

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

КУРСОВА РОБОТА

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та
електротехнологічні комплекси»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»,*

Укладачі: В. О.Бржезицький, Я. О. Гаран

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент

Пушкар М. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Відповідальний
редактор

Проценко О. Р., кандидат технічних наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 26.05.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 9 від 17.05.2022 р.)*

Курсова робота з дисципліни «Електричні апарати» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» призначена для поглибленого засвоєння студентами практичних навичок розрахунку параметрів електричних апаратів на основі теоретичних знань, одержаних в лекційному курсі вивчення дисципліни «Електричні апарати». Курсова робота розрахована на самостійне виконання студентами з консультацією викладачів кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Реєстр. № НП 21/22-463. Обсяг 2,3 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ	5
1.1. Призначення, класифікація, основні параметри	5
1.2. Векторна діаграма трансформатора струму	9
1.3. Способи зниження похибок трансформаторів струму	13
2. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ ТИПУ ТФУМ.....	15
2.1. Розрахунок паперово-масляної ізоляції конденсаторного типу ...	22
2.2. Розрахунок радіальних та аксіальних напруженостей електричного поля	25
2.3. Розрахунок класу точності трансформатора струму	29
2.4. Розрахунок стійкості трансформатора струму до теплового пробою	40
2.5. Розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки .	48
2.6. Розрахунок динамічної стійкості трансформатора струму.....	50
Додаток 1	52
Додаток2.....	54
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

ВСТУП

Навчальним планом здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси») передбачено виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні апарати», яка присвячена розрахунку характеристик високовольтного трансформатора струму на основі теоретичних знань, отриманих протягом лекційного курсу даної дисципліни та пов'язана з дослідженням функціонування окремих вузлів типового високовольтного трансформатора струму типу ТФУМ та режимів його роботи, визначенням гранично допустимих умов роботи даного електричного апарата за допомогою програмування на персональних комп'ютерах.

Мета виконання курсової роботи – закріплення основних теоретичних положень, одержаних в лекційному курсі з даної дисципліни, ознайомлення студентів з будовою трансформатора струму типу ТФУМ, одержання студентами практичних навичок програмування розрахунку параметрів вузлів трансформатора струму, у відповідності до вимог його експлуатації, визначення відповідності вимогам експлуатації граничних режимів його роботи, набуття практичного досвіду визначення факторів, що впливають на роботу високовольтного трансформатора струму.

Курсова робота складається з 2 розділів: теоретичних відомостей про трансформатори струму та методики розрахунку його параметрів, кожен з яких містить інформацію, необхідну для підготовки до виконання курсової роботи, виконання необхідних розрахунків, визначення методів, які будуть застосовані студентом для визначення тих чи інших характеристик проектного трансформатора струму.

1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ

1.1. Призначення, класифікація, основні параметри

Трансформатором струму (ТС) називають інформаційний пристрій, призначений для масштабного перетворення (зменшення) первинного струму до величини, прийнятної для її вимірювання, а також ізоляції вимірювального контуру від високого потенціалу первинного.

При будь-якому значенні номінального первинного струму $I_{I_{ном}}$ вторинний $I_{2ном}$ дорівнює 5А або 1А. Первинну обмотку ТС під'єднують послідовно в розсічку струмопроводу, а вторинну замикають на вимірювальні прилади: амперметри, струмові обмотки лічильників, ватметрів чи обмотки струмових реле.

Нормальний режим роботи трансформатора струму близький до режиму короткого замикання. Режим холостого ходу є для ТС аварійним. У цьому режимі при $I_2 = 0$ первинні ампер-витки створюють у магнітопроводі трапецеїдальної форми (у часі) магнітний потік, а на розімкнутих кінцях вторинної обмотки виникає ЕРС:

$$E_2 = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

у вигляді коротких високовольтних імпульсів змінної полярності.

Основними параметрами і характеристиками ТС згідно з ДСТУ ІЕС 60044-1:2008 «Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Трансформатори струму» є:

- *найвища напруга обладнання* – найвища міжфазна напруга, на середньоквадратичне значення якої розраховано ізоляцію трансформатора;
- *найвища напруга електричної мережі* – найвище значення робочої напруги, яка існує за нормальних робочих умов у будь-який час і в будь-якій точці мережі;
- *номінальна первинна сила струму* – значення первинної сили струму, що визначає характеристики трансформатора;

– *номінальна вторинна сила струму* – значення вторинної сили струму, що визначає характеристики трансформатора. Стандартними значеннями номінальної вторинної сили струму є 1, 2 і 5 А, але переважним значенням є 5 А.

Вторинне навантаження $Z_{2ном}$ відповідає повному опору його зовнішнього вторинного кола, вираженому в омах, з зазначенням коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 0,8$. Вторинне навантаження можна також характеризувати повною потужністю у вольт-амперах, спожитої ним при заданому коефіцієнті потужності і номінальному вторинному струмі. У цьому випадку $Z_{2ном} = S_{2ном}/I_{2ном}^2$. Номінальний коефіцієнт трансформації $n_H = I_{1ном}/I_{2ном}$.

Стійкість ТС до механічних і теплових впливів характеризують струмами електродинамічної і термічної стійкості I_D та I_{ft} . Струм електродинамічної стійкості I_D дорівнює найбільшій амплітуді струму короткого замикання за нормований час його протікання, яку ТС витримує без ушкоджень, що перешкоджають його справній подальшій роботі. Електродинамічну стійкість часто характеризують кратністю, що дорівнює $K_D = I_D/I_{1ном}$.

Струм термічної стійкості дорівнює найбільшому діючому значенню струму короткого замикання, який витримує ТС протягом часу t_T , без нагрівання струмопровідних частин до температур, що перевищують припустимі при струмах короткого замикання. Температура струмопровідних частин ТС при проходженні струму термічної стійкості не повинна перевищувати 200 °С для струмопровідних частин з алюмінію і 250 °С для струмопровідних частин з міді, що контактують з трансформаторним маслом. Для трансформаторів струму класу 330 кВ $t_T = 1$ с; для трансформаторів струму класів напруги 110...220 кВ $t_T = 3$ с.

Між струмами електродинамічної і термічної стійкості існують співвідношення: для ТС класу 330 кВ $I_d \geq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1T}$; для ТС класів 110...220 кВ $I_d \geq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3T}$.

У табл. 1 показано позначення вивідних кінців первинних і вторинних обмоток. При напрямку струму в первинній обмотці від L_1 до L_2 чи L_1 до K_1 ; H_2 до K_2 ; H_i до K_i , якщо первинна обмотка складається з декількох секцій, вторинний струм пройде по зовнішньому ланцюгу від I_1 до I_2 .

Таблица 1

Позначення вивідних кінців первинних і вторинних обмоток		
w_1	З однієї секції $L_1 \text{ — } L_2$	З декількох секцій $L_1 \text{ — } K_1$ $H_2 \text{ — } K_2$ $H_i \text{ — } L_i$
w_2	Без відгалужень $I_1 \text{ — } I_2$	З відгалуженнями $I_1 \text{ — } I_2 \text{ — } I_3$

ТС з трансформаторним маслом повинен мати маслорозширювач з показником рівня масла. У ТС класів від 330 кВ передбачають захист масла від зволоження (силікагелеві фільтри, сильфони). Якщо маса ТС перевищує 50 кг, то передбачають засоби його підйому. Якщо в режимі холостого ходу напруга на розімкнутих кінцях вторинної обмотки перевищує 350 В, то передбачають напис: **«Увага! Небезпечно! На вторинній обмотці висока напруга»**.

Усі ТС можна класифікувати за такими ознаками:

За місцем установлення: ТС, що працюють на відкритому повітрі чи в закритих приміщеннях; ТС, вбудовані у внутрішні порожнини електроустановки.

За способом установлення: прохідні ТС і опорні ТС.

За кількістю ступенів трансформації: одноступінчасті і каскадні.

За виконанням первинної обмотки: одновиткові і багатовиткові.

До 2019 року, поки діяв ДСТУ ІЕС 60044-1:2008 «Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Трансформатори струму», розрахунки параметрів трансформаторів струму виконувались на підставі цього стандарту та базовим параметром в такому розрахунку був клас напруги електромережі, в якій планувалось застосовувати даний ТС. Після прийняття на заміну цього нового стандарту ДСТУ EN 61869-2:2017 «Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Додаткові вимоги до трансформаторів струму», розрахунки параметрів трансформаторів струму визначаються найбільшою робочою напругою електромережі, яка допустима за нормальних режимів роботи ТС. Дане значення U_m є базовим для визначення всіх інших параметрів, які стосуються високовольтної ізоляції ТС, на основі даних стандарту ДСТУ EN 61869-1:2017 «Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Загальні вимоги». Інформація з відповідної таблиці ДСТУ EN 61869-1:2017 наведена в табл. 2.

Таблиця 2.

Значення напруг для розрахунку високовольтної ізоляції ТС

Найбільша робоча напруга обладнання U_m , (середньоквадратичне значення), кВ	Номінальна витримувана напруга промислової частоти (середньоквадратичне значення), кВ	Номінальна витримувана напруга повного грозового імпульсу (пікове значення), кВ
123	185	450
	230	550
145	230	550
	275	650
170	275	650
	325	750
245	395	950
	460	1050
300	395	950
	460	1050
362	460	1050
	510	1175

Найбільші робочі фазні напруги для обладнання визначаються як

$$U_{\text{н.р.ф.}} = \frac{U_m}{\sqrt{3}}.$$

1.2. Векторна діаграма трансформатора струму

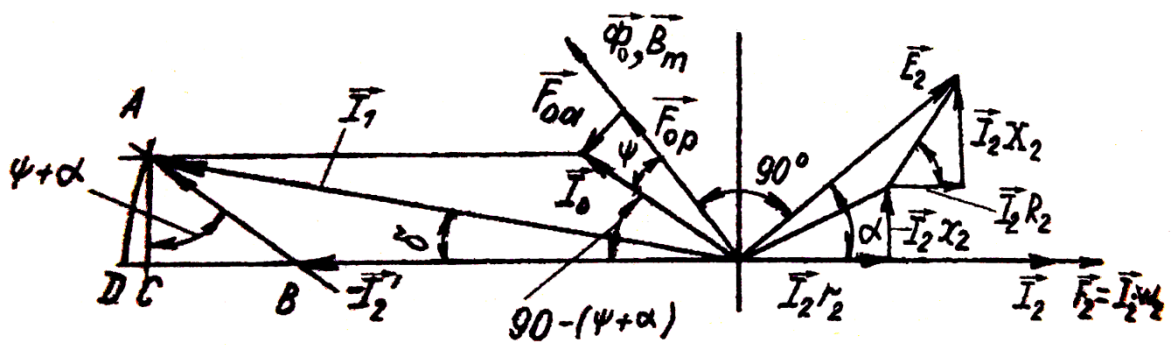
За допомогою векторної діаграми визначають при заданих величині і розміщенні на площині вектора вторинного струму розташування вектора струму, що проходить по первинній обмотці трансформатора. Після чого за отриманою картиною взаємного розташування струмів $\overline{I}_1$ та $\overline{I}_2$, визначають струмову і кутову похибки ТС.

Побудова векторної діаграми можлива, якщо всі параметри і характеристики ТС задані, а саме: струми; опори навантаження R_2 і X_2 та вторинної обмотки r_2 і x_2 ; кількість витків w_1 і w_2 ; марка сталі, площа перерізу q_n і довжина середньої лінії магнітопроводу l_c .

Раніше був прийнятий такий порядок побудови діаграми. Вздовж горизонтальної осі відкладали в різних масштабах вектори $\overline{I}_1$ і $\overline{I}_2 \cdot w_2$. У масштабі напруги будували трикутники спаду напруги на опорі навантаження і на внутрішньому опорі вторинної обмотки. Визначали ЕРС $E_2 = I_2 \cdot \sqrt{(R_2 + r_2)^2 + (X_2 + x_2)^2}$, після чого, користуючись виразом $E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B_m \cdot q_n$, знаходили амплітудне значення індукції $\overline{B}_m$ вектор якої на 90° випереджає вектор $\overline{E}_2$. Для обраної марки сталі, користуючись графіком залежності від $\overline{B}_m$ кута втрат ψ і питомих ампер-витків H , визначали повну намагнічувальну силу $\overline{I}_1 \cdot w_1 = \overline{H} \cdot l_c$, яка випереджає вектор $\overline{B}_m$ на кут ψ .

Положення шуканого вектора $\overline{I}_1$ – струму, що проходить по первинній обмотці, – визначали у вигляді суми $\overline{I}_1 = -\overline{I}_2' + \overline{I}_0$, де $\overline{I}_2' = \overline{I}_2 \cdot \frac{w_2}{w_1}$.

Побудована таким чином векторна діаграма ТС мала вигляд, представлений на рис. 1.



Отриманий у результаті побудови за наведеною методикою вираз $\overline{I}_1 = -\overline{I}_2' + \overline{I}_0$, не підтверджують дані експериментів, відповідно до яких $\overline{I}_1 = \overline{I}_2' + \overline{I}_0$. Отже, користуючись класичною векторною діаграмою при виводі формули струмової похибки, необхідно враховувати абсолютне значення струму $\overline{I}_2$.

На рис. 2 напрямок струму $\overline{I}_1$ у первинній обмотці ТС показано, згідно з табл.1, від L_1 до L_2 . Напрямки струмів $\overline{I}_1$ і намагнічування $\overline{I}_0$, які практично збігаються, однозначно визначають напрямок магнітного потоку $\overline{\Phi}$ у сталі магнітопроводу. Напрямки намотування первинної і вторинної обмоток однакові. Отже, в обох обмотках виникають однаково спрямовані проти-ЕРС $\overline{E}_1 = \overline{E}_2$. Напрямок струму $\overline{I}_2$ визначають за правилом Ленца (магніторушійна сила $\overline{I}_2 \cdot w_2$ створює потік $\overline{\Phi}_2$, спрямований назустріч потоку $\overline{\Phi}_1$, так що результуючий потік $\overline{\Phi} = \overline{\Phi}_1 - \overline{\Phi}_2$).

$$\bar{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_2) + \bar{I}_2 \cdot (r_2 + j \cdot x_2) = -\bar{E}_2, \quad (1)$$

складеної відповідно до другого закону Кірхгофа для вторинного контуру ТС, де R_2 і X_2 – параметри навантаження; r_2 і x_2 – параметри вторинної обмотки.

