

### 3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТРАНСФОРМАТОРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

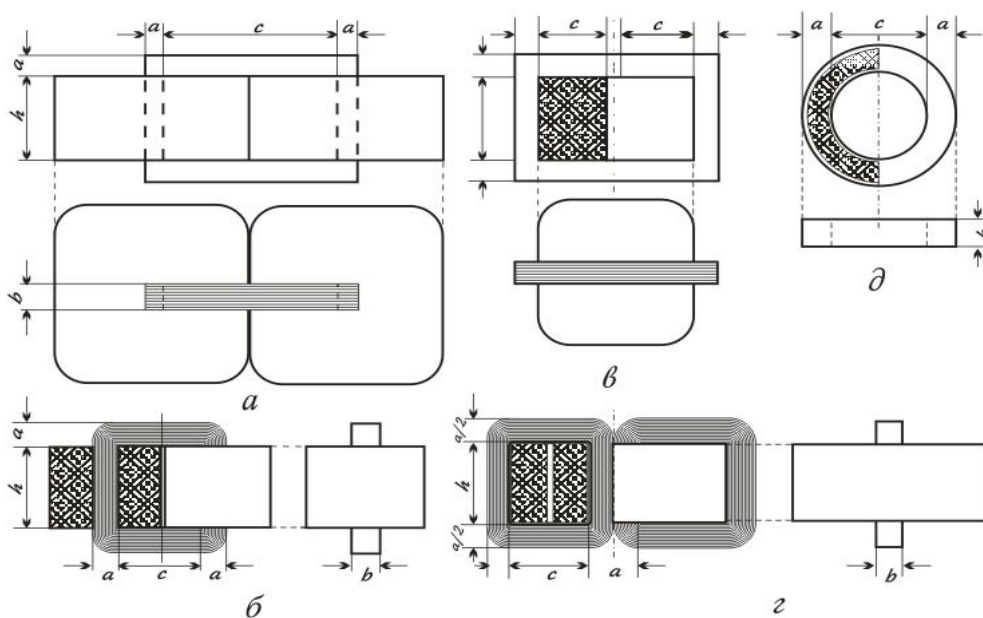
Задачею розрахунку є визначення геометричних розмірів магнітопроводу, параметрів обмоток (кількість витків, марки і діаметри проводів і параметрів трансформатора (струм холостого ходу (ХХ), напруга короткого замикання (КЗ), зміна вторинної напруги, коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії (ККД), температура перегріву і т.ін.).

Основними елементами конструкції трансформаторів є магнітопровід (МП) і обмотки.

Магнітопроводи однофазових трансформаторів малої потужності виготовляються набірними і штампованими із П-, Ш- чи О-подібних пластин, або стрічковими. Марки електротехнічних сталей, їх магнітні властивості та питомі втрати визначаються в ГОСТ 802-58 (табл.Д.1, Д.2).

У залежності від конструктивного виконання магнітопроводу, а також розташування обмоток, розрізняють трансформатори стрижневого (рис.3.1,а – набірний, рис.3.1,б – стрічковий), броневого (рис.3.1,в – набірний, рис.3.1,г – стрічковий) і тороїдального (рис.3.1,д) типів.

Конструктивні різновиди трансформаторів (рис.3.1) відрізняються, у крайньому випадку, умовами охолодження МП і котушки, а також економічними показниками.



**Рис.3.1. Конструктивне виконання трансформаторів**

У броньовому трансформаторі поверхня магнітопроводу, з якої випромінюється тепло в навколишнє середовище, більша, ніж у стрижневого трансформатора того ж розміру. Однак, стрижневий трансформатор має більш відкриту поверхню котушок і менші витрати обмоточного проводу. За вартістю виготовлення броньовий трансформатор дешевше стрижневого. Переваги стрічкових МП броньового і стрижневого трансформаторів перед набірним відбиваються на можливості повної автоматизації їх виготовлення, повній відсутності залишків сталі, легкості збирання, можливості використання тонких матеріалів.

Стрічкові МП можуть бути замкненими (рис.3.1,б-г), рознімними (табл.Д.5, Д.6) – останнє викликане необхідністю спрощення технології намотування котушок. У замкнених магнітопроводах магнітні властивості вихідного матеріалу можуть бути відтворені повністю, а в МП рознімних ці властивості неминуче погіршуються (табл.Д.3).

Стрічкова холоднокатана сталь випускається в стандартних ширинах: 5; 5,6; 6,3; 6,5; 7,1; 8; 9; 10; 11,2; 12; 12,5; 14; 15; 16; 18; 20; 22,4; 25; 28; 32; 35,5; 40; 45; 50; 56; 64; 71; 80; 90; 100 мм.

