

Лекція 1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

1.1. Призначення, сфера застосування та номінальні дані трансформаторів

Трансформатором називають статичний індуктивний перетворювач, що має дві або більше індуктивно зв'язаних взаємонерухомих обмоток і призначений для перетворення за допомогою магнітного поля однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну), що має інші характеристики, зокрема напругу та струм. У більшості випадків за допомогою трансформатора перетворюють тільки напругу та струм без зміни частоти і числа фаз.

Трансформатор, що має дві електрично незв'язані між собою обмотки, називають двообмотковим. Обмотку, що споживає енергію з електричної мережі, називають первинною, а обмотку, що віддає енергію споживачу – вторинною. Існують багатообмоткові трансформатори, які мають декілька первинних і вторинних обмоток.

Якщо первинна обмотка має вищу напругу (ВН), а вторинна – нижчу напругу (НН), то такий трансформатор називають понижувальним. У протилежному випадку трансформатор називають підвищувальним.

Залежно від числа фаз розрізняють однофазні, трифазні та багатофазні трансформатори.

Залежно від охолодження трансформатори поділяють на сухі та масляні з природним та примусовим охолодженням.

Трансформатори виготовляють за технічними умовами або відповідно до вимог стандартів і призначені виробником для виконання певних функцій по перетворенню електричної енергії.

Параметри, що відносяться до того режиму роботи, для якого трансформатор призначений виробником, називають номінальними. За цих параметрів трансформатор може тривалий час працювати, не перегріваючись вище допустимих норм.

У паспорті трансформатора (заводська табличка, що кріпиться до трансформатора) вказують такі номінальні величини:

1. Номінальна первинна лінійна напруга U_{1H} .
2. Номінальна вторинна лінійна напруга U_{2H} на розімкненій вторинній обмотці при живленні первинної обмотки напругою U_{1H} , номінальної частоти.
3. Номінальний лінійний струм I_{1H} первинної обмотки.
4. Номінальну потужність S_H , під якою розуміють повну потужність трансформатора на затискачах вторинної обмотки. Для двообмоткових трансформаторів номінальна потужність первинної обмотки S_{1H} береться такою, що дорівнює номінальній потужності вторинної обмотки S_{2H} і дорівнює номінальній потужності трансформатора S_H . $S_{1H} = S_{2H} = S_H$.

5. Номінальний лінійний струм вторинної обмотки I_{2H} .

Номінальні струми визначають за номінальною потужністю та номінальною напругою обмотки.

Для однофазного трансформатора:

$$I_{1H} = S_H / U_{1H}; \quad I_{2H} = S_H / U_{2H}.$$

Для трифазного трансформатора:

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} U_{1H}); \quad I_{2H} = S_H / (\sqrt{3} U_{2H}) - \text{лінійні струми.}$$

$$I_{1H\phi} = S_H / (3 U_{1H\phi}); \quad I_{2H\phi} = S_H / (3 U_{2H\phi}) - \text{фазні струми.}$$

6. Схема і група з'єднань обмоток.

7. Напруга короткого замикання.

Слід відмітити, що номінальні дані не вказують на те, що трансформатор необхідно експлуатувати тільки при них. Робота трансформатора можлива в діапазоні зміни вторинного струму від 0 до I_{2H} , можливі короточасні перевантаження, а також невеликі зміни напруги та частоти, спеціально обумовлені стандартами.

1.2. Електромагнітні процеси в трансформаторі при неробочому ході

Незважаючи на різновиди трансформаторів і величин їх потужностей, теорія їх єдина і ґрунтується на законі електромагнітної індукції. Зі сторони первинної обмотки з кількістю витків w_1 трансформатор є споживачем електричної енергії, а зі сторони вторинної обмотки з кількістю витків w_2 він є джерелом електричної енергії для приймача з опором Z . Струм i_2 у вторинній обмотці визначається опором Z . При деякому значенні цього опору ($Z = Z_H$) через вторинну обмотку протікає номінальний струм ($i_2 = i_{2H}$). Зменшення ($Z < Z_H$) або збільшення ($Z > Z_H$) опору Z порівняно з опором Z_H призводить трансформатор до перевантаження ($i_2 > i_{2H}$) або до

недовантаження ($i_2 < i_{2H}$). При $Z=0$ трансформатор буде працювати в режимі короткого замикання ($i_2 \gg i_{2H}$). При $Z = \infty$ струм вторинної обмотки $i_2=0$, трансформатор буде працювати в режимі неробочого ходу. В останньому випадку трансформатор не перетворює електричну енергію, що і зумовлює таку назву режиму.

Розглянемо спочатку електромагнітні процеси у трансформаторі в режимі неробочого ходу на прикладі понижувального двообмоткового трансформатора, принципова схема якого зображена на рис. 1.1.

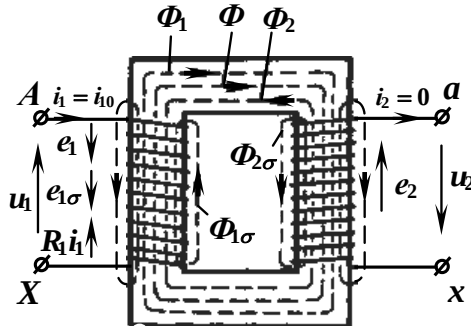


Рис. 1.1. Схема однофазного трансформатора

Під дією прикладеної до первинної обмотки синусоїдної напруги u_1 через неї протікає струм $i_1 = i_{10}$, що називається струмом неробочого ходу. Струм i_1 , протікаючи через витки первинної обмотки, збуджує основний змінний магнітний потік $\Phi_1 = \Phi_{10}$, що замикається через феромагнітний магнітопровід і зчіплюється з усіма витками первинної та вторинної обмоток, і магнітний потік розсіяння $\Phi_{\sigma 1}$, що замикається через немагнітні (повітряні, ізоляційні) ділянки, магнітна проникність яких значно менша, ніж магнітопровода. Тому магнітний потік розсіяння у багато разів менший від основного магнітного потоку ($\Phi_{\sigma 1} \ll \Phi_1$). Потоки Φ_1 і $\Phi_{\sigma 1}$ в первинній обмотці індукують електрорушійні сили e_1 індукції та $e_{\sigma 1}$ розсіяння

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_{\sigma 1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt}, \quad (1.1, a, б)$$

а у вторинній обмотці потік Φ_1 індукуює електрорушійну силу взаємної індукції

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (1.2)$$

Рівняння, що написано за другим законом Кірхгофа для первинної обмотки, має вигляд

