'єднання обмоток.

Необхідність виконання першої з умов є очевидною, оскільки на паралельну роботу трансформатори вмикають між одними і тими ж шинами, як з високої, так і з низької сторони напруги. Розбіжність у значеннях коефіцієнтів трансформації апаратів тут не повинна бути більшою, ніж $\pm 0,5\%$.

Значення напруги короткого замикання на практиці використовують для оцінки опору обмоток трансформатора. Так, трансформатор, у якого $U_{кз}$ більша, має менший внутрішній опір обмоток у порівнянні з другим апаратом, аналогічним першому за всіма іншими параметрами. Отже, при паралельній роботі навантаження між такими трансформаторами

розподілиться не пропорційно номінальним потужностям апаратів. Значення $U_{\text{кз}}$ трансформаторів не повинні відрізнятись між собою більше ніж на $\pm 10\%$.

Невиконання третьої умови призводить до виникнення у системі врівноважувальних струмів, внаслідок чого режим роботи трансформаторів може стати близьким до аварійного режиму короткого замикання.

Увімкнення трансформаторів на паралельну роботу (рис. 3.21) виконують так. При увімкнених рубильниках Q_1 та Q_2 , коли трансформатор №1 працює під навантаженням, потенціали нижніх затискачів рубильника Q_4 визначаються напругами вторинної обмотки цього трансформатора, тобто U_{a_1} , $U_{a_1'}$, U_{c_1} . При вмиканні рубильника Q_3 трансформатор №2 працює в режимі холостого ходу і потенціали U_{a_2} , $U_{a_2'}$, U_{c_2} верхніх затискачів рубильника Q_4 визначаються напругами вторинних обмоток трансформатора №2. За таких умов увімкнення трансформаторів №1 і №2 на паралельну роботу – увімкнення рубильника Q_4 – можливе, якщо різниця потенціалів між точками a_1 і a_2 , a_1' і a_2' , c_1 і c_2 рубильника Q_4 дорівнює нулю. Різницю потенціалів між верхніми і нижніми затискачами рубильника Q_4 перевіряють вольтметром при перемкнутих двох будь-яких однойменних затискачах рубильника (наприклад c_1 і c_2). Якщо показання вольтметра, підключеного до затискачів $a_1 - a_2$, і $a_1' - a_2'$, не дорівнюють нулю, то увімкнення рубильника Q_4 недопустиме. Наявність різниці потенціалів між затискачами рубильника означає, що при збиранні схеми або були переплутані фази і обмотки трансформаторів підключені до невідповідних шин, або трансформатори мають різні групи з'єднання обмоток.

Підкреслимо, що при перевірці різниці потенціалів два будь-яких однойменних затискачі рубильника обов'язково повинні бути перемкнуті між собою. У разі відсутності цієї перемички між вторинними обмотками трансформаторів №1 і №2 немає електричного зв'язку. За таких умов навіть при підключенні вольтметра до різнойменних затискачів рубильника покази приладу будуть дорівнювати нулю.

3.4.4. Приклад розрахунку трифазного трансформатора

Трифазний трансформатор типу ТМ–400/10 промислової частоти 50 Гц має номінальні паспортні дані: потужність $S_{\text{н}} = 400$ кВА; лінійні напруги $U_{1\text{н}} = 10$ кВ та $U_{2\text{н}} = 0,4$ кВ; втрати у дослідах холостого ходу

$P_0 = 1080$ Вт та короткого замикання $P_{кз} = 5900$ Вт; напруга короткого замикання $U_{кз} = 0,0045 U_{1н}$; схема з'єднання обмоток Y/Δ .

Визначити: фазні напруги трансформатора, лінійний і фазний коефіцієнти трансформації, номінальні струми первинної і вторинної обмоток, активний, реактивний і повний опори обмоток в режимі короткого замикання, напругу вторинної обмотки і коефіцієнт корисної дії для завантаження 80 % від номінального при $\cos \varphi_2 = 0,95$ та 0,7.