При конструюванні трансформаторів низької потужності доцільним є використання загальної теорії трансформаторів. Фізичні процеси при холостому ході, у режимі навантаження і при короткому замиканні будуть аналогічні процесам у звичайних потужних силових трансформаторах. Однак, кількісні співвідношення окремих важливих показників, що визначають робочий процес, будуть зовсім іншими.

У табл.Д.4, Д.5, Д.6 надані розміри стандартних МП для трансформаторів малої потужності, які складають уніфіковані ряди типових розмірів, для броньової конструкції (пластинчатого і стрічкового типів) і стрижневої (стрічкового типа). У табл.Д.7 наведені оптимальні співвідношення розмірів з точки зору мінімуму ваги, об'єму і вартості для трансформаторів різних конструкцій.

Електрична схема обмоток трансформатора визначається його призначенням.

У курсовій роботі розглядається трансформатор ДВЖ, який виконано за двохобмоточною схемою.

За своєю конструкцією обмотки трансформаторів розподіляються на концентричні та переміжні. Обмотки можуть бути каркасними і безкаркасними: витки обмоток можуть бути розташованими в ряди, виток до витка, чи у навал. Для намотування використовуються мідні (або алюмінієві) ізолювані проводи круглого (або прямокутного) розрізу.

Обмотки та інші частини трансформаторів, які проводять електричний струм, ізолюються.

Конструктив обмоток має забезпечувати їх добре охолодження. Температура нагрівання обмоток має знаходитися у межах, встановлених для відповідних класів ізоляції обмоточних проводів.

У залежності від стійкості до нагрівання, тобто здатності безперервно працювати при даній температурі протягом певного терміну, ізоляційні матеріали розподіляються на сім класів з наступними гранично припустимими температурами: клас Y – 90<sup>0</sup>С; клас А – 105<sup>0</sup> С; клас Е – 120<sup>0</sup> С; клас В – 130<sup>0</sup> С; клас F – 155<sup>0</sup> С; клас Н – 180<sup>0</sup>; клас С – більше 180<sup>0</sup>С.

Розрахунок обмоток трансформатора зводиться до визначення кількості витків у кожній обмотці, вибору щільності струму та діаметру проводів, визначенню втрат в обмотках і перевірці на вірність розміщення обмоток трансформатора на вибраному МП.

### 3.1. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ І ВИБІР МАГНІТОПРОВОДУ ТРАНСФОРМАТОРА

3.1.1. При розрахунку трансформаторів малої потужності, призначених для схем ДВЖ постійного струму, заданими є випрямлені струм та напруга на навантаженні  $I_H$  і  $U_H$ , номінальні діючі значення напруги  $U_2$  і струму  $I_2$  у вторинній обмотці трансформатора. Відношення  $U_2/U_H$  та  $I_2/I_H$  залежать від ряду факторів, а саме від схеми випрямляча, типу вихідного згладжувального фільтра і т.ін. У табл.3.1 для найбільш розповсюджених схем випрямлення при наявності ємнісного вихідного фільтра наведені орієнтовні значення цих відношень. При розрахунку джерела живлення в напрямку від навантаження величини  $U_2$  та  $I_2$  визначаються точно.

Таблиця 3.1

**Значення відношень  $U_2/U_H$  та  $I_2/I_H$  для різних типів діодних схем випрямлення**

Тип однофазної схеми випрямлення	$U_2/U_H$	$I_2/I_H$
Однонапівперіодна	1,4	1,9...2,5
Подвоєння напруги	0,7	2,7...3,5
Двохнапівперіодна із середньою точкою	1,1	1,0...1,3
Мостова	1,1	1,4...1,8

**Примітка.** У разі використання в ДВЖ параметричного стабілізатора, напруга  $U_2$  визначається з урахуванням співвідношення (6.6).

За визначеними, із використанням табл.3.1 значеннями  $U_2$ ,  $I_2$ , розраховується потужність вторинної обмотки трансформатора.

$$\begin{aligned} S_2 &= U_2 I_2, \text{ ВА}; \\ P_2 &= S_2 \cos \varphi_2, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.1.2. Вибір конфігурації магнітопроводу, марки сталі і товщини пластин або стрічки виконується з урахуванням розрахункової електромагнітної потужності  $S_{EM}$ , максимальної магнітної індукції  $B$  і частоти електромережі живлення  $f$ .

Електромагнітна потужність трансформатора  $S_{EM}$  і потужність вторинної обмотки  $S_2$  відрізняються одна від одної, головним чином за рахунок втрат у трансформаторі. Попередньо можна прирівняти ці потужності.