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + R_1 i_{10}. \quad (1.3)$$

Напруга u_2 на вторинній обмотці при неробочому ході дорівнює індукованій у ній електрорушійній силі

$$u_2 = e_2. \quad (1.4)$$

Для силових трансформаторів $R_1 i_{10} \ll e_1$ і $e_{\sigma 1} \ll e_1$. Тому рівняння (1.3) наближено можна записати у вигляді

$$u_1 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (1.5)$$

Якщо врахувати, що u_1 змінюється за законом $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то внаслідок лінійності рівняння (9.5), магнітний потік також буде синусоїдним

$$\Phi_1 = \frac{1}{w_1} \int U_{1m} \sin \omega t dt = -\frac{U_{1m}}{w_1 \omega} \cos \omega t = \Phi_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (1.6)$$

$$\text{де } \Phi_{1m} = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega} - \text{максимальне значення потоку.} \quad (1.7)$$

З урахуванням, що $U_{1m} \approx E_{1m}$ із рівняння (1.7) можна отримати формули для визначення діючого значення ЕРС E_1 і E_2 :

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_{1m} = 4,44 f w_1 \Phi_{1m};$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_{1m} = 4,44 f w_2 \Phi_{1m}. \quad (1.8)$$

З (1.8) випливає, що індуковані в обмотках ЕРС пропорційні кількості витків обмоток, а відношення їх дорівнює відношенню кількості витків або приблизно дорівнює відношенню напруг обмоток

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = n. \quad (1.9)$$

Число n називають коефіцієнтом трансформації трансформатора, до того ж держстандарт передбачає відношення більшої напруги до меншої

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}. \quad (1.10)$$

Перепишемо рівняння (1.3) у комплексній формі

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_{10} R_1, \quad (1.11)$$

де $E_\sigma = -jX_1 \dot{I}_{10}$; X_1 - індуктивний опір первинної обмотки, зумовлений потоком розсіяння $\Phi_{\sigma 1}$.

Підставивши значення $E_{\sigma 10}$ в (1.11), отримаємо

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} (R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} Z_1. \quad (1.12)$$

Наочне уявлення про процеси, що відбуваються в трансформаторі при неробочому ході, дає векторна діаграма (рис. 1.2).

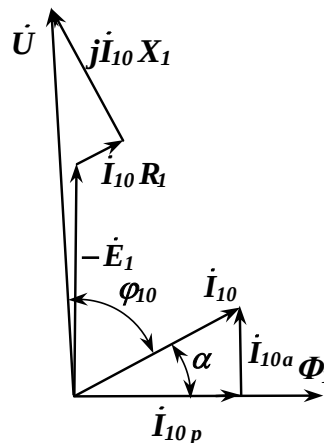


Рис. 1.2. Векторна діаграма трансформатора, що працює в режимі неробочого ходу

Побудову векторної діаграми починають з вектора основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_1$. Під кутом 90° в сторону відставання від вектора $\dot{\Phi}_1$ відкладені вектори $\dot{E}_1$ і $\dot{E}_2$, що співпадають за фазою, оскільки первинна та вторинна обмотки одночасно перетинаються одним і тим же основним магнітним потоком. Під кутом втрат α (дорівнює декільком градусам) у сталюму сердечнику трансформатора в сторону випередження $\dot{\Phi}_1$ відкладають вектор струму неробочого ходу $\dot{I}_{10}$. Згідно з рівнянням (1.12), побудований вектор $\dot{U}_1$. Кут зсуву фаз φ_{10} між напругою $\dot{U}_1$ первинної обмотки та струмом $\dot{I}_{10}$ неробочого ходу близький до 90° . Для більшої наочності на векторній діаграмі вектори спадів напруг $\dot{I}_{10} R_1$, $\dot{I}_{10} X_1$ і кут α значно збільшені.

При розрахунках електричних кіл, що містять трансформатори, магнітний зв'язок між первинними і вторинними колами заміняють електричним, що значно спрощує аналіз електричного кола. На рис. 1.3 наведена заступна схема трансформатора, який працює у режимі неробочого ходу. Як видно з рисунка, ця схема відповідає заступній схемі котушки з феромагнітним осердям, до якої прикладена синусоїдна напруга.

У режимі неробочого ходу трансформатор не виконує корисної роботи, тому споживана потужність P_0 витрачається тільки на покриття втрат неробочого ходу, які складаються з електричних втрат у первинній обмотці P_{E1} , і магнітних втрат P_M .

Електричними втратами в первинній обмотці P_{E1} при неробочому ході, пропорційними I_{10}^2 , можна знехтувати, тому що струм I_{10} малий і втрати P_{E1} значно менші, ніж у номінальному режимі.

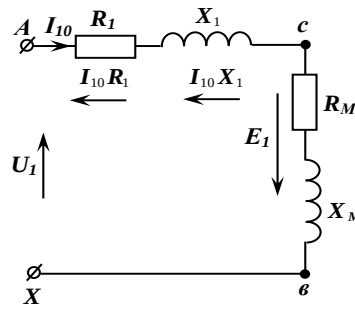


Рис. 1.3. Заступна схема трансформатора за неробочого ходу

Магнітні втрати в трансформаторі дорівнюють 1-2% від номінальної потужності, незважаючи на те, що магнітопровід трансформатора шихтований. Вони складаються з втрат на гістерезис P_H , пропорційних частоті та квадрату індукції, і втрат на вихрові струми P_B , пропорційних квадратам частоти та індукції. У силових трансформаторах визначають відразу повні магнітні втрати за імперичною формулою

$$P_M = P_H + P_B = \sum p_{1,0/50} B_k^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_k, \quad (1.13)$$

де $p_{1,0/50}$, Вт/кг – питомі втрати в сталі к-ої ділянки за частоти 50Гц та індукції 1Тл;

B_k , m_k – індукція та маса сталі к-ої ділянки магнітопровода.

Нехтуючи електричними втратами в первинній обмотці можна вважати, що втрати неробочого ходу P_0 дорівнюють магнітним втратам $P_0 \approx P_M$.

Магнітні втрати при неробочому ході та номінальній напрузі майже такі, як при номінальному режимі внаслідок незалежності магнітного потоку та індукції від режиму роботи трансформатора. Порівняно з номінальною потужністю трансформатора потужність втрат P_0 невелика, однак вона має важливе експлуатаційне значення, тому що втрати в сталі мають місце, поки трансформатор під'єднаний до мережі, незалежно від того навантажений він чи працює в неробочому режимі. Оскільки силові трансформатори від'єднуються від мережі в рідких випадках, то втрати в сталі можуть суттєво понизити ККД електромереж.