Номінальні фазні напруги трансформатора, кВ:
обмотки ВН, які з'єднані у зірку –

$$U_{1н.ф} = U_{1н} / \sqrt{3} = 10 / \sqrt{3} = 5,78;$$

обмотки НН, які з'єднані у трикутник –

$$U_{2н.ф} = U_{2н} = 0,4.$$

Коефіцієнти трансформації:

лінійний –

$$k = U_{1н} / U_{2н} = 10 / 0,4 = 25;$$

фазний –

$$k_{\phi} = U_{1н.ф} / U_{2н.ф} = 5,78 / 0,4 = 14,43.$$

Відношення коефіцієнтів трансформації:

$$k / k_{\phi} = 25 / 14,43 = \sqrt{3}.$$

Номінальні струми обмоток ВН та НН, А:

фазні –

$$I_{1н.ф} = S_{н} / (\sqrt{3} U_{1н.ф}) = 400 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 23,1,$$

$$I_{2н.ф} = S_{н} / (3 U_{2н.ф}) = 400 / (3 \cdot 0,4) = 333,33;$$

лінійні –

$$I_{1н} = I_{1н.ф} = 23,1,$$

$$I_{2н} = \sqrt{3} I_{2н.ф} = S_{н} / (\sqrt{3} U_{2н.ф}) = 400 / (\sqrt{3} \cdot 0,4) = 578;$$

Опори обмоток трансформатора в режимі короткого замикання, Ом:
повний –

$$z_{кз} = U_{кз} / (\sqrt{3} I_{1н.ф}) = 0,045 \cdot 10000 / (\sqrt{3} \cdot 23,1) = 11,2;$$

активний –

$$r_{кз} = P_{кз} / (3 I_{1н.ф}^2) = 5900 / (3 \cdot 23,1^2) = 3,69;$$

реактивний –

$$x_{кз} = \sqrt{z_{кз}^2 - r_{кз}^2} = \sqrt{11,2^2 - 3,69^2} = 10,6.$$

Зміну напруги вторинної обмотки залежно від завантаженості і ККД трансформатора розраховують за формулами, відповідно:

$$\Delta U_2 \% = \beta (U_{кз.а} \cos \varphi_2 + U_{кз.р} \sin \varphi_2);$$

$$\beta = \frac{\beta S_{н} \cos \varphi_2}{\beta S_{н} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кз}}.$$

Складові напруги короткого замикання, %:

активна –

$$U_{кз.а} = 100 \cdot P_{кз} / S_{н} = 100 \cdot 5,9 / 400 = 1,475;$$

реактивна –

$$U_{кз.р} = \sqrt{U_{кз}^2 - U_{кз.а}^2} = \sqrt{4,5^2 - 1,475^2} = 4,25.$$

При $\beta = 0,8$ та $\cos\varphi_2 = 0,95$ ($\sin\varphi_2 = 0,39$) напруга вторинної обмотки та ККД трансформатора будуть:

$$\Delta U_2 \% = 0,8(1,475 \cdot 0,95 + 4,29 \cdot 0,39) = 2,45 \%;$$

$$\Delta U_2 = \Delta U_2 \% \cdot U_{2н} / 100 = 2,45 \cdot 400 / 100 = 9,8 \text{ В};$$

$$U_2 = U_{2н} - \Delta U_{2н} = 400 - 9,8 = 390,2 \text{ В};$$

$$\eta = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot 0,95}{0,8 \cdot 400 \cdot 0,95 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,984.$$

При $\beta = 0,8$ та $\cos\varphi_2 = 0,7$ ($\sin\varphi_2 = 0,713$):

$$\Delta U_2 \% = 0,8(1,475 \cdot 0,7 + 4,29 \cdot 0,713) = 3,25 \%;$$

$$\Delta U_2 = \Delta U_2 \% \cdot U_{2н} / 100 = 3,25 \cdot 400 / 100 = 13 \text{ В};$$

$$U_2 = U_{2н} - \Delta U_{2н} = 400 - 13 = 387 \text{ В};$$

$$\eta = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot 0,7}{0,8 \cdot 400 \cdot 0,7 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,978.$$

