

ТРАНСФОРМАТОРИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

ТРАНСФОРМАТОРИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2018

УДК 621.314.222 (075.8)
Т65

Колектив авторів:

С. А. Агаркова, Е. А. Галіцин, А. О. Бояркін, С. М. Фірсов

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Д. М. Клец,
канд. техн. наук, доц. О. В. Чумаченко

Трансформатори малої потужності [Електронний ресурс] : навч. посіб. / С. А. Агаркова, Е. А. Галіцин, А. О. Бояркін, С. М. Фірсов.– Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 68 с.

Викладено основні відомості про трансформатори малої потужності. Наведено методику електромагнітного розрахунку. Подано необхідні для практичних розрахунків таблиці та графіки намагнічування сталевих осердь, питомих втрат у них, номінальні розміри проводів первинних і вторинних обмоток.

Для студентів при виконанні розрахунково-графічних, курсових і дипломних робіт.

Іл. 28. Табл. 12. Бібліогр: 5 назв

УДК 621.314.222 (075.8)

© Колектив авторів, 2018
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2018

Вступ

Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат, що перетворює змінний струм однієї напруги у змінний струм іншої напруги тієї ж частоти

До трансформаторів малої потужності (т.м.п.) зазвичай відносяться трансформатори, потужність яких не перевищує 1000 вольт-ампер.

Такі трансформатори широко застосовуються в радіотехніці, автоматиці, приладобудуванні, лічильно-обчислювальних пристроях, імпульсній техніці, у побуті й т.д. Залежно від призначення та функцій, виконуваних т.м.п. у схемах, розрізняють трансформатори силові, вимірювальні, імпульсні, пікові, вхідні, вихідні, узгоджувальні й т.д.

З усіх видів т.м.п. до найбільш поширеної групи відносяться силові трансформатори, призначені для живлення електронних приладів, схем магнітних підсилювачів, електродвигунів, напівпровідникових приладів, обмоток реле і т.ін. Найчастіше силові т.м.п. виконуються на частоті $f = 50, 400, 500$ і 1000 Гц при напрузі первинних обмоток від 30 до 220 В і вторинних обмоток від 5 до 1000 В.

Залежно від призначення і умов роботи до силових т.м.п. пред'являються різні вимоги. Термін служби т.м.п. залежить від строку служби апаратури значно менше, ніж термін служби великих трансформаторів, тому при проектуванні т.м.п. прагнуть знизити їх вартість і спростити конструкцію, а також повніше використовувати активні та ізоляційні матеріали. У ряді випадків (зокрема, для авіації та ракетної апаратури) велике значення має зниження габаритів і ваги трансформаторів.

До т.м.п. авіаційної апаратури виставляють вимоги підвищеної вологостійкості, високої механічної міцності, стійкості відносно вібрацій, прискорення і т.ін. Бажано також отримати досить високий коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора.

Виконання окремих названих вище вимог при проектуванні трансформатора призводить до суперечностей. Наприклад, виконання вимоги більш високого ККД призводить до збільшення габаритів трансформатора, і навпаки, зниження габаритів і ваги пов'язане зі зменшенням ККД. Завданням розробника є визначення оптимального варіанта трансформатора, який найкраще відповідає технічним умовам.

В посібнику дано основи розрахунку і конструювання трансформаторів малої потужності на частотах 50, 400, 500 і 1000 Гц.

Принцип дії трансформатора

Електромагнітна схема однофазного двохобмотувального трансформатора складається з двох обмоток (рис.1), розміщених на замкнутому магнітопроводі, який виготовлений з феромагнітного матеріалу. Застосування феромагнітного магнітопроводу дозволяє посилити електромагнітний зв'язок між обмотками, тобто зменшити магнітний опір контуру, по якому проходить магнітний потік машини.

Первинну обмотку 1 підключають до джерела змінного струму електричної мережі з напругою U_1 . До вторинної обмотки 2 приєднують опір навантаження Z_H .

Обмотку більш високої напруги називають *обмоткою вищої напруги* (ВН), а низької напруги – *обмоткою нижчої напруги* (НН).

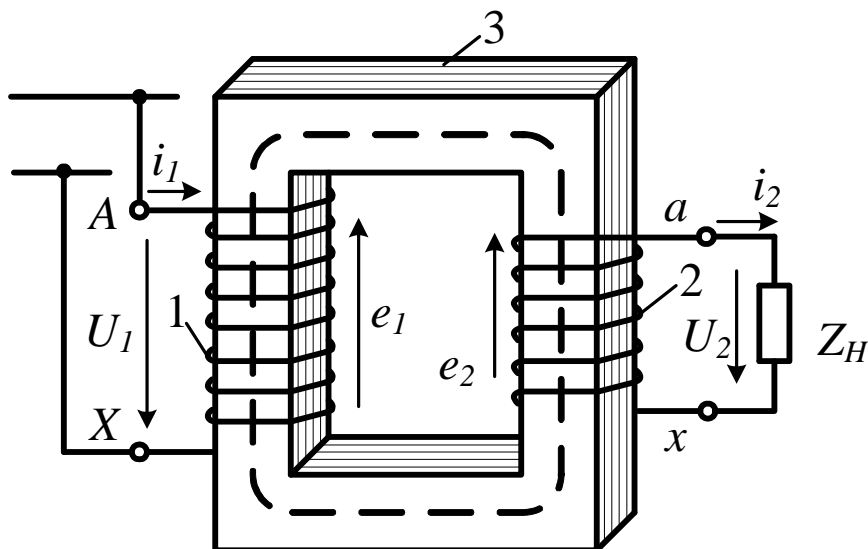


Рис.1. Електромагнітна система однофазного трансформатора

Початки і кінці обмотки ВН позначають літерами A і X ; обмотки НН – літерами a і x .

При підключенні до мережі у первинній обмотці виникає змінний струм i_1 , який створює змінний магнітний потік, основна частина якого Φ замикається по магнітопроводу, а незначна $\Phi_{р1}$ (магнітний потік розсіювання) – по повітрю. Основний магнітний потік Φ індукуює в обох обмотках змінні ЕРС – e_1 і e_2 , пропорційні, згідно із законом електромагнітної індукції, числам витків w_1 і w_2 відповідної обмотки і швидкості зміни потоку $d\Phi/dt$. Таким чином, миттєві значення ЕРС індуковані у кожній обмотці:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Таким чином, енергія з первинної обмотки у вторинну передається за допомогою змінного магнітного поля, а гальванічний зв'язок між обмотками відсутній.

При практичних розрахунках трансформаторів використовують вирази для діючого значення ЕРС обмоток трансформатора, а також приймають припущення, що магнітний потік трансформатора є синусоїдальною функцією часу, тобто

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

Після підстановки і диференціювання отримаємо:

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t,$$

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t.$$

Оскільки

$$\cos \omega t = -\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

то

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

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

Звідки амплітудне значення ЕРС:

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m,$$

$$E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m.$$

Розділивши E_{1m} і E_{2m} на $\sqrt{2}$ і підставивши $\omega = 2\pi f$, отримаємо діючі значення ЕРС обмоток трансформатора:

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

$$E_2 = 4,44fw_2\Phi_m.$$

Відношення миттєвих і діючих ЕРС в обмотках визначаються виразом

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Якщо знехтувати падінням напруги в обмотках трансформатора, які зазвичай не перевищують 3...4 % від номінальних значень напруг U_1 і U_2 , і вважати, що

$$E_1 \approx U_1 \quad \text{і} \quad E_2 \approx U_2,$$

то одержимо

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}.$$

Отже, підбираючи відповідним чином числа витків обмоток, при заданій напрузі U_1 можливо отримати бажану напругу U_2 . Якщо необхідно підвищити вторинну напругу, то число витків w_2 повинно бути більше числа w_1 ; такий трансформатор називають підвищувальним. Якщо потрібно зменшити напругу U_2 , то число витків w_2 беруть менше w_1 . Такий трансформатор називають знижувальним.

Відношення ЕРС $E_{\text{ВН}}$ обмотки вищої напруги на ЕРС $E_{\text{НН}}$ обмотки нижчої напруги (або відношення чисел витків) називають коефіцієнтом трансформації:

$$k = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}}.$$

Коефіцієнт трансформації завжди більше одиниці як для понижувального, так і для підвищувального трансформаторів.

У системах передачі й розподілу енергії в ряді випадків застосовуються триобмотувальні трансформатори, а у пристроях радіоелектроніки і автоматики – багатообмотувальні трансформатори. У таких трансформаторах на магнітопроводі розміщують три або більше ізольованих одної від іншої обмотки, що дозволяє при живленні однієї з обмоток отримувати дві або більше різних напруг (U_2 , U_3 , U_4 і т.ін.) для електропостачання двох або більшого числа груп споживачів. У триобмотувальних силових трансформаторах розрізняють обмотки вищої, нижчої та середньої (СН) напруг.

У трансформаторі перетворюються лише напруги і струми. Потужність залишається приблизно постійною (вона дещо зменшується через внутрішні втрати енергії у трансформаторі). Отже,

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

При збільшенні вторинної напруги трансформатора у k разів, порівняно з первинною напругою, струм i_2 у вторинній обмотці відповідно зменшується в k разів.

Трансформатор може працювати тільки в колах змінного струму. Якщо первинну обмотку трансформатора підключити до джерела постійного струму, то в його магнітопроводі утворюється магнітний потік, постійний у часі за величиною і напрямком. Тому в первинній і вторинній обмотках у сталому режимі не індукуються ЕРС, а отже, не передається електрична енергія з первинного кола у вторинне. Такий режим небезпечний для трансформатора, так як за відсутності ЕРС E_1 у первинній обмотці струм

$$I_1 = U_1/R_1$$

досить великий.

Важливою властивістю трансформатора, що використовується у пристроях автоматики і радіоелектроніки, є його здатність перетворювати навантажувальний опір. Якщо до джерела змінного струму підключити опір R через трансформатор з коефіцієнтом трансформації k , то його величина для кола джерела дорівнює

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \approx k^2 R,$$

де P_1 – потужність, що споживається трансформатором від джерела змінного струму, Вт;

$P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ – потужність, споживана опором R від трансформатора.

Таким чином, *трансформатор змінює значення опору R у k^2 разів*. Цю властивість широко використовують при розробленні електричних схем для узгодження опорів навантаження з внутрішнім опором джерел електричної енергії.

Режими роботи

Режим холостого ходу трансформатора – це режим роботи, при якому первинна обмотка трансформатора включена в мережу змінного струму з напругою U_1 і частотою f , а вторинна розімкнута (відключена) (рис. 2), тобто

$$Z_H = \infty, \quad I_2 = 0.$$

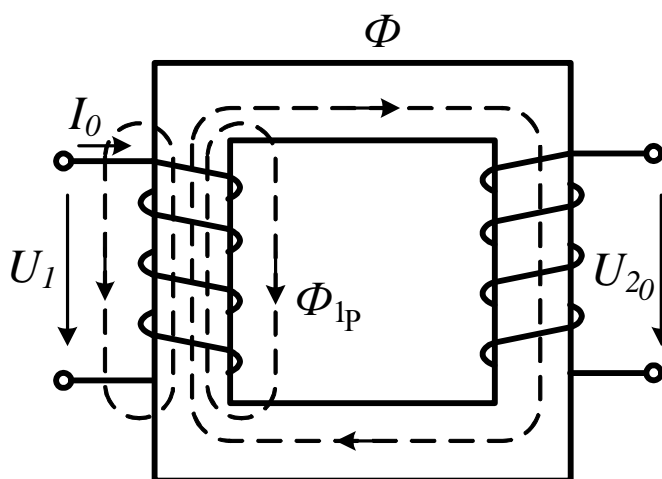


Рис. 2. Трансформатор у режимі холостого ходу

Під дією напруги U_1 по первинній обмотці протікає струм холостого ходу I_0 , який створює магніторушійну силу МДС, яка дорівнює $I_0 w_1$. МДС створює в трансформаторі основний магнітний потік Φ і магнітний потік розсіювання первинної обмотки Φ_{1p} . Потік розсіювання Φ_{1p} зчеплен тільки з первинною обмоткою і наводить у ній ЕРС розсіювання:

$$\begin{aligned} e_{1p} &= -L_{1p} \frac{di_0}{dt} = -L_{1p} \frac{d(I_{0m} \sin \omega t)}{dt} = \\ &= -L_{1p} \omega I_{0m} \cos \omega t = -I_{0m} X_{1p} \cos \omega t, \end{aligned}$$

де L_{1p} – індуктивність розсіювання первинної обмотки;

X_{1p} – індуктивний опір розсіювання первинної обмотки.

ЕРС розсіювання e_{1p} відстає по фазі від струму i_0 на $\pi / 2$. Діюче значення, виражене у комплексній формі, розраховують за виразом

$$\dot{E}_{1p} = -j\dot{I}_0 X_{1p},$$

де

$$X_{1p} = \omega L_{1p},$$

Рівняння первинного кола трансформатора має вигляд

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1p} = \dot{I}_0 R_1,$$

або

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{1p}.$$

Величина

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jX_{1p}$$

називається повним внутрішнім опором первинної обмотки. В остаточному вигляді рівняння первинного ланцюга буде таке:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \dot{Z}_1,$$

Векторна діаграма (рис. 3) аналогічна діаграмі котушки зі сталевим осер'ям. Струм холостого ходу має активну і реактивну складові:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0p}, \quad I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}.$$

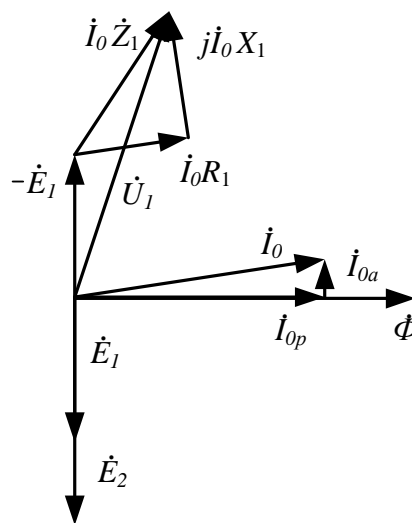


Рис.3. Векторна діаграма трансформатора в режимі холостого ходу

Реактивна складова I_{0p} йде на створення магнітного потоку (намагнічувальний струм). Активна складова I_{0a} забезпечує компенсацію магнітних втрат активної потужності в магнітопроводі. За величиною активна складова I_{0a} , як правило, значно менше реактивної I_{0p} .

Струм холостого ходу зазвичай дуже малий і не перевищує кількох відсотків від номінального первинного струму.

Режим навантаження. Якщо до вторинної обмотки включити навантаження Z_H , то в ній під дією E_2 почне протікати струм I_2 , який створює магнітний потік. Основна частина цього потоку Φ_2 замикається по магнітопроводу, зчепленому зі вторинною і первинною обмотками. Незначна частина потоку замикається по повітрю, зчеплюючись тільки зі вторинною обмоткою Φ_{2p} (рис. 4), і наводить в ній ЕРС розсіювання E_{2p} . Аналогічно виразу для ЕРС, розсіювання первинної обмотки можна записати так:

$$\dot{E}_{2p} = -j\dot{I}_2 X_{2p}, \quad X_{2p} = \omega L_{2p},$$

де L_{2p} – індуктивність розсіювання вторинної обмотки;

X_{2p} – індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки.

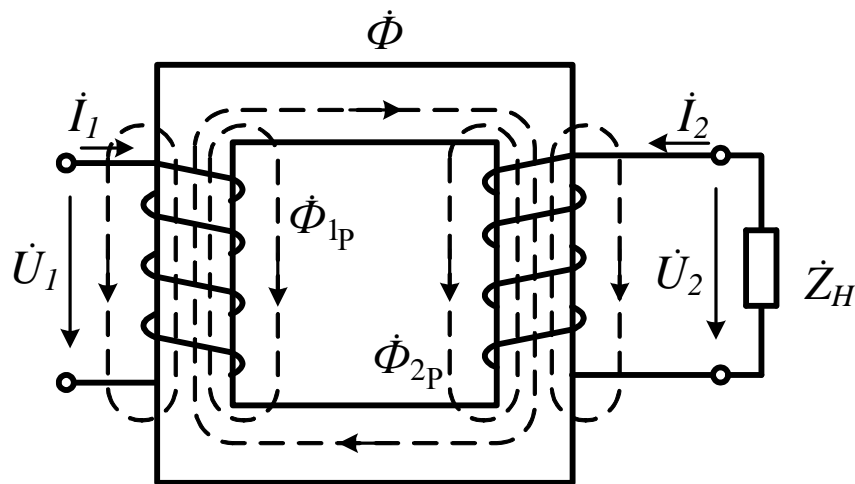


Рис.4. Трансформатор у режимі навантаження

Магнітний потік Φ_2 спрямований назустріч (відстає на 180°) магнітному потоку Φ_1 , створеному струмом первинної обмотки I_1 . Загальний магнітний потік Φ може бути виражений сумою

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

З рівняння первинного кола трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \dot{Z}_1 ,$$

нехтуючи втратами напруги на опорі обмотки \dot{Z}_1 , отримаємо

$$U_1 \approx E_1 ,$$

Згідно з рівнянням трансформаторної ЕРС

$$U_1 \approx E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m ,$$

величина магнітного потоку Φ_m залежить тільки від величини напруги первинної обмотки U_1 . Оскільки U_1 не залежить від режимів роботи трансформатора, то

$$\Phi_m \neq f(\dot{Z}_H) = const,$$

тобто *магнітний потік трансформатора не залежить від режиму, і є величина постійна.*

Амплітуда магнітного потоку, в режимах холостого ходу і навантаження, однакова. Тому сума магніторушійних сил не залежить від режиму роботи, тобто

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2.$$

Якщо всі члени рівняння розділити на w_1 , отримаємо співвідношення

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

Величина

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$$

називається *зведеним вторинним струмом.*

Співвідношення струмів трансформатора набуває вигляду

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

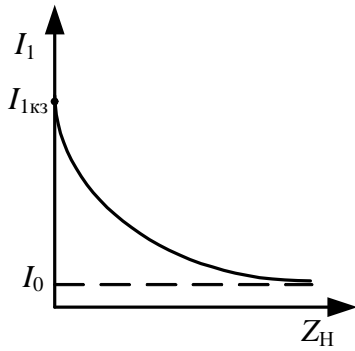


Рис. 5 Струм первинної обмотки

Із співвідношення струмів видно, що у режимі холостого ходу $\dot{I}'_2 = 0$, тобто $\dot{I}_0 = \dot{I}_1$. У режимі навантаження струм \dot{I}_2 , згідно із законом Ленца, призводить до виникнення магнітного потоку, який послаблює основний магнітний потік. Для того, щоб Φ_m залишався незмінним, зростає струм первинної обмотки \dot{I}_1 . Залежність струму первинної обмотки від навантаження наведено на рис. 5

Рівняння вторинного кола має вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2p} = \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_H,$$

або

$$\dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{2p} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_H.$$

Повний внутрішній опір вторинної обмотки

$$\dot{Z}_2 = R_2 + jX_{2p},$$

а вторинна напруга (напруга на навантаженні):

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_H.$$

В остаточному вигляді рівняння вторинного кола буде мати вигляд

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

Рівняння первинного кола трансформатора має вигляд

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1p} = \dot{I}_1 R_1,$$

або

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{1p}$$

В остаточному вигляді:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \dot{Z}_1,$$

Таким чином, трансформатор у режимі навантаження описується рівняннями струмів первинного та вторинного кола:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \dot{Z}_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \end{aligned} \right\}.$$

Для побудови векторної діаграми навантаженого трансформатора (рис. 6) необхідно використовувати основні рівняння трансформатора у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{1p} \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{2p} - \dot{I}_2 R_2 \end{aligned} \right\}.$$

Режим короткого замикання – аварійний режим роботи трансформатора, при якому напруга на первинній обмотці трансформатора дорівнює номінальній напрузі, а опір навантаження дорівнює нулю. В обмотках трансформатора встановлюються великі струми, що призводить до виходу з ладу трансформатора.