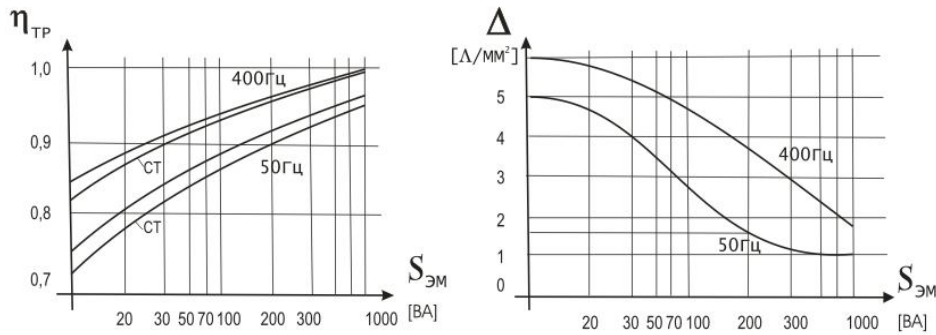
3.1.3. Визначення основних розмірів трансформатора виконується у відповідності з виразом

$$S_C \cdot S_0 = \frac{1 + \eta_{TP}}{\eta_{TP}} \cdot \frac{S_{EM} 10^2}{4,44 f B \Delta K_{OK} K_C}, \text{ см}^4, \quad (3.2)$$

де  $S_C$  і  $S_0$  – площини поперечного перерізу стрижня магнітопроводу і вікна;  $f$  – частота мережі живлення (Гц);  $B$  – амплітуда магнітної індукції (Тл);  $\Delta$  – щільність струму в обмотках ( $\text{А/мм}^2$ );  $K_{OK}$ ,  $K_C$  – коефіцієнти заповнення вікна МП обмотками і сталлю площі поперечного перерізу стрижня магнітопроводу відповідно;  $\eta_{TP}$  – ККД трансформатора.

Вираз (3.2) вказує на те, що при даних коефіцієнтах заповнення і незмінності електромагнітних навантажень,  $\Delta$  і  $B$ , потужність трансформатора пропорційна сумі площин МП і вікна.

Параметри  $\eta_{TP}$  і  $\Delta$  визначаються орієнтовано за залежностями (рис.3.2,а,б).



**Рис.3.2. Графіки залежностей для визначення  $\eta_{ТР}$  і  $\Delta$**

Вибір величини  $B$  вагомо впливає на вірність співвідношень параметрів у проєктованому трансформаторі. Слід враховувати, що практично у всьому діапазоні потужностей для всіх типів трансформаторів малої потужності з холоднокатаної сталі  $B = 1,6...1,8$  Тл, з гарячекатаної –  $B = 1,1...1,25$  Тл. Нижні межі відповідають меншим потужностям, а до 5...10 ВА – тим, що виходять за нижню межу. При рівних потужностях найбільш високі індукції забезпечуються у стрижневих трансформаторах, а потім у броньових і тороїдальних. При підвищених частотах величина  $B$  визначається втратами у сталі та її нагрівом, і може бути попередньо вибрана в межах 0,5...1,1 Тл.

Коефіцієнт заповнення вікна магнітопроводу  $K_{ОК}$  залежить від діаметрів проводів обмоток (від потужності трансформатора), ізоляції і напруги обмоток (табл. 3.2, 3.3).

Таблиця 3.2

**Значення  $K_{ОК}$  для деяких марок проводів при  $U < 1000$  В**

Марка повода	Діаметр проводу, мм	$K_{ОК}$
ПЕЛ, ПЕВ, ПЕТ	0,05...0,1	0,15...0,20
	0,1...0,2	0,18...0,25
	0,2...0,5	0,22...0,3
	0,5...1,5	0,27...0,35
ПЕЛШО	0,1...0,2	0,12...0,19
	0,2...0,5	0,17...0,25
ПЕЛЩД, ПЩД, ПЕЛБО	0,2...0,5	0,15...0,22
ПБД, ПЕЛБД	0,5...1,5	0,16...0,25
	1,5...4,5	0,22...0,3

Таблиця 3.3

**Значення  $K_{OK}$  в залежності від потужності трансформатора**

$S_{EM}, \text{ВА}$ $f, \text{Гц}$	15...50	50...150	150...300	300...1000
50	0,22...0,28	0,28...0,34	0,34...0,36	0,36...0,38
400	0,21...0,25	0,25...0,28	0,28...0,3	0,3...0,37

Коефіцієнт заповнення сталю перерізу МП ( $K_C$ ) залежить від товщини сталевих листів чи стрічки та матеріалу ізоляції (табл.3.4).