Для визначення деяких величин, що характеризують роботу трансформатора, використовують дослід неробочого ходу. Схема для проведення дослідів наведена на рис. 1.4.

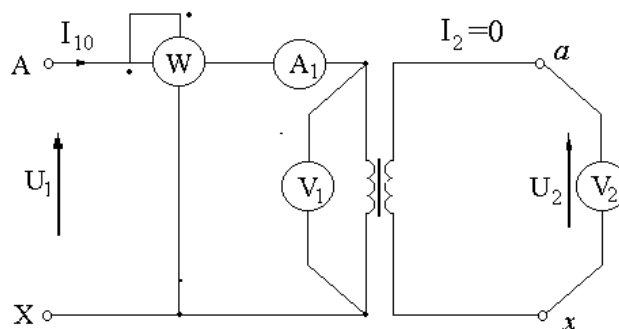


Рис. 1.4. Схема дослідів неробочого ходу однофазного трансформатора

Первинна обмотка трансформатора під'єднана до номінальної напруги, а вторинна обмотка розімкнена. За допомогою вольтметрів V_1 і V_2 , амперметра A і ватметра W вимірюють первинну напругу $U_1 = U_{1H}$, струм $I_1 = I_{10}$, потужність $P_1 = P_0$, вторинну напругу $U_2 = U_{2H}$.

За даними дослідження неробочого ходу визначають повний опір Z_0 , активний R_0 та індуктивний X_0 опори неробочого ходу:

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (1.14)$$

коефіцієнт трансформації n і кут втрат α :

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}; \quad \alpha = \arcsin \frac{P_0}{U_{1H} I_{10}}. \quad (1.15)$$

Із заступної схеми трансформатора при неробочому ході (рис. 1.3) видно, що $Z_0 = Z_1 + Z_M$; $R_0 = R_1 + R_M$; $X_0 = X_1 + X_M$.

Звичайно в трансформаторах $R_1 \ll R_M$, $X_1 \ll X_M$.

Тому можна вважати, що опори неробочого ходу дорівнюють опорам контура намагнічування: $Z_0 \approx Z_M$; $R_0 \approx R_M$; $X_0 \approx X_M$.

1.3. Електромагнітні процеси в трансформаторі при навантаженні

Режим навантаження трансформатора – це такий режим роботи, при якому первинна обмотка під'єднана до джерела змінної напруги, а до затисків вторинної обмотки під'єднаний споживач (рис.1.5).

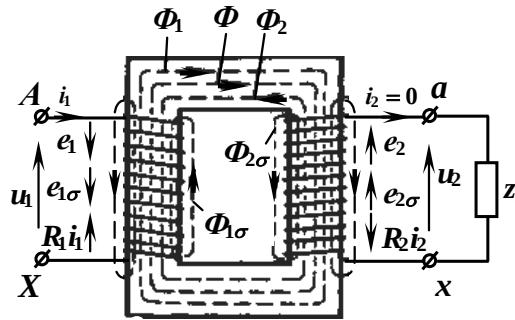


Рис. 1.5. Однофазний трансформатор у режимі навантаження

У режимі навантаження через вторинну обмотку протікає струм $I_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$, який збуджує магнітний потік $\dot{\Phi}_2$, прямопропорційний намагнічуючій силі $I_2 w_2$ вторинної обмотки. За правилом Ленца магнітний потік $\dot{\Phi}_2$ протидіє причині, що його спричиняє, тобто спрямований проти магнітного потоку $\dot{\Phi}_1$. Отже, у магнітопроводі трансформатора діє деякий результуючий магнітний потік $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$, що індукуює у первинній і вторинній обмотках електрорушійні сили $\dot{E}_1$ і $\dot{E}_2$.

Результуючий магнітний потік $\dot{\Phi}$ не залежить від режиму роботи трансформатора і за будь-якого навантаження залишається майже незмінним та дорівнює магнітному потоку неробочого ходу $\dot{\Phi}_{10}$. Постійність основного (результуючого) магнітного потоку Φ (при $U_1 = \text{const}$) впливає із рівняння $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} Z_1$ електричної рівноваги первинної обмотки при неробочому ході. Нехтуючи дуже малою величиною спаду напруги $I_{10} Z_1$, можна вважати, що $U_1 \approx E_1$. Підведена до первинної обмотки напруга U_1 незмінна, отже і $E_1 \approx \text{const}$. Але величина E_1 залежить від амплітуди основного магнітного потоку, отже, амплітуда основного магнітного потоку Φ залишається майже незмінною.

Основний магнітний потік Φ замикається через магнітопровід і зічплюється з витками первинної та вторинної обмоток. Частина магнітного потоку, що зічплюється лише з витками первинної обмотки та замикається через повітря, складає потік розсіяння первинної обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ і йому відповідає ЕРС $E_{\sigma 1}$. Частина магнітного потоку, що зічплюється тільки з витками вторинної обмотки, складає потік розсіяння вторинної обмотки $\Phi_{\sigma 2}$, який обумовлює ЕРС $E_{\sigma 2}$ і замикається також через повітря. У правильно спроектованих силових трансформаторах потоки $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ незначні і складають $0,1 \div 0,4\%$ від основного магнітного потоку.

Отже, у первинній обмотці трансформатора електрична енергія перетворюється в енергію магнітного поля, а у вторинній обмотці – енергія магнітного поля перетворюється в електричну енергію.

Магнітний стан трансформатора визначається рівнянням намагнічуючих сил, яке в комплексній формі має вигляд

$$\dot{I}_{10} w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \quad (1.16)$$

Розділивши всі члени рівняння (9.16) на число витків w_1 первинної обмотки, отримаємо рівняння струмів

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{n} \text{ або } \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2', \quad (1.17)$$

де $\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{n}$ - струм вторинної обмотки, зведений до первинної обмотки;

$n = \frac{w_1}{w_2}$ - коефіцієнт трансформації (для понижувального трансформатора).

З рівняння (1.17) випливає, що струм $\dot{I}_1$ має дві складові: струм неробочого ходу $\dot{I}_{10}$, що майже не залежить від навантаження, і струм $\dot{I}_2'$, що залежить тільки від навантаження. При зміні струму у вторинній обмотці на величину $\Delta \dot{I}_2'$ відбувається зміна струму первинної обмотки на величину $\Delta \dot{I}_1 = \Delta \dot{I}_2'$, але результуюча намагнічуюча сила трансформатора $\dot{I}_{10} w_1$ залишається без зміни (при $U_1 = \text{const}$).