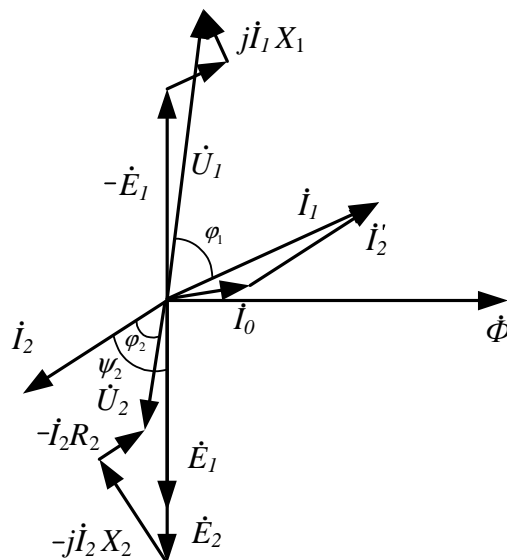


Рис. 6. Векторна діаграма трансформатора в режимі навантаження

Схема заміщення трансформатора

У *реального трансформатора* обмотки мають як активний опір, так і реактивний опір розсіювання, тобто, крім основного магнітного потоку, є магнітні потоки розсіювання первинної і вторинної обмоток.

Для спрощених досліджень процесів вживають *ідеалізований трансформатор*, в якому відсутні магнітні потоки розсіяння, а активні опори обмоток дорівнюють нулю.

При побудові схем заміщення трансформатора використовують поняття *зведений трансформатор*.

Зведений трансформатор еквівалентний реальному трансформатору, у якого коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці. При цьому повинні залишитися незмінними всі енергетичні співвідношення в трансформаторі. Наведені електричні величини позначаються штрихами.

Рівняння балансу енергії наведеного та реального трансформаторів має вигляд

$$\dot{E}_2 I_2 = \dot{E}'_2 I'_2,$$

тобто наведена ЕРС вторинної обмотки

$$\dot{E}'_2 = \frac{\dot{E}_2 I_2}{I'_2}.$$

Оскільки

$$I'_2 = -I_2 \frac{w_2}{w_1} = -I_2 \frac{1}{k},$$

то

$$\dot{E}'_2 = -\dot{E}_2 k .$$

З рівняння балансу потужностей

$$\dot{U}_2 I_2 = \dot{U}'_2 I'_2$$

отримуємо

$$\dot{U}'_2 = -\dot{U}_2 k.$$

У загальному випадку наведені величини отримуємо множенням рівняння вторинного кола трансформатора на коефіцієнт трансформації k :

$$\dot{U}_2 k = \dot{E}_2 k - j \dot{I}_2 X_{2p} k - \dot{I}_2 R_2 k.$$

Це рівняння для приведеного трансформатора

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j \dot{I}'_2 X'_2,$$

відповідно, наведені величини

$$\dot{U}'_2 = -\dot{U}_2 k, \quad \dot{E}'_2 = -\dot{E}_2 k, \quad R'_2 = R_2 k^2,$$

$$X'_2 = X_2 k^2, \quad Z'_2 = Z_2 k^2.$$

Наведені параметри навантаження:

$$Z'_H = Z_H k^2, \quad R'_H = R_H k^2, \quad X'_H = X_H k^2, \quad L'_H = L_H k^2.$$

Таким чином, приведений трансформатор описується трьома рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_{1p} \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j \dot{I}'_2 X'_2 \end{aligned} \right\}.$$

Схема заміщення трансформатора (рис.7) будується на підставі рівнянь зведеного трансформатора і векторної діаграми і являє собою поєднання двох схем заміщення для первинної і вторинної обмоток, які з'єднані між собою в точ-

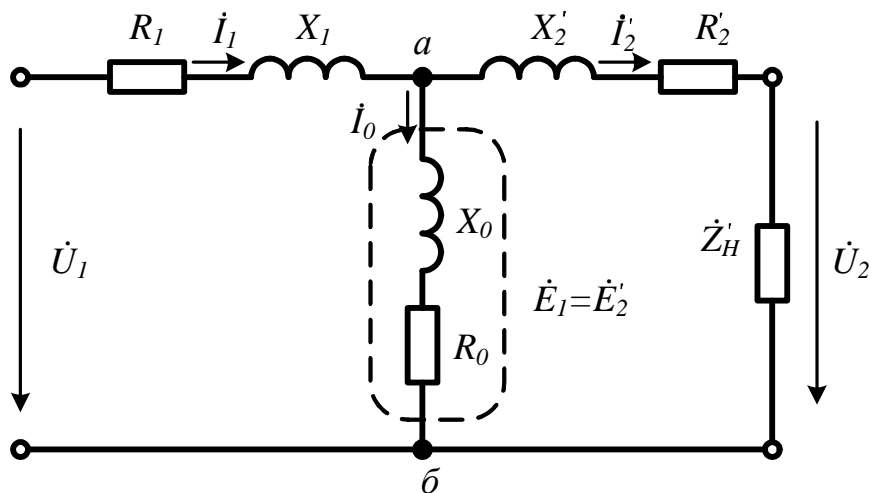


Рис. 7. Схема заміщення трансформатора

ках a і b . Ділянка схеми між точками a і b , по якій протікає струм I_0 , називається намагнічувальним контуром і заміщує дію основного магнітного потоку. Він є загальним для обох контурів та індукує ЕРС:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2,$$

його внутрішній опір

$$\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0.$$

Втрати у трансформаторі

Потужність, що споживається трансформатором:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Потужність, що передається до навантаження:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Рівняння балансу активних потужностей

$$P_1 = P_2 + P_E + P_M,$$

де P_E – електричні втрати, іноді називаються *втрати в міді*;

P_M – магнітні втрати, які називаються *втрати у сталі*.

ККД трансформатора визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_E + P_M}.$$

Магнітні втрати – це втрати в магнітопроводі трансформатора. При стабільній напрузі U_1 і частоті f амплітуда магнітного потоку Φ_m практично постійна, тому значення магнітних втрат також практично незмінне, тобто не залежить від навантаження трансформатора і дорівнює втратам потужності на холостому ході.

Магнітні втрати визначаються експериментально: дослідом холостого ходу або обчисленням за емпіричними залежностями, наприклад:

$$P_M = P_{1,0/400} \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} G_M,$$

де $P_{1,0/400}$ – питомі втрати потужності (в 1кг) сталі при індукції $B_m = 1$ Тл та частоті $f = 400$ Гц;

G_M – маса осердя.

Електричні втрати – це втрати, що йдуть на нагрівання обмоток трансформатора струмами, що протікають по них:

$$P_{\Sigma} = R_1(t^\circ)I_1^2 + R_2(t^\circ)I_2^2.$$

При визначенні втрат враховуються зміни активного опору обмоток від нагрівання. Вони прямо пропорційні квадрату струму, тобто залежать від навантаження, тому називаються змінними. Електричні втрати можливо визначити експериментально (дослід короткого замикання).

Основні теоретичні положення та рекомендації до розрахунку трансформаторів малої потужності

При розрахунку т.м.п. користуються формулою, яка дає зв'язок між потужністю трансформатора та його геометричними розмірами. Розглянемо виведення цієї формули.

Сума потужностей всіх обмоток трансформатора (враховуючи первинну):

$$P'_S = \sum U_i I_i,$$

де $i = 1, 2, 3 \dots N$ – порядковий номер обмотки. Напряга кожної обмотки наближено може бути виражена через ЕРС:

$$U_i \approx E_i = 4,44 f w_i \Phi_m,$$

$$\Phi_m = B_m S_c K_c \cdot 10^{-4},$$

де $S_c = ab$ [см²] – площа перерізу осердя;

K_c – коефіцієнт заповнення осердя сталлю, що враховує наявність ізоляції між листами сталі;

B_m [Тл] – максимальне значення індукції в осерді магнітопровода.

Струм кожної обмотки можна виразити через густину струму $j \left[\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right]$ та площу поперечного перерізу проводу $q \text{ [мм}^2\text{]}$:

$$I_i = j_i q_i.$$

Площа поперечного перерізу оголеної міді обмотки дорівнює добутку площі поперечного перерізу проводу на кількість витків $q_i w_i \text{ [мм}^2\text{]}$.

Площа поперечного перерізу кожної обмотки з урахуванням ізоляції S_i визначається за виразом

$$S_i = \frac{q_i w_i}{K_{mi}} 10^{-2},$$

де K_{mi} – коефіцієнт заповнення площі вікна міддю, що залежить від діаметра проводу і сорту ізоляції ($K_{mi} < 1$).

Повна площа поперечного перерізу, займана усіма обмотками, визначає площу вікна трансформатора $S_{ок} = ch \text{ [см}^2\text{]}$ (рис. 8):

$$S_{ок} \approx \sum_{i=1}^{i=N} S_i \text{ [см}^2\text{]}.$$

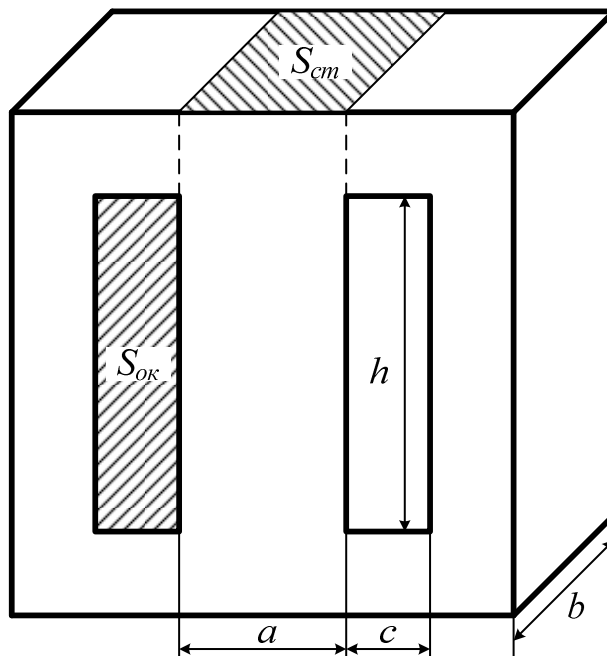


Рис.8. Розрахункова площа поперечного перерізу осердя $S_{ст}$ і вікна $S_{ок}$

Потужність P_1 , споживана первинною обмоткою, більше сумарної потужності вторинних обмоток P_2 на величину втрат у трансформаторі й визначається через ККД:

$$P_2 = P_1 \eta [B \cdot A].$$

Використовуючи наведені вище вирази, можна отримати розрахункову формулу, яка встановлює зв'язок між вторинною (корисною) потужністю трансформатора P_2 , його геометричними розмірами $S_{ок}S_{ст}$, частотою f і електромагнітними навантаженнями – індукцією B і густиною струму j :

$$S_{ок}S_{ст} = \frac{P_2(1 + \eta)10^2}{4,44fBjK_cK_m} [\text{см}^4].$$

Аналізую отриманий вираз, можна зробити такі висновки:

1) для однієї і тієї ж потужності і частоти може бути отримано велику кількість трансформаторів різних розмірів;

2) розміри (а отже, вага та вартість) трансформатора при даній потужності й частоті визначаються вибором електромагнітних навантажень. Чим більше індукція і густина струму, тим менше розміри трансформатора. Однак при збільшенні індукції і густини струму зростають втрати в осерді і обмотках, а отже знижується ККД і збільшується нагрівання. Крім того, зростають намагнічувальний струм і падіння напруги в обмотках трансформатора. Ці фактори обмежують збільшення B і j ;

3) підвищення частоти знижує розміри трансформатора. Цим пояснюється все більше використання трансформаторів (як і інших електротехнічних пристроїв) на підвищеній частоті 400, 500, 1000 Гц і більше. Однак при збільшенні частоти доводиться дещо зменшити електромагнітні навантаження (щоб уникнути надмірного нагріву), тому розміри трансформатора зменшуються в меншій мірі, ніж змінюється частота;

4) розміри поперечного перерізу сердечника $S_{ст}$ і вікна трансформатора $S_{ок}$ при одній і тій же потужності, частоті і електромагнітних навантаженнях обернено пропорційні один одному. Отже, можна змінювати співвідношення між розмірами осердя і розмірами обмоток, між вагою сталі й вагою міді. Це співвідношення може бути вибрано таким, щоб отримати трансформатор або мінімальної ваги, або мінімальної вартості, або максимального ККД і т.д. Слід враховувати, що ціна обмотувальної міді у малопотужних трансформаторів значно вище вартості сталі, тому відношення ваги сталі до ваги міді у них вибирається вищим, ніж для трансформаторів великої потужності;

5) з усього сказаного впливає, що проектування трансформатора є завданням з багатьма невідомими, розв'язуваним таким чином, щоб отримати найвигідніший варіант трансформатора з урахуванням виконання вимог щодо його ваги, габаритів вартості, ККД, зміни вторинних напруг із зміною навантаження, величини намагнічувального струму, перегріву, конструкції, технологічності і т. д.

В наш час немає необхідності повністю застосовувати метод послідовного наближення для розрахунку кожного трансформатора, так як на основі рівності розроблені методики розрахунку, в яких наводяться різні формули, таблиці та криві, що дозволяють швидко підійти до оптимальних варіантів трансформатора і виконати їх на нормалізованих осердях. Ці методики створені на основі матеріалів випробувань, досліджень, експлуатації серійних і спеціальних трансформаторів.

Магнітопроводи трансформаторів малої потужності

Залежно від технології виготовлення магнітопроводи т.м.п. поділяють на пластинчасті й стрічкові .

Згідно з конструктивним виконанням пластинчасті і стрічкові магнітопроводи діляться на три типи: стрижневі, броньові та тороїдальні (рис. 9).

Пластинчасті магнітопроводи збирають з окремих пластин, виготовлених штампуванням ізольованих один від одного оксидною плівкою або шаром ізоляційного лаку для зменшення втрат на вихрові струми.

Найбільш поширені пластинчасті броньові магнітопроводи (звані також Ш-подібними) збираються вперекришку, причому в кожному шарі містяться пластини двох типів: одна Ш-подібна і одна прямокутна. Пластини вставляються в готову котушку, причому кожна наступна Ш-подібна пластина вставляється в котушку з іншого боку.

Стрічкові магнітопроводи виготовляються із стрічки, попередньо покритої спеціальними ізолювальними і склеювальними сумішами. Збираються вони встик з окремих осердь підковоподібної форми (рис. 9 г. д.). Для одержання можливо меншого магнітного опору в місцях стику осердь їх торцеві поверхні шліфують. Крім цього, обидві частини магнітопроводу після складання часто склеюються за допомогою спеціальної феромагнітної пасти. Слід зазначити, що останнім часом подібним чином почали виготовляти і пластинчасті штамповані магнітопроводи.

Стрічкові магнітопроводи, завдяки ряду переваг перед штампованими, знайшли широке застосування при виготовленні т.м.п. Серед переваг стрічкових магнітопроводів найбільш суттєвими є:

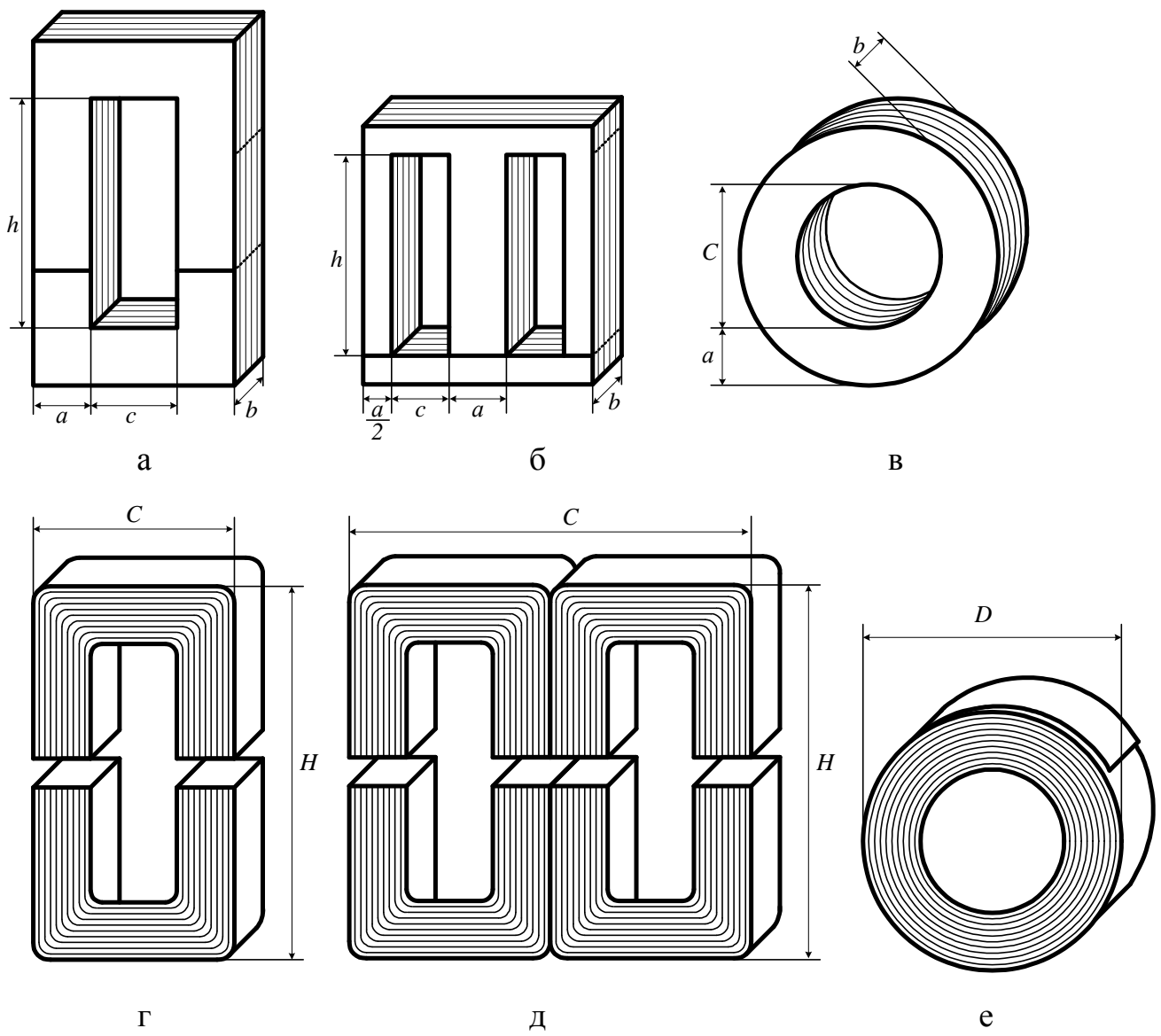


Рис. 9. Конструкція магнітопроводів

1) краще використання магнітних властивостей матеріалу, особливо текстурованого (при інших рівних умовах допустиме значення індукції в середньому на 20...30 % більше, ніж у штампованих);

2) можливість використання магнітних матеріалів менших товщин на підвищених частотах (збирання магнітопровода з пластин тонше 0,2 мм вельми скрутне, у той час як, стрічкові магнітопроводи легко виготовляються із стрічки практично будь-якої товщини);

3) простота технології виготовлення, що не потребує дорогих штампів; крім того, як відомо, холоднокатана сталь Э310 штампується з великими труднощами і термін служби штампів різко скорочується; тому доцільним є виготовлення з цієї високоякісної сталі стрічкових магнітопроводів;

4) малі відходи матеріалу при виготовленні, в той час як при виготовленні штампованих магнітопроводів відхід досягає 25...30 % вихідної кількості матеріалів.