Таблиця 3.4

**Значення  $K_C$  для трансформаторної сталі**

Товщина листа	$K_C$	
	Для пластинчастих МП	Для стрічкових МП
0,35...0,5	0,89...0,93	0,95...0,97
0,20...0,35	0,82...0,89	0,93...0,95
0,05...0,1	—	0,75...0,88

Визначивши добуток  $S_C \cdot S_0$  можна легко встановити межі припустимої ширини стрижня МП, які можуть бути використані для даного трансформатора.

Маючи оптимальні співвідношення сторін  $x = c/a$ ;  $y = b/a$ ;  $z = h/a$  (табл.Д.7), можна визначити величину  $a$ :

$$a = 4 \sqrt[4]{\frac{S_c \cdot S_o}{x \cdot y \cdot z}}, \text{ см.} \quad (3.3)$$

Знаючи величини  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $h$  для  $y=1$  і  $y=2$ , а також добуток  $S_C \cdot S_0$ , з табл.Д.4, Д.5, Д.6 можна вибрати стандартний МП. Для подальшого розрахунку з таблиць треба вписати наступні дані: типорозмір ТР, геометричні розміри МП, площину його перерізу, вагу і значення  $S_C \cdot S_0$ .

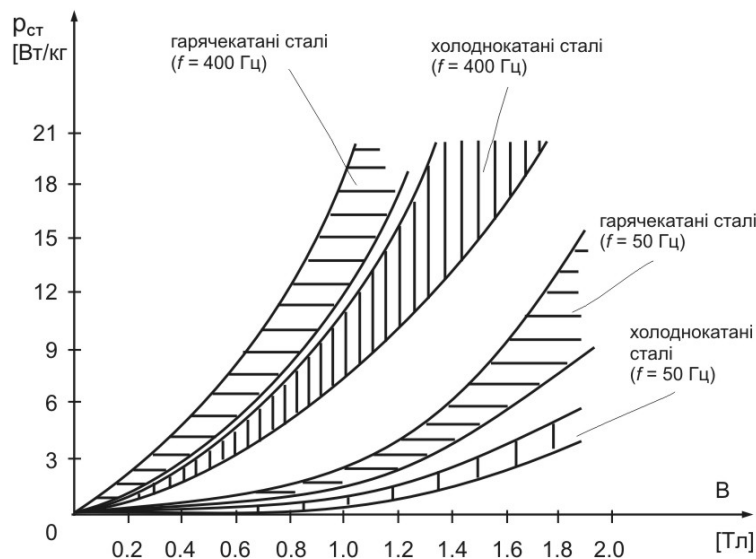
3.1.4. Втрати у сталі визначаються за формулою:

$$P_{CT} = p_{CT} \cdot G_{CT}, \text{ Вт,} \quad (3.4)$$

де  $p_{CT}$  – питомі втрати потужності в МП (Вт/кг), які залежать від марки сталі, товщини пластин або стрічки, магнітної індукції і

частоти напруги в мережі живлення;  $G_{CT}$  – вага сталі магнітопроводу (кг).

Питомі втрати  $P_{CT}$  можуть бути визначені для заданої частоти, вибраної конструкції МП і його матеріалу за табл.Д.1, Д.2, Д.3, а також за експериментально отриманими зонами залежностей питомих втрат у сталі від магнітної індукції, вказаними на рис.3.3.



**Рис.3.3.** Залежність питомих втрат в сталі  $P_{CT}$  від магнітної індукції  $B$

При необхідності перерахунку величини питомих втрат на інші значення індукції можна з достатньою для практики точністю скористатися квадратичною залежністю:

$$P_{CT} = P_{CT\text{ вИД}} \left( B / B_{ИЗВ} \right)^2, \quad (3.5)$$

де  $P_{CT\text{ вИД}}$  – питомі втрати при відомій індукції  $B_{ИЗВ}$ .

3.1.5. Активна складова струму холостого ходу у відсотках від номінального струму визначається за співвідношенням

$$I_{0a} = (P_{CT} / S_{EM}) \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

3.1.6. Реактивна складова струму холостого ходу у відсотках від номінального струму дорівнює

$$I_{0p} = (Q_C / S_{EM}) \cdot 100\% = (q_C G_{CT} / S_{EM}) \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

де  $Q_c$  – реактивна намагнічувальна потужність (ВАр);  $q_c$  – питома намагнічувальна (ВАр/кг), яка залежить від марки сталі, частоти, конструкції МП і магнітної індукції та може бути визначена за табл.3.5, 3.6.