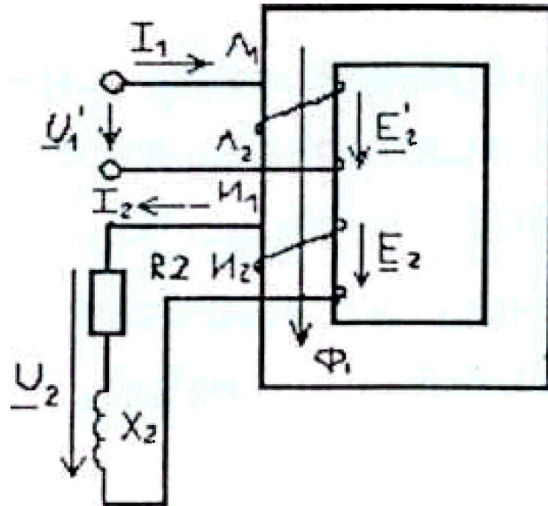


Рисунок 2 – Визначення напрямків струмів і напруг

Побудову альтернативної векторної діаграми проводять у такій послідовності. Вздовж горизонтальної осі вправо від точки 0 відкладають напрямок досі невідомих за величиною значень потоку намагнічування $\bar{\Phi}$ й індукції $\bar{B}_m$. ЕРС $\bar{E}_2 = -w_2 \cdot \frac{d\bar{\Phi}}{dt}$ відстає від потоку $\bar{\Phi}$ на 90° . Проводять вектори $\bar{E}_2$ і $-\bar{E}_2$. Визначають кут α , на який вектор $\bar{I}_2$ відстає від вектора $\bar{E}_2$:

$$\alpha = \arctg \frac{X_2 + x_2}{R_2 + r_2}.$$

На отриманому напрямку струму $\bar{I}_2$ відкладають вектори $\bar{I}_2$; $\bar{I}_2 \cdot w_2$ і $\bar{I}_2 \cdot R_2$. Перпендикулярно з кінця вектору $\bar{I}_2 \cdot R_2$ відкладають $\bar{I}_2 \cdot X_2$, з кінця якого паралельно вектору $\bar{I}_2$ проводять вектор $\bar{I}_2 \cdot r_2$, після чого за допомогою вектору $\bar{I}_2 \cdot x_2$ реалізують вираз (1) і визначають величину $-\bar{E}_2$.

Визначають значення індукції:

$$B_m = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot q_{\Pi}}.$$

$$\overline{\mathbf{I}}_1 \cdot \mathbf{w}_1 = \overline{\mathbf{I}}_2 \cdot \mathbf{w}_2 + \overline{\mathbf{I}}_0 \cdot \mathbf{w}_1, \quad (2)$$

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_2' + \overline{I}_0. \quad (3)$$

Для ідеального ТС $\bar{I}_1 \cdot w_1 = \bar{I}_2 \cdot w_2$. У реального ТС $I_1 \cdot w_1 > I_2 \cdot w_2$.

$$f_1 = \frac{\frac{w_2}{w_1} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100. \quad (4)$$

З огляду на те, що кут δ малий, з векторної діаграми випливає, що струмова похибка пропорційна відрізку AB , а кутова похибка – відрізку BC .

Якщо з точки О провести перпендикуляр до вектора $\overline{OA}$, то по відношенню до вектора $\overline{\Phi}$ перпендикуляр пройде під кутом α , а по відношенню до вектора $\overline{I_0}$ – під кутом $\psi + \alpha$.

З векторної діаграми випливає, що в трикутнику ABC кут при вершині С також дорівнює $\psi + \alpha$. Отже, $AB = I_0 \cdot w_1 \cdot \sin(\psi + \alpha)$; $BC = I_0 \cdot w_1 \cdot \cos(\psi + \alpha)$.

Вираз (4) набуває вигляду:

$$f_1 = -\frac{I_0 \cdot w_1}{I_1 \cdot w_1} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Кутова похибка, в кутових хвилинах, визначається виразом:

$$\delta = \frac{I_0 \cdot w_1}{I_1 \cdot w_1} \cdot \cos(\psi + \alpha) \cdot 3438. \quad (6)$$

1.3. Способи зниження похибок трансформаторів струму

З отриманих виразів випливає пряма залежність похибок від струму намагнічування. Струм $\overline{I_0}$ зв'язаний з напруженістю магнітного поля H законом повного струму $\overline{I_0} \cdot w_1 = \overline{H} \cdot l_c$, де l_c – середня довжина магнітопроводу.

Довжину магнітопроводу зменшують завдяки використанню матеріалів з поліпшеними ізоляційними властивостями: елегазу, епоксидних смол, паперово-масляної ізоляції конденсаторного типу.

Потік $\Phi_m = B_m \cdot q_{\text{п}}$, визначає вторинну ЕРС $E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m$. Із зростанням потоку збільшується напруженість $\overline{H}$ і МРС $\overline{I_0} \cdot w_1$.

Згідно з (1) ЕРС $\overline{E_2}$ залежить від опорів навантаження і вторинної обмотки. Для зниження похибок (зниження E_2) вторинну обмотку необхідно виготовити з рафінованого мідного проводу і намагатись зменшувати індуктивність розсіювання x_2 вторинної обмотки. Варто пам'ятати, що індуктивність x_2 можна вважати рівною нулю у разі рівномірного розміщення вторинної обмотки на тороїдальному магнітопроводі.

Для зниження питомих ампер-витків намагнічування бажано використовувати кращі марки сталі і суворо дотримуватися технології її обробки: знаття задилок, лакування, відпал.

Зниження похибок досягають шляхом збільшення поперечного перерізу сталі. Однак струмова похибка зменшується повільніше, ніж збільшується переріз, оскільки із зростанням q_n збільшується довжина проводу й опір вторинної обмотки.

Зниженню похибок сприяє збільшення первинної намагнічувальної сили $I_1 \cdot w_1$ за рахунок збільшення кількості витків первинної обмотки. З економічної точки зору це доцільно для ТС внутрішнього устанавлення при $I_{1н} < 400$ А і ТС зовнішнього устанавлення при $I_{1н} < 1000$ А.

Найбільш розповсюдженим способом зниження струмової похибки є виткова корекція, за якою відмотують частину витків вторинної обмотки.

З аналізу векторної діаграми випливає, що вимірюваний первинний струм $I_2 \cdot w_2 / w_1$ менший за дійсний I_1 . Відмотування частини внутрішніх витків вторинної обмотки приводить до зростання струму I_2 . Коефіцієнт трансформації беруть незалежно від кількості витків w_2 рівним $n = I_{1н} / I_{2н}$.

Тоді формула (4) набуває вигляду:

$$f_1 = -\frac{I_0 \cdot w_1}{I_1 \cdot w_1} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100 + \frac{\Delta w_2}{w_2} \cdot 100, \quad (7)$$

де $\frac{100}{w_2}$ – ціна в одиницях похибки одного відмотаного витка.

На рис. 4 показано залежність похибок f_1 і δ від кратності первинного струму.

Зростання похибок при великих кратностях первинного струму відбувається завдяки насиченню сталі.

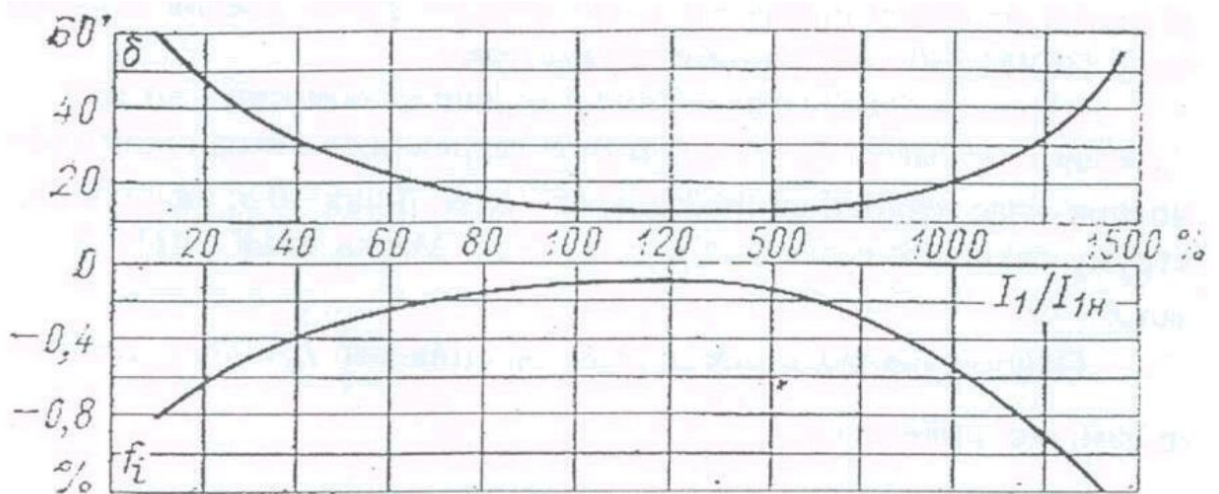


Рисунок 4 – Залежності $\delta (I_1 / I_{1N})$ і $f_1 (I_1 / I_{1N})$.

2. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ ТИПУ ТФУМ

Абревіатура маркування (тип трансформатора) ТФУМ розшифровується наступним чином: трансформатор струму («**Т**» – **т**ока) з порцеляноюю покриттю («**Ф**» – **ф**арфоровий) з **У**-подібною формою первинної обмотки та **м**аслонаповнений. Трансформатор складається з активної частини, яка знаходиться всередині порцелянової покритті, герметично з'єднаної з металевим баком внизу ТС (активна частина занурена в трансформаторне масло) та маслорозширювачем і високовольтними відводами зверху конструкції ТС. Переріз будови ТС показано на рис. 5.

Порцелянова покриття ТС типу ТФУМ є гладкою всередині та має ребрення ззовні. Мінімальну висоту покритті **H** (найменша відстань між баком та маслорозширювачем, мм) визначають з виразу $H = 0,16 \cdot U_{\text{сух.}}^{1,49}$, де $U_{\text{сух.}}$ – сухорозрядна напруга, яка відповідає найбільшій робочій напрузі обладнання U_m . Для $U_m = 123$ кВ $U_{\text{сух.}} = 280$ кВ; для $U_m = 245$ кВ $U_{\text{сух.}} = 465$ кВ; для $U_m = 362$ кВ $U_{\text{сух.}} = 670$ кВ. Для всіх інших проміжних значень найбільших робочих напруг значення сухорозрядної напруги обирають методом лінійної інтерполяції.

Розрядна відстань між кінцями зовнішньої та внутрішньої обкладинок паперово-масляної ізоляції конденсаторного типу (ПМКІ) визначається як $h = 0,75 \cdot H$.

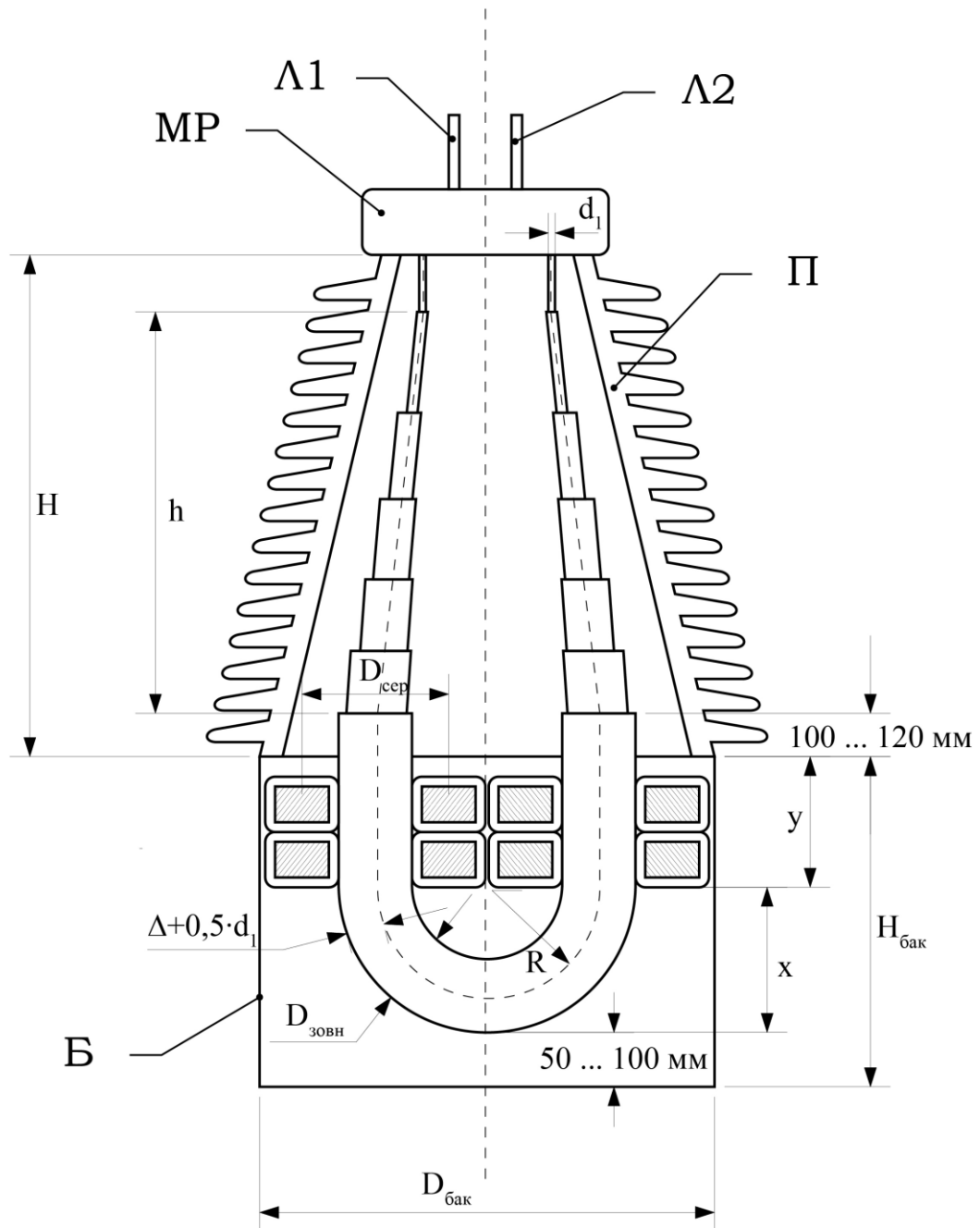


Рисунок 5 – Переріз внутрішньої будови трансформатора струму типу ТФУМ: Б – сталевий бак; П – порцелянова покриття; МР – маслорозширювач; Л1, Л2 – лінійні відводи.