Згідно з другим законом Кірхгофа, запишемо рівняння для первинної

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 \quad (1.18)$$

і вторинної

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_2 \dot{I}_2 \quad (1.19)$$

обмоток навантаженого трансформатора, де R_1 , R_2 і X_1 , X_2 – відповідно активні та реактивні опори обмоток.

Помноживши рівняння (1.19) на коефіцієнт трансформації n , отримаємо

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - R_2' \dot{I}_2' - jX_2' \dot{I}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' \underline{Z}_2', \quad (1.20)$$

де $\dot{U}_2' = n \dot{U}_2$; $\dot{E}_2' = n \dot{E}_2$; $\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{n}$; $R_2' = n^2 R_2$; $X_2' = n^2 X_2$; $\underline{Z}_2' = n^2 \underline{Z}_2$

є вторинні величини, що зведені до числа витків первинної обмотки.

Рівняння (1.18), (1.19), (1.20) характеризують роботу зведеного трансформатора при навантаженні

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1; \quad (1.21)$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - R_2' \dot{I}_2' - jX_2' \dot{I}_2';$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2'.$$

Отже, замість реального трансформатора ми отримали еквівалентний трансформатор з $n = \frac{w_1}{w_2} = 1$.

Такий трансформатор називають зведеним. Це дає змогу спростити аналіз процесів, які відбуваються у трансформаторі.

Зведення вторинних величин до первинної обмотки дозволяє розглядати заступну схему трансформатора в режимі навантаження (рис. 1.6), як таку, в якій індуктивний зв'язок між обмотками замінений відповідними електричними з'єднаннями.

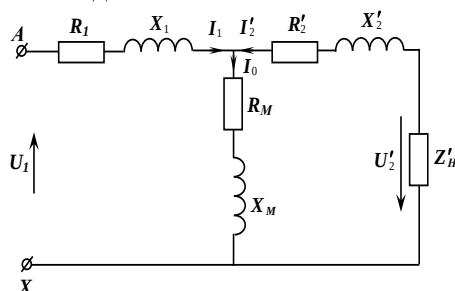


Рис. 1.6. Заступна схема зведеного трансформатора

Параметри заступної схеми можуть бути визначені розрахунковим чи експериментальним шляхом.

Дослід короткого замикання трансформатора здійснюють за схемою, що зображена на рис. 1.7. Вторинну обмотку замикають накоротко, а до первинної обмотки для уникнення перегрівання та пошкодження трансформатора підводять понижено напругу, при якій струми в обох обмотках дорівнюють номінальним. Цю напругу називають напругою короткого замикання U_K . Величину

$$U_K = \frac{U_K}{U_H} \cdot 100\% \quad (1.22)$$

вказують у паспортній табличці трансформатора. Вона складає для силових трансформаторів від 4% до 15% від U_H .

При короткому замиканні $U_K \ll U_{1H}$ і основний магнітний потік Φ_{1K} складає до 5% від магнітного потоку при номінальному режимі. Втрати в сталі пропорційні квадрату індукції, тобто квадрату магнітного потоку Φ_{1K} . Отже, в досліді короткого замикання втратами в сталі та намагнічуючим струмом можна знехтувати. Тому потужність короткого замикання P_K практично витрачається на покриття втрат у первинній і вторинній обмотках

$$P_K = R_1 I_{1H}^2 + R_2 I_{2H}^2 = R_K I_{1H}^2.$$

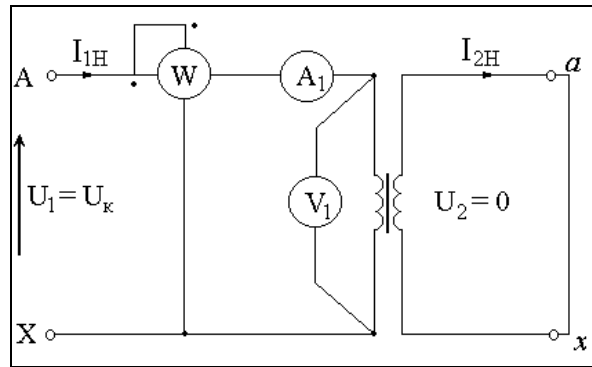


Рис. 1.7. Схема досліді короткого замикання однофазного трансформатора

Повний Z_K , активний R_K і реактивний X_K опори короткого замикання визначають за формулами:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}}; R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (1.23)$$

З досліді короткого замикання визначають активну U_{KA} і реактивну U_{KP} складові напруги U_K короткого замикання, що виражені у відносних одиницях

$$U_K = \frac{I_{1H} Z_K}{U_H} \cdot 100\% = \sqrt{U_{Ka}^2 + U_{Kp}^2},$$

$$\text{де } U_{KA} = U_K \cos \varphi_K = \frac{I_{1H} R_K}{U_H} \cdot 100\%; U_{KP} = U_K \sin \varphi_K = \frac{I_{1H} X_K}{U_H} \cdot 100\%; \varphi_K = \arctg \frac{X_K}{R_K}.$$

1.4. Зовнішні характеристики трансформатора

Залежність напруги U'_2 від струму I'_2 або $U'_2 = f(\beta)$ при $\varphi_2 = \text{const}$ і $U_1 = U_{1H} = \text{const}$ називають зовнішньою характеристикою трансформатора. На рис. 1.8 наведені зовнішні характеристики трансформатора для різних видів навантаження вторинної обмотки.

Розрахунок зовнішніх характеристик проводиться за формулою

$$U'_2 = U_{2H} - \Delta U = U_{2H} \left[1 - \frac{\beta}{100} (U_{KA} \cos \varphi_2 + U_{KP} \sin \varphi_2) - \frac{\beta^2}{200} (U_{KP} \cos \varphi_2 - U_{KA} \sin \varphi_2)^2 \right]. \quad (1.24)$$

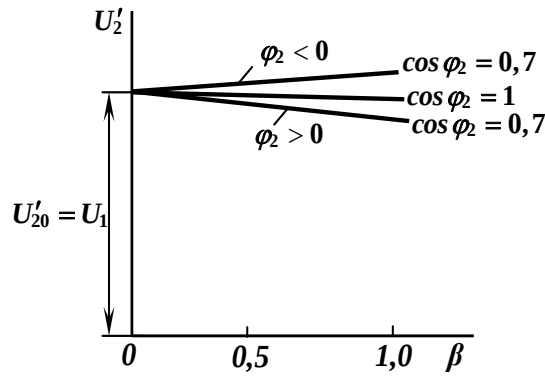


Рис. 1.8. Зовнішні характеристики трансформаторів

У межах зміни коефіцієнта $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ від 0 до 1 зовнішні характеристики практично прямолінійні.