Зверніть увагу: активний, реактивний та повний опори обмоток трансформатора в режимі короткого замикання можуть бути визначені так (Ом):

$$r_{кз} = U_{кз.а} / (\sqrt{3} I_{1н.ф}) = (1,475 \cdot 10000 / 100) / (\sqrt{3} \cdot 23,1) = 3,69;$$

$$x_{кз} = U_{кз.р} / (\sqrt{3} I_{1н.ф}) = (4,25 \cdot 10000 / 100) / (\sqrt{3} \cdot 23,1) = 10,6;$$

$$z_{кз} = \sqrt{r_{кз}^2 + x_{кз}^2} = \sqrt{3,69^2 + 10,6^2} = 11,2.$$

3.5. Автотрансформатори

Автотрансформатор, як і трансформатор, використовують для зміни параметрів змінного струму без зміни його частоти.

Подібно до трансформатора, найпростіший автотрансформатор (рис. 3.22) має замкнений магнітопровід, набраний з листової електротехнічної сталі, на якому розташована обмотка, поділена на дві частини. Таким чином, у автотрансформатора обмотка НН є частиною обмотки ВН і між обмотками апарата, крім магнітного, є електричний зв'язок. Наголосимо, що обмотки звичайного трансформатора можна увімкнути за схемою автотрансформатора. Для цього затискач X обмотки ВН трансформатора достатньо перемкнути з затискачем a його обмотки НН.

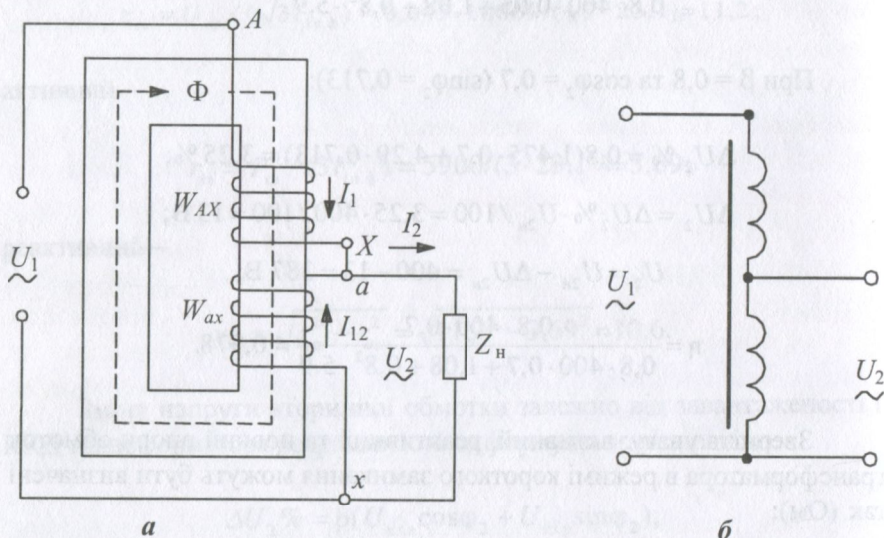


Рис. 3.22. Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми однофазного автотрансформатора.

Електромагнітні процеси, що відбуваються в автотрансформаторі, практично такі ж, як і в трансформаторі. Обмотку осердя тут можна розглядати як результат накладання незалежних первинної і вторинної обмоток. Напруги і струми автотрансформатора зв'язані між собою тими ж співвідношеннями, що і в трансформаторі:

$$W_1 / W_2 \approx U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1.$$

Але в одній частині обмотки автотрансформатора ($a-x$, вона ж $a-X$, тобто обмотка НН) одночасно діють струми I_1 та I_2 , що спрямовані назустріч один одному. Нехтуючи величиною струму намагнічування, можна вважати, що результуючий струм I_{12} обмотки НН автотрансформатора дорівнює:

$$I_{12} = I_1 - I_2.$$

При значенні коефіцієнта трансформації апарата

$$k = W_1 / W_2,$$

близькому до одиниці, струм I_{12} є малою величиною у порівнянні зі струмами I_1 та I_2 . Це дає можливість виконувати обмотку НН такого апарата з проводу малого перерізу. У свою чергу, для розташування на осерді обмотки, що виконана з тонкого проводу і, відповідно, має менший геометричний розмір, потрібно менше місця. Таким чином, при однакових електричних параметрах вага, розмір і вартість автотрансформатора є меншими, ніж у трансформатора.