На рис. 5 позначені $D_{\text{бак}}$ – діаметр баку ТС; $H_{\text{бак}}$ – висота баку ТС; $D_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр паперово-масляної конденсаторної ізоляції (ПМКІ); Δ –

товщина ПМКІ; R – внутрішній радіус заокруглення проводів первинної обмотки; d_1 – внутрішній діаметр ПМКІ (зовнішній діаметр пакету провідників первинної обмотки); $D_{\text{сер}}$ – середній діаметр магнітопроводу; H – висота покритишки ТС; h – відстань між крайніми обкладинками ПМКІ.

Первинна обмотка трансформаторів типу ТФУМ виконується з 4 паралельних провідників, від способу з'єднання яких отримують первинну обмотку, що складається з 1, 2 або 4 витків і, відповідно, три можливі значення номінального первинного струму. Так само, кожен з витків первинної обмотки проходить крізь 4 магнітопроводи з вторинними обмотками – в залежності від з'єднання відводів цих вторинних обмоток отримують необхідні значення номінальних вторинних струмів.

Бак ТС виконується зі сталі і герметично з'єднується з порцеляною покритишкою за допомогою гумового ущільнювача. Типові внутрішні діаметри баку для ТС, розрахованих на різні значення U_m , складають: для $U_m = 123$ кВ $D_{\text{бак}} = 400$ мм; для $U_m = 245$ кВ $D_{\text{бак}} = 500$ мм; для $U_m = 362$ кВ $D_{\text{бак}} = 600$ мм. Висота баку для цих значень U_m складає 450 мм, 600 мм та 740 мм, відповідно. Діаметр та висоту баку для інших значень U_m визначають методом лінійної інтерполяції. Внутрішній діаметр баку співпадає з найбільшим внутрішнім діаметром порцелянової покритишки (в нижній частині). Найменша товщина бічної стінки порцелянової покритишки становить $S_n = 25$ мм.

4 провідники (витки) первинної обмотки ТС з'єднані в ізольований джгут, навколо якого додається шар високовольтної паперово-масляної конденсаторної ізоляції. Джгут провідників в ізоляції вигнуто у формі літери «U», від чого походить тип даного ТС. В верхній частині ТС провідники зі джгута мають можливість бути з'єднаними за схемою, що являє собою 1, 2 або 4 витки первинної обмотки ТС, і приєднані в розсічку у високовольтне електричне коло. Оскільки первинні струми ТС складають в номінальному режимі сотні або навіть тисячі ампер (а в аварійних режимах можуть перевищувати миттєві значення сотень кілоампер), неможливо виконати ці

провідники одножильним проводом круглого перерізу зі стандартного сортаменту обмоткових проводів (внаслідок поверхневого ефекту). В таких випадках використовують провідники або складені з багатьох жил ізолюваного обмоткового проводу, з'єднаних паралельно, сумарна площа перерізу яких відповідає розрахунковій площі перерізу одного витка первинної обмотки ТС, або використовують плоскі шини. Приклади розташування провідників у джгуті первинної обмотки представлені на рис. 6. При цьому, розмір d_1 при формуванні джгута з перерізом, наближеним до кругового, визначається зовнішнім діаметром ізоляції 4 груп провідників, а при використанні плоских шин прямокутного перерізу – діаметром кола, описаного навколо пакету з 4 шин в ізоляції. В цьому випадку зовнішній діаметр ізоляції $D_{зовн}$ визначається максимальним розміром ізоляції.

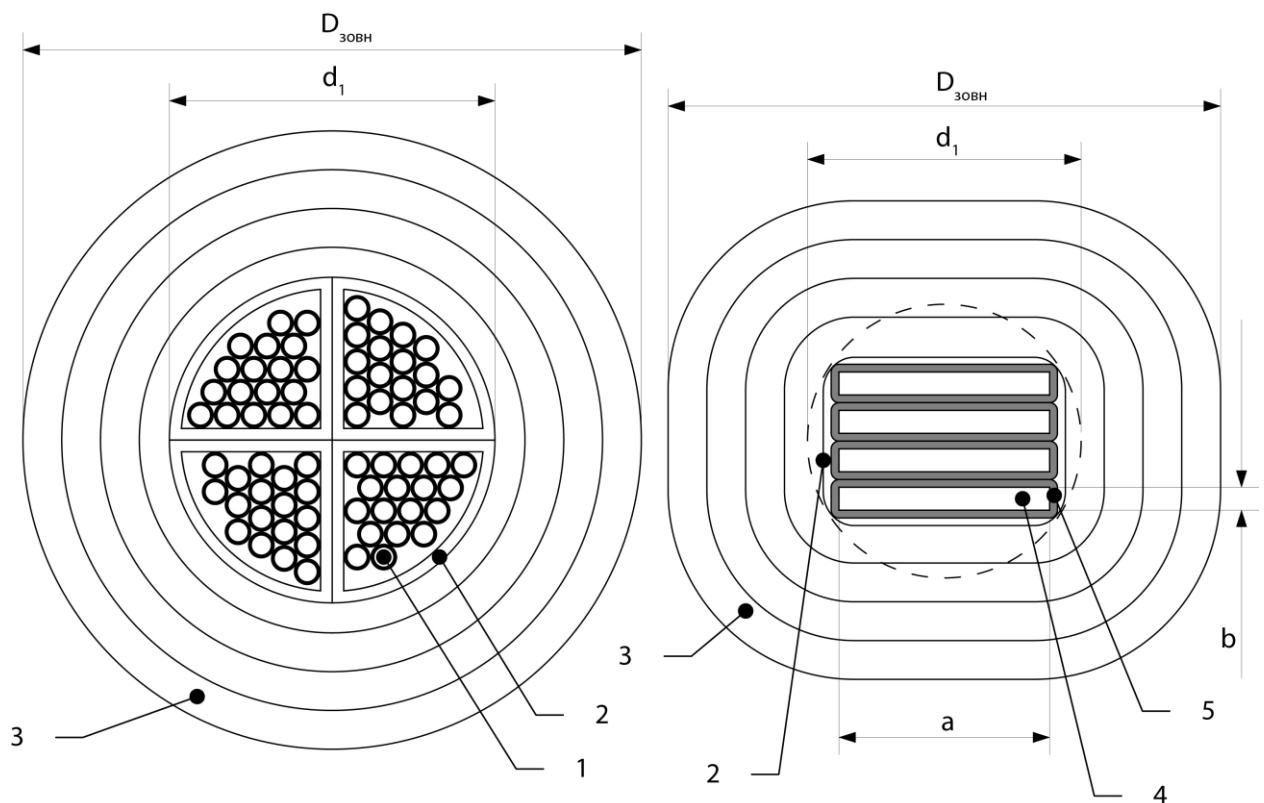


Рисунок 6 – Приклади розташування провідників витків у перерізі джгута первинної обмотки: 1 – ізолювані провідники з сортаменту проводу круглого перерізу; 2 – загальна ізоляція жгута провідників первинної обмотки; 3 – шари високовольної ПМКІ; 4 – провідник з плоскої шини прямокутного перерізу; 5 – ізоляція провідника прямокутного перерізу.

Для початку розрахунків ТС необхідні наступні вхідні дані:

- найбільша робоча напруга (лінійна, U_m);
- рівень ізоляції (звичайний або посилений – в залежності від цього обирають величини витримуваних напруг у табл. 2);
- номінальні первинні струми, А;
- номінальний вторинний струм (номінальні вторинні струми), А;
- клас точності вимірювальних осердь (у відповідності до діючого ДСТУ EN 61869-2:2017);
- марка сталі магнітопроводів ТС;
- номінальне значення комплексного опору навантаження вторинної обмотки, Ом;
- $\cos \varphi$ навантаження вторинної обмотки;
- кратність струму термічної стійкості $K_t = \frac{I_t}{I_{1ном}}$ – відношення значення максимально допустимого струму, який нагріває ТС протягом визначеного терміну часу (1 с для $U_m = 362$ кВ і 3 с для нижчих значень робочих напруг), до значення номінального первинного струму;
- кратність струму динамічної стійкості $K_d = K_t \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2}$ – відношення значення максимально допустимого струму, який може створювати електродинамічний вплив на елементи конструкції ТС, до значення номінального первинного струму.

Розрахунок параметрів проектного трансформатора струму розглянемо на прикладі. Серед задач розрахунку – вибір провідників первинної обмотки, розрахунок параметрів паперово-масляної конденсаторної ізоляції, забезпечення необхідного класу точності магнітних осердь зі вторинними обмотками, розрахунок точки теплової рівноваги усталеного режиму роботи ТС, розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки і розрахунок первинної обмотки ТС на електродинамічну стійкість.

Необхідно розрахувати параметри трансформатора струму для якого найбільша робоча напруга становить $U_m = 300$ кВ, посилена ізоляція; номінальні первинні струми $I_{1н} = 500/1000/2000$ А (для 4, 2 та 1 витків первинної обмотки, відповідно); номінальний вторинний струм $I_{2н} = 2$ А; кратність струму термічної стійкості $K_t = 33$; клас точності вимірювальних осердь, у відповідності до ДСТУ EN 61869-2:2017 становить 0,2; марка електротехнічної сталі осердь – 3411; опір вторинного навантаження $Z_n = 2,2$ Ом, $\cos \varphi = 0,83$.

У відповідності до табл. 2 обираємо значення витримуваних напруг промислової частоти $U_{вум_50} = 460$ кВ; $U_{имн} = 1050$ кВ. Радіус заокруглення первинної обмотки в баку ТС становить $R = D_{бак} / 4$, у відповідності до рис. 5. Приймаємо відстань високовольтної ізоляції первинної обмотки до дна баку, у відповідності до рис. 5, $\Delta_{дна} = 90$ мм. Відстань, на яку виступає зовнішня обкладинка ПМКІ з баку ТС приймемо рівною, у відповідності до рис. 5, $\Delta_{обкл} = 110$ мм.

Обчислення діаметру d_{isl} ізольованих 4 провідників первинної обмотки визначають за трьома умовами: термічної стійкості ТС, неможливості теплового пробою при номінальному первинному струмі та відсутності корони на першій обкладинці.

При адіабатичному нагріванні первинної обмотки струмом термічної стійкості I_t температура обмотки не повинна змінюватися від сталого значення $\Theta_y = 70$ °С до допустимого короткочасного значення $\Theta_k = 200$ °С.

Короткочасно допустиму густину струму для проводів первинної обмотки (для $U_m = 300$ кВ – протягом 3 секунд) визначають з виразу:

$$\delta_t = \sqrt{\frac{1}{p \cdot t} \cdot \ln \left(\frac{1 + \alpha \cdot \Theta_k}{1 + \alpha \cdot \Theta_y} \right)}, \quad (8)$$

де $p = \frac{\rho_0 \cdot \alpha}{\gamma \cdot c}$; ρ_0 – питомий опір матеріалу провідника (Ом·см); α – температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника (1/°С); γ – густина матеріалу (г/см³); c – питома теплоємність матеріалу (Дж/(г·°С)); t – тривалість проходження струму (с).

Прийmemo в якості матеріалу провідників первинної обмотки мідь. Тоді $\rho_0 = 1,68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см; $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/°C; $\gamma = 8,9$ г/см³; $c = 0,39$ Дж/(г·°C); $t = 3$ с. $p = \frac{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8,9 \cdot 0,39} \approx 1,94 \cdot 10^{-9}$. $\delta_t = \sqrt{\frac{1}{1,94 \cdot 10^{-9} \cdot 3} \cdot \ln\left(\frac{1+4 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{1+4 \cdot 10^{-3} \cdot 70}\right)} \approx 7654$ (А/см²) = 76,54 А/мм². Трисекундний струм термічної стійкості $I_t = K_t \cdot I_{1n}$. Оскільки в одному провіднику первинної обмотки протікає номінальний струм $I_{1n} = 500$ А, то $I_t = 33 \cdot 500 = 16500$ (А). Переріз провідника, мм², визначаємо з відношення:

$$q_{1п} = \frac{I_t}{\delta_t}. \quad (9)$$

$$q_{1п} = \frac{16500}{76,54} \approx 216 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Термічний пробій ізоляції відбувається, коли кількість тепла, що виділяється при номінальному режимі роботи в міді та ізоляції первинної обмотки, перевищує кількість тепла, що відводиться із зовнішньої поверхні ТС. Термічний пробій супроводжується монотонним зростанням температури проводів первинної обмотки внаслідок температурної залежності діелектричних втрат від $\text{tg}\delta$.

Для запобігання теплового пробою рекомендують отримане розрахункове значення діаметру проводів первинної обмотки збільшити в 1,5...2 рази з наступним уточненням у ході теплового розрахунку.