Складові напруги короткого замикання U_{KA} і U_{KP} залежать від номінальної потужності трансформатора. У трансформаторах середньої потужності U_{KP} значно більша від U_{KA} . Тому в таких трансформаторах реактивне навантаження викликає більшу зміну напруги U'_2 , ніж активне, тобто за умови активно-індуктивного навантаження чим менша величина $\cos \varphi_2$, тим нижче проходить зовнішня характеристика.

За умови активно-ємнісного навантаження напруга U'_2 для деяких кутів φ_2 може бути більшою за U_1 для $\varphi_2 < 0$ величина $\sin \varphi_2$ стає від'ємною).

Для зменшення зміни напруги навантаженого трансформатора зменшують потоки розсіяння. Для цього первинні та вторинні обмотки розміщують на одному стержні і якомога більше наближають одна до одної (концентричні обмотки). Мінімальний проміжок між обмотками обмежується електричною міцністю. Тому високовольні трансформатори, в яких ізоляційний проміжок між обмотками більший, мають відносно більші потоки розсіяння та напругу U_K порівняно з низьковольтними трансформаторами.

1.5. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії трансформатора

Втрати активної потужності в трансформаторі поділяються на електричні втрати в обмотках і магнітні втрати в сталі.

Величина втрат визначається розрахунковим шляхом для трансформаторів, що проектуються, і експериментальним шляхом для виготовлених трансформаторів.

Як було встановлено раніше, втрати P_M при всіх навантаженнях дорівнюють втратам P_0 при неробочому ході, а електричні втрати P_E дорівнюють втратам короткого замикання P_K :

$$P_M = P_0;$$

$$P_E = P_{E1} + P_{E2} = R_1 I_1^2 + R'_2 I_2'^2 = R_K I_1^2 = R_K I_{1H}^2 \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 = P_K \beta^2. \quad (1.25)$$

Повні втрати ΔP дорівнюють

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K. \quad (1.26)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як відношення потужності P_2 , що віддається у вторинну мережу до активної потужності P_1 , що надходить в первинну обмотку

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1},$$

або

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_K}. \quad (1.27)$$

Враховуючи, що

$$P_2 = mU_2 I_2 \cos \varphi_2 = mU_{1H} I_2' \cos \varphi_2' = mU_{1H} I_{1H} \frac{I_2'}{I_{1H}} \cos \varphi_2,$$

отримаємо

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_K + P_0}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}. \quad (1.28)$$

Ця формула рекомендується державним стандартом для визначення ККД трансформатора. Величини S_H , P_0 , P_K наведені у відповідних стандартах і каталогах.

Оптимальне значення β_{opt} , при якому ККД має максимальне значення:

$$\beta_{opt} = \sqrt{P_0 / P_K}.$$

Для силових трансформаторів $P_0 / P_K = 0,5 \div 0,25$ і максимальне значення ККД буде при навантаженні $\beta = 0,7 \div 0,5$.

Слід відмітити, що в силових трансформаторах максимум ККД виражений незначно, тобто ККД зберігає високе значення в широкому діапазоні зміни навантаження ($0,4 < \beta < 1,5$).

1.6. Трифазні трансформатори

1.6.1. Магнітні системи і способи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

Трифазний трансформатор можна отримати, якщо розмістити магнітопроводи трьох однофазних трансформаторів під кутом 120° один до одного (рис.1.9,а). Середній стержень такого трансформатора ніби відповідає нейтральному провіднику при з'єднанні трифазного споживача зіркою. При симетричній трифазній системі вектори магнітних потоків створюють симетричну зірку і їх сума дорівнює нулю (рис.1.9,б). Тому середній стержень є непотрібним, оскільки магнітний потік у ньому дорівнює нулю. Така конструкція магнітопровода є симетричною. Симетричний магнітопровід є незручним для виготовлення і в сучасному трансформаторобудуванні використовується рідко.

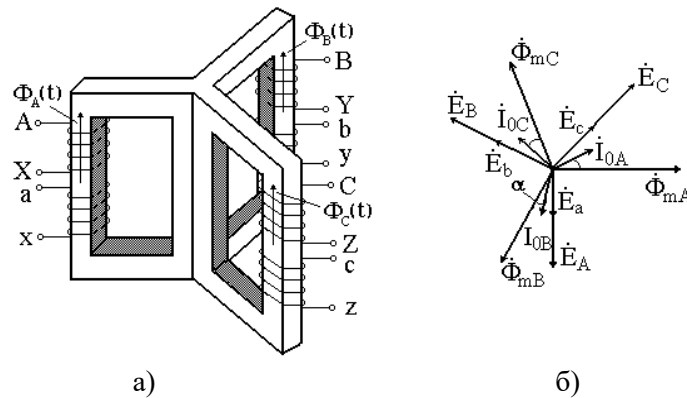


Рис. 1.9. Симетричний магнітопровід трифазного трансформатора (а) і векторна діаграма (б) при неробочому режимі

Магнітопроводи сучасних трифазних трансформаторів мають три стержні, що розміщені в одній площині. Магнітне коло плоского магнітопровода має невелику магнітну асиметрію, що обумовлює несиметрію намагнічуючих струмів. Струм неробочого ходу в фазі, що розміщена на середньому стержні, буде більший за величиною в порівнянні з струмами двох інших фаз, струми неробочого ходу яких рівні між собою. Однак практично для потужних трансформаторів це не має суттєвого значення, так як величина струму неробочого ходу складає 3-8% від номінального струму фази.

Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані зіркою або трикутником. При сполученні зіркою назовні крім лінійних кінців виводиться іноді нульова точка.

В деяких випадках використовується також з'єднання обмоток за схемою зигзаг (рис.1.10), коли фаза обмотки поділяється на дві частини, які розміщені на різних стержнях і з'єднуються послідовно. При цьому друга половина обмотки під'єднується зустрічно по відношенню до першої половини.

Згідно з державним стандартом, початки обмотки ВН позначаються літерами А, В, С, а кінці – літерами Х, У, Z. Початки обмотки НН позначаються малими літерами а, б, с, а кінці – х, у, z. Нульова точка позначають літерою N.