Найкращі магнітні характеристики мають стрічкові тороїдальні магнітопроводи, в яких магнітні властивості матеріалу використовуються найбільш повно.

Однак тороїдальні трансформатори найменш технологічні, і це істотно обмежує область їх застосування.

Товщина пластин або листів магнітопроводу визначається частотою, на яку розраховано трансформатор. Для частоти 50 Гц зазвичай застосовують холоднокатану електротехнічну сталь Э320 товщиною 0,35 мм, для частоти 400 Гц сталь Э44 товщиною 0,2 мм. Холоднокатану сталь Э310 (ХВП) у вигляді стрічки товщиною 0,08 застосовують для частот 400, 500 і 1000 Гц.

Шляхи зменшення маси і габаритів т.м.п.

Зниження маси, обсягу, вартості трансформаторів може бути здійснено такими способами:

1) вибором магнітних матеріалів з великою магнітною індукцією насичення при невисоких питомих втратах і вартості. Як зазначено на рис. Д.1 (у додатку), текстурована холоднокатана сталь Э310 (ХВП) має значно кращі магнітні властивості порівняно з гарячекатаною сталлю Е42;

2) підвищенням допустимої температури перегріву магнітопроводу і обмоток (за рахунок збільшення електромагнітних навантажень) до такої величини, при якій ще можлива досить надійна робота протягом заданого терміну служби;

3) вибором найбільш ефективною конфігурації осердя (стрижневий, броньовий або тороїдальний);

4) знаходженням оптимальних співвідношень між основними лінійними розмірами осердя вибраної конфігурації (або, як кажуть, "оптимальної геометрії" трансформатора);

5) раціональним електричним розрахунком, при якому виконуються електричні, конструктивні, економічні і різні спеціальні вимоги.

Слід зазначити, що типові магнітопроводи для т.м.п. мають співвідношення між основними лінійними розмірами, близькі до оптимальних, з точки зору отримання мінімуму маси і об'єму.

Основні довідкові дані про магнітопроводи наведено у додатках (табл. Д.1 – Д.6).

Обмотки трансформаторів малої потужності

Ізоляція обмотки від стрижневих і броньових магнітопроводів здійснюється за допомогою каркасів, виготовлених з негіроскопічного матеріалу з хорошою електричною і механічною міцністю. Найпростіший і найбільш поширений тип каркаса являє собою гільзу, виготовлену з електротехнічного картону (пресшпану)

Досить часто застосовуються склеєні з пресшпану каркаси, які відрізняються від гільз наявністю бічних щічок, що захищають торцеві частини обмоток від механічних поверхонь. При масовому виробництві трансформаторів використовуються збірні каркаси, які виготовляються з твердих ізоляційних матеріалів (гетинаксу або текстоліту, склотекстоліту), або каркаси, пресовані з різних ізоляційних пластмас. Зразки гільзи і каркас наведено на рис. 10.

Крім каркаса, який оберігає обмотки від зіткнення з магнітопроводом, котушка трансформатора містить також міжобмотувальну і зовнішню ізоляцію. У низьковольтних трансформаторах необхідною міжшаровою ізоляцією служить ізоляція самого дроту. Однак міжшарові прокладки часто застосовуються для більш рівномірного укладання проводу. Як міжшарову і міжобмотувальну ізоляцію зазвичай застосовують різні марки ізоляційного паперу. Для трансформаторів підвищеної нагрівостійкості й підвищеної напруги застосовують кремнійорганічну склолакотканину, плівку з флорпласта, плівкоелектрокартон. Основні довідкові дані про матеріали міжшарової і міжобмотувальної ізоляції наведено в табл. Д. 4 додатка.

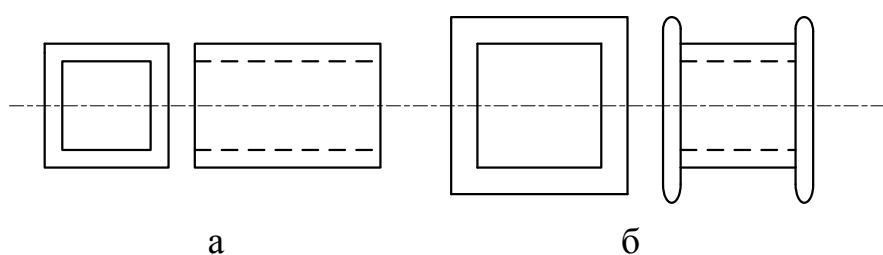


Рис.10. Варіанти ізоляції обмоток від магнітопроводу:
а) гільза; б) каркас

Витки обмоток можуть розташовуватися впорядковано, виток до витка у кілька шарів. Таку обмотку називають багатошаровою рядною. При невисоких робочих напругах, невеликих діаметрах проводів з гарною ізоляцією іноді застосовують обмотку з невпорядкованим розташуванням окремих витків (обмотка "унавал" або "врозкид"). Для вирівнювання обмотки і зменшення ймовірності по-

яви короткозамкнених витків намотування "в навал" ведуть окремими шарами, між яких поміщають міжшарову ізоляцію.

Конструкція обмоток тороїдальних трансформаторів відрізняється від вищеописаних насамперед відсутністю спеціального ізоляційного каркаса. Ізоляція магнітопровода від обмоток у тороїдальних трансформаторів здійснюється шляхом обмотування осердя стрічкою із лакотканини або мікастрічкою. На відміну від котушкової обмотки, обмотка тороїдальних трансформаторів розташовується по всій довжині осердя, повністю закриваючи його.

Слід також відзначити конструктивну особливість цієї обмотки, зумовлену відмінністю у величинах зовнішнього і внутрішнього діаметрів тороїда. Якщо укладати витки обмотки по зовнішньому діаметру поруч один з одним, то по внутрішньому діаметру, який має менший периметр, всі витки не зможуть бути покладені в один шар, тому товщина обмотки по внутрішньому діаметру збільшується. Через зазначену особливість тороїдального намотування в ній незручно застосовувати міжшарову ізоляцію. Тому при намотуванні тороїдального магнітопроводу доцільно застосовувати проводи з підвищеною електричною міцністю (як, наприклад, проводи марки ПЕВ-2 або ПЭЛШКО).

Міжобмотувальна і зовнішня ізоляція тороїдальної обмотки зазвичай виконується з мікастрічкового паперу або пліткових діелектриків (наприклад, фторопласту). Загальний вид обмотки тороїдального трансформатора наведено на рис.11.

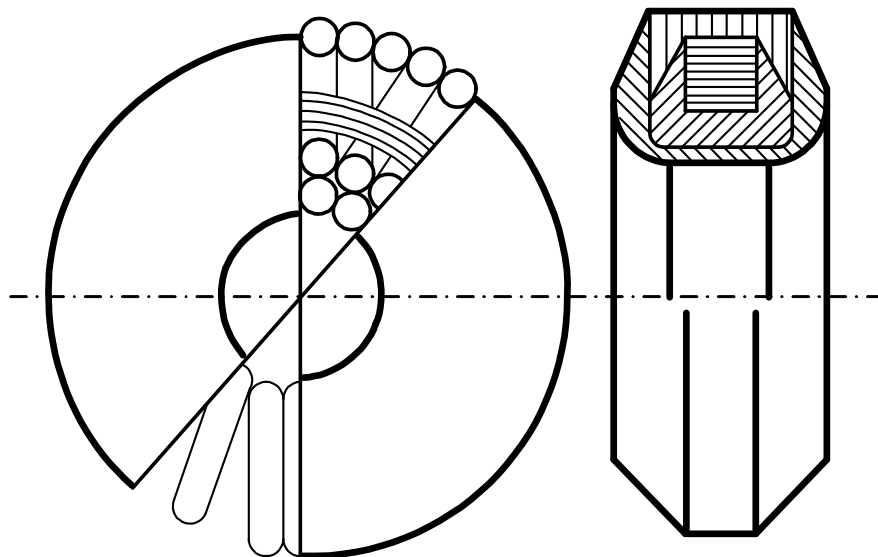


Рис. 11. Схематичне зображення тороїдального трансформатора

При виготовленні обмоток трансформаторів малої потужності найбільш широко застосовують проводи з емалевою ізоляцією:

- 1) до 105 °С – ПЕЛ (155 °С);
- 2) до 120 °С – ПЕВ-1 (175 °С);
- 3) до 130 °С – ПЕТВ (180 °С);
- 4) до 200 °С – ПЭТК (до 250 °С).

В дужках вказані межі робочої температури при терміні служби до 500 годин.

У випадках, коли потрібні обмотувальні проводи з більш високими механічними властивостями, застосовують емалеві проводи з додатковою ізоляцією, виготовленою з органічних або неорганічних волокнистих матеріалів (х/б, шовкової, капронової пряжі чи пряжі зі скловолокна):

- 1) до 105 °С – ПЕЛШО, ПЭЛШКО, ПЭЛБО (155 °С);
- 2) до 200 °С – ПЭТКСО, ПЭТКСОТ (до 250 °С).

Частіше такі проводи використовуються для обмоток з порівняно великими струмами (понад 5 А).

Крім обмотувальних проводів, використовуються також спеціальні марки проводів для відведення кінців обмоток:

- 1) до 250 В – МГЩДО, МГСЛ, МГЦСЛ;
- 2) більше 250 В – ЛПЛ, ПВГ, ПВЛ.

Основні довідкові дані щодо обмотувальних проводів наведено в табл. Д. 5 додатка.

Порядок розташування обмоток у багатообмотувальному трансформаторі визначається за його призначенням та умовами експлуатації. При конструюванні трансформаторів можна керуватися такими міркуваннями:

1) обмотку з меншим діаметром проводу, як дорожчу, вигідніше для зниження вартості трансформатора розташовувати ближче до осердя, при цьому зменшується довжина проводу. Обмотку з великим діаметром проводу роблять зовнішньою, при цьому конструкція обмоток має велику механічну міцність;

2) у силових трансформаторах для живлення радіоелектронної апаратури першою (ближче до осердя трансформатора) розташовують мережну обмотку. Після неї розташовують екранну обмотку, яку намотують в один шар. Екранна обмотка має один відвід, який приєднується на «масу» (корпус, «землю») апарата;

3) у разі, якщо дві обмотки мають невелике число витків, їх можна розташовувати в одному шарі;

4) регульовальні відгалуження робляться шляхом виведення петлі обмотувального дроту без його обривання.

Конструктивне оформлення трансформаторів малої потужності

Крім магнітопроводу і обмоток, трансформатори малої потужності містять ряд додаткових елементів, до яких відносяться:

- 1) деталі для збірки окремих частин осердя і кріплення зібраного трансформатора;
- 2) деталі для підключення трансформатора до схеми;
- 3) зовнішня електроізоляція та вологозахист.

Після того як вибрані магнітопровід і обмотки, конструкція інших елементів визначається в основному тими умовами, в яких має працювати трансформатор.

Відповідно до цього всі трансформатори можуть бути розподілені на дві основні групи: відкриті й закриті (герметизовані).

Усі магнітопроводи, використовувані як у відкритих, так і у закритих трансформаторах, мають бути добре скріплені для отримання механічно міцної конструкції. При цьому необхідно забезпечити одержання мінімальних повітряних зазорів і зменшити шум магнітопроводів, основними причинами якого є магнітострикція, а також механічні коливання погано затягнутих деталей магнітопроводу під впливом періодичної зміни магнітного потоку з частотою живлячої мережі.

Пластинчасті магнітопроводи трансформаторів після складання стягують шпильками за допомогою металевих пластинок чи спеціальних накладок, які одночасно використовуються і для кріплення трансформатора на шасі (рис.12). Стяжні шпильки, планки та обойми мають бути ізольовані від магнітопроводу, з тим щоб запобігти можливості утворення короткозамкненого витка навколо всього осердя або його частини; утворення такого витка призводить до сильного нагрівання трансформатора і втрати ним потужності.

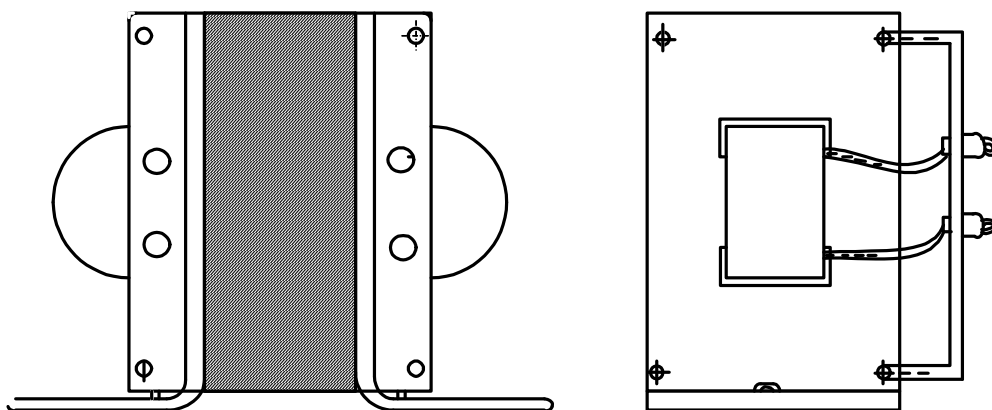


Рис. 12. Трансформатор з осердям, стягнутим накладними стійками

Стрічкові осердя навиваються з вузької сталеві стрічки стандартної ширини. Механічна міцність сердечників забезпечується склеюванням стрічки лаком (або сумішшю на основі рідкого скла), які одночасно служать ізоляцією. Броньовий тип трансформатора виходить шляхом здвоювання двох одинарних стержневих сердечників (див. рис. Д. 9). Осердя виконуються роз'ємними, що дозволяє намотувати котушки окремо і потім вставляти в них заготовлені полуосердя. Полуосердя скріплюються у замкнутий магнітопровід або за допомогою спеціальних стяжних скоб з немагнітної сталі, або за допомогою склеювання їх торців спеціальною феромагнітною пастою. Застосування склеювання торців дозволяє відмовитися від стяжних планок, накладок, шпильок і стрічок, що спрощує конструкцію і складання магнітопроводів.

Тороїдальні магнітопроводи трансформаторів є нероз'ємними, і тому стяжки не потребуються. Одну з конструкцій для кріплення тороїдального трансформатора на шасі наведено на рис. 13.

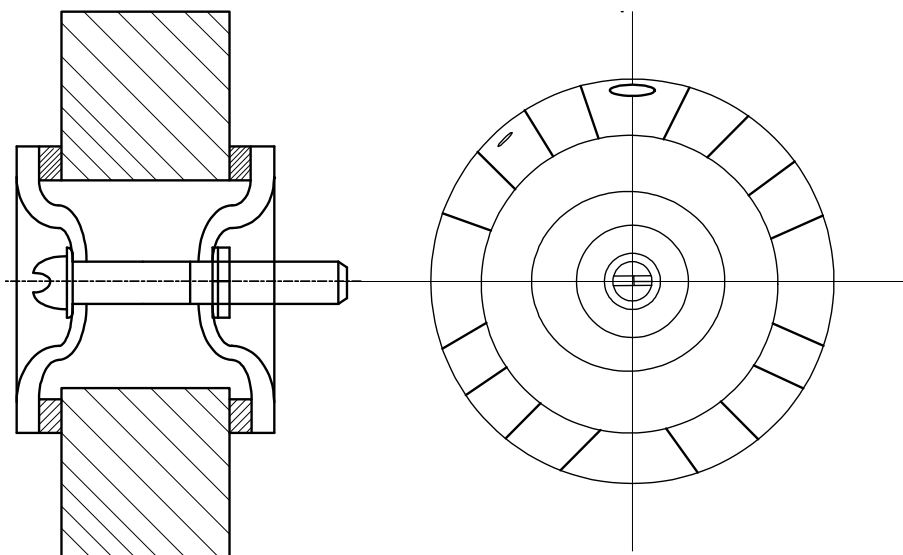


Рис. 13. Конструкція кріплення тороїдального трансформатора

Відведення обмоток відкритих трансформаторів малої потужності здійснюється припаюванням провідників обмоток, одягнутих у ізоляційні (линоксинові, поліхлорвінілові або фторпластові) трубки, до латунних пелюсток, які розташовані на ізоляційних панелях. Панель з пелюстками привернута до стяжної обойми. Досить часто пелюстки розміщуються по зовнішньому периметру котушки в торцевих її частинах.

Найбільш простим методом захисту обмоток від впливу вологи є їх просочування ізоляційними лаками. Просочування не тільки підвищує вологостійкість обмотки, але й збільшує її електричну і механічну міцність, підвищує допустиму температуру нагрівання і збільшує теплопровідність. Більш досконалий вологозахист може бути забезпечений шляхом закладення торців котушки ізолювальними сумішами і покриття зібраного трансформатора спеціальними обволікувальними сумішами. У тих випадках, коли потрібно забезпечити досить високу надійність роботи трансформаторів в умовах різкої зміни температури і впливу вологи, їх слід повністю герметизувати.

Порядок розрахунку силових трансформаторів малої потужності

Вихідними величинами для розрахунку трансформаторів служать:

- U_1 (В) – напруга живильної мережі ;
- f (Гц) – частота живильної мережі ;
- $I_2; I_3; \dots I_k$ (А) – струм вторинних обмоток ;
- $U_2; U_3; \dots U_k$ (В) – напруги вторинних обмоток;
- t_0 (°С) – температура навколишнього середовища ;
- t_1 (°С) – допустима температура нагріву трансформатора.