Таблиця 3.5

**Питома намагнічувальна потужність  $q_c$  (ВАр/кг)  
для холоднокатаної сталі при різних значеннях індукції  $B$   
(частота 50 Гц)**

Марка сталі \ $B$ , Тл	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
E310	1,45	1,91	2,44	3,17	4,47	6,75	14,25	38,3
E320	1,22	1,53	2,02	2,51	3,55	5,3	10,0	27,0
E330	1,0	1,25	1,57	2,0	2,7	3,85	6,2	14,0
E330A	0,7	0,9	1,1	1,3	1,65	1,97	2,8	5,6

При підвищених частотах питома намагнічувальна потужність суттєво підвищується. Для приблизних розрахунків питомої намагнічувальної потужності можна скористатися співвідношенням  $q_{c400} = (3...5)q_{c50}$ , де відображений зв'язок між розглянутими параметрами на частотах 400 і 50 Гц.

Таблиця 3.6

**Питома намагнічувальна потужність  
для сталі марок E41, E42, E43 0,35 і 0,5 мм при різних  
значеннях індукції  $B$**

$B$ , Тл	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$q_c$ , Вар/кг	2,25	2,75	3,5	4,6	6,5	10,0	15,7	25,8	43,5

3.1.7. Струм холостого ходу, виражений у відсотках від номінального, дорівнює

$$I_{0\%} = \sqrt{(I_{0a\%})^2 + (I_{0p\%})^2}. \quad (3.8)$$

3.1.8. Номінальне значення струму первинної обмотки визначається за співвідношенням

$$I_1 = \frac{S_{EM}}{U_1 \eta_{TP} \cos \varphi_1}. \quad (3.9)$$



Коефіцієнт потужності може бути прийнятий  $\cos \varphi_1 = 0,9 \dots 0,95$  при частоті 50 Гц і  $\cos \varphi_1 = 0,85 \dots 0,96$  при частоті 400 Гц (чим більша потужність трансформатора, тим більший  $\cos \varphi_1$ ). Такі значення  $\cos \varphi_1$  пояснюються тим, що в трансформаторах малої потужності він залежить, в основному, від величини струму холостого ходу.

3.1.9. Вираз для абсолютного значення струму холостого ходу має наступний вигляд

$$I_0 = (I_{0\%}/100\%) \cdot I_1. \quad (3.10)$$

Струм холостого ходу в трансформаторах малої потужності лежить в межах 25...40% від номінального струму при частоті 50 Гц і 10...30% – при частоті 400 Гц.

Якщо винайдений струм знаходиться вище верхньої можливої межі, то слід зменшити магнітну індукцію. Якщо ж струм виходить за нижні вказані межі, індукцію слід підвищити і знову здійснити розрахунок.

## 3.2. РОЗРАХУНОК ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

3.2.1. Попереднє визначення поперечних перерізів проводів обмоток трансформатора можна виконувати за наступними співвідношеннями

$$q'_1 = I_1/\Delta; \quad q'_2 = I_2/\Delta, \text{ мм}^2. \quad (3.11)$$

Від величини вибраної щільності струму  $\Delta$  в обмотках, залежить переріз їх проводів, температура перенагрівання, а також вартість матеріалу. У такому разі необхідно забезпечення певного теплового режиму трансформатора, тобто припустимого перегріву обмоток відносно навколишнього середовища. При відомій температурі середовища перенагрівання обумовлює робочу температуру ізоляції котушок трансформатора, яка визначає термін його роботи, тому що МП трансформаторів малої потужності, особливо стрічкових, можуть витримувати значно більш високі температури, ніж котушки.

Існує правило, згідно з яким підвищення температури ізоляції класу А на кожні  $8^{\circ}\text{C}$  (а теплостійкої ізоляції – на кожні  $12^{\circ}\text{C}$ ), скорочує термін її служби у два рази. Даний факт підтверджує неприпустимість зайвого перенагрівання котушок трансформаторів.

Припустимі перенагрівання котушок знаходяться в межах  $35^{\circ}\text{C} \dots 65^{\circ}\text{C}$ , а для теплостійких ізоляційних матеріалів –  $80^{\circ}\text{C} \dots 100^{\circ}\text{C}$  і вище.

Рекомендовані значення щільності струму, при яких забезпечується температура перенагрівання до  $50^{\circ}\text{C}$ , вказані на рис.3.2,б.

Остаточна щільність струму в обмотках може бути визначена після повного конструктивного і теплового розрахунку трансформатора.

3.2.2. Вибір найближчого стандартного перерізу проводів  $q_1, q_2$  та їх марки виконується за довідником [9].

При напрузі на обмотках до 500 В слід вибрати провід марки ПЕЛ або ПЕВ-1, при струмах в обмотках до 5 А – провід марки ПЕЛБО або ПБД при струмах більше 5 А. При напрузі обмотки більш 500 В слід вибрати провід марки ПЕВ-2.