Зі збільшенням k вказані переваги автотрансформатора у порівнянні з трансформатором зменшуються, а наявність електричного зв'язку між обмотками ВН і НН стає основним недоліком цього апарата.

При збільшенні коефіцієнта трансформації збільшується різниця між U_1 і U_2 апарата. Враховуючи відносно малий опір обмотки автотрансформатора, і зокрема, ділянки $A-a$, у разі пошкодження обмотки НН (ділянки $a-x$) споживач, підключений до затискачів $a-x$, опиняється під напругою, близькою до напруги на затискачах $A-X$. Тому автотрансформатори не можна використовувати, наприклад, для живлення розподільчої мережі з напругою 220 В від мережі з напругою 6 кВ. Оскільки при цьому, для безпеки персоналу, ізоляцію всієї розподільчої мережі довелося би розраховувати на 6 кВ.

Враховуючи викладене, автотрансформатори використовують лише там, де напругу потрібно трансформувати не більше ніж у 2,5–3 рази.

Обмотки трифазного автотрансформатора (рис. 3.23) з'єднують за схемою зірки з виведеною нульовою точкою або без неї.

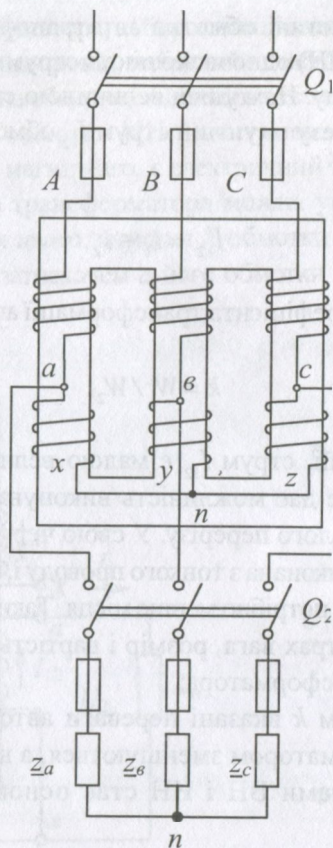


Рис. 3.23. Трифазний автотрансформатор.

Зміна положення точки поділу обмотки автотрансформатора на дві частини викликає зміну напруги вторинної обмотки апарата. У більшості конструкцій промислових та побутових однофазних автотрансформаторів положення точки a на обмотці є фіксованим – нерегульовані апарати. Є автотрансформатори, від обмотки яких зроблено кілька відгалужень. У таких апаратах є можливість стрибкоподібно змінювати вторинну напругу. В лабораторних автотрансформаторах (ЛАТР) одним із затискачів вторинної обмотки є рухомий контакт. Це дає можливість змінювати вторинну напругу апарата в широкому діапазоні. Трифазні автотрансформатори з рухомих затискачем вторинної обмотки використовують як регулятори напруги.

Такий апарат використовують, наприклад, для здійснення пуску асинхронних двигунів – автотрансформаторний пуск двигуна.

3.6. Трансформатори для електрозварювання

Взагалі, зварювальні трансформатори слід було б віднести до електротехнологічного обладнання. Адже їх використовують не тільки для зварювання, але і для наплавлення, і для різання металів.

Як правило, сумарний час виконання технологічної операції і наступної паузи складає близько 5 хвилин. Отже, ці апарати працюють у перервному режимі. У загальному випадку вони повинні задовольняти наступним вимогам:

- 1) напруга на затискачах вторинної обмотки повинна бути безпечною для людини і достатньою для виникнення електричної дуги;
- 2) зварювальний струм повинен легко регулюватися;
- 3) для забезпечення постійного значення зварювального струму при виконанні технологічної операції апарат повинен мати круту зовнішню характеристику;
- 4) струм короткого замикання апарата не повинен перебільшувати номінальний струм більш ніж на 20–40 %.