В результаті розрахунку повинні бути визначені геометричні розміри осердя, дані обмоток (тобто кількість витків, марки і діаметри проводів), а також електричні й експлуатаційні параметри трансформатора (ККД, струм холостого ходу, падіння напруги в обмотках і температура перегріву трансформатора).

Вибір магнітопроводу

1. Вибирають конфігурацію магнітопроводу.

Зіставлення переваг і недоліків трансформаторів різних типів з точки зору мінімальних маси, обсягу, вартості, простоти конструкції і технологічності дозволило зробити такі висновки .

Для малих потужностей (від одиниць до декількох десятків вольт-ампер) при напругах, що не перевищують 1000 В, та частоті мережі 50...1000 Гц слід рекомендувати броньові трансформатори при використанні як пластинчастих, так і стрічкових магнітопроводів. Лише трохи поступаючись стержневим трансформаторам по питомій потужності на одиницю маси і об'єму, броньові трансформатори, що мають одну котушку, значно технологічніші їх у виготовленні та простіше за конструкцією.

При потужностях від декількох десятків до декількох сотень вольт-ампер при частоті 50 Гц і до декількох кіловольт-ампер – при частоті 400...1000 Гц най-

більш перспективними є стержневі трансформатори з двома котушками і стрічковими роз'ємними осердями. Основний недолік конструкції цих трансформаторів – наявність двох котушок компенсується в цьому випадку тим, що замість двох осердів, необхідних для броньового стрічкового магнітопроводу, для стержневого магнітопроводу потрібно всього лише одне осердя.

Трансформатори з тороїдальним стрічковим осердям можуть використовуватися при потужностях від 30...40 до 200...300 вольт-ампер і частоті 400...1000 Гц лише в тих випадках, коли потрібне максимальне розсіювання магнітного потоку без застосування зовнішніх екранів, або коли вимоги мінімального обсягу є першорядними. Завдяки деяким масовим та об'ємним перевагам перед стержневими і броньовими трансформаторами в діапазоні потужностей від кількох вольт-ампер до декількох сотень вольт-ампер і порівняно простій конструкції, тороїдальні трансформатори є разом з тим і найменш технологічними.

Вибравши конфігурацію магнітопроводу, приступають до визначення його основних геометричних розмірів.

2. Вибирають марку сталі й товщину пластини або стрічки магнітопроводу відповідно до заданої частоти мережі. Визначають коефіцієнт заповнення перетину магнітопроводу сталлю (K_C) за табл. 1.

3. Визначають потужність, що віддається трансформатором:

$$\sum_{i=2}^K P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \dots + U_K I_K .$$

Таблиця 1

Коефіцієнт заповнення перетину магнітопроводу, K_C					
Конфігурація магнітопроводу	Товщина сталі, мм				
	0,08	0,1	0,15	0,2	0,35
Стержнева, пластинчаста	–	0,7	–	0,85	0,91
Броньова пластинчаста	–	0,75	–	0,89	0,94
Стержнева стрічкова	0,87	–	0,9	0,91	0,93
Броньова стрічкова					
Тороїдальна стрічкова	0,87	–	–	0,88	–

4. Знаходять орієнтовні значення електромагнітних навантажень B і J за графіками, поданими на рис. Д. 2, Д. 3, Д. 4, Д. 6.

Температура обмотки визначається кількістю виділеного в ній тепла, тобто втратами в обмотці, які, у свою чергу, пропорційні квадрату щільності струму. Тому величина щільності струму практично однозначно визначає собою температуру проводу, а отже, і його перетин. Рекомендовані значення густини струму забезпечують температуру перегріву обмоток у середньому 50 °С. Однак ці дані використовуються лише для попереднього визначення основних розмірів трансформатора, перерізів і діаметрів проводів. Остаточні ці величини можуть бути визначені тільки після виконання конструктивного і теплового розрахунку обмоток.

5. За формулою

$$S_{ок}S_{ст} = \frac{\sum P_2 (1 + \eta) 10^2}{2,22fBjK_c K_m} \text{ [см}^4\text{]}.$$

знаходять значення добутку площі перерізу сталі магнітопроводу $S_{ст}$ на площу вікна $S_{ок}$.

Значення коефіцієнта заповнення вікна міддю (K_m) може бути знайдене за табл. 2.

Таблиця 2.

Коефіцієнт заповнення вікна, K_m						
f , Гц	Конфігурація магнітопроводу	$\sum P_r$, В·А				
		15...50	50...150	150...300	300...1000	1000...2500
50	Стержневий	0,18...0,26	0,26...0,3	0,3...0,33	0,33...0,35	–
	Броньовий	0,22...0,28	0,28...0,34	0,34...0,36	0,36...0,38	–
400, 500, 1000	Стержневий	0,17...0,22	0,22...0,25	0,25...0,27	0,27...0,35	0,35...0,36
	Броньовий	0,21...0,25	0,25...0,28	0,28...0,3	0,3...0,37	0,37...0,38
	Тороїдальний	0,16...0,17	0,17...0,24	0,24...0,25	0,25...0,28	–

Значення ККД попередньо визначається за графіком рис. Д. 5.

Отримане значення добутку $S_{ок}S_{ст}$ визначає потрібний типорозмір магнітопроводу, який вибирають з табл. Д. 1 – Д. 6 у додатках. Виписують необхідні дані

про магнітопроводи:

$S_{ок}S_{ст}$ – точне значення для вибраного магнітопроводу, см⁴;

$S_{ст}$ – активний перетин сталі осердя, см²;

$m_{ст}$ – маса сталі, кг або г.

Розрахунок числа витків в обмотках трансформатора

6. Обчислюють ЕРС одного витка:

$$e_B = 4,44fS_cB \cdot 10^4 \text{ [В]}.$$

7. Визначають число витків первинної обмотки:

$$w_1 = \frac{E_1}{e_B} = \frac{U_1 \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)}{e_B},$$

де E_1 – ЕРС первинної обмотки;

ΔU – падіння напруги в обмотці (в %) від номінального значення напруги, визначається за графіком рис. Д. 7.

Числа витків округляють до найближчого більшого цілого значення при $w > 100$ і з точністю до 0,5 витка при $w < 100$.

8. Уточнюють ЕРС одного витка:

$$e_{B,y} = \frac{E_1}{w_1} \text{ [В]}.$$

9. Обчислюють числа витків вторинних обмоток за рівнянням

$$w_n = \frac{E_n}{e_{B,y}} = \frac{U_n \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)}{e_{B,y}},$$

де E_n – ЕРС вторинної обмотки.

Розрахунок струму холостого ходу і повного струму первинної обмотки

10. Магнітні втрати в сталі осердя:

$$P_M = P_y m_{ст},$$

де $P_y \left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right]$ – питомі втрати (в 1 кг) сталі даної марки і певної товщини при вибраній індукції і заданій частоті;

P_y – визначають за графіками рис. Д. 8 і Д. 9.

11. Знаходять активну складову струму холостого ходу трансформатора:

$$I_{0a} = \frac{P_M}{U_1} [\text{A}].$$

12. Визначають реактивну (що намагнічує) складову струму холостого ходу трансформатора:

$$I_{0p} = \frac{H l_{cp}}{w_1} [\text{A}],$$

де l_{cp} – середня довжина силової лінії в магнітопроводі, яка обчислюється або береться з табл. Д. 1 – Д. 6 у додатках.

Значення напруженості магнітного поля в сталі знаходять залежно від індукції за кривими намагнічування броньових, стержневих і тороїдальних трансформаторів (рис. Д. 10, Д. 11). Ці криві побудовані з урахуванням немінучих технологічних немагнітних зазорів на шляху магнітного потоку. Величина зазору залежить від технології виготовлення магнітопроводу і дорівнює в середньому 0,02 ... 0,05 мм. Якщо користуватися кривими намагнічування матеріалу магнітопроводу і враховувати конкретну величину немагнітного зазору, реактивну складову струму холостого ходу можна знайти за формулою

$$I_{0p} = \frac{H_{ст} l_{cp} + H_B \delta}{w_1} [\text{A}],$$

де $H_B = \frac{H_m}{\mu_0} 10^{-2}$ – напруженість магнітного поля в зазорі, А/см ;

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ – магнітна проникність вакууму, Гн/м ;

$\delta = 0,002 \dots 0,005$ – величина немагнітного зазору, см.

13. Знаходять абсолютне значення струму холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} [\text{A}].$$

14. Струм у первинній обмотці визначають за формулою

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{\sum P_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} \text{ [A]},$$

де $\cos \varphi_1$ орієнтовно визначено залежно від потужності $\sum P_2$ за даними табл. 3.

Струм первинної обмотки можна також розраховувати за формулою

$$I_0 = \sqrt{(I'_1 + I_{0a})^2 + I_{0p}^2} \text{ [A]},$$

де I'_1 – струм первинної обмотки без урахування втрат у магнітопроводі і намагнічувального струму при роботі на активне навантаження:

$$I'_1 = \sum_{i=2}^K \frac{E_i}{E_1} I_i \text{ [A]}.$$

15. Відносне значення струму холостого ходу розраховують за формулою

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_1} 100 \% .$$

Таблиця 3.

Значення $\cos \varphi_1$					
Частота f , Гц	Сумарна потужність $\sum P_2$, В · А				
	15...50	50...150	150...300	300...1000	Свьше 1000
50	0,9...0,93	0,93...0,95	0,93...0,95	0,93...0,94	–
400...500	0,84	0,84...0,95	0,95...0,96	0,96...0,99	0,99
1000	0,8...0,82	0,81...0,92	0,92...0,93	0,91...0,95	0,97

Вибір обмотувальних проводів

16. За вибраними значеннями щільності струму в обмотках розраховують площу поперечного перерізу проводів обмоток:

$$S_{\text{пр}n} = \frac{I_n}{j_n} [\text{мм}^2].$$

17. Вибирають марки, стандартні перерізи і діаметри проводів (додаток табл. Д. 9)

$$S_{\text{пр}n}; \quad d_{\text{пр}n}; \quad d_{\text{из}n}; \quad g_{\text{из}n}.$$

$d_{\text{пр}n}$ – стандартний діаметр голого проводу, мм;

$d_{\text{из}n}$ – стандартний діаметр ізолюваного проводу, мм;

$g_{\text{из}n}$ – маса одного погонного метра проводу, г/м.

18. Знаходять фактичні щільності струму в проводах:

$$j_n = \frac{I_n}{S_{\text{пр}n}} \left[\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right].$$

19. За даними табл. Д. 8 додатка знаходять значення випробувальної напруги трансформатора $U_{\text{вип}}$.

20. Визначають допустиму осьову довжину кожної обмотки:

$$h_d = h_1 - 2h_{\text{из}1} [\text{мм}],$$

де $h_1 = h - 1$ – довжина гільзи, мм;

h – висота вікна, мм;

$h_{\text{из}1} = 2 \dots 4$ мм – відстань від крайнього витка обмотки до серцевини.

21. Визначають число витків у шарі $w_{\text{сл}}$ і число шарів кожної обмотки $N_{\text{сл}}$:

$$w_{\text{сл}} = \frac{h_d}{K_y d_{\text{из}}}, \quad N_{\text{сл}} = \frac{w_n}{w_{\text{сл}}},$$

де K_y – коефіцієнт укладання проводу, визначається з даними табл. 4;

w_n – повне число витків для броньових трансформаторів і половинне число витків кожної обмотки для стрижневих (з двома котушками).

22. Розраховують радіальні розміри обмоток.

В якості міжшарової ізоляції трансформаторів малої потужності з робочою температурою не більше 105 °С (клас нагрівостійкості А) рекомендовано вибирати:

– при проводах діаметром менше 0,1 мм – конденсаторний папір товщиною 0,01 мм;

- при проводах діаметром 0,1 ... 0,5 мм – телефонний папір товщиною 0,5 мм;
- при проводах діаметром понад 0,5 мм – кабельний папір товщиною 0,12 мм.

Вибравши міжшарову ізоляцію, знаходять радіальні розміри кожної обмотки за формулою

$$\alpha_n = K_y N_n d_{uz} + (N_n - 1) \Delta_{uz} \quad [\text{мм}],$$

де Δ_{uz} – товщина міжшарової ізоляції.

За міжобмотувальну ізоляцію та ізоляцію поверх котушки зазвичай вибирають різні марки ізоляційного паперу, намотаного у кілька шарів. Загальну товщину цієї ізоляції (h_{uz}) можна приймати такою, що дорівнює 0,2...0,3 мм. Радіальний розмір котушки

$$\alpha = \Delta_3 + h_{uz_2} + \alpha_1 + h'_{uz_3} + \alpha_2 + h''_{uz_3} + \dots + h^{N-1}_{uz_3} + \alpha_N + \alpha_{N_0} \quad [\text{мм}],$$

де $\Delta_3 = (0,3 \dots 0,6)$ – зазор між гільзою (каркасом) і серцевиною, мм;

h_{uz_2} – товщина гільзи або каркасу, мм;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_N$ – радіальні розміри обмоток, мм;

$h'_{uz_3}, h''_{uz_3}, h^{N-1}_{uz_3}$ – товщина міжобмотувальної ізоляції, мм;

α_{N_0} – товщина ізоляції поверх крайньої обмотки, мм (зазвичай $\alpha_{N_0} \approx h_{uz_3}$).

Фактична товщина котушки з урахуванням її розбухання при намотуванні та просоченні буде більшою. Збільшення товщини котушки враховується коефіцієнтом випинання K_B , величина якого, залежно від діаметра проводу, наведена у табл. 4.

Таблиця 4

Коефіцієнт укладання проводу та коефіцієнт випинання						
$d_{uz}, \text{мм}$	0,07...0,12	0,13...0,19	0,2...0,3	0,31...0,8	0,86...1,0	Понад 1,0
K_y	1,15	1,1	1,07	1,05	1,1	1,15
K_e	1,05	1,08	1,1	1,12	1,15	1,15

23. Визначають зазор між котушкою і осердям для броньових трансформаторів:

$$\Delta_{\text{KC}} = C - \alpha K_{\text{B}} \text{ [мм]},$$

або двома котушками для стержневих трансформаторів:

$$\Delta_{\text{KK}} = C - 2\alpha K_{\text{B}} \text{ [мм]},$$

де C – ширина вікна магнітопроводу, мм.

Якщо отриманий зазор менше (0,5...2) мм, то слід перерахувати показники трансформатора, або збільшивши індукцію в магнітопроводі, або підібравши проводи менших діаметрів.

24. Визначають сумарні втрати в міді обмоток за формулою:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + \dots + P_{\Sigma N} \text{ [Вт]},$$

$$P_{\Sigma N} = R_N I_N^2 \text{ [Вт]},$$

$$R_N = \rho \frac{l_{\text{cp}N}}{S_N} w_N [1 + \alpha(t_1 - 20)] \text{ [Ом]}.$$

де $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий опір мідного обмотувального проводу при температурі 20°C;

$\alpha = 0,004 \frac{1}{\text{град}}$ – температурний коефіцієнт опору;

t_1 – робоча температура обмотки, °C;

$l_{\text{cp}N}$ – середня довжина витка обмотки, м;

Середню довжину витка визначають: для броньових трансформаторів – на підставі рис. 14, для стрижневих – рис. 15 з виразів

$$l_{\text{cp}1} = 2 \cdot 10^{-3} (a_k + b_k + \pi r_1) \text{ [м]},$$

де

$$r_1 = \frac{a_1}{2};$$

$$l_{\text{cp}2} = 2 \cdot 10^{-3} (a_k + b_k + \pi r_2) \text{ [м]},$$

де

$$r_1 = a_1 + a_{12} + \frac{a_2}{2};$$

і т. д.

Визначення температури перегріву трансформатора

25. Сумарна маса міді обмоток:

$$G_M = \sum_{n=1}^N G_{Mn} = \gamma_M \sum w_n l_{cpn} S_n \quad [\text{г}],$$

$\gamma_M = 8,9$ – щільність міді обмоток, г/см^3 .

26. Маса магнітопроводу

$$G_{uz} = \gamma_{uz} V_M (1 - K_M) \quad [\text{г}],$$

де $\gamma_{uz} = 2 \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$ – середнє значення щільності ізоляційних і просочувальних матеріалів:

$$V_M = \sum_{n=1}^N S_{uzn} w_n l_{cpn} \quad [\text{см}],$$

$$K_M = \frac{S_{np1} + S_{np2} W_2 + \dots + S_{npN} W_N}{S_{ок}}.$$

27. Загальна маса трансформатора:

$$G_{mp} = G_M + m_{ст} + G_{uz} \quad [\text{г}].$$

28. Сумарна питома теплоємність трансформатора:

$$C_{mp} = \frac{C_{ст} m_{ст} + C_M G_M + C_{uz} G_{uz}}{G_{mp}},$$

де $C_{ст} = 474 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$;

$C_M = 385 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$;

$C_{uz} = 2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$ – для просочених котушок;

$C_{из} = 2600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{С}}$ – для котушок, які не просочені;

$C_{ст}, C_{м}, C_{из}$ – середні значення питомих теплоємностей сталі, міді та ізоляції відповідно.

29. Поверхню охолодження трансформатора $S_{охл}$ знаходять з табл. Д. 2 і Д. 4 додатка або розраховують за геометричними розмірами.

Приклад розрахунку поверхні охолодження для однофазного броньового трансформатора наведено нижче.