Після вибору проводів обмоток трансформатора, слід занотувати наступні дані: поперечні перерізи проводів  $q_1, q_2$  ( $\text{мм}^2$ ); діаметри проводів з ізоляцією  $d_1, d_2$  (мм) та без неї  $d'_1, d'_2$  (мм); вагу одного метра проводу  $g_1, g_2$  (г).

3.2.3. Дійсна щільність струму в обмотках

$$\Delta_1 = I_1/q_1; \Delta_2 = I_2/q_2. \quad (3.12)$$

Середня щільність струму для двухобмоточного трансформатора визначається як  $\Delta = \sqrt{\Delta_1 \cdot \Delta_2}$ .

3.2.4. Кількість витків в обмотках ТР визначається із співвідношень

$$W_1 = \frac{E_1 \cdot 10^4}{4,44 fBS_{CA}}; W_2 = \frac{E_2 \cdot 10^4}{4,44 fBS_{CA}}, \quad (3.13)$$

де  $S_{CA}$  ( $\text{см}^2$ ) – активний переріз магнітопроводу (табл.Д.4, Д.5, Д.6);  $E_1, E_2$  – ЕРС обмоток при холостому ході, тобто  $E_1 = U_{10}$ ;  $E_2 = U_{20}$ .

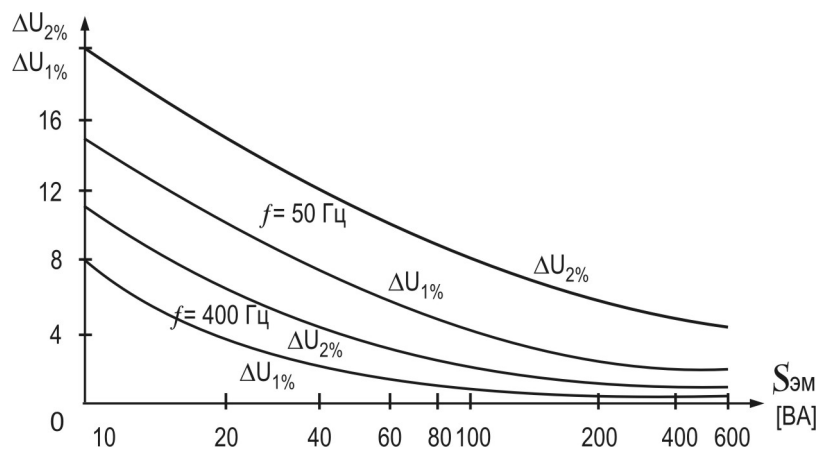
При роботі навантаженого трансформатора для визначення кількості витків, треба розрахувати ЕРС з урахуванням падіння напруги на обмотках.

$$\begin{aligned} E_1 &= U_1(1 + \Delta U_{1\%}/100); \\ E_2 &= U_2(1 + \Delta U_{2\%}/100), \end{aligned} \quad (3.14)$$

де  $\Delta U_{1\%}$ ,  $\Delta U_{2\%}$  – відсоткове падіння напруги у первинній і вторинній обмотках.

Орієнтовні значення  $\Delta U_{1\%}$  і  $\Delta U_{2\%}$  у залежності від потужності трансформаторів броньового типу з напругою обмоток до 1000 В і температурою перенагрівання до  $50^{\circ}\text{C}$  наведені на рис.3.4.

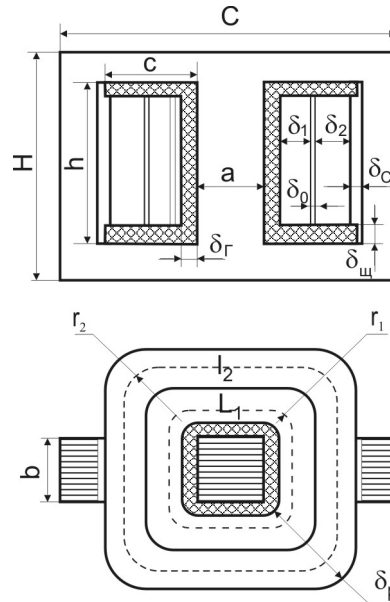
Виходячи з того, що обмотки стрижневих трансформаторів мають менш активні і реактивні опори ніж у броньових, то при їх розрахунку значення  $\Delta U_{1\%}$  і  $\Delta U_{2\%}$  слід зменшити на 20-30% порівняно із наведеними на рис.3.4.



**Рис.3.4. Графіки для визначення падіння напруги на обмотках  $\Delta U_{1\%}$  і  $\Delta U_{2\%}$**

3.2.5. Після визначення перерізу проводів і кількості витків обмоток слід провести *конструктивний розрахунок обмоток*.