Схему з'єднання двообмоткового трансформатора позначають у вигляді дробу, в чисельнику якого поміщають позначення схеми з'єднання обмотки BH , а в знаменнику – обмотки HH (наприклад Y/Y).

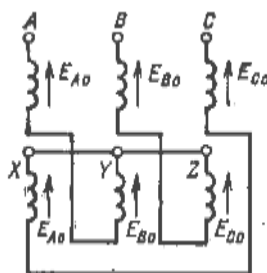


Рис. 1.10. Схема з'єднання обмотки зигзагом

Вибір схеми з'єднання обмоток залежить від багатьох причин. Наприклад, для мереж з напругою 35 кВ і більше вигідно з'єднати обмотку трансформатора зіркою і заземлити нульову точку, так як при цьому напруга виводів трансформатора і провідників лінії передачі відносно землі буде завжди в $\sqrt{3}$ раз меншою за лінійну, що дає можливість зменшити вартість ізоляції.

При з'єднанні обмоток трансформатора за схемою Y_n/Y треті гармоніки фазних струмів замикаються через нульовий провідник. При цьому струм неробочого ходу кожної фази має третю гармоніку, а потік є синусоїдним.

У схемі Y/Y шлях для замикання третіх гармонік фазних струмів відсутній і струм неробочого ходу є синусоїдним. Однак крива магнітного потоку спотворюється і має третю гармоніку. Несинусоїдними будуть також і ЕРС фаз. В тристержневому трансформаторі треті гармоніки магнітних потоків фаз не можуть замикатися через сталений магнітопровід, так як вони в будь-який момент направлені зустрічно. Тому треті гармоніки потоків замикаються через стінки бака, створюючи при цьому додаткові втрати потужності.

Якщо одна із обмоток з'єднана трикутником, то фазні потоки є практично синусоїдними. Це тому, що в обмотці, яка з'єднана трикутником, треті гармоніки е.р.с. викликають струм потрійної частоти, який протікає через фазні обмотки і зменшує треті гармоніки магнітних потоків. Таким чином, обмотки трансформаторів краще з'єднувати за схемами Y/Δ або Y_n/Δ , що дозволяє практично позбутися третіх гармонік в кривих магнітних потоків і ЕРС.

1.6.2. Групи з'єднань обмоток трансформаторів

З'єднання обмоток BH і HH зіркою чи трикутником отримують з'єднуючи відповідним чином затискачі фаз обмоток. Залежно від того, які затискачі фаз обмоток BH і HH з'єднуються разом, змінюється величина кута α зсуву фаз між векторами лінійних напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора в режимі неробочого режиму, що взяті між однойменними затискачами. В однофазних трансформаторах кут α дорівнює 0° чи 180° , а в трифазних трансформаторах кут α дорівнює

$$\alpha = K \cdot 30^\circ,$$

де $K = 0, 1, 2, 3, \dots, 11$ – ціле число, яке називається групою з'єднань обмоток трансформатора.

Для зручності визначення числа K користуються годинником. При цьому під номером групи з'єднання приймають годину на годиннику, хвилинна стрілка якого суміщена з вектором лінійної напруги $\dot{U}_{AB}$ обмотки BH і встановлена на цифру 0 (12), а годинна суміщена з вектором лінійної напруги $\dot{U}_{ab}$ обмотки HH .

Номер групи з'єднання вказується після позначення схеми з'єднання його обмоток, наприклад $Y/\Delta-11$ або $Y/Y-0$. Знання групи з'єднань обмоток необхідно при вмиканні трансформаторів на паралельну роботу, коли необхідно з'єднувати рівнопотенціальні затискачі обмоток.

Проілюструємо визначення групи з'єднань годинниковим способом на прикладах (рис.1.11). Для визначеності прийемо, що обмотки BH і HH намотані в одну сторону.

Трифазний трансформатор з з'єднанням обмоток BH і HH за схемою Y/Y і маркуванням виводів, що показана на рис.6.3,а, відноситься, як видно з векторних діаграм напруг первинної і вторинної обмоток, до групи 0. (Вектор U_{AB} співпадає за напрямом з вектором U_{ab}). Якщо нульову перемичку всередині трансформатора перенести (рис.1.11,б), то напрям всіх електрорушійних сил обмотки HH зміниться на 180° (Вектор U_{AB} буде в протифазі з вектором U_{ab}) і група з'єднання обмоток буде $Y/Y-6$.