Визначимо діаметр провідника круглого перерізу, який відповідає такій площі перерізу: $d_{1п} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{1п}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 216}{\pi}} \approx 16,6$ (мм). Оскільки ізольований лаковою оболонкою обмотковий провід такого діаметру не випускається (внаслідок незадовільного використання матеріалу, спричиненого дією поверхневого ефекту), для первинної обмотки обираємо провідники з сортаменту мідної шини прямокутного перерізу, ізольованої стрічкою трансформаторного паперу товщиною $S_n = 0,25$ мм. Оберемо площу перерізу прямокутної мідної шини більшою за розраховане значення у 1,8² разів, тобто, $q_{1п} = 216 \cdot 1,8^2 \approx 698$ (мм²). Перерізу 698 мм² відповідає мідна

шина прямокутного перерізу з висотою $a = 10$ мм, шириною $b = 70$ мм і площею перерізу 700 мм^2 . Товщина ізоляції на кожному стороні перерізу шини складає подвійну товщину стрічки трансформаторного паперу, таким чином пакет (джгут) з 4 провідних мідних шин (витків первинної обмотки) в ізоляції має ширину $b = 70 + 2 \cdot 2 \cdot 0,25 = 71$ (мм) і висоту $a = 4 \cdot (10 + 2 \cdot 2 \cdot 0,25) = 44$ (мм). Діаметр кола, описаного навколо перерізу цього пакету провідників в ізоляції визначаємо як

$$d_1 = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (10)$$

$d_1 = \sqrt{71^2 + 44^2} \approx 84$ (мм). Неможливість коронування першої обкладинки ПМКІ визначають у ході розрахунку ізоляції.

2.1. Розрахунок паперово-масляної ізоляції конденсаторного типу

Паперово-масляна конденсаторна ізоляція (ПМКІ) призначена для вирівнювання напруженості електричного поля у високовольтній ізоляції первинної обмотки до рівня, який унеможливорює ефекти коронування в робочих режимах ТС і забезпечує витримування цією ізоляцією всіх видів випробувальних напруг. Вирівнювання напруженості електричного поля відбувається за рахунок його регульованого розподілення по товщині ізоляції між різнопотенціальними електродами шляхом створення в ізоляції провідних обкладинок (наприклад, зі стрічки мідної фольги, яку намотують поверх шару ізоляції таким чином, щоб не утворювати короткозамкнені витки), які утворюють циліндричні конденсатори з «плаваючим» потенціалом на обкладинках. Оскільки гострі кромки на торцях обкладинок є джерелами збільшеної напруженості електричного поля, на торцях обкладинок можуть додаватись електростатичні екрани у вигляді незамкненого витка проводу (або трубки) круглого перерізу, електрично з'єднаного з обкладинкою. Для додаткового вирівнювання електричного поля між обкладинками біля їхніх торців додають манжети – вузькі полоси з провідної фольги, які утворюють в перерізі додаткові уступи і створюють

додаткові циліндричні конденсатори, що також додатково вирівнюють розподіл напруженості електричного поля біля торців обкладинок (рис. 7).

Товщину ПМКІ визначають при дії на неї трьох розрахункових напруг: найбільшої робочої фазної напруги $U_{м.ф}$ (трансформатори струму встановлюються на фазну напругу, а не на лінійну), витримуваної напруги промислової частоти $U_{вум_50}$ та імпульсної напруги $U_{имп}$.

Для трансформатора ТФУМ-300 $U_{м.ф} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{300}{\sqrt{3}} \approx 174$ (кВ); $U_{вум_50} = 460$ кВ; $U_{имп} = 1050$ кВ.

Конструктивно ПМКІ складається з деякої кількості головних обкладинок з мідної фольги, відстань між якими беруть рівною 3...5 мм. Між кожною парою головних обкладинок біля їхніх країв закладають манжети (рис. 7), відстань між якими коливається від 0,5 до 1 мм. Нехай відстань між манжетами дорівнює 1 мм: $\Delta_m = 1$ мм. Допустимі напруженості електричного поля на кінцях головних обкладинок та манжет за дією різних видів напруги визначають з виразів:

$$E_{доп.ф} = 4 \cdot \Delta_m^{-0,58}; E_{доп.50} = 8 \cdot \Delta_m^{-0,58}; E_{доп.имп} = (20 \dots 40) \cdot \Delta_m^{-0,58}. \quad (11)$$

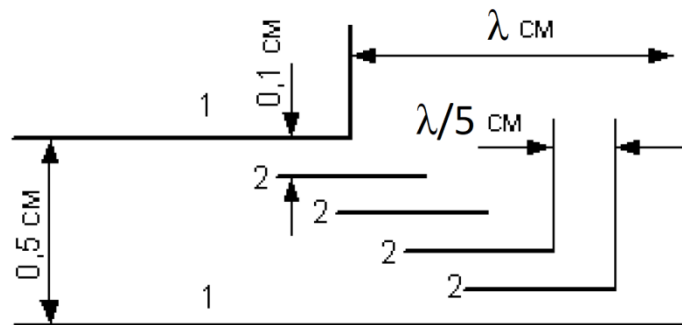


Рисунок 7 – Переріз будови ізоляції між двома сусідніми обкладинками ПМКІ в області розташування манжет: 1 – головні обкладинки; 2 – манжети.

При обраному значенні $\Delta_m = 1$ мм отримуємо $E_{доп.ф} = 4$ кВ/мм; $E_{доп.50} = 8$ кВ/мм; $E_{доп.имп} = (20 \dots 40)$ кВ/мм.

За відомими значеннями напруг, що впливають на ізоляцію та допустимими для цих видів напруг напруженостями електричного поля визначаємо допустиму товщину ізоляції:

$$\Delta_{\text{доп.ф}} = \frac{U_{\text{т.ф}}}{E_{\text{доп.ф}}}; \quad (12)$$

$$\Delta_{\text{доп.50}} = \frac{U_{\text{вит.50}}}{E_{\text{доп.50}}}; \quad (13)$$

$$\Delta_{\text{доп.імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{E_{\text{доп.імп}}}. \quad (14)$$

$\Delta_{\text{доп.ф}} = \frac{174}{4} = 43,3$ (мм); $\Delta_{\text{доп.50}} = \frac{460}{8} = 57,5$ (мм); $\Delta_{\text{доп.імп}} = \frac{1050}{20 \dots 40} \approx 52,5 \dots 26,25$ (мм). З обчислених значень обираємо найбільше та округлюємо в бік найближчого більшого цілого числа, кратного 5 мм: $\Delta = 60$ мм.

Визначаємо зовнішній діаметр (максимальний розмір) ізольованих високовольтною ПМКІ проводів первинної обмотки:

$$D_{\text{зовн}} = d_1 + 2 \cdot \Delta. \quad (15)$$

$D_{\text{зовн}} = 84 + 2 \cdot 60 = 204$ (мм). Методом лінійної інтерполяції визначаємо діаметр та висоту баку для значення $U_m = 300$ кВ (з округленням в бік найближчого цілого значення, кратного 1 мм): $D_{\text{бак}} = 548$ мм; $H_{\text{бак}} = 665$ мм. Оскільки радіус заокруглення проводів первинної обмотки в баку становить чверть діаметру баку, обчислюємо значення цього радіусу: $R = \frac{D_{\text{бак}}}{4} = \frac{548}{4} = 137$ (мм).

Визначимо довжину відрізка x за рис. 5:

$$x = R + \Delta + 0,5 \cdot d_1. \quad (16)$$

$x = 137 + 60 + 0,5 \cdot 84 = 239$ (мм). Визначимо довжину відрізка y за рис. 5:

$$y = H_{\text{бак}} - x - \Delta_{\text{дна}}. \quad (17)$$

$y = 665 - 239 - 90 = 336$ (мм). Визначимо середню довжину зовнішньої обкладинки ПМКІ ТС на одну «ногу» первинної обмотки, за рис. 5:

$$l_{\text{зовн}} = \frac{\pi \cdot R}{2} + y + \Delta_{\text{обкл}}. \quad (18)$$

$l_{\text{зовн}} = \frac{\pi \cdot 137}{2} + 336 + 110 \approx 661$ (мм). Визначимо висоту значення сухорозрядної напруги для $U_m = 300$ кВ методом лінійної інтерполяції: $U_{\text{сух.}} = 569$ кВ.

Визначимо висоту порцелянової покришки:

$$H = 0,16 \cdot U_{\text{сух.}}^{1,49} = 0,16 \cdot 569^{1,49} \approx 2038 \text{ (мм)}.$$

Визначимо відстань між краями зовнішньої та внутрішньої обкладинок ПМКІ: $h = 0,75 \cdot H = 0,75 \cdot 2038 = 1529$ (мм).

Визначимо середню довжину внутрішньої обкладинки ПМКІ ТС на одну «ногу» первинної обмотки, за рис. 5: $l_{\text{вн}} = l_{\text{зовн}} + h = 661 + 1529 = 2190$ (мм).

Обираємо радіальну відстань між головними обкладинками ПМКІ рівною: $\Delta_{\text{ш}} = 5$ мм. Тоді кількість шарів ПМКІ буде:

$N_{\text{ш}} = \frac{\Delta}{\Delta_{\text{ш}}} = \frac{60}{5} = 12$ (за отримання дробового значення, округлюємо в бік найближчого більшого цілого значення). Кількість манжет, у відповідності до рис. 7: $N_{\text{м}} = N_{\text{ш}} \cdot 4 = 12 \cdot 4 = 48$.

Визначимо довжину головних уступів ПМКІ (аксіальна відстань між краями сусідніх обкладинок), у відповідності до рис. 7:

$$\lambda = \frac{l_{\text{вн}} - l_{\text{зовн}}}{N_{\text{ш}}}. \quad (19)$$

$\lambda = \frac{2190 - 661}{12} \approx 128$ (мм). Дане значення округлюємо в бік найближчого більшого цілого значення, кратного 5 мм: $\lambda = 130$ мм.

Приймаємо значення для наступних розрахунків:

Довжина головних уступів ПМКІ $\lambda = 130$ мм; довжина внутрішньої обкладинки $l_{\text{вн}} = 2190$ мм; довжина зовнішньої обкладинки $l_{\text{зовн}} = l_{\text{вн}} - \lambda \cdot N_{\text{ш}} = 670$ мм; радіус внутрішньої обкладинки $r_{\text{вн}} = 0,5 \cdot d_1 = 0,5 \cdot 84 = 42$ (мм); радіальна відстань між обкладинками $\Delta_r = 5$ мм.

2.2. Розрахунок радіальних та аксіальних напруженостей електричного поля

Метою розрахунку на даному етапі є одержання розрахункових значень E_{ri} , $E_{\lambda i}$ напруженостей електричного поля для характерних областей ПМКІ і наступного порівняння цих значень з допустимими значеннями E_{don_r} та E_{don_l} радіальної та аксіальної складових напруженості електричного поля у високовольтній ПМКІ $E_{don_r} = 8$ кВ/мм та $E_{don_l} = 1,25$ кВ/мм.

Кожна пара обкладинок ПМКІ являє собою коаксіальні циліндри, що утворюють разом з діелектриком між ними конденсатор (деформацією циліндричного конденсатора на скругленні первинної обмотки радіусом R нехтуємо). Для обчислення ємності кожної пари концентричних обкладинок ПМКІ користуємось формулою:

$$C_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot l_{i+1}}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}, \quad (20)$$

де i – номер обкладинки, починаючи з внутрішньої з номером 1; ε_0 – електрична стала (наближено, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-15}$ Ф/мм); ε – відносна діелектрична проникність діелектрику між обкладинками (для паперово-масляної ізоляції приймаємо $\varepsilon = 3,6$); l – довжина обкладинки з певним номером (довжина приймається для однієї «ноги» первинної обмотки, тобто, для її половини), мм; r – радіус обкладинки, мм. Номер шару в розрахунку відповідає номеру обкладинки з меншим радіусом (кількість обкладинок на 1 більша за кількість шарів ПМКІ).

Описані вище розрахунки зручніше виконувати за допомогою програмування циклічних розрахунків у програмному пакеті Mathcad (або аналогічних йому за функціоналом некомерційних пакетах SMath Studio, Махіма тощо). Так, для першого шару ПМКІ ємність між обкладинками становитиме:

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot (l_1 - \lambda)}{\ln\left(\frac{r_1 + \Delta_{III}}{r_1}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-15} \cdot 3,6 \cdot (2190 - 130)}{\ln\left(\frac{42+5}{42}\right)} \approx 3,668 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}.$$

Аналогічним чином розраховуються ємності всіх інших шарів ПМКІ та значення заносяться у відповідну колонку табл. 3. Паралельно, при розрахунках ємностей C_i , розраховують обернені величини $1/C_i$ ($1/C_1 = 2,726 \cdot 10^8$ Ф⁻¹), які надалі підсумовують і також заносять до табл. 3, а

обернена величина до цієї суми є еквівалентною ємністю високовольтної ПМКІ, у відповідності до виразу:

$$C_{\text{екв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{\text{ш}}-1} \frac{1}{C_i}}. \quad (21)$$

Для заданих параметрів ПМКІ одержуємо $C_{\text{екв}} = 2,915 \cdot 10^{-10}$ Ф. Напруга, прикладена до ПМКІ, розподіляється обернено пропорційно ємностям шарів. Для визначення цього розподілу використовують формулу:

$$\Delta U_i = U_{\text{внт}_50} \cdot \frac{C_{\text{екв}}}{C_i}. \quad (22)$$

Для першого шару ПМКІ одержуємо: $\Delta U_1 = 460 \cdot \frac{2,915 \cdot 10^{-10}}{3,668 \cdot 10^{-9}} \approx 36,55$ (кВ). Радіальну і аксіальну складові напруженості електричного поля розраховуємо за формулами:

$$E_{ri} = \frac{\Delta U_i}{\Delta r}; E_{\lambda i} = \frac{\Delta U_i}{\lambda}. \quad (23)$$

Для першого шару ПМКІ за цими формулами одержуємо: $E_{r1} = \frac{\Delta U_1}{\Delta r} = \frac{36,55}{5} \approx 7,31$ (кВ/мм); $E_{\lambda 1} = \frac{\Delta U_1}{\lambda} = \frac{36,55}{130} \approx 0,2812$ (кВ/мм). Аналогічно заповнюємо даними розрахунків інші комірочки табл. 3.