Основні конструктивні розміри обмоток наведені на прикладі броньового набірною трансформатора (рис.3.5). Аналогічні креслення можуть бути розроблені і для інших типів трансформаторів із використанням рис.3.1.



**Рис.3.5. Конструктивні розміри котушки і обмоток броньового трансформатора**

Для конструктивного розрахунку обмоток трансформатора необхідно вибрати матеріал каркаса, міжвиткову і міжобмоточну ізоляцію, а також ізоляцію обмотки.

Висоту обмотки та число витків у кожному її шарі можна визначити за співвідношеннями

$$\begin{aligned}
 h_{обм} &= h - 2\delta_{щ} - (1...2), \text{ мм}; \\
 N_i &= [h_{обм} / (K_v d_i)] - 1, \quad i = 1, 2,
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

де  $d_i$  – діаметр проводу з ізоляцією (мм);  $K_v = 1,1...1,15$  – коефіцієнт, який враховує щільність намотування обмотки.

Число витків в одному шарі обмотки слід округлювати до найближчого меншого цілого числа.

Число шарів кожної обмотки для броньової і стрижневої конструкції відповідно дорівнює

$$M_i = W_i / N_i; \quad M_i = W_i / 2N_i.
 \tag{3.16}$$

Товщину кожної обмотки  $\delta_i = 1,2M_i d_i$ , де коефіцієнт 1,2 враховує міжшарові ізоляції і розбухання обмоток при намотуванні та просочуванні.

Радіальний розмір всіх обмоток із врахуванням міжшарових та міжобмоточних ізоляцій  $\delta_p = \delta_1 + \delta_2 + (n-1) \cdot \delta_0$ , де  $n$  – число обмоток;  $\delta_0 \cong 0,2...0,3$  мм при напрузі обмоток до 1000 В.

Вільний проміжок між обмоткою і магнітопроводом (рис.3.5) для броньової конструкції дорівнює  $\delta_c = c - \delta_{3A3} - \delta_\Gamma - \delta_p$ , а для стрижневої  $\delta_c = c - 2(\delta_{3A3} + \delta_\Gamma + \delta_p)$ , де  $c$  – ширина вікна МП;  $\delta_{3A3} = 0,5...1,0$  мм – щілина між каркасом і магнітопроводом трансформатора.

Розраховане значення  $\delta_c$  повинно бути не менш ніж 1...4 мм (якщо така умова не виконується, то потрібно вибрати інший МП з більшим  $c$ , або збільшити індукцію  $B$  чи щільність струму  $\Delta$ ; якщо  $\delta_c$  є більшим за 5...8 мм, то розрахунок необхідно виконати знову).

### 3.2.6. Визначення сумарних втрат у проводах обмоток.

Вага міді кожної обмотки

$$G_{Mi} = W_i g_i l_i 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (3.17)$$

де  $g_i$  – вага одного метру проводу (г);  $l_i$  – середня довжина витка обмотки (м).

$$l_i = 2(a + b + \pi r_i) \cdot 10^{-3}, \text{ м (для рис. 3.5)} \quad (3.18)$$

$$r_i = \delta_{3A3} + \delta_\Gamma + (i-1)\delta_0 - \delta_i/2 + \sum_1^i \delta_i, \text{ мм.} \quad (3.19)$$

Вага міді обох обмоток

$$G_{M0} = G_{M1} + G_{M2} \quad (3.20)$$

Втрати в міді кожної обмотки при температурі проводу  $100^0\text{C}...105^0\text{C}$

$$P_M = 2,7\Delta_i^2 G_{Mi}, \text{ Вт ; } i = 1,2. \quad (3.21)$$

Сумарні втрати у всіх обмотках

$$P_{M0} = P_{M1} + P_{M2}. \quad (3.22)$$

### 3.2.7. ККД трансформатора

$$\eta_{mp} = P_2 / (P_2 + P_{CT} + P_{M0}). \quad (3.23)$$

3.2.8. Активний опір кожної обмотки і повний активний опір обмоток трансформатора, зведених до первинної відповідно дорівнюють

$$r_i = C_M \frac{l_i W_i}{q_i}, \text{ Ом, } (i = 1, 2); \quad (3.24)$$

$$r_K = r_1 + r_2' = r_1 + r_2 (W_1/W_2)^2, \quad (3.25)$$

де  $C_M$  – питомий опір міді при  $t = 105^\circ \text{C}$  ( $C_M = 2,35 \cdot 10^{-2}$  Ом·мм<sup>2</sup>/м);  $r_2'$  – приведений опір вторинної.