Принципово, зварювальний апарат (рис. 3.24) являє собою однофазний трансформатор 1, до вторинної обмотки якого послідовно підключений електричний дросель 2 з регульованим повітряним зазором 3.

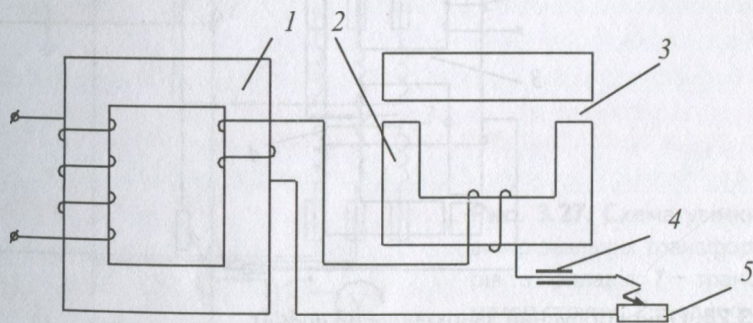


Рис. 3.24. Принципова схема зварювального апарата.

Номінальна напруга первинної обмотки трансформатора зазвичай складає 220 або 380 В. Вторинну обмотку розраховують так, щоб напруга

на її затискачах в режимі холостого ходу U_{20} складала 60–70 В, а при роботі під навантаженням $U_{2н}$ – близько 30 В. Зварювальний струм між електродами 4 і виробом 5 регулюють величиною повітряного зазору у магнітопроводі дроселя. Зміна вигляду зовнішньої характеристики трансформатора залежно від величини струму зварювання I_{21} та I_{22} показана на рис 3.25.

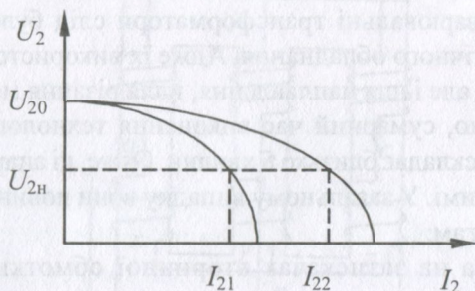


Рис. 3.25. Зовнішня характеристика зварювального трансформатора.

В сучасних апаратах магнітопроводи трансформатора і дроселя, як правило, об'єднують у спільну конструкцію, наприклад так, як це показано на рис. 3.26, де 1 та 2 – відповідно первинна та вторинна обмотки трансформатора, 3 – ярмо дроселя та трансформатора, 4 – обмотка дроселя.

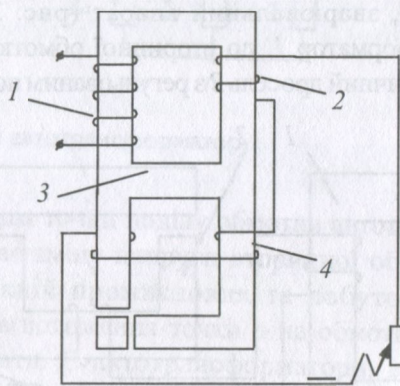


Рис. 3.26. Однокорпусний зварювальний апарат.

На відміну від попередньої конструкції (рис. 3.24), в таких однокорпусних апаратах між вторинною обмоткою трансформатора і котушкою дроселя, крім електричного, є ще і магнітний зв'язок. Як

наслідок, при роботі на холостому ході в котушці дроселя утворюється власна напруга. Оскільки ця напруга є частиною напруги зварювальної дуги, то покращуються умови збудження і стійкість горіння дуги.

За призначенням зварювальні апарати поділяють так: для ручного зварювання, для автоматичного зварювання під флюсом, для електрошлакового зварювання і для зварювання у середовищі захисних газів. За величиною зварювального струму промислові апарати умовно поділяють на три групи: 1 – до 150 А; 2 – до 380 А; 3 – до 2500 А.