Таблиця 3

Дані розрахунку параметрів паперово-масляної конденсаторної ізоляції

Номер обкладинки ТС	r_i , мм, при $\Delta r = 5$ мм	l_i , мм, при $\lambda = 130$ мм	C_i , нФ	$1/C_i \cdot 10^{-8}$, Φ^{-1}	ΔU_i , кВ	E_{ri} , кВ/мм	$E_{\lambda i}$, кВ/мм
1	42	2190	3,668	2,726	36,55	7,31	0,2812
2	47	2060	3,823	2,616	35,07	7,013	0,2697
3	52	1930	3,927	2,547	34,14	6,829	0,2627
4	57	1800	3,978	2,514	33,71	6,741	0,2593
5	62	1670	3,977	2,515	33,72	6,743	0,2593
6	67	1540	3,924	2,549	34,17	6,834	0,2629
7	72	1410	3,818	2,619	35,11	7,023	0,2701
8	77	1280	3,661	2,732	36,62	7,325	0,2817
9	82	1150	3,451	2,898	38,85	7,769	0,2988
10	87	1020	3,19	3,135	42,03	8,407	0,3233
11	92	890	2,876	3,477	46,62	9,323	0,3586
12	97	760	2,51	3,984	53,41	10,68	0,4108
13	102	630	-	-	-	-	-

Результати розрахунків, представлені в табл. 3, показують, що всі значення аксіальних складових напруженості електричного поля $E_{\lambda i}$ не перевищують допустимого значення 1,25 кВ/мм. В той же час, в останніх трьох шарах ПМКІ спостерігаються радіальні складові напруженості електричного поля, які перевищують допустиме значення напруженості електричного поля для витримуваної напруги промислової частоти 8 кВ/мм. В такому випадку у зазначених шарах ПМКІ встановлюють манжети з більшою густиною з метою додаткового вирівнювання напруженості електричного поля. Оберемо відстань між манжетами в останніх двох шарах ПМКІ рівною $\Delta_m = 0,5$ мм. Обчислимо допустиму напруженість радіальної складової електричного поля для витримуваної напруги промислової частоти і відповідної відстані між манжетами:

$E_{\text{доп.50}} = 8 \cdot 0,5^{-0,58} \approx 11,96$ (кВ/мм), що є більшим за розраховані в таблиці значення. Таким чином, після встановлення додаткових манжет (9 замість 4) в останніх (зовнішніх) трьох шарах ПМКІ, розрахунок паперово-масляної конденсаторної ізоляції високовольтної обмотки ТС відповідає встановленим вимогам.

2.3. Розрахунок класу точності трансформатора струму

Згідно завдання, клас точності проектного ТС має бути 0,2. У відповідності до ДСТУ EN 61869-2:2017, клас точності 0,2 вимірювальних трансформаторів струму характеризується наступними параметрами струмових та кутових похибок: за 5% від номінального струму – не більше $\pm 0,75\%$ струмової похибки і не більше ± 30 кутових хвилин кутової похибки; за 20% від номінального струму – не більше $\pm 0,35\%$ струмової похибки і не більше ± 15 кутових хвилин кутової похибки; за 100% і 120% від номінального струму – не більше $\pm 0,2\%$ струмової похибки і не більше ± 10 кутових хвилин кутової похибки.

Визначимо похибки ТС для режимів 5% від номінального струму та 120% від номінального струму, як граничні. Для режиму роботи ТС у 5% від

номінального струму приймається значення навантаження, яке дорівнює 100% від номінального навантаження вторинної обмотки ТС (при цьому для розрахунків обираємо нижчий сорт трансформаторної сталі), а для режиму ТС у 120% від номінального струму приймається 25% від номінального навантаження (при цьому для розрахунків обираємо вищий сорт трансформаторної сталі).

Розрахунок починаємо з визначення максимальної кількості витків вторинної обмотки на кожному з магнітопроводів. Оскільки $\frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{w_2}{w_1}$, звідси

$$w_2 = \frac{I_{1H} \cdot w_1}{I_{2H}}. \quad (24)$$

Добуток $I_{1H} \cdot w_1$ є МРС первинної обмотки і позначається F_1 . Оскільки первинна обмотка складається з 4 секцій, комбінацією з'єднання яких можна одержати 1, 2 або 4 витки у первинній обмотці, відповідно, по цих витках може проходити 2000 А, 1000 А, або 500 А номінального первинного струму, відповідно, при цьому МРС первинної обмотки залишатиметься незмінною. Тому зручно використовувати розрахунок МРС за 1 витком первинної обмотки (всі 4 провідники витків первинної обмотки з'єднані паралельно) і 2000 А номінального первинного струму. Обчислимо кількість витків вторинної обмотки: $w_2 = \frac{2000 \cdot 1}{2} = 1000$. Дана кількість витків відповідає 1 витку первинної обмотки, отже, для схеми з 2 витків первинної обмотки ($I_{1H} = 1000$ А) $w_2 = 1000 \cdot 2 / 2 = 1000$; для схеми з 4 витків первинної обмотки ($I_{1H} = 500$ А) $w_2 = 500 \cdot 4 / 2 = 1000$ витків. Відповідно, значення МРС первинної обмотки за 5% від номінального струму та 120% від номінального струму будуть: $F_{1_5} = 0,05 \cdot 2000 \cdot 1 = 100$ (А); $F_{1_120} = 1,2 \cdot 2000 \cdot 1 = 2400$ (А). Визначимо комплексні опори вторинного навантаження для обох режимів:

$$Z_{H_120} = 0,25 \cdot Z_H; Z_{H_5} = Z_H. \quad (25)$$

$Z_{H_120} = 0,25 \cdot 2,2 = 0,55$ (Ом); $Z_{H_5} = 2,2$ (Ом). Визначимо активні та реактивні складові опорів навантаження для режимів роботи ТС 5% і 120% від номінального струму за заданим значенням $\cos \varphi$ навантаження:

$$R_{H_{120}} = Z_{H_{120}} \cdot \cos\varphi; R_{H_5} = Z_{H_5} \cdot \cos\varphi. \quad (26)$$

$$R_{H_{120}} = 0,55 \cdot 0,83 \approx 0,457 \text{ (Ом)}; R_{H_5} = 2,2 \cdot 0,83 \approx 1,826 \text{ (Ом)}.$$

Визначимо значення $\sin \varphi$:
 $\sin\varphi = \sin(\arccos(\cos\varphi)) = \sin(\arccos(0,83)) \approx 0,558.$ Визначимо реактивні складові опорів навантаження для обох режимів:

$$X_{H_{120}} = Z_{H_{120}} \cdot \sin\varphi; X_{H_5} = Z_{H_5} \cdot \sin\varphi. \quad (27)$$

$$X_{H_{120}} = 0,55 \cdot 0,558 \approx 0,307 \text{ (Ом)}; X_{H_5} = 2,2 \cdot 0,558 \approx 1,228 \text{ (Ом)}.$$

Визначимо вторинні струми у обмотках ТС за режимів роботи ТС 5% і 120% від номінального струму:

$$I_{2_{120}} = I_{2H} \cdot 1,2; I_{2_5} = I_{2H} \cdot 0,05. \quad (28)$$

$$I_{2_{120}} = 2 \cdot 1,2 = 2,4 \text{ (А)}; I_{2_5} = 2 \cdot 0,05 = 0,1 \text{ (А)}.$$

Для подальших розрахунків необхідно визначитись з діаметром обмоткового проводу та геометричними розмірами магнітопроводів. Магнітні осердя з обмотками призначені для використання їхніх вторинних кіл у вимірювальних колах та колах релейного захисту і автоматики. Виконаємо розрахунок класу точності на прикладі розрахунку магнітного осердя, призначеного для вимірювальних кіл. У відповідності до рис. 5, 2 магнітопроводи з обмотками мають поміститись в баку діаметром $D_{бак}$. Це означає, що зовнішній діаметр тороїда магнітопроводу з вторинною обмоткою на ньому та ізоляцією не має перевищувати половину діаметру баку. Враховуючи мінімальні відстані між магнітопроводами та між магнітопроводами і стінками баку $\Delta_x = 1$ мм, можемо записати:

$$D_{тор_{зовн}} = \frac{D_{бак} - 3 \cdot \Delta_x}{2}. \quad (29)$$

$D_{тор_{зовн}} = \frac{548 - 3 \cdot 1}{2} = 272,5$ (мм). Округлюємо це значення в менший бік: $D_{тор_{зовн}} = 272$ мм. Внутрішній діаметр тороїду зі вторинною обмоткою в ізоляції має бути на величину $2 \cdot \Delta_x$ бути більшим за діаметр зовнішньої обкладинки ПМКІ, розрахованої на попередньому етапі проектування. Тобто, $D_{тор_{вн}} = D_{зовн} + 2 \cdot \Delta_x = 204 + 2 \cdot 1 = 206$ (мм). У відповідності до рис. 5,

висота двох магнітопроводів з обмотками у перерізі не має сумарно перевищувати величину y . Відповідно, можемо записати:

$$H_{\text{тор_макс}} = \frac{y}{2}. \quad (30)$$

$H_{\text{тор_макс}} = \frac{336}{2} \approx 168$ (мм). Дане значення може бути округленим і в більший бік (за рахунок виходу частини зовнішньої обкладинки ПМКІ з вертикальних розмірів баку в покрішку), проте, краще округлювати це значення в менший бік до цілого числа: $H_{\text{тор_макс}} = 168$ мм. Розміри елементів магнітопроводів та вторинних обмоток у перерізах наведено на рис. 8. На рис. 8 а) наведено переріз для первинної обмотки, виконаної плоскими провідними шинами прямокутного перерізу в ізоляції.

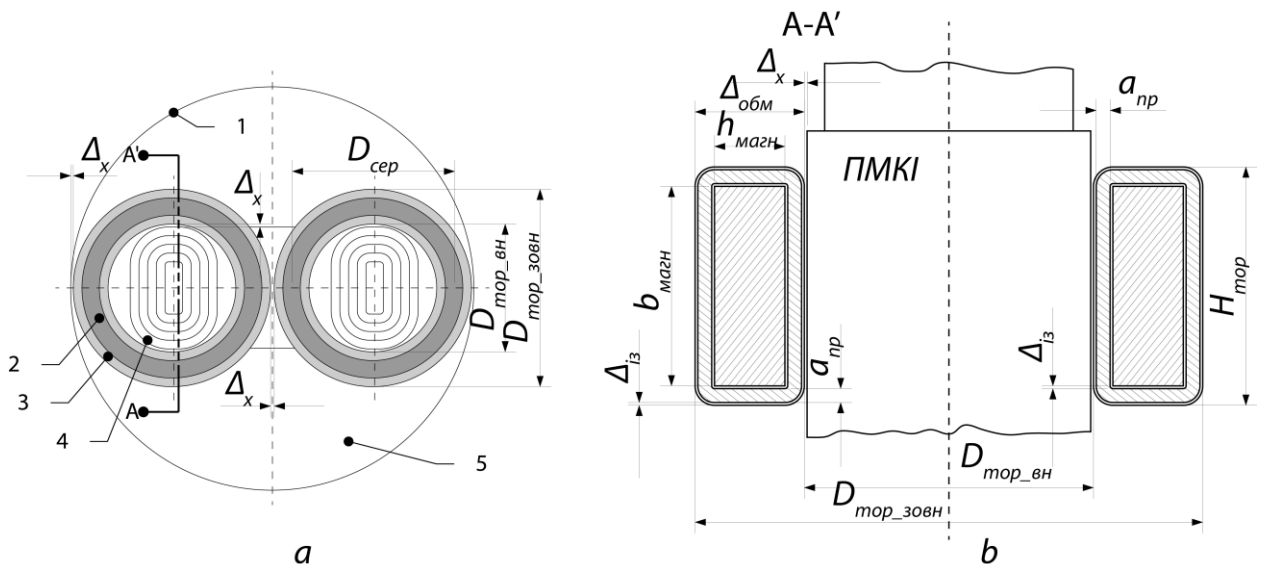


Рисунок 8 – Перерізи магнітопроводів з обмотками: а) – горизонтальний переріз; б) – вертикальний переріз; 1 – бічна стінка баку ТС; 2 – переріз магнітного осердя; 3 – вторинна обмотка; 4 – ПМКІ первинної обмотки; 5 – середовище трансформаторного масла.

Для подальших розрахунків параметрів ТС необхідно визначити площу перерізу $S_{\text{магн}}$ магнітного осердя і середній діаметр $D_{\text{сер}}$ магнітопроводу. Також необхідно визначити параметр $a_{\text{пр}}$, який відповідає діаметру обмоткового проводу круглого перерізу в ізоляції, або меншому

розміру перерізу прямокутної шини в ізоляції. Прийнемо товщину ізоляції вторинної обмотки рівною подвійній товщині стрічки ізоляційного паперу: $\Delta_{iz} = 2 \cdot S_{\Pi} = 2 \cdot 0,25 = 0,5$ (мм). Тоді, за умови розташування витків вторинної обмотки в 1 шар, у відповідності до рис. 8 одержуємо формулу для розрахунку ширини перерізу обмотки:

$$\Delta_{обм} = \frac{D_{тор_зовн} - D_{зовн} - 2 \cdot \Delta_{iz}}{2} = \frac{D_{тор_зовн} - D_{тор_вн}}{2}. \quad (31)$$

$$\Delta_{обм} = \frac{272 - 206}{2} \approx 33 \text{ (мм)}. \text{ Для того, щоб під час виконання розрахунків}$$

даного розділу можна було нехтувати впливом індуктивності розсіювання, витки вторинної обмотки мають бути розташовані на тороїдальному магнітопроводі рівномірно. На рис. 9 представлені типові розташування витків вторинної обмотки для обмоткового проводу круглого перерізу.