Повна поверхня охолодження трансформатора складається з поверхонь відкритих частин осердя і обмоток, об'єднаних в котушку. Ці поверхні на рис. 16 і 17 показані штрихуванням. Наближено вони можуть бути підраховані за формулами:

а) для осердя:

$$S_c = 2(2a + 2c)b + 2(h + c)b + 2(2a + 2c)c + 4h \frac{c}{2} =$$

$$= 2c(5b + 4c) + 2h(b + c) \quad [\text{см}^2]$$

(при $a = c$);

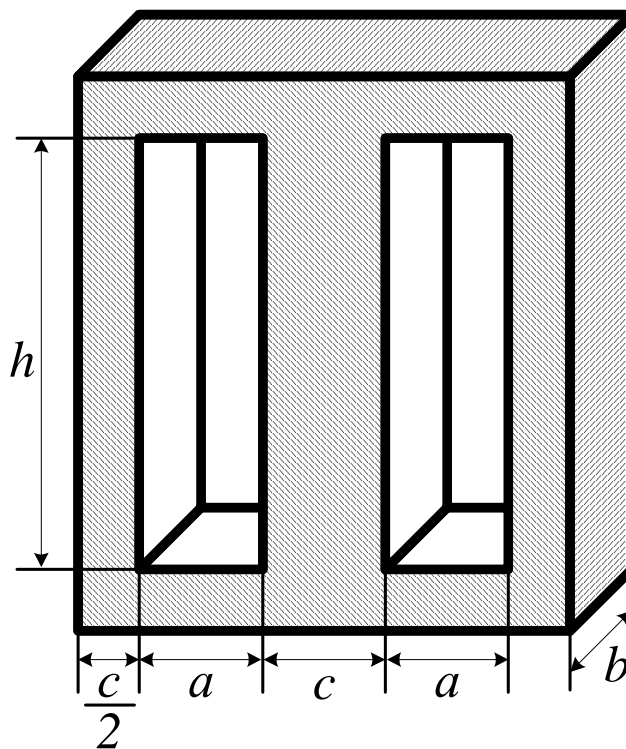


Рис. 16. Розрахункова поверхня охолодження сердечника

б) для котушки:

$$\begin{aligned} S_k &= 2(c + 2A_k)h + 4A_k h + 4(c + 2A_k)A_k = \\ &= 2ch + 4A_k(c + 2h + 2A_k) \quad [cm^2]; \end{aligned}$$

в) повна поверхня охолодження

$$S_{охл} = S_c + S_k \quad [cm^2].$$

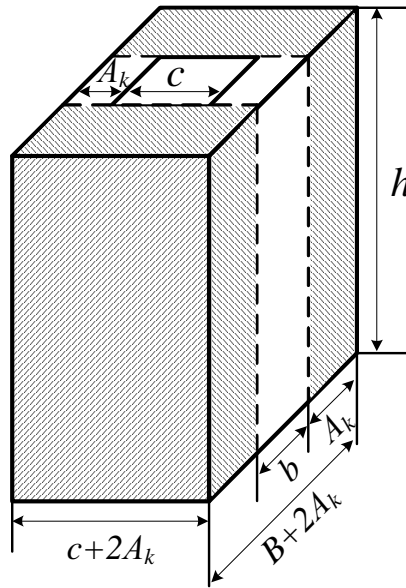


Рис. 17. Розрахункова поверхня охолодження котушки

30. Теплова постійна часу трансформатора визначається з емпіричного виразу:

$$T = 10 \frac{G_{тр}}{S_{охл}} \quad [мин].$$

Температура перегріву трансформатора:

$$\Delta\tau = \frac{(P_{\text{э}} + P_{\text{м}})T60}{C_{тр}G_{тр}} \quad [^{\circ}C].$$

31. Температура перегріву трансформатора може бути розрахована за іншою методикою:

$$\Delta\tau = \frac{P_m + P_\vartheta}{\alpha_{tr} S_{охл}} [^\circ\text{C}],$$

де α – середній коефіцієнт тепловіддачі трансформатора; вибирається за таблицями довідкових даних про магнітопроводи, в середньому дорівнює

$$\alpha_{tr} \approx (1,3 \div 1,4) * 10^{-3} \text{ [Вт/см}^2\text{}^\circ\text{C]}.$$

32. Абсолютне значення температури трансформатора:

$$\tau_1 = \tau_0 + \Delta\tau \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

Якщо отримана величина температури буде близька до тієї, на яку провід розрахований, то розрахунок трансформатора виконаний правильно.

У тих випадках, коли знайдена величина τ_1 більше допустимого значення, то для зменшення її слід збільшити перетин проводу (за наявності у вікні вільного місця).

Якщо збільшити перетин проводу без зміни типорозміру магнітопроводу і числа витків неможливо, то необхідно або збільшити переріз магнітопроводу при збереженні колишньої величини індукції, або збільшити індукцію, зберігши колишній переріз магнітопроводу.

Збільшити індукцію слід до величини, при якій відносне значення струму холостого ходу залишається в межах 0,2...0,5 при частоті 50 Гц і в межах 0,05...0,3 при частотах 400, 500 Гц. Менші межі вказані для трансформаторів більшої потужності.

В обох випадках перетин проводу може бути збільшено за рахунок звільненого у вікні місця. В деяких випадках можливо не перераховувати трансформатор, а застосувати більш теплостійкі ізоляційні матеріали.

Якщо знайдена з розрахунку величина τ_1 менше допустимої на 10...15%, то слід зменшити розміри магнітопроводу та зробити перерахунок трансформатора, збільшуючи щільність струму в обмотках, і, якщо допустимо за величиною відносного струму холостого ходу, збільшуючи індукцію.

33. Падіння напруги в обмотках трансформатора (для т.м.п. зазвичай враховують тільки активні опори обмоток, оскільки індуктивні відносно невеликі):

$$\Delta U = \frac{I_n Z_n}{U_n} 100 [\%].$$

Якщо знайдена величина падіння напруги значно відрізняється від попередньо прийнятої на початку розрахунку, то слід змінити число витків відповідно з отриманим результатом.

34. Коефіцієнт корисної дії трансформатора:

$$\eta = \frac{\Sigma P_2}{\Sigma P_2 + P_n + P_3} .$$

Після закінчення розрахунку слід виконати ескіз двох проекцій трансформатора з урахуванням основних елементів конструктивного виконання.

Особливості розрахунку тороїдальних трансформаторів

Розрахунок трансформатора з тороїдальними магнітопроводами принципово не відрізняється від розрахунків трансформаторів зі стержневими і броньовими магнітопроводами, проте має ряд особливостей.

Відсутність повітряних зазорів і відносно малий обсяг сталі тороїдальних магнітопроводів призводить до того, що навіть при великих індукціях відносно значення струму холостого ходу трансформатора невелике.

Одна з особливостей розрахунку тороїдальних трансформаторів, пов'язана з відсутністю в магнітопроводі повітряних зазорів, полягає в тому, що визначення реактивної складової струму холостого ходу можна робити безпосередньо з кривою намагнічування за формулою

$$I_{cp} = \frac{Hl_{cm}}{w_1} \quad [A].$$

На рис. Д. 10 наведено криву намагнічування сталі ХВП (тороїдальний магнітопровід).

Величину реактивної складової, а отже, і повного струму холостого ходу можна знайти лише після того, як буде вибрано число витків первинної обмотки. Необхідні для розрахунку дані електромагнітних навантажень та коефіцієнтів беруться з графіків рис. Д. 6.

Тороїдальні трансформатори мають значно складнішу конструкцію обмоток, ніж трансформатори зі стержневими і броньовими магнітопроводами. Ця обставина значно ускладнює конструктивний розрахунок обмоток тороїдальних трансформаторів, вона є основною особливістю їх розрахунку.

Перевірка розміщення обмоток тороїдального трансформатора

1. Визначається товщина ізоляції з внутрішньої (Δb_0) і зовнішньої (Δ_{H0}) сторін магнітопроводу перед намотуванням:

$$\Delta_{H0} = \Delta_{из} N \varphi \text{ [мм]},$$

$$\Delta b_0 = \Delta_{H0} \frac{D}{c} \text{ [мм]},$$

де $\Delta_{из}$ – товщина ізоляційного матеріалу;

N – число шарів;

φ – коефіцієнт намотування ізоляції, що дорівнює в середньому 1,5.

2. За табл. Д. 8 додатка підбирається матеріал міжшарової і міжобмотувальної ізоляції. Остання має витримувати дворазову або триразову випробувальну напругу.

3. Визначаються зовнішній (D_{Hi}) і внутрішній (D_{Bi}) діаметри обмотки за формулами:

$$D_{Hi} = \sqrt{\frac{4w_i S_{изi}}{\pi K_y} + [D_{H(i-1)} + 2\tau_{H(i-1)}]^2} \text{ [мм]},$$

$$D_{Bi} = \sqrt{[D_{B(i-1)} - 2\tau_{B(i-1)}]^2 - \frac{4w_i S_{изi}}{\pi K_y}} \text{ [мм]},$$

де K_y – коефіцієнт укладання обмоток, значення якого залежить від діаметра проволу:

- для діаметра від 0,08 до 0,31 мм становить від 0,6 до 0,7;
- для діаметра від 0,31 до 0,5 мм дорівнює 0,7;
- для діаметра від 0,5 до 2,1 мм падає з 0,7 до 0,45.

Для первинної обмотки $D_{H(i-1)}$ і $D_{B(i-1)}$ являють собою зовнішній і внутрішній діаметри осердя трансформатора D і c , а $\tau_{H(i-1)}$ і $\tau_{B(i-1)}$ – відповідно товщини ізоляції осердя.

4. Визначаються зовнішній та внутрішній діаметри трансформатора:

$$D_{нтр} = D_{Hi} + 2\tau_{Hi} \text{ [мм]},$$

$$D_{втр} = D_{Bi} + 2\tau_{Bi} \text{ [мм]},$$

Визначається висота трансформатора:

$$H_{\text{тр}} = h + c - D_{\text{втр}} \text{ [мм]},$$

Якщо при розрахунку виходить, що $D_{\text{втр}} \geq D_{\sigma}$, то обмотка нормально вкладається у вікні магнітопроводу.

Тут D_{σ} – найменший діаметр вікна, що залишається після намотування трансформатора, який визначається типом намотувального верстата і зазвичай становить не менше 6...12 мм.

Для визначення опору, ваги і втрат у кожній обмотки визначають середню довжину витка кожної обмотки, користуючись масштабним ескізом трансформатора або аналітичними виразами:

$$l_{\text{срв}i} = 2(a + h) + 8 \left(\tau_0 + \sum_{i=1}^n \tau_{0i} \right) + \frac{8 \sum_{i=1}^n w_i S_{\text{из}i}}{\pi K_{y_i} (D + c)},$$

де

$$a = \frac{D - c}{2}; \quad \tau_0 = \frac{\tau_{\text{н0}} + \tau_{\text{в0}}}{2}; \quad \tau_{0i} = \frac{\tau_{\text{н}i} + \tau_{\text{в}i}}{2}.$$

При падінні напруги в обмотках тороїдальних трансформаторів враховують тільки активний опір, оскільки потік розсіювання у них практично відсутній при рівномірному розподілі витків обмоток по всій довжині осердя, і отже, індуктивний опір розсіювання обмоток близький до нуля. Тому відносна величина падіння напруги ΔU у тороїдальних трансформаторів найменша, що необхідно враховувати при визначенні чисел витків обмоток.

Температуру нагрівання обмоток тороїдальних трансформаторів можна визначити будь-яким з описаних вище методів.

Величину охолоджувальної поверхні тороїдального трансформатора зазвичай визначають наближено за формулою

$$S_{\text{охл}} = 2 \frac{\pi D_{\text{н}}^2}{4} + \pi D_{\text{н}} H_{\text{тр}} = \pi D_{\text{н}} \left(\frac{D_{\text{н}}}{2} + H_{\text{тр}} \right) \text{ [см}^2\text{]}.$$

За винятком перелічених вище особливостей, розрахунок тороїдальних трансформаторів не відрізняється від розрахунку трансформаторів зі стержневими і броньовими осердями.

Додаток

ДОВІДКОВІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ Т.М.П.

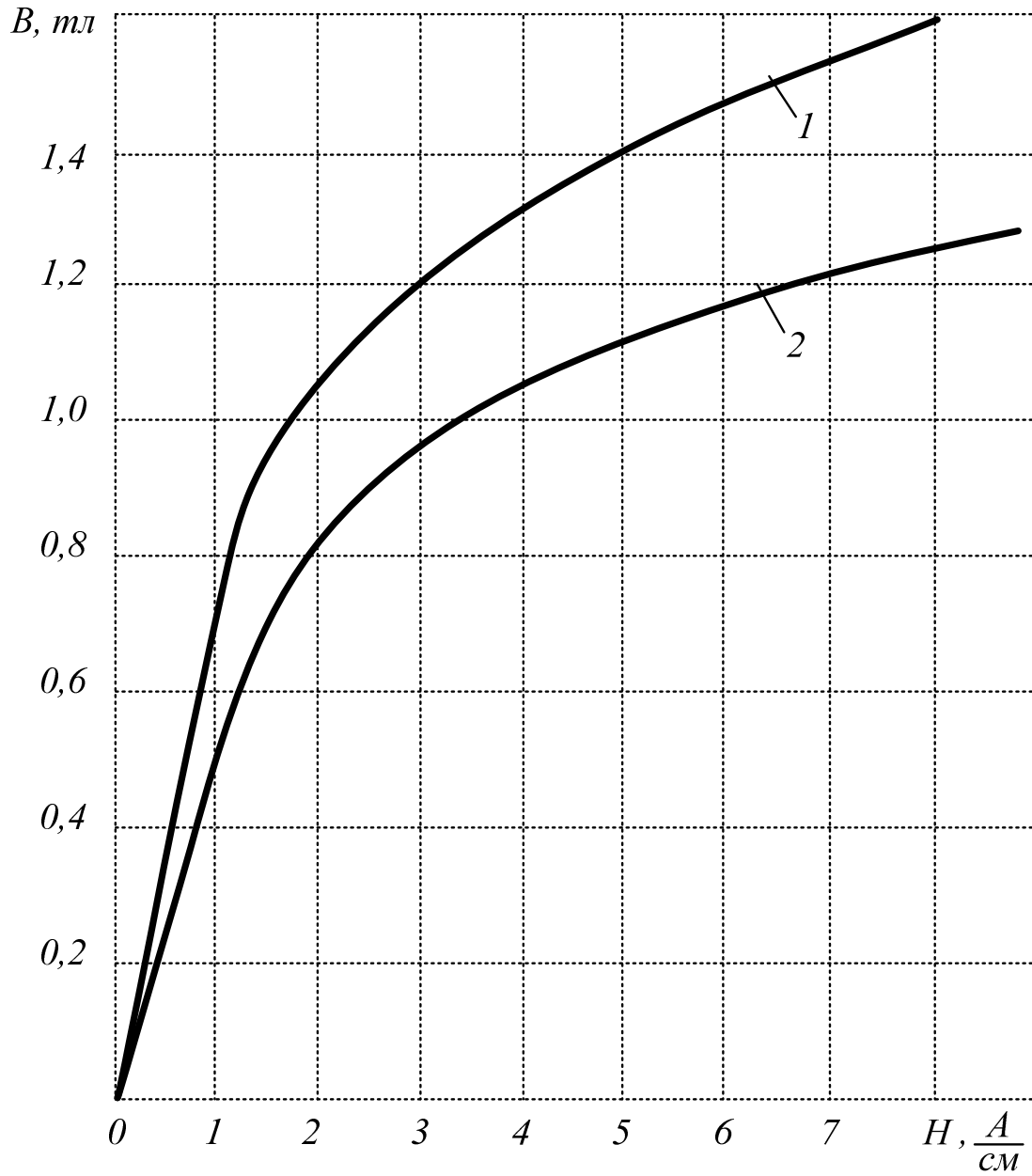


Рис. Д. 1. Криві намагнічування трансформаторних сталей:

1 – сталь Э-310 товщиною 0,35 мм,

2 – сталь Э-42 товщиною 0,35 мм

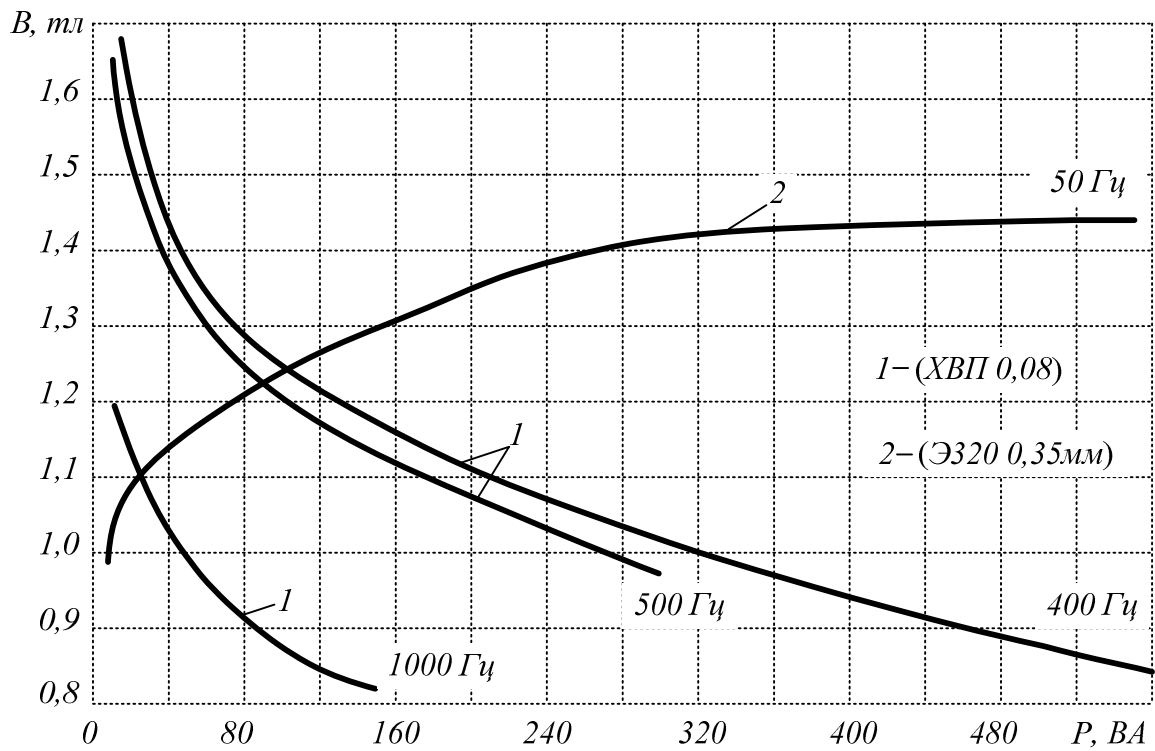


Рис. Д. 2. Залежність допустимої індукції в середньому стержні броньового трансформатора від потужності трансформатора

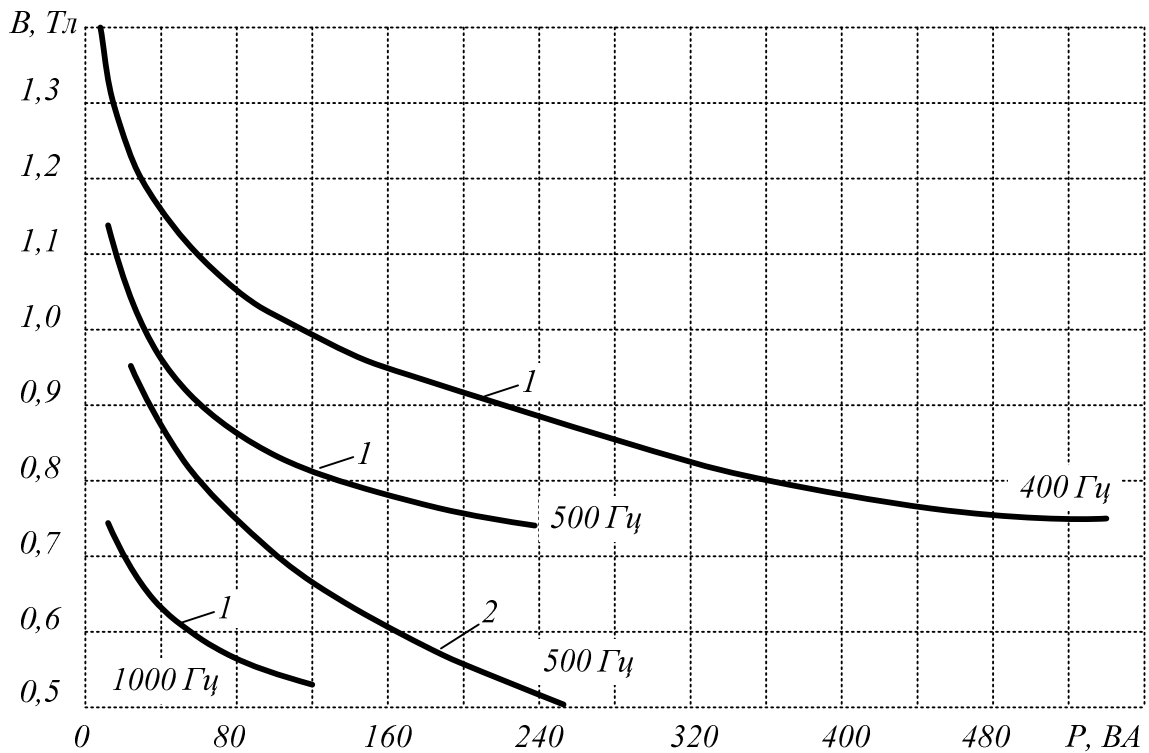


Рис. Д. 3. Залежність допустимої індукції в середньому стержні броньового трансформатора від потужності трансформатора