Коефіцієнт корисної дії зварювального трансформатора складає 83–90 %, а $\cos\phi = (0,52...0,62)$.

3.7. Вимірювальні трансформатори

У потужних електричних мережах високої напруги, для безпеки персоналу, який обслуговує вимірювальні прилади, а також там, де потрібно розширити межі вимірювання, використовують вимірювальні трансформатори (рис. 3.27). За призначенням їх поділяють на трансформатори струму і трансформатори напруги.

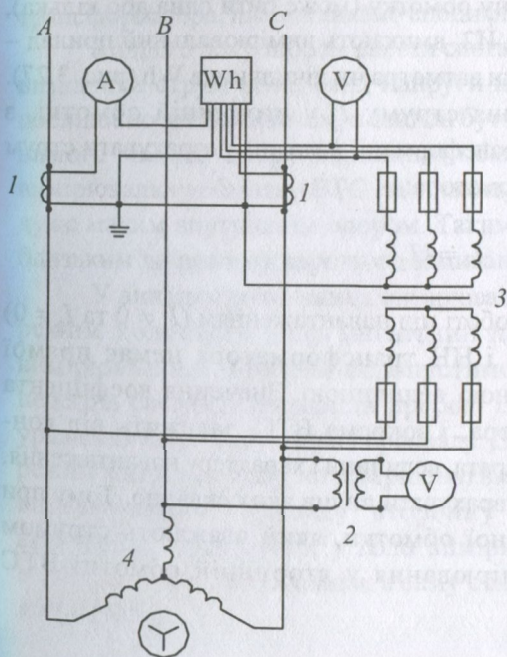


Рис. 3.27. Схема увімкнення вимірювальних трансформаторів та приладів: 1 – трансформатор струму, 2 – однофазний трансформатор напруги, 3 – трифазний трансформатор напруги, 4 – електричний двигун.

3.7.1. Трансформатори струму

Вимірювальні трансформатори струму (ВТС) призначені для перетворення великих струмів у струми, значення яких придатні для вимірювання стандартними приладами, для живлення засобів автоматизації та захисту. За принципом ВТС є аналогом однофазного силового трансформатора і має такі основні параметри:

- 1) номінальна напруга – лінійна напруга системи, де ВТС може працювати і на яку розрахована його ізоляція;
- 2) номінальний струм первинної обмотки – струм $I_{1н}$, при тривалій дії якого обмотка не перегрівається вище допустимої температури;
- 3) номінальний струм вторинної (вимірювальної) обмотки – за стандартом струм $I_{2н}$ може бути 1 або 5А;
- 4) номінальний коефіцієнт трансформації – $k_{ін} = I_{1н}/I_{2н}$;
- 5) клас точності;
- 6) номінальна потужність – потужність навантаження ВТС у межах його класу точності.

Для приведення ВТС у робочий стан його первинну обмотку (позначення затискачів Л1 і Л2) вмикають послідовно зі споживачем електричної енергії. У вторинну обмотку (може бути одна або кілька), затискачі якої позначені И1 та И2, вмикають вимірювальний прилад – амперметр А, струмові обмотки ватметра чи лічильника Wh (рис. 3.27). За результатами вимірювання струму I_2 у вторинній обмотці, з використанням коефіцієнта трансформації k можна розрахувати струм I_1 первинної обмотки трансформатора:

$$I_1 = kI_2$$

Але ж відомо, що при роботі під навантаженням ($I_1 \neq 0$ та $I_2 \neq 0$) між струмами обмоток ВН і НН трансформатора немає прямої залежності і, отже, k є змінною величиною. Значення коефіцієнта трансформації трансформатора, і зокрема ВТС, залежить від конструктивних особливостей апарата, величини і характеру навантаження, а також ряду інших факторів, врахувати вплив яких складно. Тому при розрахунках струму первинної обмотки, який вважають струмом споживача, результати вимірювання у вторинній обмотці ВТС помножують на $k_{ін}$:

$$I_1 = k_{in} I_2$$

Оскільки значення k_{in} , незалежно від струмів у обмотках апарата, вважають постійним, то виникає похибка. Відносну похибку вимірювання струму розраховують за формулою:

$$\delta = (k_{in} I_2 - I_1) / I_1.$$

З рівняння випливає, що чим більше I_1 та I_2 відрізняються відповідно від $I_{1н}$ та $I_{2н}$, тим більшою є похибка вимірювання струму.