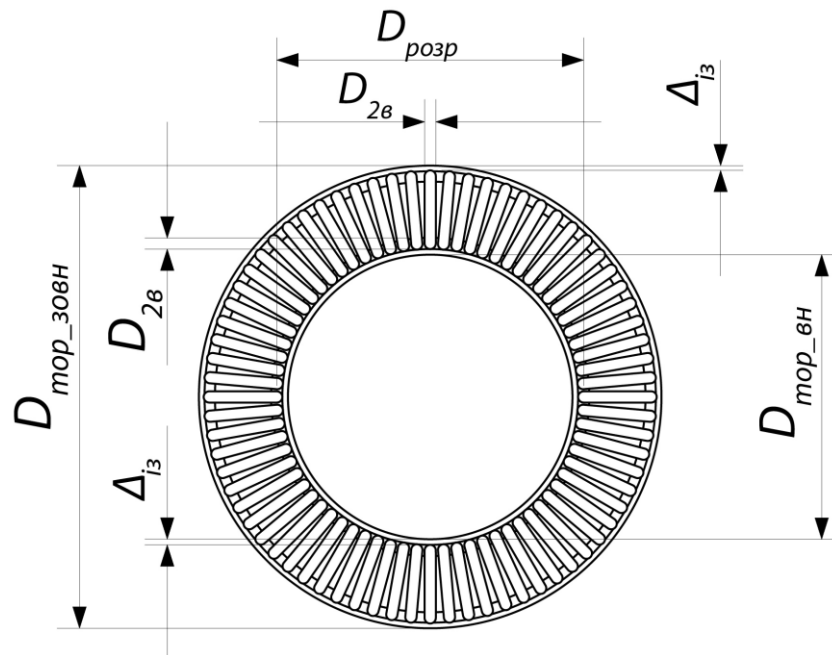


Рисунок 9 – Розташування витків вторинної обмотки.

Як можна бачити з рис. 9, якщо задана певна кількість витків вторинної обмотки (в даному випадку $w_2 = 1000$ витків), максимальний діаметр проводу при розташуванні витків в один шар обмежується кількістю витків w_2 діаметром d_{lv} , які розташовані впритул центрами на колі розрахункового діаметру $D_{розр}$. Відповідно, максимальний діаметр проводу в ізоляції для вторинної обмотки можна розрахувати за формулою:

$$d_{2B} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{тор_вн}} + 2 \cdot \Delta_{i3})}{w_2 - \pi}. \quad (32)$$

$d_{2B} = \frac{\pi \cdot (206 + 2 \cdot 0,5)}{1000 - \pi} \approx 0,6524$ (мм). З сортаменту мідного обмоткового проводу круглого перерізу типу ПЭТ-155 обираємо найближчий за діаметром (з урахуванням ізоляції), не більший розрахованого значення. Приймаємо $d_{2B} = 0,649$ мм з внутрішнім діаметром жили $d_2 = 0,6$ мм.

Одночасно, $\Delta_{\text{обм}} = h_{\text{магн}} + 4 \cdot \Delta_{i3} + 2 \cdot a_{\text{пр}}$, де $a_{\text{пр}} = d_{2B}$. Звідси находимо максимально можливу висоту набору стрічкового витого магнітопроводу:

$$h_{\text{магн}} = \Delta_{\text{обм}} - 4 \cdot \Delta_{i3} - 2 \cdot d_{2B}. \quad (33)$$

$h_{\text{магн}} = 33 - 4 \cdot 0,5 - 2 \cdot 0,649 \approx 29,7$ (мм). Округлюємо це значення в менший бік: $h_{\text{магн}} = 29$ мм. Ширину стрічки електротехнічної сталі обираємо не більшою за розраховане значення: $b_{\text{магн}} \leq H_{\text{тор_макс}} - 2 \cdot (d_{2B} + 2 \cdot \Delta_{i3})$, тобто, $b_{\text{магн}} \leq 168 - 2 \cdot (0,649 + 2 \cdot 0,5)$, або $b_{\text{магн}} \leq 160$ (мм). Округлення також відбувається в бік меншого цілого значення, кратного 5 мм. Відповідно, площа перерізу магнітопроводу у розрахунках не може бути більшою за добуток ширини стрічки на висоту набору та на коефіцієнт заповнення сталі (для стрічкових магнітопроводів можна прийняти $k_{\text{зан}} = 0,98$), тобто: $q_{\text{магн_макс}} = b_{\text{магн}} \cdot h_{\text{магн}} \cdot k_{\text{зан}} = 160 \cdot 29 \cdot 0,98 = 4547$ (мм²).

Для визначення активного опору витків вторинної обмотки крім діаметру провідної жили необхідно ще знати загальну довжину проводу в обмотці. $l_{2_обм} = w_2 \cdot l_{2B}$. Довжину проводу одного витка (по середній лінії), у відповідності до рис. 8, можна визначити за формулою:

$$l_{2B} = 2 \cdot (b_{\text{магн}} + h_{\text{магн}} + 4 \cdot \Delta_{i3}) + 2 \cdot \pi \cdot (\Delta_{i3} + 0,5 \cdot d_{2B}). \quad (34)$$

Обчислимо максимально можливу довжину витка для даного ТС: $l_{2B_макс} = 2 \cdot (160 + 29 + 4 \cdot 0,5) + 2 \cdot \pi \cdot (0,5 + 0,5 \cdot 0,649) = 387,2$ (мм). Відповідно, загальна довжина вторинної обмотки: $l_{2_обм} = 1000 \cdot 387,2 = 387200$ (мм), або $l_{2_обм} = 387,2$ м. Приймаючи питомий опір міді $\rho_M = 0,0168$ Ом·мм²/м, визначимо активну складову опору вторинної обмотки:

$$R_{2_обм} = \frac{4 \cdot \rho_M \cdot l_{2_обм}}{\pi \cdot d_2^2}. \quad (35)$$

$$R_{2_обм} = \frac{4 \cdot 0,0168 \cdot 387,2}{\pi \cdot 0,6^2} \approx 23,01 \text{ (Ом)}. \text{ Відповідно, діаметр середньої лінії}$$

магнітопроводу обчислюється за формулою:

$$D_{сер} = \frac{D_{тор_зовн} + D_{тор_вн}}{2}. \quad (36)$$

$$D_{сер} = \frac{272 + 206}{2} = 239 \text{ (мм)}. \text{ Довжина середньої лінії магнітопроводу}$$

$$l_{сер} = \pi \cdot D_{сер} = \pi \cdot 239 \approx 750,8 \text{ (мм)}, \text{ або } l_{сер} = 0,7508 \text{ м}.$$

Обчислимо загальний опір вторинного кола за формулою:

$$Z_2 = \sqrt{(R_2 + R_{2_обм})^2 + X_2^2}. \quad (37)$$

Для 120% від номінального струму отримаємо:

$$Z_{2_120} = \sqrt{(R_{2_120} + R_{2_обм})^2 + X_{2_120}^2} = \sqrt{(0,457 + 23,01)^2 + 0,307^2} \approx$$

23,46 (Ом). Для 5% від номінального струму отримаємо:

$$Z_{2_5} = \sqrt{(R_{2_5} + R_{2_обм})^2 + X_{2_5}^2} = \sqrt{(1,826 + 23,01)^2 + 1,228^2} \approx 24,86$$

(Ом).

Визначимо кут α між вторинною ЕРС і вторинним струмом за формулою:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{X_2}{R_2 + R_{2_обм}}\right). \quad (38)$$

$$\text{Відповідно, } \alpha_{120} = \arctg\left(\frac{X_{2_120}}{R_{2_120} + R_{2_обм}}\right) = \arctg\left(\frac{0,307}{0,457 + 23,01}\right) \approx 0,7491$$

$$\text{(градуси); } \alpha_5 = \arctg\left(\frac{X_{2_5}}{R_{2_5} + R_{2_обм}}\right) = \arctg\left(\frac{1,228}{1,826 + 23,01}\right) \approx 2,829 \text{ (градуси)}.$$

Обчислимо модуль вторинної ЕРС за формулою:

$$E_2 = I_2 \cdot Z_2. \quad (39)$$

$$\text{Для граничних значень струмів отримуємо: } E_{2_120} = I_{2_120} \cdot Z_{2_120} = 2,4 \cdot 23,46 = 56,31 \text{ (В)}. E_{2_5} = I_{2_5} \cdot Z_{2_5} = 0,1 \cdot 24,86 = 2,486 \text{ (В)}.$$

Обчислимо індукцію в магнітопроводі за формулою:

$$B = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot q_{магн}}, \quad (40)$$

де f – частота струму (50 Гц); $4,44 = \pi \cdot \sqrt{2}$. Визначимо індукцію в стрижні для граничних значень струмів: $B_{120} = \frac{E_{2_120}}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot q_{\text{магн}}} = \frac{56,31}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 4547 \cdot 10^{-6}} \approx 0,05575$ (Тл). $B_5 = \frac{E_{2_5}}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot q_{\text{магн}}} = \frac{2,486}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 4547 \cdot 10^{-6}} \approx 0,002461$ (Тл).

За табл.1 Додатку 1 методом лінійної інтерполяції визначимо значення питомої МРС для обчислених значень індукції в магнітопроводі для нижчого і вищого сортів трансформаторної сталі. Одержуємо значення: $F_{0_120} \approx 3,787$ А/м; $F_{0_5} \approx 0,8192$ А/м.

Розраховуємо повну МРС для граничних значень струмів:

$$F_{2_120} = F_{0_120} \cdot l_{\text{сер}}; F_{2_5} = F_{0_5} \cdot l_{\text{сер}}. \quad (41)$$

$$F_{2_120} = 3,787 \cdot 0,7508 \approx 2,844 \text{ (А)}; F_{2_5} = 0,8192 \cdot 0,7508 \approx 0,6151 \text{ (А)}.$$

За табл. 2 Додатку 1 методом лінійної інтерполяції визначимо значення кутів втрат ψ в сталі, в градусах для нижчого і вищого сортів трансформаторної сталі. Одержуємо значення: $\psi_{120} = 29,36^\circ$; $\psi_5 = 6,055^\circ$.

Розраховуємо значення синуса кута ($\psi + \alpha$): $\sin(\psi_{120} + \alpha_{120}) = \sin(29,36 + 0,749) \approx 0,5017$; $\sin(\psi_5 + \alpha_5) = \sin(6,055 + 2,829) \approx 0,1544$.

Обчислюємо МРС первинної обмотки для граничних значень струмів:

$$F_1 = I_1 \cdot w_1. \quad (42)$$

$$F_{1_120} = 2000 \cdot 1,2 \cdot 1 = 2400 \text{ (А)}; F_{1_5} = 2000 \cdot 0,05 \cdot 1 = 100 \text{ (А)}.$$

Обчислюємо струмову похибку за формулою:

$$f_i = -\frac{F_2}{F_1} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100\%. \quad (43)$$

Для граничних значень струмів, які впливають на нормоване у стандарті значення похибки, отримуємо значення струмових похибок:

$$f_{i_120} = -\frac{F_{2_120}}{F_{1_120}} \cdot \sin(\psi_{120} + \alpha_{120}) \cdot 100\% = -\frac{2,844}{2400} \cdot 0,5017 \cdot 100 \approx -0,05944$$

$$(\%); f_{i_5} = -\frac{F_{2_5}}{F_{1_5}} \cdot \sin(\psi_5 + \alpha_5) \cdot 100\% = -\frac{0,6151}{100} \cdot 0,1544 \cdot 100 \approx -0,09499$$

$$(\%).$$

Визначимо кутові похибки ТС за формулою:

$$\delta = \frac{F_2}{F_1} \cos(\psi + \alpha) \cdot 3438. \quad (44)$$

Обчислимо кутові похибки ТС для граничних значень струмів:

$$\delta_{120} = \frac{F_{2,120}}{F_{1,120}} \cos(\psi_{120} + \alpha_{120}) \cdot 3438 = \frac{2,844}{2400} \cdot \cos(\arcsin(0,5017)) \cdot 3438 \approx 3,524$$

$$(\text{кутових хвилин}); \quad \delta_5 = \frac{F_{2,5}}{F_{1,5}} \cos(\psi_5 + \alpha_5) \cdot 3438 = \frac{0,6151}{100} \cdot \cos(\arcsin(0,1544)) \cdot$$

$3438 \approx 20,89$ (кутових хвилин). Занесемо всі розраховані на даному етапі розрахунків дані до табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунків для визначення класу точності ТС

Розрахункові параметри і формули	Розрахунки при 5% первинного струму від номінального значення та $Z_{н\ 5} = Z_{н}$	Розрахунки при 120% первинного струму від номінального значення та $Z_{н\ 120} = 0,25 \cdot Z_{н}$
$R_{н} = Z_{н} \cdot \cos\varphi$, Ом	$2,2 \cdot 0,83 \approx 1,826$	$0,25 \cdot 2,2 \cdot 0,83 \approx 0,457$
$X_{н} = Z_{н} \cdot \sin\varphi$, Ом	$2,2 \cdot 0,558 \approx 1,228$	$0,25 \cdot 2,2 \cdot 0,558 \approx 0,307$
$Z_2 = \sqrt{(R_2 + R_{2,обм})^2 + X_2^2}$, Ом	$\sqrt{(1,826 + 23,01)^2 + 1,228^2} = 24,86$	$\sqrt{(0,457 + 23,01)^2 + 0,307^2} = 23,46$
I_2 , А	$2 \cdot 0,05 = 0,1$	$2 \cdot 1,2 = 2,4$
$\alpha = \arctg\left(\frac{X_2}{R_2 + R_{2,обм}}\right)$, градусів	$\arctg\left(\frac{1,228}{1,826 + 23,01}\right) \approx 2,829$	$\arctg\left(\frac{0,307}{0,457 + 23,01}\right) \approx 0,7491$
$E_2 = I_2 \cdot Z_2$, В	$0,1 \cdot 24,62 = 2,486$	$2,4 \cdot 23,23 = 56,31$
$B = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot q_{магн}}$, ТЛ	$\frac{2,486}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 4320 \cdot 10^{-6}} \approx 0,002461$	$\frac{56,31}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 4320 \cdot 10^{-6}} \approx 0,05575$
Питома МРС F_0 , А/м, (за Додатком 1)	0,8192	3,787
Повна МРС $F_0 \cdot l_{сер}$, А	$0,8192 \cdot 0,7508 \approx 0,6151$	$3,787 \cdot 0,7508 \approx 2,844$
Кут втрат ψ , градусів (за Дод. 1)	6,055	29,36
$\sin(\psi + \alpha)$	$\sin(6,312 + 2,856) \approx 0,1593$	$\sin(29,71 + 0,757) \approx 0,5071$
МРС $F_1 = I_{1н} \cdot w_1$, А	$4 \cdot 500 \cdot 0,05 \cdot 1 = 100$	$4 \cdot 500 \cdot 1,2 \cdot 1 = 2400$
$f_i = -\frac{F_2}{F_1} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100$, %	$-\frac{0,6151}{100} \cdot 0,1544 \cdot 100 \approx -0,09499$	$-\frac{2,844}{2400} \cdot 0,5017 \cdot 100 \approx -0,05944$
$\delta = \frac{F_2}{F_1} \cos(\psi + \alpha) \cdot 3438$, кут. хв.	$\frac{0,6151}{100} \cdot \cos(\arcsin(0,1544)) \cdot 3438 \approx 20,89$	$\frac{2,844}{2400} \cdot \cos(\arcsin(0,5017)) \cdot 3438 \approx 3,524$

Одержані розрахункові значення струмових та кутових похибок є суттєво меншими, ніж зазначені в ДСТУ EN 61869-2:2017 для класу точності 0,2, тому побудова ТС із заданими характеристиками є принципово можливою.