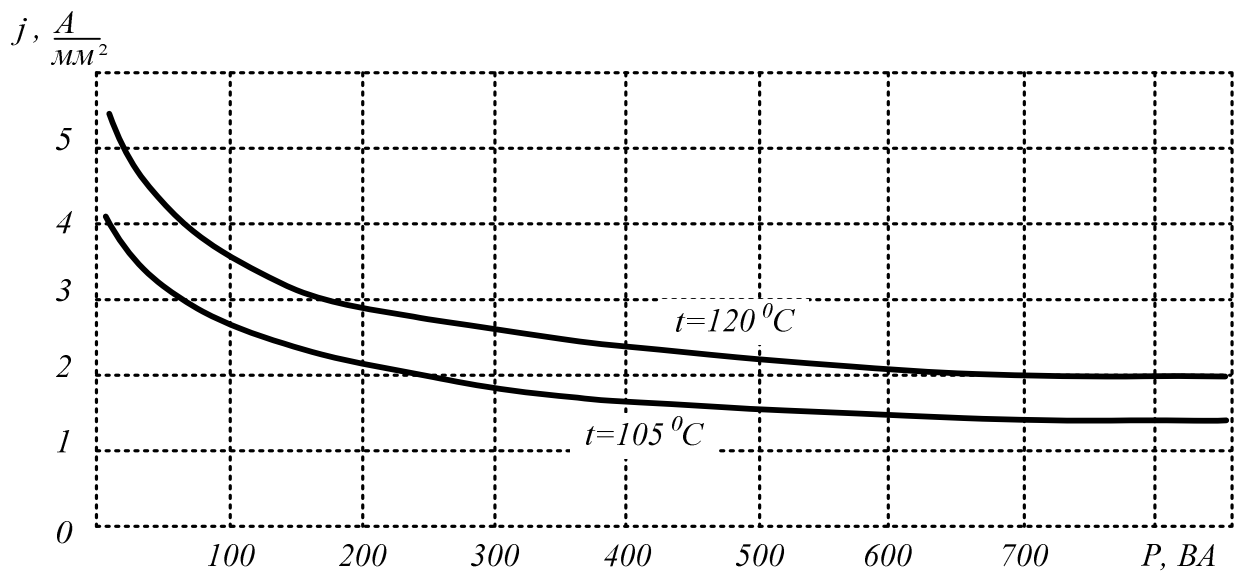


Рис. Д. 4. Залежність допустимої щільності струму від потужності броньового трансформатора

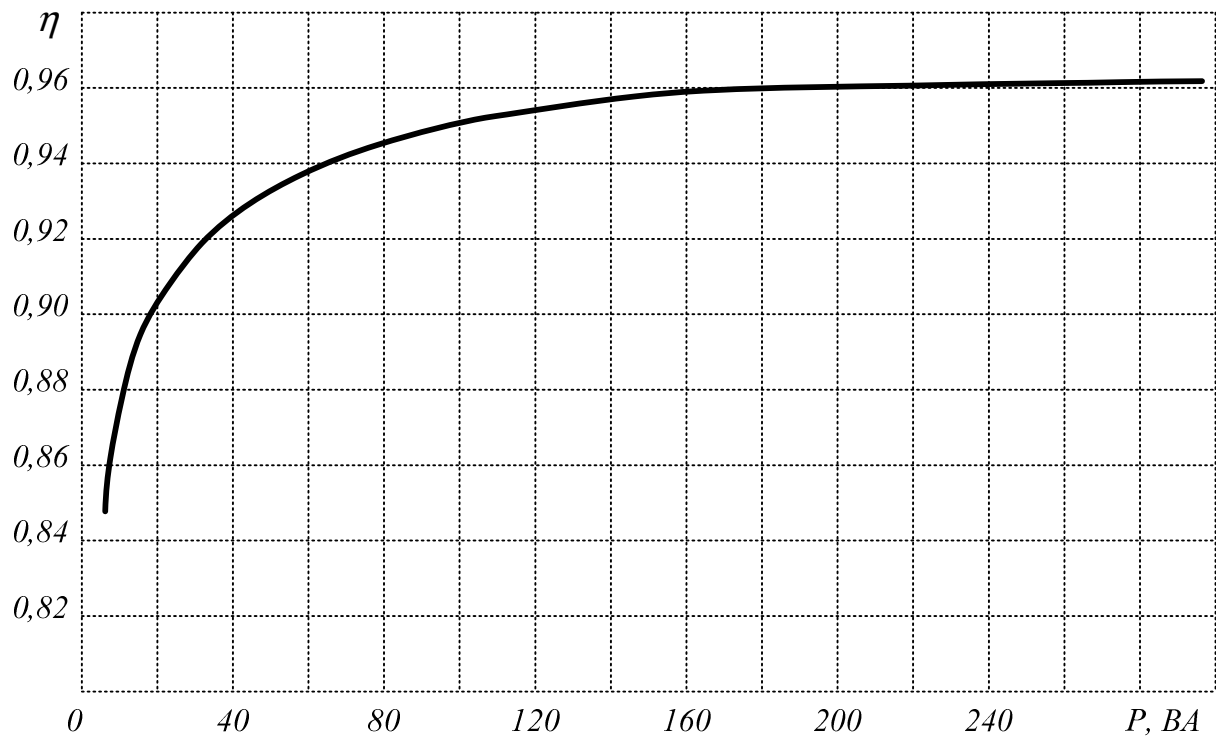


Рис. Д. 5. Залежність ККД трансформатора від його потужності

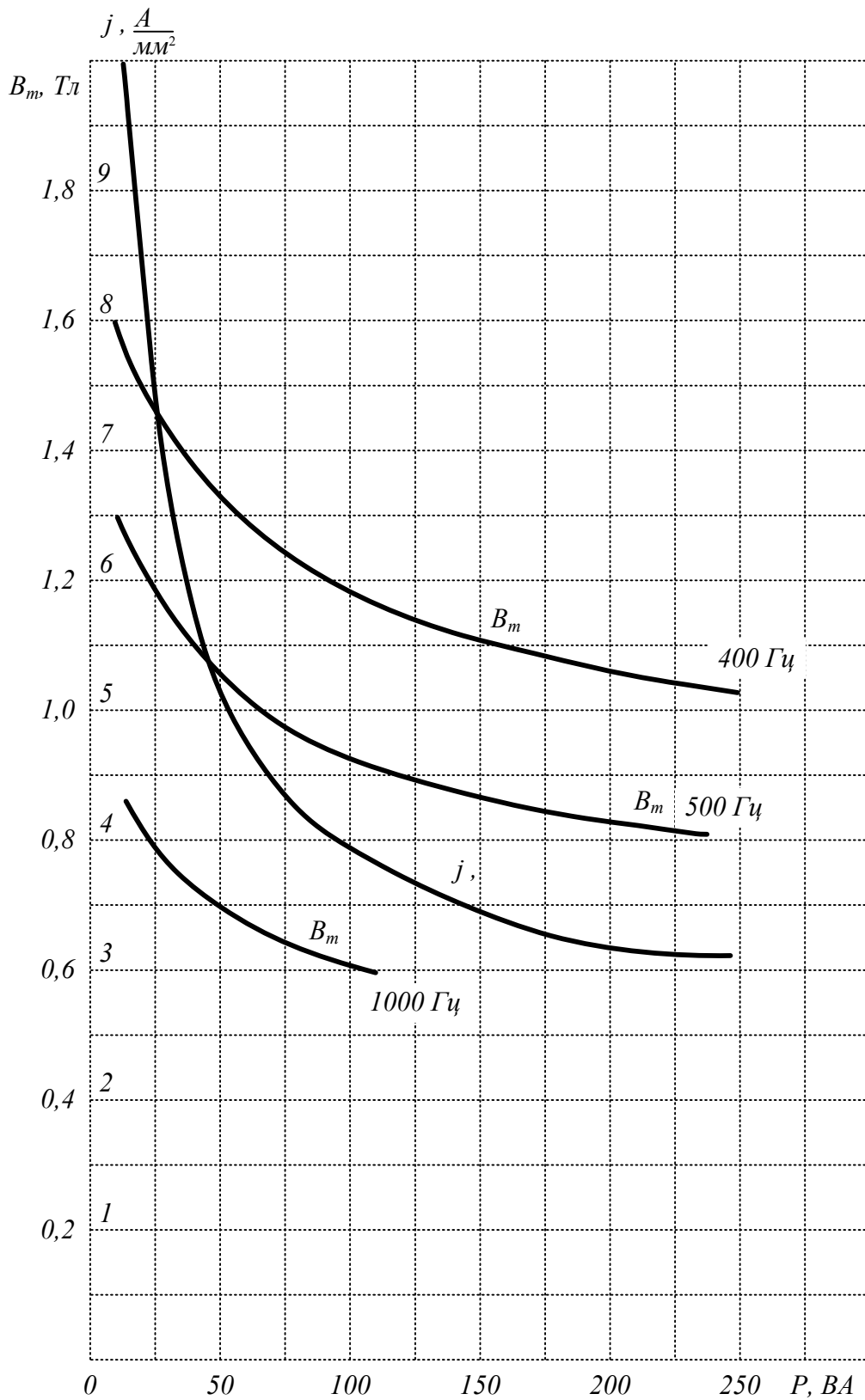


Рис. Д. 6. Залежність амплітуди індукції і щільності струму від потужності тороїдального трансформатора з магнітопроводом із сталі ХВП-0,08 мм

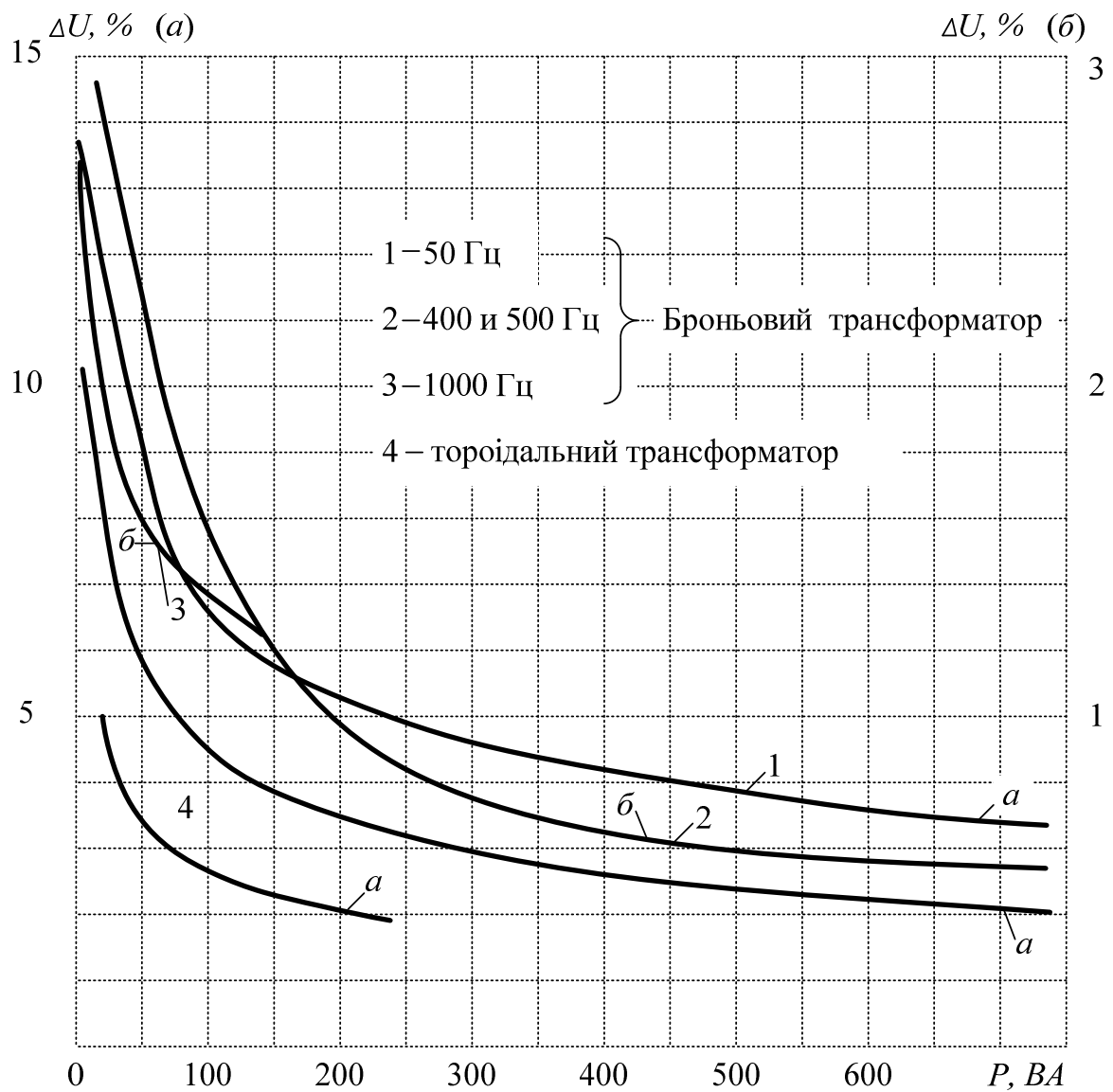


Рис. Д. 7. Залежність ΔU від потужності броньового і тороїдального трансформаторів