Крім цього, при включенні у вторинну обмотку ВТС обмотки струму ватметра або лічильника (приладу, показання якого залежать від кута зсуву фаз ϕ між векторами струму і напруги), може мати місце так звана фазова похибка вимірювання. Її абсолютна величина (у дугових хвилинах) дорівнює куту між \dot{I}_1 та \dot{I}_2 ВТС і вважається додатньою у випадку, коли \dot{I}_1 випереджає за фазою \dot{I}_2 , або від'ємною – коли \dot{I}_2 випереджає \dot{I}_1 .

Конструктивно, ВТС відрізняється від однофазного силового трансформатора, що викликано специфікою режиму його роботи.

З одного боку, щоб не внести спотворення у коло споживача і точно визначити струм кола, спад напруги на обмотці ВТС, яку вмикають послідовно зі споживачем, повинен бути мінімальним. Звідси випливає вимога малого опору первинної обмотки апарату. З іншого боку, вимірювальну обмотку ВТС замикають на прилад (обмотку приладу) з дуже малим внутрішнім опором. Таким чином, робочий режим ВТС є близьким до режиму короткого замикання силового трансформатора.

У випадку розмикання вимірювальної обмотки і переходу ВТС у режим холостого ходу магнітний потік апарата, а з ним і ЕРС вимірювальної обмотки недопустимо збільшуються. Це викликає перегрів осердя, можливість пробою ізоляції обмотки і, як наслідок, ураження обслуговуючого персоналу. Для запобігання переходу ВТС у режим холостого ходу, по завершенні вимірювань (перед відключенням вимірювального приладу) вторинну обмотку апарата обов'язково шунтують. Крім цього, у коло вимірювальної обмотки заборонено встановлювати запобіжники, а саму обмотку і корпус ВТС обов'язково заземлюють.

За кількістю витків у первинній обмотці розрізняють одновиткові і багатовиткові ВТС.

Одновиткові ВТС відносно прості у виготовленні, але при струмах до 400 А мають клас точності не менше 1. Тому такі апарати, як правило, використовують для здійснення вимірювань у потужних електросистемах з напругою понад 10 кВ, де вони здатні мати клас точності 0,5.

Наявність кількох витків у первинній обмотці ВТС обумовлює необхідність їх надійної ізоляції, що по мірі збільшення номінальної напруги суттєво ускладнює конструкцію апарата. Багатовиткові ВТС виготовляються для всієї шкали номінальних напруг і використовуються для вимірювання струмів до 3000 А. Залежно від конструкції і характеристик вони можуть мати клас точності: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 і далі. У промисловості в основному використовують багатовиткові ВТС з класом точності 0,5.

Для оперативного контролю струму у низьковольтних системах застосовують ВТС з розімкненим осердям, які виготовляють у вигляді кліщів (рис. 3.28). У вторинну обмотку такого ВТС включають амперметр, а первинною є електроізолюваний провід, у якому вимірюють струм.

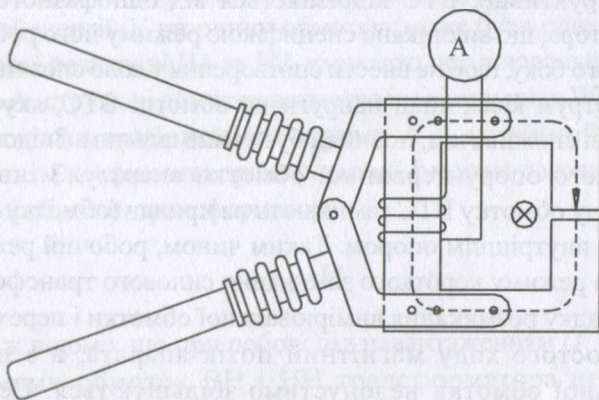


Рис. 3.28. Вимірювальні кліщі — трансформатор струму з розімкненим осердям.