3.2.9. Для подальших перевірочних розрахунків випрямляча ДВЖ необхідно також винайти повний активний опір обмоток трансформатора, зведених до вторинної

$$r_{mp} = r_1 + r_2 (W_2/W_1)^2. \quad (3.26)$$

### 3.2.10. Активна складова напруги короткого замикання

$$u_{A\%} = \left( \frac{I_1 \cdot r_K}{U_1} \right) \cdot 10^2, \%. \quad (3.27)$$

### Реактивна складова напруги короткого замикання

$$u_{P\%} = \frac{180 I_w l \delta'}{\nu B S_{CA} h_{обм}} \cdot 10^2, \%, \quad (3.28)$$

де  $I_w$  – середні ампер-витки;  $\nu$  – кількість стрижнів, які несуть обмотки (броньовий  $\nu = 1$ , стрижневий  $\nu = 2$ );  $\delta'$  – розрахункова щілина для потоку розсіювання (мм);  $l$  – середня довжина витка всіх обмоток (м); значення  $S_{CA}$  обирається із довідника (мм<sup>2</sup>).

$$I_W = \sqrt{\left(\frac{I_1 W_1 + I_2 W_2}{2}\right)^2 + (I_0 W_1)^2} . \quad (3.29)$$

$$l = (l_1 + l_2) / 2, \quad (3.30)$$

$l_1, l_2$  – визначаються з п.3.18.

$$\delta' = \delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3}. \quad (3.31)$$

Напряга короткого замикання

$$u_K = \sqrt{U_{A\%}^2 + U_{P\%}^2}, \%. \quad (3.32)$$

3.2.11. Зміна вторинної напруги при зміні навантаження від 0 до номінального

$$\Delta u = \Delta u_1 + \Delta u_2 = u_{A\%} \cos \varphi_2 + U_{P\%} \sin \varphi_2, \% \quad (3.33)$$

Розраховані суми треба порівняти і при необхідності уточнити число витків обмоток трансформатора.

3.2.12. Температура перегрівання обмоток відносно навколишнього середовища дорівнює

$$\Delta T \approx \frac{(P_{CT} + P_{M0})}{(\alpha_T S_{ОХОЛ} 10^4)}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.34)$$

де  $\alpha_T$  – коефіцієнт тепловіддачі трансформатора.

$$\alpha_T = (1,1 \dots 1,3) \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (3.35)$$

$S_{ОХОЛ}$  – загальна поверхня охолодження ( $\text{м}^2$ ).

$$S_{ОХОЛ} = S_K + S_{ОСЕРЕД}. \quad (3.36)$$

Для броньової конструкції (табл.Д.4, Д.5)

$$S_K \approx 2h_{ОБМ} (a + \pi(c - 4)) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2; \quad (3.37)$$

$$S_{ОСЕРЕД} = 2((C + H)b + (C + h)a + hb) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2. \quad (3.38)$$

Для стрижневої конструкції (табл.Д.6)

$$S_K = 2h_{\text{ОБМ}} \left( 2a + b + \frac{2\pi}{(c/2 - 2)} \right) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2; \quad (3.39)$$

$$S_{\text{ОСЕРЕД}} = 2(2Ca + b(C + 2a)) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

Робоча температура проводів обмоток

$$\Delta T_{\text{РОБ}} = \Delta T \pm T_{\text{НАВК.СЕР.}}, \quad (3.40)$$

де  $T_{\text{НАВК.СЕР.}} = 40 \dots 60^\circ\text{C}$  – температура всередині апаратури, де встановлюється трансформатор.

У результаті розрахунку трансформатора для ДВЖ малої потужності складається креслення перерізу трансформатора (магнітопроводу з обмотками) в зручному масштабі із зазначенням отриманих розмірів конструкції.

На полі креслення в таблицю повинні бути зведені основні задані і спроектовані параметри:

Таблиця 3.7

**Розрахункові параметри трансформатора**

Потужність трансформатора	$S_{\text{ЕМ}}, \text{ ВА}$
Частота мережі живлення	$F, \text{ Гц}$
Напруга первинної обмотки трансформатора	$U_1, \text{ В}$
Напруга вторинної обмотки трансформатора	$U_2, \text{ В}$
Активна потужність вторинного кола	$P_2, \text{ Вт}$
Втрати в сталі МП	$P_{\text{СТ}}, \text{ Вт}$
Втрати в міді обмоток	$P_{\text{МО}}, \text{ Вт}$
ККД при номінальному навантаженні	$\eta_{\text{ТР}}, \%$
Струм холостого ходу	$I_0, \text{ А}$
Напруга короткого замикання	$u_K, \%$
Температура перенагрівання обмоток	$\Delta T, ^\circ\text{C}$