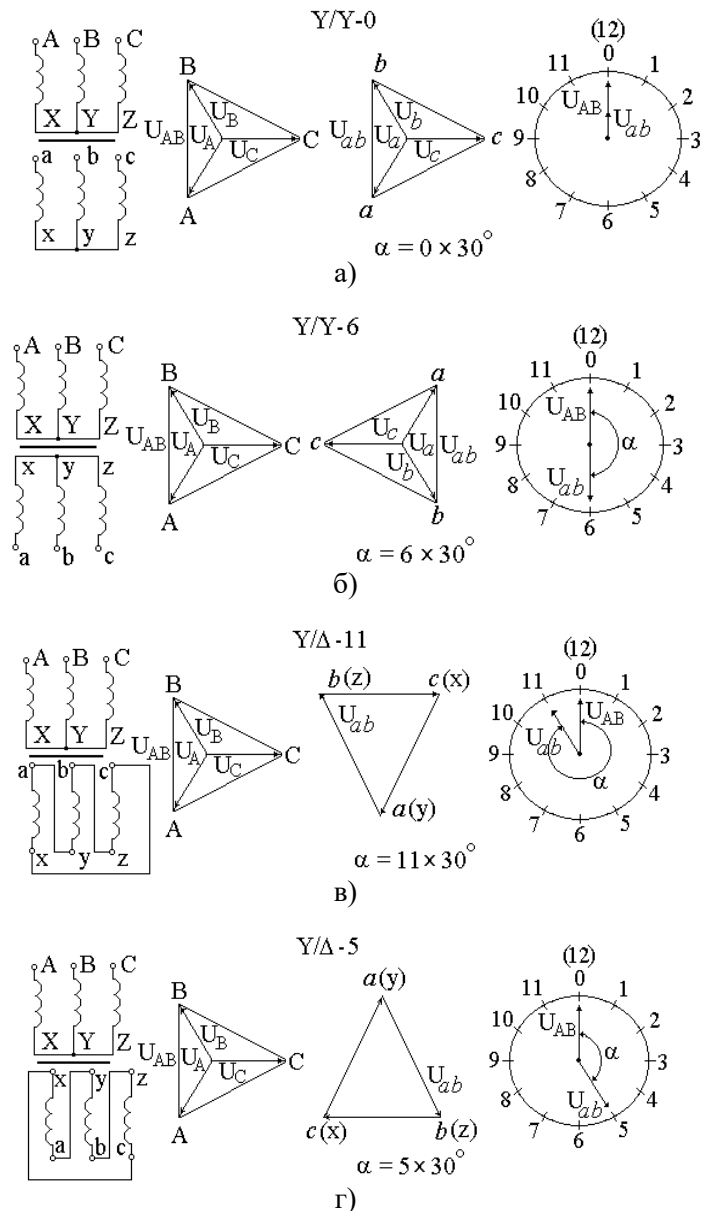


Рис.1.11. Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора

Якщо ж на рис.1.11,а,б здійснити кругове перемаркування (або перестановку) фаз обмоток *НН* і розмістити фазу *a* на правому стержні, фазу *b* – на лівому і фазу *c* – на середньому стержнях, то на векторній діаграмі напруг обмотки *НН* відбудеться кругова перестановка букв *a*, *b*, *c* проти годинникової стрілки. При цьому утвориться група з'єднань 8 (для рис.1.11,а) і 10 (для рис.1.11,б). Таким чином, при з'єднанні обмоток за схемою *Y/Y* можна отримати тільки парні номери груп.

Припустимо тепер, що обмотки з'єднані за схемою *Y/Δ*, як показано на рис.1.11,в,г. Слід відмітити, що група з'єднань обмоток буде залежати від того, яким чином обмотка *НН* з'єднана в трикутник. З'єднання обмотки *НН* в трикутник повинно утворюватись шляхом сполучення виводів *a* і *y*, *z* і *b*, *c* і *x*. Згідно з векторною діаграмою напруг рис.1.11,в маємо групу з'єднань 11, а змінюючи місцями позначення початків і кінців фаз обмотки *НН*, отримаємо перехід від групи 11 до групи 5 (рис.1.11,г). Шляхом вищеописаного кругового перемаркування позначень виводів обмотки *НН* отримаємо групи 7 і 3 (для рис.1.11,в), 1 і 9 (для рис.1.11,г). Отже, з'єднання обмоток за схемою *Y/Δ* дає можливість отримати тільки непарні номери груп.

Вище розглядалися групи з'єднань обмоток трансформатора, коли обмотка *ВН* з'єднувалась зіркою. Таких же 12 груп з'єднань можна отримати, коли з'єднати обмотку *ВН* трикутником. При цьому парні групи (0, 2, 4, 6, 8, 10) будуть при схемах з'єднань Δ/Δ , а непарні (3, 5, 7, 9, 11) при схемах з'єднання Δ/Y .

Через велику різноманітність в схемах і групах з'єднань обмоток трансформаторів, передбачено тільки дві групи 0 і 11 для з'єднання обмотки *ВН* зіркою (Y/Y_n-0 , $Y/\Delta-11$, $Y_n/\Delta-11$) і одна група 11 для з'єднання обмотки *ВН* трикутником (Δ/Y_n-11). Індекс “*n*” вказує на те, що назовні виводиться нульова точка обмотки.

При з'єднанні обмотки *ВН* за схемою Δ застосовується другий спосіб утворення трикутника (сполучення виводів *A* і *Z*, *B* і *X*, *C* і *Y*), ніж при з'єднанні трикутником обмотки *НН*. Якщо би

з'єднання трикутником обмотки BH здійснювалось так як обмотки HH при сполученні $Y/\Delta -11$, то при з'єднанні Δ/Y утворилася би група 1, а не 11.

Стандартизовані схеми і групи з'єднань обмоток трифазних трансформаторів наведені в табл.1.1

1.6.3. Паралельна робота трансформаторів

Для забезпечення надійності електропостачання, а також у зв'язку із спеціальними вимогами, на трансформаторних підстанціях встановлюються два і більше паралельно працюючих трансформатори. При цьому їх первинні обмотки ввімкнені – на спільну первинну мережу (первинні шини), а вторинні – на спільну вторинну мережу (вторинні шини).

Таблиця 1.1 - Стандартизовані схеми і групи сполучень обмоток трифазних двообмоткових трансформаторів

Схеми сполучень	Суміщені (точками B і b) векторні діаграми	Умовні позначення	
		в кресленнях	в тексті
		$Y/Y-0$	$Y/Y_н-0$
		$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$
		$Y/\Delta-11$	$Y_н/\Delta-11$
		$Y/Y-11$	$Y/Z_н-11$
		$\Delta/Y-11$	$\Delta/Y_н-11$
		$\Delta/\Delta-0$	$\Delta/\Delta-0$

Крім цього, паралельна робота трансформаторів забезпечує:

- резервування споживачів у випадку аварії;
- зменшення втрат енергії під час малих навантажень підстанції шляхом вимикання частини паралельно працюючих трансформаторів;
- кращу організацію профілактичного ремонту трансформаторів.

При паралельній роботі трансформаторів постає питання про розподіл між трансформаторами навантаження пропорційно їх номінальним потужностям. Такий розподіл навантаження досягається за умов, коли паралельно працюючі трансформатори мають:

- а) однакові групи з'єднань обмоток;
- б) рівні за величиною первинні і вторинні номінальні напруги (рівні коефіцієнти трансформації);
- в) рівні напруги короткого замикання та їх складові.

Слід відмітити, що при першому вмиканні трансформаторів на паралельну роботу необхідно переконатися в тому, що на одну і ту ж шину вмикаються такі фази окремих трансформаторів, напруги яких співпадають за фазою (однакове чергування фаз).

1.7. Електричний дросель

Сучасне визначення котушки індуктивності характеризує її як елемент електричного кола (двополюсник), що забезпечує задану в ній індуктивність. Котушки індуктивності застосовуються у найрізноманітнішій радіоелектронній апаратурі. Їх якість і параметри здійснюють суттєвий вплив на роботу радіоелектронних пристроїв. Котушки індуктивності застосовуються для настройки коливальних контурів на дану частоту, для передачі електричних коливань з одного контуру в інший (котушка зв'язку), для поділу або обмеження електричних сигналів різної частоти (дроселі) і т.д.

Дросель електричний - котушка індуктивності, що включається в електричне коло послідовно з навантаженням для усунення або обмеження змінної складової струму різної частоти.