3.7.2. Трансформатори напруги

Вимірювальні трансформатори напруги (ВТН) призначені для перетворення великих напруг у напруги, значення яких є придатними

для вимірювання стандартними приладами, а також для живлення засобів автоматизації, захисту та сигналізації. За принципом дії ВТН є аналогом силового трансформатора і має такі основні параметри:

- 1) номінальні напруги обмоток (ВН і НН) – значення $U_{1н}$, починаючи з 380В, охоплює весь ряд стандартних значень, $U_{2н} = 100$ В;
- 2) номінальний коефіцієнт трансформації – $k_{ин} = U_{1н} / U_{2н}$;
- 3) клас точності;
- 4) номінальна потужність – потужність навантаження ВТН у межах його класу точності.

Для приведення ВТН у робочий стан його обмотку ВН вмикають у коло, напругу якого потрібно визначити. До обмотки НН підключають вимірювальний прилад – вольтметр V, обмотку напруги ватметра чи лічильника Wh (рис. 3.27). Оскільки обмотка вимірювального приладу має великий опір, то робочий режим ВТН є близьким до режиму холостого ходу силового трансформатора. Звідси випливає, що за результатами вимірювання напруги U_2 , з використанням $k_{ин}$, можна розрахувати напругу кола – обмотки ВН:

$$U_1 = k_{ин} U_2.$$

Враховуючи, що на практиці значення U_1 і U_2 можуть відрізнятися від $U_{1н}$ і $U_{2н}$ ВТН, виникає похибка вимірювання, відносну величину якої розраховують за формулою:

$$\delta = (k_{ин} U_2 - U_1) / U_1.$$

З рівняння видно, що чим більше U_1 та U_2 відрізняються від $U_{1н}$ та $U_{2н}$ ВТН, тим більшою є похибка вимірювання. Абсолютна фазова похибка ВТН дорівнює куту зсуву фаз між повернутим на 180° вектором вторинної напруги \dot{U}_2 та вектором первинної напруги \dot{U}_1 апарата. Її величину вважають додатною, коли \dot{U}_2 випереджає \dot{U}_1 , і від'ємною – коли \dot{U}_1 випереджає \dot{U}_2 .

Стандартом встановлено шість класів точності ВТН: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 та 3. У харчовій та переробній промисловості частіше використовуються ВТН з класом точності 0,5.

За конструкцією ВТН практично не відрізняються від силових трансформаторів. Вони мають замкнене осердя, на якому розташована

одна обмотка ВН і одна чи дві обмотки НН (основна і додаткова). Промисловість випускає однофазні і трифазні ВТН. На відміну від ВТС, у кола обмоток ВТН для захисту від струмів перевантаження ставлять запобіжники.

3.8. Питання для самоперевірки за розділом “Трансформатори”

1. Що називають трансформатором і на чому базується принцип його дії?
2. Яку будову мають однофазний та трифазний силові трансформатори?
3. Які фізичні процеси відбуваються у силовому трансформаторі при роботі в режимі холостого ходу та під навантаженням?
4. Що таке зовнішня характеристика трансформатора?
5. Як на практиці визначають коефіцієнт корисної дії силових трансформаторів?
6. Як здійснюють розмітку виводів та як з'єднують обмотки трифазного трансформатора?
7. Які умови вмикання силових трансформаторів на паралельну роботу?
8. Яку будову мають однофазний та трифазний автотрансформатори?
9. У чому полягають переваги та недоліки автотрансформатора у порівнянні з трансформатором?
10. В чому полягають основні відмінності між зварювальним та силовим трансформаторами?
11. В яких режимах працюють вимірювальні трансформатори струму та напруги?