Якщо під час виконання розрахунків одержані характеристики ТС не відповідають вимогам до відповідного класу точності за ДСТУ EN 61869-2:2017, про це потрібно написати та визначити клас точності, якому відповідає проектуваний ТС (в такому випадку уточнюючі розрахунки даної частини проектування не виконуються).

Одержані характеристики розраховані для максимально можливих габаритів магнітопроводів ТС, тому, оскільки при розрахунках одержано значний запас у похибках (як по струму, так і по куту), виконаємо розрахунок параметрів магнітопроводів для найменших габаритів магнітопроводу (найменших витрат трансформаторної сталі), за яких ще виконується умова входження проектного ТС у клас точності 0,2.

Також, для коригування струмової похибки можна виконувати відмотування витків вторинної обмотки (виткова корекція). Ціна струмової похибки одного відмотаного витка, у відсотках, складає:

$$\Delta f_i = \frac{100\%}{w_2} = \frac{100}{1000} = 0,1 (\%). \quad (45)$$

Так, відмотування 1 витка вторинної обмотки призведе до зміни похибок, розрахованої у табл. 4: $f_{i_{120}} = -0,05944 + 0,1 = +0,04056 (\%)$; $f_{i_5} = -0,09499 + 0,1 = +0,00501 (\%)$. Змінами знаків кутових похибок при витковій корекції нехтують (важливим є модуль значення похибки).

Виконаємо уточнюючі розрахунки. Будемо покроково зменшувати ширину стрічки електротехнічної сталі ($b_{\text{магн}}$) поки струмова та кутова похибки ще залишатимуться в межах нормованих значень для класу точності 0,2 у відповідності до ДСТУ EN 61869-2:2017. Кожного разу, зменшуючи величину $b_{\text{магн}}$, будемо перераховувати всі значення, отримані на першій ітерації розрахунків і заносити у табл. 5. При значенні $b_{\text{магн}} = 25 \text{ мм}$

отримуємо наступні характеристики похибок ТС: $f_{i_5} = -0,3603\%$; $f_{i_120} = -0,1082\%$; $\delta_5 = 31$ кут.хв.; $\delta_{120} = 4,911$ кут.хв. Струмові похибки для цього значення ширини стрічки трансформаторної сталі магнітопроводу відповідають нормованим значенням, а кутова похибка для 5% від номінального струму первинної обмотки не відповідає за ДСТУ EN 61869-2:2017. Якщо кутові похибки відповідають нормованим значенням, а не відповідають струмові, намагаються виконати виткову корекцію, відмотуючи на вторинній обмотці кількість витків, кратну 4 і нові значення струмових похибок визначають за формулою (45). У випадку проектного ТС не відповідають нормованим значенням кутові похибки тому, для остаточного уточнення розрахунку приймаємо $b_{\text{магн}} = 30$ мм. Дані уточнюючих розрахунків наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Результати уточнюючих розрахунків для визначення класу точності ТС

Розрахункові параметри і формули	Розрахунки при 5% первинного струму від номінального значення та $Z_{H\ 120} = Z_H$	Розрахунки при 120% первинного струму від номінального значення та $Z_{H\ 120} = 0,25 \cdot Z_H$
$Z_2 = \sqrt{(R_2 + R_{2_обм})^2 + X_2^2}$, Ом	$\sqrt{(1,826 + 7,557)^2 + 1,228^2} \approx 9,463.$	$\sqrt{(0,457 + 7,557)^2 + 0,307^2} \approx 8,019.$
$\alpha = \arctg\left(\frac{X_2}{R_2 + R_{2_обм}}\right)$, градусів	$\arctg\left(\frac{1,228}{1,826 + 7,557}\right) \approx 7,451.$	$\arctg\left(\frac{0,307}{0,457 + 7,557}\right) \approx 2,192.$
$E_2 = I_2 \cdot Z_2$, В	$0,1 \cdot 9,463 = 0,9463$	$2,4 \cdot 8,019 = 19,25$
$B = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot q_{\text{магн}}}$, Тл	$\frac{0,9463}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 852,6 \cdot 10^{-6}} \approx 0,004996.$	$\frac{19,25}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 852,6 \cdot 10^{-6}} \approx 0,1016.$
Питома МРС F_0 , А/м, (за Додатком 1)	1,199	5,305
Повна МРС $F_0 \cdot l_{\text{сер}}$, А	$1,199 \cdot 0,7508 \approx 0,9006$	$5,305 \cdot 0,7508 \approx 3,983$
Кут втрат в сталі ψ , градусів (за Додатком 1)	12,29	34,1
$\sin(\psi + \alpha)$	$\sin(12,29 + 7,451) \approx$	$\sin(34,1 + 2,192) \approx$

	0,3378.	0,5919.
$f_i = -\frac{F_2}{F_1} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100, \%$	$-\frac{0,9006}{100} \cdot 0,3378 \cdot 100 \approx -0,3042.$	$-\frac{3,983}{2400} \cdot 0,5919 \cdot 100 \approx -0,09823.$
$\delta = \frac{F_2}{F_1} \cos(\psi + \alpha) \cdot 3438, \text{ кут. хв.}$	$\frac{0,9006}{100} \cdot 0,9412 \cdot 3438 \approx 29,14.$	$\frac{3,983}{2400} \cdot 0,806 \cdot 3438 \approx 4,599.$

Дані останніх двох рядків табл. 5 відповідають вимогам класу точності 0,2 проектованого ТС, у відповідності до ДСТУ EN 61869-2:2017.

2.4. Розрахунок стійкості трансформатора струму до теплового пробою

Тепловий пробій – це порушення теплової рівноваги, що може виникнути при тривалому режимі роботи ТС типу ТФУМ і в результаті якого спостерігають зростання температури і, як наслідок, руйнування ПМКІ. Тепловий пробій настає, коли тепловиділення всередині порцелянової покритишки перевищує тепловіддачу з її поверхні.

У конструкції ТФУМ тепловиділення відбувається не тільки за рахунок джоулевих втрат у матеріалі обмоток, але і внаслідок втрат у шарах ПМКІ – діелектричних втрат пропорційних $\text{tg}\delta$, які швидко і нелінійно зростають при збільшенні температури.

На рис. 10 представлені типові криві тепловиділення і тепловіддачі ТС.

Взаємне розташування кривих тепловиділення і тепловіддачі, показане на рис. 10, свідчить про те, що стійку теплову рівновагу спостерігають тільки при температурі $\Theta = \Theta_A$.

Якщо за будь-якої причини, наприклад, внаслідок збільшення струму I_1 , температура Θ зростає ($\Theta > \Theta_A$), то, згідно рис. 10, потужність тепловіддачі перевищує потужність тепловиділення ($P_{\text{від}} > P_{\text{вид}}$) і температура повертається до вихідного значення Θ_A . При зниженні температури ($\Theta < \Theta_A$), повернення до значення Θ_A відбувається через те, що в цьому випадку $P_{\text{від}} < P_{\text{вид}}$. Якщо $\Theta > \Theta_B$ температура зростає і тепловий пробій неминучий.

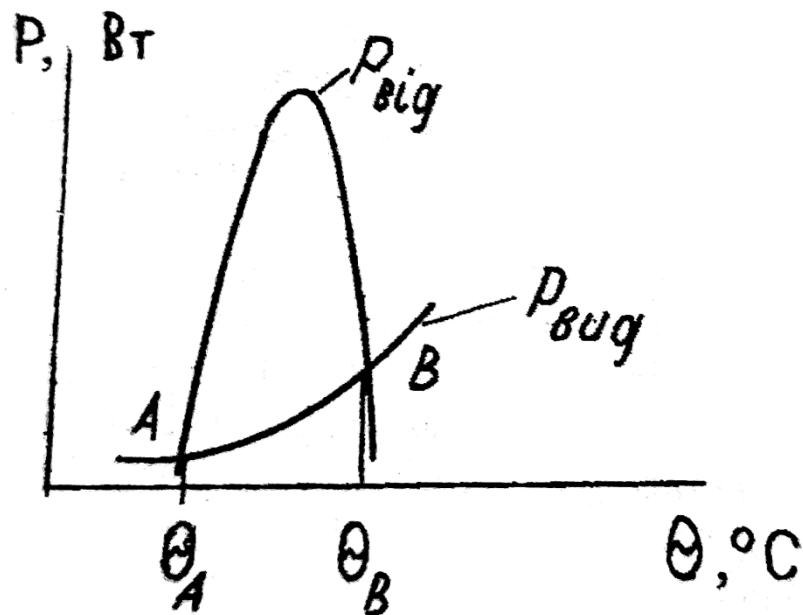


Рисунок 10 – Криві тепловиділення і тепловіддачі ТС.

Розрахунок стійкості ТС до теплового пробою проводять за методикою *крок за кроком*. Задають низку значень температури проводів первинної обмотки: 120, 110, 100, ... , 50, 40, 30 °С. Для кожного значення температури визначають втрати в проводах первинної обмотки, що приходяться на одну *ногу* ТС.

Розглянемо розрахунок стійкості проектного ТС до теплового пробою на прикладі. З попередніх етапів розрахунків обираємо числові значення розрахованих параметрів для використання в даному розрахунку.

Приймаємо довжину провідників первинної обмотки ТС рівною довжині внутрішньої обкладинки ПМКІ: $l = l_1 = 2210$ мм. Максимальний струм первинної обмотки $I = 4 \cdot I_{1н} = 4 \cdot 500 = 2000$ А при включенні всіх 4 секцій (витків) паралельно ($w_1 = 1$). Переріз одного провідника (обраної шини прямокутного перерізу) первинної обмотки становить $q_{1_1} = a \cdot b = 10 \cdot 70 = 700$ (мм). Сумарний переріз 4 провідників $q_{1_4} = 700 \cdot 4 = 2800$ (мм²). Приймаємо, що температура навколишнього повітря становить $\theta_0 = 30$ °С.

Виконаємо перший крок теплового розрахунку – обчислимо теплові характеристики ТС за усталеної температури нагріву провідників первинної

обмотки первинним струмом до температури $\Theta = 120$ °С. Активний опір R_{Θ} на одну «ногу» (половину первинної обмотки) ТС при заданій температурі визначаємо за формулою:

$$R_{\Theta} = \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\Theta_i - 20)) \cdot l_i}{q_{1-4}}. \quad (46)$$

$$R_{120} = \frac{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 20)) \cdot 2190 \cdot 10^{-3}}{2800 \cdot 10^{-6}} \approx 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

Обчислимо потужність, яка виділяється в первинній обмотці при проходженні по ній номінального струму 2000 А:

$$P_{\Theta} = I^2 \cdot R_{\Theta}; P_{120} = I^2 \cdot R_{120}. \quad (47)$$

$P_{120} = 2000^2 \cdot 1,84 \cdot 10^{-5} \approx 73,58$ (Вт). Окрім втрат на активному опорі первинної обмотки, теплові втрати на змінному струмі також відбуваються в діелектрику – шарах паперово-масляної конденсаторної ізоляції. Ці втрати описуються формулою:

$$\Delta P_i = \Delta U_i^2 \cdot \omega \cdot C_i \cdot \operatorname{tg} \delta_i, \quad (48)$$

де ΔP_i – потужність тепловиділення в i -му прошарку ПМКІ, починаючи від проводів первинної обмотки, Дж; ΔU_i – напруга між обкладинками, між якими розташовано i -й прошарок ПМКІ, В; C_i – ємність i -го прошарку ПМКІ, Ф; ω – кутова частота струму, рад/с; $\operatorname{tg} \delta_i$ – тангенс кута діелектричних втрат i -го прошарку ПМКІ, який визначається для ПМКІ за формулою:

$$\operatorname{tg} \delta_i = 0,005 \cdot e^{0,02 \cdot (\Theta_i - 20)}. \quad (49)$$

Якщо прийняти, що потужність втрат в ПМКІ рівномірно розподілена по шару, можна визначити різницю температур для середини кожного шару за формулою:

$$\Delta \Theta_i = \frac{(P_{i-1} + 0,5 \cdot \Delta P_i) \cdot \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{i3} \cdot (l_i - \lambda)}, \quad (50)$$

де r_i – радіус i -ї обкладинки ПМКІ, мм; l_i – довжина i -ї обкладинки ПМКІ, м; λ – довжина уступів між головними обкладинками ПМКІ, м; λ_{i3} – коефіцієнт теплопровідності ПМКІ ($\lambda_{i3} = 2 \cdot 10^{-4}$ Вт/(мм·К)). Для першого шару ПМКІ в

якості значення P_{i-1} обирають потужність виділення у провідниках первинної обмотки.

Температуру в кожному прошарку ПМКІ визначають за формулою:

$$\Theta_i = \Theta_{i-1} - \Delta\Theta_i. \quad (51)$$

Для першого прошарку ПМКІ $\Theta_{i-1} = \Theta$, тобто, дорівнює температурі проводів первинної обмотки.

Потужність, яка виділяється в кожному шарі ПМКІ дорівнює сумі потужності, що виділяється в цьому шарі та потужності, що виділяється у внутрішніх, по відношенню до нього, шарах:

$$P_i = P_{i-1} + 0,5 \cdot \Delta P_i. \quad (52)$$

Для першого шару ПМКІ до потужності, що виділяється в діелектрику, додається потужність, що виділяється в провідниках первинної обмотки.