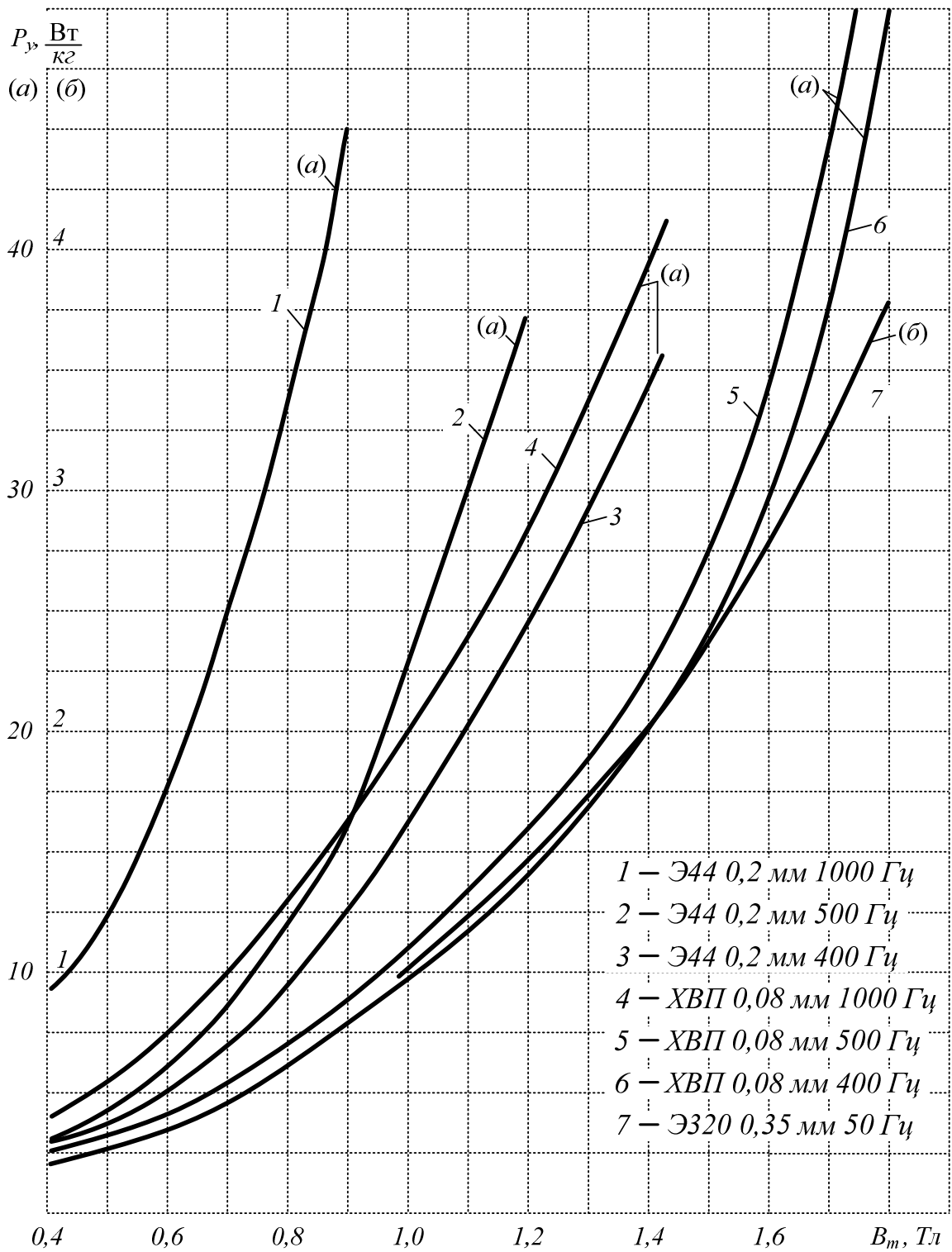


Рис. Д. 8. Криві питомих втрат броньового осердя із сталей марки Э44 і ХВП

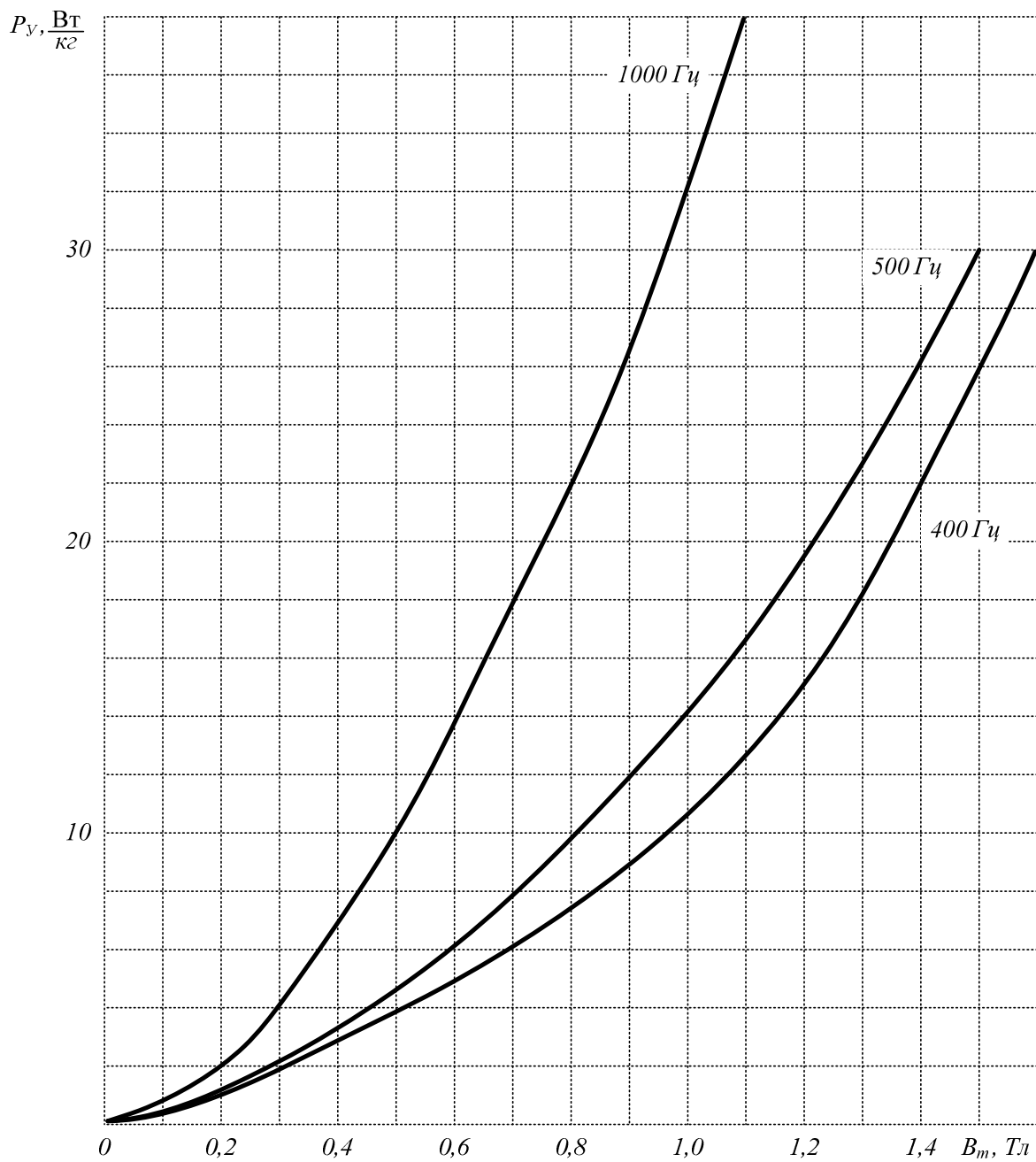


Рис. Д. 9. Криві питомих втрат тороїдального осердя із сталі марки ХВП товщиною 0,08 мм

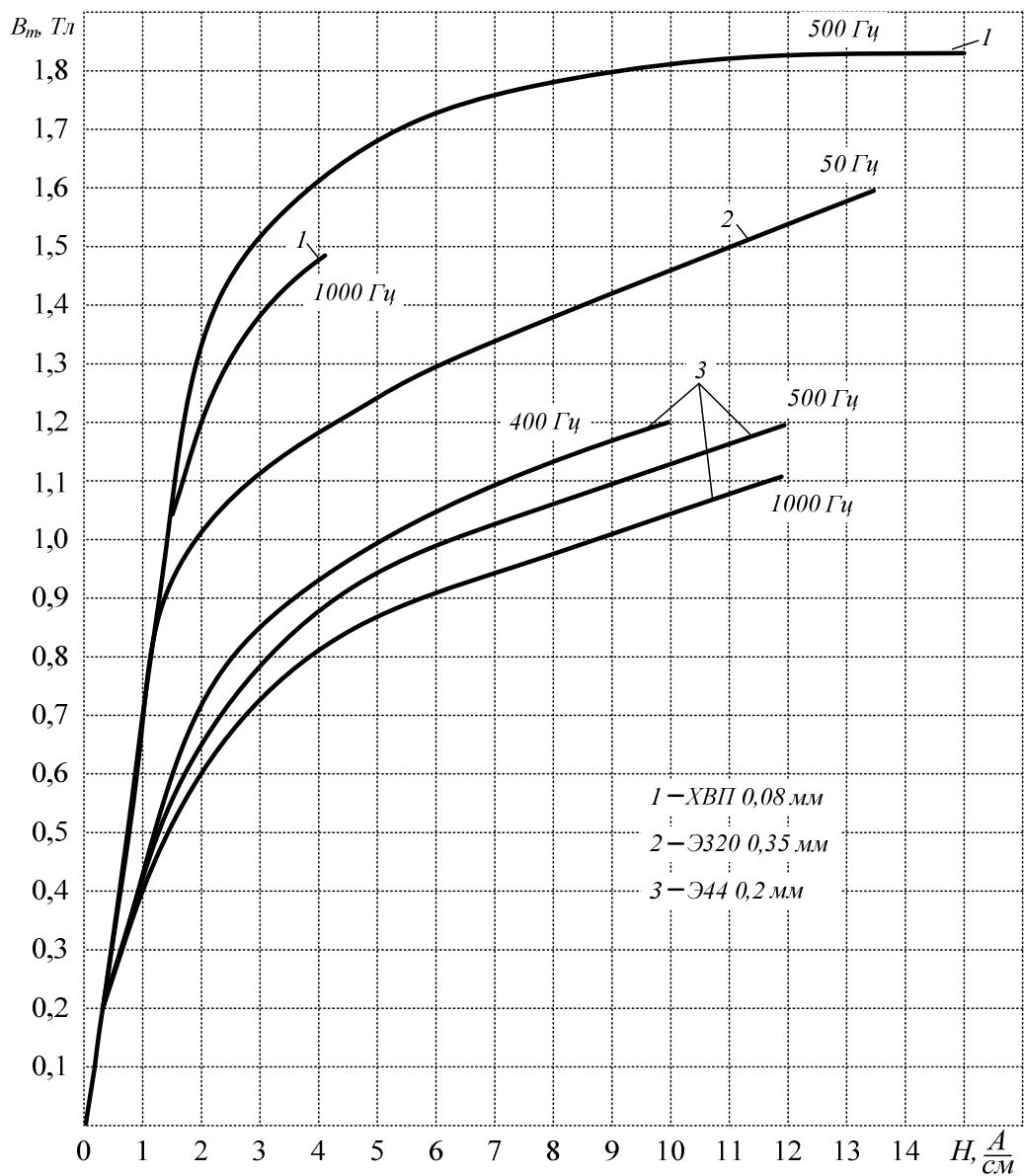


Рис. Д. 10. Криві намагнічування броньових магнітопроводів зі сталі Э44 товщиною 0,2 мм і ХВП товщиною 0,08 мм на частотах 400, 500, 1000 Гц і зі сталі Э320 на частоті 50 Гц

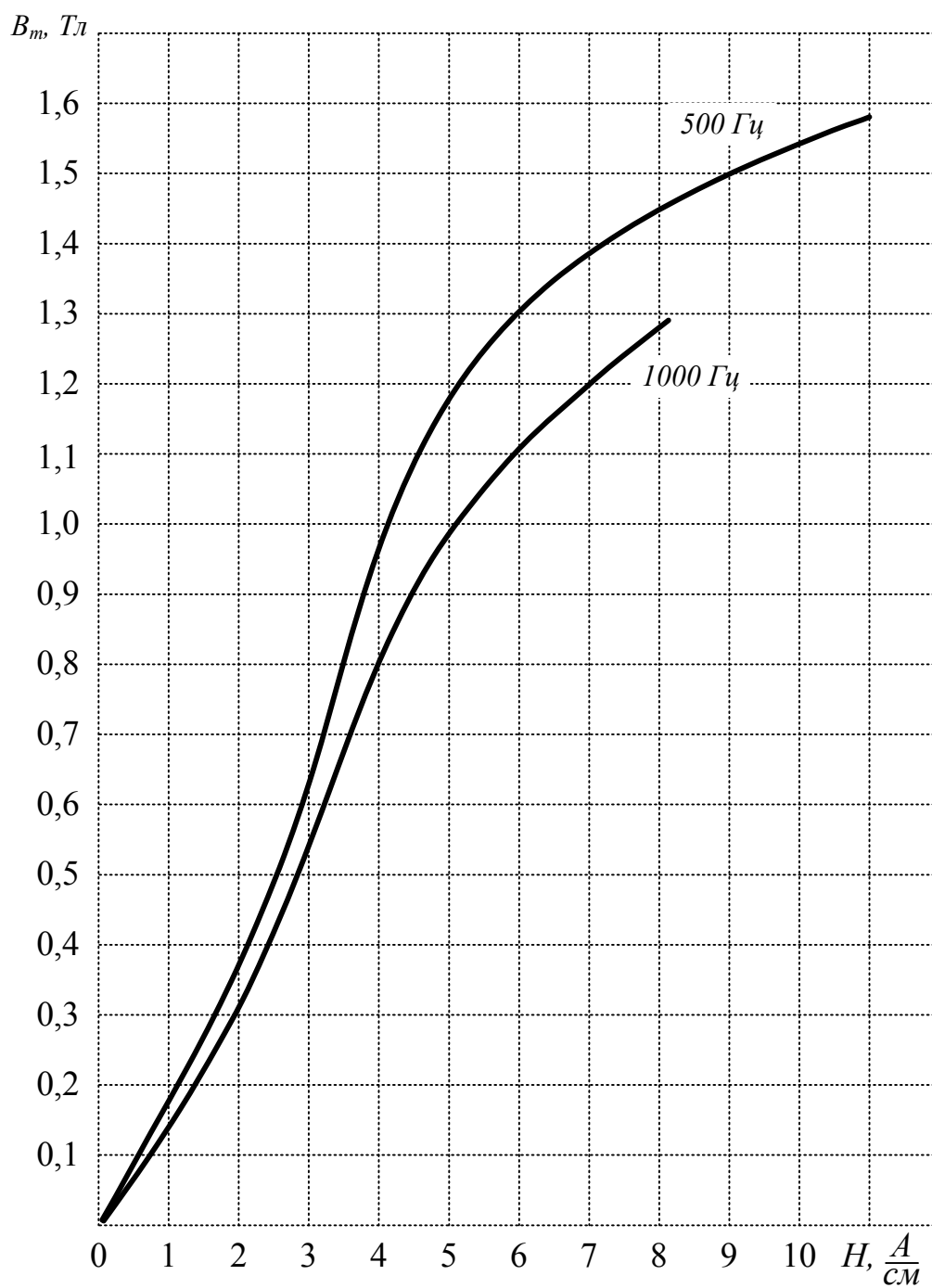


Рис. Д. 11. Криві намагнічування тороїдальних магнітопроводів із сталі товщиною ХВП 0,08 мм

Таблиця Д. 1

Броньові стрічкові магнітопроводи										
Позначення магнітопроводу	Розміри, мм (див. рис. 9)						Довідкові величини			
							Активна площа перерізу магнітопроводу (см ²)	Середня довжина магнітної силової лінії (см)	Перетин сталі x на перетин вікна (см ⁴)	Вага магнітопроводу
	a	h	c	C	H	b	$S_{сеч.акт}$	$l_{ст}$	$S_{ст}S_{ок}$	$G_{ст}$
ШЛ 10x 10	10	25	10	40	35	10	0,87	-	2,5	57
12,5	-	-	-	-	-	13	1,09	8,5	3,12	71
16	-	-	-	-	-	16	1,39	-	4	91
20	-	-	-	-	-	20	1,74	-	5	113
ШЛ 12x 12,5	12	30	12	48	42	12,5	1,31	-	5,4	100
16	-	-	-	-	-	16	1,68	10,2	6,9	130
20	-	-	-	-	-	20	2,1	-	8,7	165
25	-	-	-	-	-	25	2,63	-	10,8	205
ШЛ 16x 16	16	40	16	64	56	16	2,24	-	16,6	235
20	-	-	-	-	-	20	2,8	-	20,5	295
25	-	-	-	-	-	25	3,5	13,6	25,6	370
32	-	-	-	-	-	32	4,5	-	32,6	470
ШЛ 20x 20	20	50	20	80	70	20	3,5	-	40	460
25	-	-	-	-	-	25	4,4	17,1	50	575
32	-	-	-	-	-	32	5,6	-	64	735
40	-	-	-	-	-	40	7,1	-	80	920
ШЛ 25x 25	25	62,5	25	100	87,5	25	5,5	-	98	900
32	-	-	-	-	-	32	7,1	21,3	125	1150
40	-	-	-	-	-	40	8,8	-	156	1440
50	-	-	-	-	-	50	11	-	195	1800
ШЛ 32x 32	32	80	32	128	112	32	9,1	-	261	1900
40	-	-	-	-	-	40	11,3	27,3	328	2370
50	-	-	-	-	-	50	14,2	-	410	2970
64	-	-	-	-	-	64	18,1	-	523	3800
ШЛ 40x 40	40	100	40	160	140	40	14,2	-	640	3720
50	-	-	-	-	-	50	17,7	34,2	800	4650
64	-	-	-	-	-	64	22,7	-	1025	5960

Таблиця Д. 2

Стрічкові броньові магнітопроводи																	
Тип	Магнітопровід					Довідкові дані											
	Габаритні розміри, мм			Розміри вікна, мм		$S_{ст}$, см ²	$S_{ок}$, см ²	$S_{ст}S_{ок}$, см ⁴	G кг ст. стрічка ХВП товщ. 0,08мм	$l_{ср}$, см	$S_{охл}$, см ²	σ , см ³					
	С	Н	b	с	h												
ШЛ-6	24	22	6,5	6	16	0,39	0,96	0,37	0,0144	5,3	22,2	4,22					
			10			0,6							0,58	0,0234	25,2	4,89	
			15			0,9							0,86	0,033	29,7	5,85	
ШЛ-9	36	32,5	6,5	9	23,5	0,585	2,115	1,33	0,0356	7,9	45,2	8,75					
			10			0,9							1,9	0,0508	50	14	
			15			1,35							2,85	0,061	56,7	17,8	
			10			1,2							4,47	0,086	82,75	30,3	
			15			1,8							6,7	0,13	91,75	34	
ШЛ-12	48	43	12	12	31	3,72	3,72	8,92	0,178	10	101	37,8					
			20										2,4	11,2	0,222	110	41,1
			25										3	15,8	0,232	151	73,3
			15										2,4	21	0,33	163,2	80
			20										3,2				
ШЛ-16	64	57	16	16	41	6,56	6,56	26,2	0,39	14	175,1	89					
			25										4	33,6	0,5	192	96,5
			32										5,12	40,8	0,474	240	146
			20										4	151	0,592	255	156
			25										5				
ШЛ-20	80	73	20	20	51	10,2	10,2	65,3	0,758	17	276	170					
			32										6,4	81,6	0,947	360	187
			40										8	99,3	0,92	375	283
			25										6,25	100	1,18	401,3	306
			32										6				
ШЛ-25	100	91,5	25	25	63,5	15,87	15,87	159	1,47	22	431,3	332					
			40										10	198	1,84	468,8	364
			50										12,5	266	1,93	614,4	591
			32										10,24				
ШЛ-32	128	118	32	32	81	25,9	25,9	332	2,41	28	652,8	634					
			40										12,8				

Таблиця типових броньових пластинчатих магнітопроводів													
Позначення магнітопроводу	Розміри, мм (див. рис.9)						Довідкові величини						
							Активна площа пере- різу середнього стри- жня, см ²		Середня довжина магнітноси- лової лінії, см	Перетин сталі х перетин вікна, см ⁴	Вага магнітопроводу, г		
							0,2 мм	0,35 мм			0,2 мм	0,35 мм	
							<i>a</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>b</i>	<i>S</i> _{ст.акт.}
Ш 09x 09	9	22,5	9	36	31,5	9	0,69	0,74	7,72	1,62	40	45	
12	-	-	-	-	-	12	0,92	0,98	-	2,16	45	60	
Ш 12x 10	12	30	12	48	42	10	0,92	0,98	10,03	4,3	78	90	
12	-	-	-	-	-	12	1,23	1,31	-	5,2	100	110	
16	-	-	-	-	-	16	1,63	1,75	-	6,8	130	140	
20	-	-	-	-	-	20	2,04	2,18	-	8,6	170	180	
25	-	-	-	-	-	25	2,55	2,73	-	10,8	210	230	
32	-	-	-	-	-	32	3,26	3,49	-	13,7	270	280	
Ш 16x 10	16	40	16	64	56	10	1,22	1,31	13,7	10,2	145	156	
12	-	-	-	-	-	12	1,63	1,75	-	12,1	180	190	
16	-	-	-	-	-	16	2,18	2,33	-	16,6	240	260	
20	-	-	-	-	-	20	2,72	2,91	-	20,5	300	320	
25	-	-	-	-	-	25	3,4	3,64	-	25,6	370	400	
32	-	-	-	-	-	32	4,35	4,66	-	32,6	470	510	
40	-	-	-	-	-	40	5,44	5,82	-	41	590	630	
Ш 20x 12	20	50	20	80	70	12	2,04	2,18	17,14	24	280	300	
16	-	-	-	-	-	16	2,72	2,91	-	32	380	400	
20	-	-	-	-	-	20	3,4	3,64	-	40	470	500	
25	-	-	-	-	-	25	4,25	4,55	-	50	590	620	
32	-	-	-	-	-	32	5,44	5,82	-	64	750	800	
40	-	-	-	-	-	40	6,8	7,28	-	80	940	990	
50	-	-	-	-	-	50	8,5	9,1	-	100	1150	1240	