Дроселі зазвичай мають сердечник (електротехнічна сталь). Застосовуються переважно в електричних фільтрах.

У залежності від призначення дроселі діляться на високочастотні і низькочастотні.

Межі діапазону дуже великі, тому чисто умовно коливання поділяють на три групи:

- низької частоти, їх ще називають звукові, мають діапазон коливань від 20 Гц до 20 кГц;
- середньої частоти: від 20 кГц до 100 кГц;
- високої частоти: понад 100 кГц.

Це відмінність відноситься і до конструктивного їх виконання. Дроселі високої частоти виготовляють у вигляді одношарових або багатошарових котушок без осердя або з сердечниками. Для дроселів довгих і середніх хвиль застосовують секційне намотування. Дроселі на коротких і метрових хвилях мають одношарову намотування, суцільну або з примусовим кроком.

Для зменшення габаритів дроселів застосовують магнітні сердечники. До числа таких матеріалів відносяться відомі альсифера і карбонильное залізо. Останнім часом в якості матеріалу для сердечників широко застосовують ферити (М): нікель-цинкові (Н), марганець-нікелеві (М), літій-цинкові (Л). Переваги феритів – стабільність магнітних характеристик у широкому діапазоні частот, малі втрати на вихрові струми і простота виготовлення феритових деталей. Ферити майже не піддаються механічній обробці, вони обробляються тільки абразивами, такими як, наприклад, корунд. Завдяки високому питомому опору, котушки з сердечниками з феритів можуть мати дуже велику добротність, на низьких частотах понад 500, а на частотах 500 ... 1000 кГц – 300.

Основною характеристикою магнітного матеріалу сердечника є магнітна проникність. На практиці вона оцінюється відносною величиною (по відношенню до магнітної проникності вакууму) і є безрозмірною. Магнітну проникність феритів можна вважати постійною лише при першому, грубому наближенні.

Цифри, що стоять перед літерними позначеннями, вказують середнє значення початкової магнітної проникності матеріалу сердечника (B_0). Якщо до температурної стабільності початкової магнітної проникності феритів не пред'являються підвищені вимоги, то застосовують марганець-цинкові ферити марок 6000НМ, 4000НМ, 3000НМ, 2000НМ, 1500НМ і 1000НМ. Ці ферити використовуються в діапазоні частот до декількох сотень кілогерц як у слабких, так і в сильних полях. Ферити марок 2000НМ1, 1500НМ1, 1500НМ2, 1500НМ3, 1000НМ3 і 700НМ призначені для частот до 3 МГц у слабких і середніх полях. Їм властиві малі втрати і малий температурний коефіцієнт початкової магнітної проникності в широкому інтервалі температур. Для магнітних антен приймачів випускаються феритові стрижні марок 700НМ (до 3 МГц), 150ВМ (до 12 МГц), 100ВМ (до 18 МГц), 50ВМ2 (до 30 МГц) і 30ВМ2 (до 100 МГц). Стрижні виготовляються круглого і прямокутного перерізу. Феритові деталі можна склеювати полістиролових, епоксидним та іншими клеями.

Стабільність котушок індуктивності з сердечниками з нікель-цинкових феритів з початковою магнітною проникністю 10 ... 50 (ферити марок ВН) складає 1 рік, при цьому індуктивність змінюється не більше $\pm 5\%$, а котушки з сердечниками з того ж матеріалу, але марок НН – до $\pm 2\%$. Індуктивність котушок з сердечниками з марганець цинкових феритів (марки НМ) за рік змінюється до 5% і є менш стабільною, ніж попередні. Котушки на альсиферових кільцях змінюють свою індуктивність в плинні року не більше ніж на $\pm 1\%$.

Умовне позначення феритового стрижня складається з чотирьох елементів:

1. Буква М вказує, що виріб зроблено з фериту.
2. Цифра – початкове значення магнітної проникності.
3. Букви і кілька цифр – марка фериту (В – ферит для роботи на частотах вище 5 МГц, Н – для роботи на низьких частотах).

4. Скорочене позначення конструктивного виду сердечника і його розмірів в міліметрах.

На додаток до названих буквах третього елемента іноді додається ще одна буква з вказівкою характеристики магнітного поля, в якому може працювати цей ферит: З - ферит для роботи в сильних магнітних полях, І – спеціальний ферит для роботи в імпульсних магнітних полях, якщо цієї букви немає, то ферит призначений для роботи в слабких магнітних полях. Після четвертого елемента іноді може стояти цифра, яка характеризує відмінність властивостей фериту. Після зазначених елементів слід риса, яка виділяє найменування виробу виготовленого з фериту (позначається літерою) і його конструктивні розміри (позначаються цифрами):

- Б – броньовий сердечник, що складається з двох чашок з циліндричним підлаштуванням стрижня (число після літери вказує зовнішній діаметр чашки);
- Г – Г-подібний для телеапаратури, далі числа послідовно відповідають довжині, ширині і товщині виробу;
- К – кільцевої сердечник, далі числа відповідають зовнішньому діаметру, внутрішньому діаметру і висоті кільця;
- ОС – кільцевої сердечник для відхиляючої системи кінескопа, числа позначають типорозмір сердечника;
- ПК – П-подібний, круглого перетину сердечник для трансформатора рядкової розгортки, числа вказують відстань між діаметрами та їх діаметр;
- ПП – П-подібний, прямокутного перерізу осердя, числа вказують відстань між стрижнями, ширину стрижня, висоту стрижня;
- СС – для циліндричних стрижнів не більше 3,5 мм, числа вказують діаметр і довжину сердечника (циліндричні стрижні діаметром 8 мм і 10 мм в позначенні не містять літер СС, в стержнях прямокутного перерізу числа вказують ширину, товщину і довжину сердечника);
- Ш – Ш-подібний сердечник, числа позначають ширину і товщину середнього виступу;
- З – замкнутий;
- П – П-подібний сердечник, числа позначають висоту виробу, висоту вікна, ширину виробу і ширину вікна.

Приклад: М100НН-2-СС 2,8 x12: М – ферит; 100, $B_0 = 100$; Н – низькочастотний; Н – нікель-цинковий; 2 – різні властивості; СС – стрижень; 2,8 мм – діаметр; 12 мм – довжина.

М700НМ-Б9: М – ферит; 700, $B_0 = 700$; Н – низькочастотний; М – марганець-цинковий; Б – броньовий; 9 мм – діаметр.