Таблиця типових броньових пластинчатих магнітопроводів													
Позначення магнітопроводу	Розміри, мм (див. рис.9)						Довідкові величини						
							Активна площа пере- різу середнього стри- жня, см ²		Середня довжина магнітноси- лової лінії, см	Перетин сталі х перетин вікна, см ⁴	Вага магнітопроводу, г		
							0,2 мм	0,35 мм			0,2 мм	0,35 мм	
							<i>a</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>b</i>	$S_{ст.акт.}$
Ш 25x 16	25	62,5	25	100	87,5	16	3,4	3,64	21,4	62,5	580	620	
20	-	-	-	-	-	20	4,25	4,55	-	78	720	770	
25	-	-	-	-	-	25	5,31	5,68	-	97,5	900	970	
32	-	-	-	-	-	32	6,8	7,82	-	125	1160	1230	
40	-	-	-	-	-	40	8,5	9,1	-	156	1440	1556	
50	-	-	-	-	-	50	10,6	11,4	-	196	1800	1930	
64	-	-	-	-	-	64	13,6	14,5	-	250	2310	2470	
Ш 32x 20	32	80	32	128	112	20	5,44	5,82	27,4	164	1180	1270	
25	-	-	-	-	-	25	6,8	7,28	-	205	1480	1580	
32	-	-	-	-	-	32	8,7	9,32	-	261	1890	2020	
40	-	-	-	-	-	40	10,88	11,65	-	328	2370	2530	
50	-	-	-	-	-	50	13,6	14,56	-	410	2950	3170	
64	-	-	-	-	-	64	17,41	18,63	-	522	3790	4040	
80	-	-	-	-	-	80	21,76	23,29	-	356	4730	5070	
Ш 40x 25	40	100	40	160	140	25	8,5	9,1	34,3	400	2310	2470	
32	-	-	-	-	-	32	10,88	11,65	-	512	2960	3160	
40	-	-	-	-	-	40	13,6	14,56	-	640	3700	3960	
50	-	-	-	-	-	50	17	18,2	-	800	4610	4950	
64	-	-	-	-	-	64	21,76	23,29	-	1025	5910	6320	
80	-	-	-	-	-	80	27,2	29,12	-	1280	7390	7920	
100	-	-	-	-	-	100	34	36,4	-	1600	9240	9860	

Таблиця Д. 4

Штамповані броньові магнітопроводи													
Пластини	Магнітопровід					Довідкові дані							
	Габаритні розміри, мм			Розміри вікна, мм		$S_{ст}, \text{см}^2$	$S_{ок}, \text{см}^2$	$S_{ст} \cdot S_{ок}, \text{см}^4$	$G_{ст}, \text{кг}$ ст. Э44 товщ. 0,2 мм	$l_{ср}, \text{см}$	$S_{окл}, \text{см}^2$	$\sigma, \text{см}^3$	
	C	H	b	c	h								
Ш-9	36	31,5	10	9	22,5	0,9	22,5	1,82	0,047	7,72	49,9	13,4	
			12			1,8		2,19			0,056	52,6	14,2
Ш-12	48	42	12	12	30	1,44	3,6	5,18	0,1	10,03	86,4	30,8	
			16			1,92		6,91			0,131	93,5	33,7
			20			2,4		8,64			0,166	101,0	36,55
			25			3,0		10,8			0,207	110,0	40,18
Ш-16	64	56	16	16	40	2,56	6,4	16,4	0,243	13,7	153,6	73,2	
			20			3,2		20,48			0,299	163,2	78,35
			25			4,0		25,6			0,373	175,0	84,6
			32			5,12		32,8			0,473	192	93,7
Ш-20	80	70	20	20	50	4,0	10	40	0,462	17,14	240	142,8	
			25			5,0		50			0,585	255	152,8
			32			6,4		64			0,738	276	166,8
			40			8,0		80			0,935	300	182,8
Ш-25	100	87,5	25	25	62,5	6,25	15,6	97,5	0,903	21,4	375	279	
			32			8,0		125			1,154	401,3	301
			40			10,0		156,3			1,442	431,3	326
			50			12,5		195			1,805	468,8	357
Ш-32	128	112	32	32	80	10,2	25,6	262,1	1,885	27,4	614,4	585	
			40			12,8		328			2,36	652,8	625
			50			16,0		409,6			296	700	675

Таблиця Д. 5

Таблиця типових стержневих стрічкових магнітопроводів											
Позначення магнітопроводу		Розміри, мм (див. рис 9)						Довідкові дані			
								Активна площа перерізу магнітопроводу, см ²	Середня довжина магнітної силової лінії, см	Геометричний розмір, см ⁴	Вага магнітопроводу, г
a	b	c	C	H	h	$S_{ст.акт.}$	$l_{ст}$	$S_{ст}S_{ок}$	$G_{ст}$		
ПЛ 10x12,5	20	-	-	-	-	40	20	-	9,6	3,1	81
	25	10	12,5	12,5	32,5	45	25	1,1	10,6	3,9	89
	32	-	-	-	-	52	32	-	11,6	5,0	98
	40	-	-	-	-	60	40	-	13,6	6,3	114
ПЛ 12.5x16	25	-	-	-	-	50	25	-	12	8,0	163
	32	12,5	16	16	41	55	32	1,77	13,4	10,2	182
	40	-	-	-	-	65	40	-	15,0	12,8	203
	50	-	-	-	-	75	50	-	17,0	16,0	230
ПЛ 12,5x25	30	-	-	-	-	55	30	-	13,8	18,7	292
	40	12,5	25	20	45	65	40	2,76	15,8	25	334
	50	-	-	-	-	75	50	-	17,8	31	376
	60	-	-	-	-	85	60	-	19,8	37,6	418
ПЛ 16x32	40	-	-	-	-	72	40	-	18,0	51	620
	50	16	32	25	57	82	50	4,54	20,0	64	690
	65	-	-	-	-	97	65	-	23,0	83	795
	80	-	-	-	-	112	80	-	26,0	102	900
ПЛ 20x40	50	-	-	-	-	90	50	-	22,7	128	1230
	60	20	40	32	72	100	60	7,1	24,7	154	1350
	80	-	-	-	-	120	80	-	28,7	205	1550
	100	-	-	-	-	140	100	-	32,7	256	1770
ПЛ 25x50	65	-	-	-	-	115	65	-	28,8	325	2440
	80	25	50	40	90	130	80	11,1	31,8	400	2700
	100	-	-	-	-	150	100	-	35,8	500	3040
	120	-	-	-	-	170	120	-	39,8	600	3380
ПЛ 32x64	80	-	-	-	-	144	80	-	36,0	820	5000
	100	32	64	50	114	164	100	18,2	40,0	1025	5600
	130	-	-	-	-	194	130	-	46,0	1330	6480
	160	-	-	-	-	224	160	-	52,0	1640	7250
ПЛ 40x80	100	-	-	-	-	180	100	-	45,3	2050	9900
	120	-	-	-	-	200	120	-	49,0	2460	10700
	160	40	80	64	144	240	160	28,6	57,3	3260	12500
	200	-	-	-	-	280	200	-	65,3	4100	14300

Таблиця Д. 6

Стрічкові тороїдальні магнітопроводи									
Розмір магнітопроводу (тип ОЛ)	Магнітопровід				Довідкові дані				
	Габаритні розміри				$S_{ст},$ см ²	$S_{ок},$ см ²	$S_{ст}S_{ок},$ см ⁴	G, кг	$l_{ср},$ см
	C мм	D мм	b мм	a мм					
20/28 – 6,5	20	28	6,5	4	0,26		0,294	0,0128	7,52
20/28 – 10	20	28	10	4	0,40		0,492	0,0208	7,52
20/32 – 10	20	32	10	6	0,6	1,13	0,678	0,0318	8,16
20/32 – 15	20	32	15	6	0,9		1,016	0,0477	8,16
25/35 – 10	25	35	10	5	0,5		1,45	0,0306	9,42
25/39 – 10	25	39	10	7	0,7	2,9	2,03	0,0457	10,04
25/39 – 15	25	39	15	7	1,05		3,045	0,0685	10,04
30/42 – 15	30	42	15	6	0,9	5,05	4,55	0,0661	11,3
30/46 – 15	30	46	15	8	1,2		6,06	0,0933	11,92
35/53 – 15	35	53	15	9	1,35	7,61	10,27	0,1215	13,8
35/55 – 20	35	55	20	10	2,0		15,22	0,1835	14,12
40/60 – 20	40	60	20	10	2,0	10,55	21,1	0,204	15,7
40/60 – 25	40	60	25	10	2,5		26,4	0,255	15,7
45/65 – 25	45	65	25	10	2,5	13,9	34,7	0,284	17,3
45/69 – 25	45	69	25	12	3,0		41,6	0,349	17,9

Таблиця Д. 7

Тороїдальні стрічкові магнітопроводи									
Позначення магнітопро- воду	Розміри, мм (див. рис. 9)				Довідкові величини				
					Активна площа пе- рерізу маг- нітопрово- ду, см ²	Середня довжина магнітної силової лінії, см	Геомет- ричний розмір, см ⁴	Вага магнітоп- роводу, г	
	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>D</i>	$S_{ст\ акт}$	$l_{ст}$	$S_{ст} S_{ок}$	$G_{ст}$	
ОЛ 16/26 6,5	-	-	6,5	-	0,28	-	0,66	14,2	
	8	16	5	8	26	0,35	6,5	0,8	176
	10	-	-	10	-	0,43	-	1	21,6
ОЛ 20/32	8	-	-	8	-	0,42	-	1,5	25
	10	20	6	10	32	0,52	8,1	1,86	32,2
	12,5	-	-	12,5	-	0,65	-	2,82	40,3
	16	-	-	16	-	0,84	-	300	52
ОЛ 25/40	10	-	-	10	-	0,66	-	3,67	51,2
	12,5	26	7,5	12,5	48	0,82	10,2	4,6	64
	16	-	-	6	-	1,05	-	5	82
	20	-	-	20	-	1,3	-	7,35	102
	25	-	-	25	-	1,64	-	9,18	128
ОЛ 32/50	16	-	-	16	-	1,27	-	11,5	125
	20	32	9	20	50	1,58	12,8	14,4	156
	25	-	-	25	-	1,98	-	18	194
	32	-	-	32	-	2,54	-	23	249
ОЛ 40/64	20	-	-	20	-	2,12	-	30	264
	25	40	12	25	64	2,64	16,3	38	329
	32	-	-	32	-	3,38	-	48	421
	40	-	-	40	-	4,23	-	60	527

Таблиця Д. 8

Матеріал міжшарової і міжобмотувальної ізоляції			
Матеріал прокладки	Товщина прокладки	Середня пробивна напруга прокладок	Робоча температура
Конденсаторний папір КОН-1	0,007	275	105 (155)
	0,012	300	
	0,022	475	
Телефонний папір КТН	0,05	500	105 (155)
Кабельний папір К-12	0,12	1000	105 (155)
Просочувальний папір ИП-63	0,11	500	105 (155)
Плівка електроізоляційна з фторопласту 4, орієнтована	0,04	4000	155 (200)
Склотканина ЛСК-7	0,11	1800	180 (250)
Плівкоелектрокартон	0,16	3500	105 (155)
Лакотканина ЛШС	0,12	4500	105 (155)
Мікастрічка	0,1	2500	130 (180)
Випробувальна напруга міжобмотувальної ізоляції			
Потенціал обмоток (робоча напруга) В	Випробувальна напруга В		
До 24	250		
24 – 100	500		
100 – 500	2000		
Понад 500	Подвійний найбільший потенціал		

Таблиця Д. 9

Номінальні дані обмотувальних проводів круглого перерізу						
Номінальний діаметр проводу по міді, мм	Перетин проводу, мм ²	Вага 1м мідного проводу, г	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭЛ	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭВ-1	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭВ-2	Діаметр проводу з ізоляцією ПБД
0.03	0.00071	0.0063	0.05	0.045	-	-
0.04	0.00126	0.0112	0.06	0.055	-	-
0.05	0.00196	0.0175	0.065	0.08	-	-
0.06	0.00283	0.0251	0.075	0.085	0.09	-
0.07	0.00385	0.0342	0.0342	0.095	0.010	-
0.08	0.00503	0.0447	0.095	0.105	0.11	-
0.09	0.00636	0.0565	0.105	0.115	0.12	-
0.10	0.00785	0.0698	0.120	0.125	0.13	-
0.11	0.00950	0.0845	0.130	0.135	0.14	-
0.12	0.1131	0.101	0.140	0.145	0.15	-
0.13	0.01327	0.118	0.150	0.155	0.16	-
0.14	0.01539	0.137	0.160	0.165	0.17	-
0.15	0.01767	0.157	0.170	0.18	0.19	-
0.16	0.02011	0.179	0.18	0.19	0.20	-
0.17	0.02270	0.202	0.190	0.20	0.21	-
0.18	0.02545	0.226	0.200	0.21	0.22	-
0.19	0.02835	0.252	0.21	0.22	0.23	-
0.20	0.03104	0.279	0.225	0.23	0.24	-
0.21	0.03464	0.308	0.235	0.24	0.25	-
0.23	0.04155	0.369	0.255	0.27	0.28	-
0.25	0.04909	0.436	0.275	0.29	0.30	-
0.27	0.05726	0.509	0.310	0.31	0.32	-
0.29	0.06605	0.587	0.330	0.33	0.34	-
0.31	0.07548	0.7548	0.350	0.35	0.36	-
0.33	0.08553	0.760	0.370	0.37	0.38	-
0.35	0.09621	0.855	0.390	0.39	0.41	-
0.38	0.1134	1.010	0.42	0.42	0.44	0.61

Номінальні дані обмотувальних проводів круглого перерізу						
Номінальний діаметр проводу по міді, мм	Перетин проводу, мм ²	Вага 1м мідного проводу, г	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭЛ	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭВ-1	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭВ-2	Діаметр проводу з ізоляцією ПБД
0.41	0.1320	1.180	0.450	0.45	0.47	0.64
0.44	0.1521	1.350	0.490	0.48	0.50	0.67
0.47	0.1735	1.540	0.52	0.51	0.53	0.7
0.49	0.1886	1.680	0.54	0.53	0.55	0.72
0.51	0.2043	1.820	0.560	0.56	0.58	0.74
0.53	0.2206	1.96	0.58	0.58	0.60	0.76
0.55	0.2376	2.110	0.600	0.60	0.62	0.78
0.57	0.2552	2.270	0.620	0.62	0.64	0.80
0.59	0.2734	2.430	0.64	0.64	0.66	0.82
0.62	0.3019	2.680	0.670	0.67	0.69	0.85
0.64	0.3217	2.860	0.690	0.69	0.72	0.87
0.67	0.3526	3.130	0.720	0.72	0.75	0.90
0,69	0,3739	3,320	0,740	0,74	0,77	0,92
0,72	0,4072	3,600	0,780	0,77	0,80	0,96
0,74	0,4301	3,820	0,800	0,80	0,83	0,98
0,77	0,4657	4,140	0,830	0,83	0,86	1,01
0,80	0,5027	4,470	0,860	0,86	0,89	1,04
0,83	0,5411	4,810	0,890	0,89	0,92	1,07
0,86	0,5809	5,160	0,920	0,92	0,95	1,10
0,90	0,6362	5,66	0,960	0,96	0,99	1,14
0,93	0,6793	6,04	0,990	0,99	1,02	1,17
0,96	0,7238	6,44	1,020	1,02	1,05	1,20
1,00	0,7854	6,98	1,070	1,08	1,11	1,29
1,08	0,9161	8,14	1,160	1,16	1,19	1,37
1,12	0,9852	8,76	1,200	1,20	1,23	1,41
1,16	1,057	9,40	1,24	1,24	1,27	1,45

Номінальні дані обмотувальних проводів круглого перерізу						
Номінальний діаметр проводу по міді, мм	Перетин проводу, мм ²	Вага 1м мідного проводу, г	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭЛ	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭВ-1	Діаметр проводу з ізоляцією ПЭВ-2	Діаметр проводу з ізоляцією ПБД
1,20	1,1310	10,10	1,280	1,28	1,31	1,49
1,25	1,2270	10,90	1,330	1,33	1,36	1,54
1,30	1,3270	11,80	1,380	1,38	1,41	1,59
1,35	1,4310	12,70	1,430	1,43	1,46	1,64
1,40	1,5390	13,70	1,480	1,48	1,51	1,69
1,45	1,6510	14,70	1,530	1,53	1,56	1,74
1,50	1,7670	15,70	1,580	1,58	1,61	1,79
1,56	1,9110	17,00	1,640	1,64	1,67	1,86
1,62	2,061	18,30	1,710	1,71	1,73	1,91
1,68	2,217	18,7	1,770	1,77	1,79	1,98
1,74	2,378	21,10	1,830	1,82	1,85	2,04
1,81	2,5730	22,9	1,900	1,90	1,93	2,11
1,88	2,776	24,7	1,970	1,97	2,00	2,18
1,95	2,987	26,5	2,040	2,4	2,07	2,25
2,02	3,205	28,5	2,12	2,11	2,14	2,32
2,10	3,464	30,80	2,200	2,20	2,23	2,40
2,26	4,012	35,70	2,360	2,36	2,39	2,62
2,44	4,676	41,6	2,540	2,54	2,57	2,80
2,63	5,433	48,30	-	-	-	2,99
2,83	6,29	55,9	-	-	-	3,19
3,05	7,306	65,0	-	-	-	3,42
3,28	8,450	75,1	-	-	-	3,65
3,53	9,787	87,0	-	-	-	3,90
3,80	11,34	101	-	-	-	4,17
4,10	13,20	117	-	-	-	4,47
4,50	15,90	142	-	-	-	4,88
4,80	18,10	161	-	-	-	5,18
5,20	21,24	189,0	-	-	-	5,53

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Паначевный, Б. И. Курс электротехники: учебник / Б. И. Паначевный. – Харьков : Торсинг; Ростов н/Д.: Феникс, 2002. – 288 с.
2. Костенко, М. П. Электрические машины: учебник. В 2 ч. Ч.1. Машины переменного тока / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л. : Энергия, 1973. – 647 с.
3. Векслер, Г. С. Расчет электропитающих устройств. – Киев, Техника, 1978. – 208 с.
4. Галицын, Э. А. Электрические машины и электроснабжение летательных аппаратов : учеб. пособие / Э. А. Галицын, Б. И. Дорошенко, Л. Н. Поляков. – Харьков : ХАИ, 1977. – 84 с.
5. Галицын, Э. А. Расчет трансформатора : учеб. пособие / Э. А. Галицын, Б. И. Дорошенко, Л. Н. Поляков. – Харьков : ХАИ, 1969. – 52 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
Принцип дії трансформатора	4
Режими роботи.....	8
Схема заміщення трансформатора.....	14
Основні теоретичні положення та рекомендації до розрахунку трансформаторів малої потужності.....	17
Магнітопроводи трансформаторів малої потужності	20
Шляхи зменшення маси і габаритів т.м.п.	22
Обмотки трансформаторів малої потужності	23
Конструктивне оформлення трансформаторів малої потужності	26
Порядок розрахунку силових трансформаторів малої потужності.....	28
Особливості розрахунку тороїдальних трансформаторів	42
Перевірка розміщення обмоток тороїдального трансформатора.....	43
Додаток. Довідкові дані для розрахунку т.м.п.	45
Бібліографічний список	66

Навчальне видання

**Агаркова Світлана Анатоліївна
Галіцин Едуард Андрійович
Бояркін Андрій Олександрович
Фірсов Сергій Миколайович**

ТРАНСФОРМАТОРИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Редактор Є. О. Александрова

Зв. план, 2018

Підписано до видання 23.10.2018

Ум. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. 4,25. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001