Виконаємо розрахунки за формулами (48 – 52) і занесемо результати в табл. 6. Дані про радіуси та довжини обкладинок ПМКІ, ємність шарів беремо з табл. 3 попередньо виконаних розрахунків. Дані по розподілу напруг між шарами ПМКІ не відповідають зазначеним в табл. 3, оскільки ці напруги розраховані для витримуваної напруги промислової частоти $U_{\text{внт}_50} = 460$ кВ, а тепловий розрахунок виконується для найбільшої робочої фазної напруги $\frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{300}{\sqrt{3}}$. Тому, відповідні значення ΔU_i , з табл. 3 необхідно домножувати на відношення $\frac{U_m}{U_{\text{внт}_50 \cdot \sqrt{3}}} = \frac{300}{460 \cdot \sqrt{3}} \approx 0,377$. В якості прикладу розрахуємо значення для перших двох рядків табл. 6:

$$tg\delta_1 = 0,005 \cdot e^{0,02 \cdot (120-20)} \approx 0,0369;$$

$$\Delta P_1 = \left(\frac{36,55 \cdot 300}{460 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^3 \right)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,668 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0369 \approx 8,064 \text{ (Вт)};$$

$$\Delta\Theta_1 = \frac{(73,58 + 0,5 \cdot 8,064) \cdot \ln\left(\frac{47}{42}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot (2190 - 130)} \approx 3,372 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$\Theta_1 = 120 - 3,372 = 116,6 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$P_1 = 73,58 + 0,5 \cdot 8,064 = 77,62 \text{ (Вт)}.$$

$$tg\delta_2 = 0,005 \cdot e^{0,02 \cdot (116,6 - 20)} \approx 0,0345;$$

$$\Delta P_2 = \left(\frac{35,07 \cdot 300}{460 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^3 \right)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,823 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0345 \approx 7,232;$$

$$\Delta \theta_2 = \frac{(77,62 + 0,5 \cdot 7,232) \cdot \ln\left(\frac{52}{47}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot (2060 - 130)} \approx 3,397;$$

$$\theta_2 = 116,6 - 3,397 = 113,2;$$

$$P_2 = 77,62 + 0,5 \cdot 7,232 = 81,23.$$

Аналогічно розраховують значення для інших комірок табл. 6.

Таблиця 6

Результати розрахунків тепловиділення та температур у шарах ПМКІ

Номер обкладинки ТС	C_i , нФ	ΔU_i , кВ	$\theta = 120^\circ \text{C}$			
			ΔP_i , Вт	$\Delta \theta_i$, $^\circ \text{C}$	θ_i , $^\circ \text{C}$	P_i , Вт
1	3,668	13,76	8,064	3,372	116,6	77,62
2	3,823	13,2	7,232	3,397	113,2	81,23
3	3,927	12,86	6,579	3,45	109,8	84,52
4	3,978	12,69	6,062	3,535	106,2	87,55
5	3,977	12,69	5,649	3,658	102,6	90,38
6	3,924	12,87	5,322	3,824	98,76	93,04
7	3,818	13,22	5,066	4,045	94,72	95,57
8	3,661	13,79	4,873	4,337	90,38	98,01
9	3,451	14,63	4,74	4,724	85,66	100,4
10	3,19	15,83	4,667	5,247	80,41	102,7
11	2,876	17,55	4,659	5,977	74,43	105
12	2,51	20,11	4,737	7,043	67,39	107,4

Загальна потужність тепловиділення в проводах та ізоляції на одну «ногу» первинної обмотки зазначена в останньому рядку і останній колонці табл. 6 ($P_{\text{сум}} = 107,4$ Вт). Температура поверхні ізоляції первинної обмотки може бути наближено визначена, як температура останньої обкладинки (останній рядок, передостання колонка табл. 6). Вся потужність тепловиділення первинної обмотки та її ізоляції передається середовищу трансформаторного масла всередині баку та покритишки ТС. За рахунок конвекції масла можемо прийняти, що воно набуває температури зовнішньої обкладинки МПКІ у всьому об'ємі при тривалому режимі роботи, тобто,

$\Theta_m = \Theta_{i_зовн} = 67,39 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Будемо вважати, що за найгірших умов роботи теплота від нагрітого масла до більш холодного повітря навколишнього середовища передається виключно через порцелянову покришку ТС.

Для розрахунку різниці температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями порцелянової покришки необхідно визначити загальну потужність, яка генерується всередині ТС. Сумарна потужність, що виділяється у вторинних обмотках чотирьох магнітопроводів може бути наближено оцінена за величиною активних втрат в проводах вторинних обмоток (втратами в сталі можна нехтувати) за формулою:

$$P_2 = 4 \cdot I_{2н}^2 \cdot R_{2_обм}. \quad (53)$$

Для останнього варіанту розрахунку класу точності ТС можемо записати: $P_2 = 4 \cdot 2^2 \cdot 7,557 \approx 120,9 \text{ (Вт)}$.

Сумарна потужність тепловиділення всередині покришки розраховується за формулою (враховується тепловиділення в двох «ногах» ТС):

$$P_{\text{вид}} = 2 \cdot P_{\text{сум}} + P_2. \quad (54)$$

Загальна потужність тепловиділення при температурі нагріву провідників первинної обмотки до температури $\Theta = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ становить: $P_{\text{вид}} = 2 \cdot 107,4 + 120,9 = 335,7 \text{ (Вт)}$.

Порцелянова покришка ТС має висоту $H = 2038 \text{ мм}$ і площу зовнішньої поверхні $F_{\text{нов}}$, яку визначають зі співвідношення, що залежить від величини витримуваної напруги промислової частоти: для $U_{\text{вум}_50} = 230 \text{ кВ}$ $F_{\text{нов}} = 25 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$; для $U_{\text{вум}_50} = 460 \text{ кВ}$ $F_{\text{нов}} = 33 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$; для $U_{\text{вум}_50} = 510 \text{ кВ}$ $F_{\text{нов}} = 46 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$. Для всіх інших значень витримуваних напруг площу зовнішньої поверхні порцелянової покришки визначають методом лінійної інтерполяції. Для проектного ТС за напруги $U_{\text{вум}_50} = 460 \text{ кВ}$ $F_{\text{нов}} = 33 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$.

Різницю температури між внутрішньою та зовнішньою поверхнями порцелянової покришки визначимо за формулою:

$$\Delta\Theta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{вид}} \cdot \ln\left(\frac{D_{\text{зовн}}}{D_{\text{вн}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot H}, \quad (55)$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності порцеляни ($\lambda_n = 9 \cdot 10^{-4}$ Вт/(мм·К)); $D_{вн}$ – внутрішній діаметр порцелянової покритишки ($D_{вн} = D_{бак} = 548$ мм); $D_{зовн}$ – зовнішній діаметр порцелянової покритишки ($D_{зовн} = D_{вн} + 2 \cdot S_n = 548 + 2 \cdot 25 = 598$ мм). Відповідно, різниця температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями порцелянової покритишки при температурі нагріву провідників первинної обмотки до температури $\Theta = 120$ °С становить: $\Delta\Theta_{\pi} = \frac{335,7 \cdot \ln\left(\frac{598}{548}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{-4} \cdot 2038} \approx 2,543$ (°С). Відповідно, температуру зовнішньої поверхні порцелянової покритишки визначаємо за формулою:

$$\Theta_{\pi} = \Theta_m - \Delta\Theta_{\pi}. \quad (56)$$

Для температури нагріву провідників первинної обмотки до температури $\Theta = 120$ °С температура зовнішньої поверхні порцелянової покритишки становить $\Theta_{\pi} = 67,39 - 2,543 = 64,85$ (°С).

Теплоту, яка віддається з поверхні порцелянової покритишки ТС, нагрітої до температури Θ_{π} , у навколишнє середовище з температурою повітря $\Theta_0 = 30$ °С, розраховують за формулою Ньютона:

$$P_{від} = F_{пов} \cdot k_T \cdot (\Theta_{\pi} - \Theta_0), \quad (57)$$

Де k_T – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище теплоти з поверхні порцелянової покритишки ($k_T = 2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·К)). Для температури нагріву провідників первинної обмотки до температури $\Theta = 120$ °С потужність, яка віддається в навколишнє середовище з зовнішньої поверхні порцелянової покритишки становить $P_{від} = 33 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot (64,85 - 30) = 2300$ (Вт).

Одержане значення потужності тепловіддачі $P_{від} = 2300$ Вт перевищує значення потужності тепловиділення всередині ТС $P_{вид} = 335,7$ Вт, що означає, що напрямок теплового потоку спрямований зсередини ТС назовні. Ознакою точки теплової рівноваги Θ_A , у відповідності до рис. 10, є зрівняння значень потужностей тепловиділення і тепловіддачі. Для знаходження точки теплової рівноваги виконують всі розрахунки за формулами (46 – 57), приймаючи значення температури нагріву провідників первинної обмотки,

покроково, меншими, ніж 120 °С. Розраховані значення потужностей тепловиділення і тепловіддачі для кожного значення температури нагріву провідників первинної обмотки заносять в табл. 7. Дані табл. 7 надалі будуть використовуватись для побудови графічних залежностей (за аналогією з рис. 10), тому від температури $\Theta = 120$ °С до температури $\Theta = \Theta_A$ °С в таблиці мають бути представлені, щонайменше, 10 пар значень.

Таблиця 7

Результати розрахунку потужностей тепловиділення і тепловіддачі
проектowanego ТС для різних температур нагріву первинної обмотки

Θ , °С	120	115,5	111	106,5	102	97,5	93	88,5	84	79,5	75
$P_{\text{вид}}$, Вт	335,7	328,6	321,8	315,4	309,3	303,6	298,1	293	288	283,3	278,9
$P_{\text{від}}$, Вт	2300	2108	1910	1708	1500	1288	1072	852	628,7	402,2	172,8

На основі даних табл. 7 будуюмо графіки залежностей потужностей тепловиділення та тепловіддачі від температури нагріву провідників первинної обмотки. Координата по вісі абсцис точки перетину цих графіків є точкою теплової рівноваги.

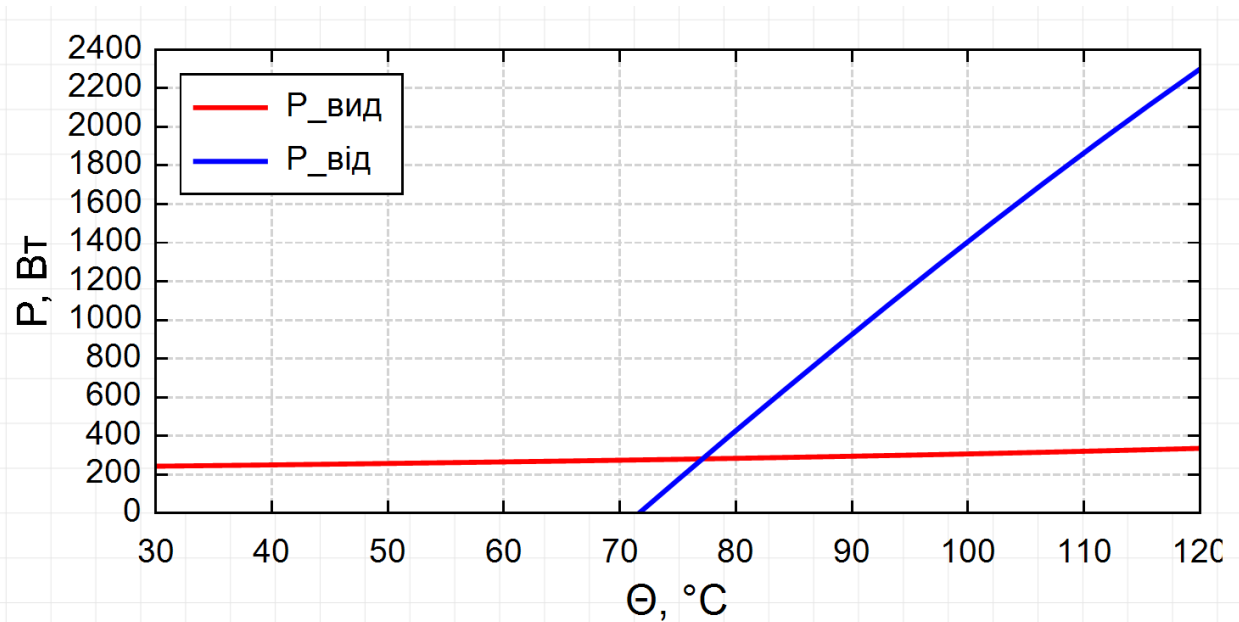


Рисунок 11 – Графіки залежностей потужностей тепловиділення та тепловіддачі від температури нагріву провідників первинної обмотки.

Згідно графіків рис. 11 та даних табл. 7 точку теплової рівноваги Θ_A розраховуємо як точку перетину двох відрізків прямих, представлених за відомими значеннями в останніх двох колонках табл. 7. Отримуємо значення $\Theta_A = 77,38$ °С.

2.5. Розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки

Нормальний режим роботи ТС – режим короткого замикання, тому, якщо відводи вторинної обмотки замкнені на навантаження з високим опором, або взагалі розімкнені, МРС первинної обмотки не компенсується струмами у вторинній обмотці, внаслідок чого відбувається різке збільшення індукції в магнітопроводі і, як наслідок, різко збільшений магнітний потік генерує ЕРС у витках вторинної обмотки, що може бути небезпечною як для ізоляції ТС, так і для персоналу, що обслуговує ТС. Для того, щоб розраховувати потенційно небезпечну ЕРС на розімкнених кінцях вторинної обмотки ТС використовують графічні залежності питомої ЕРС E_n (на один виток вторинної обмотки та на 1 см² перерізу магнітопроводу) від питомої МРС первинної обмотки на 1 см довжини середньої лінії магнітопроводу. Типові графіки такої залежності для використовуваної при проектуванні ТС сталі 3411 представлені на рис. 12.

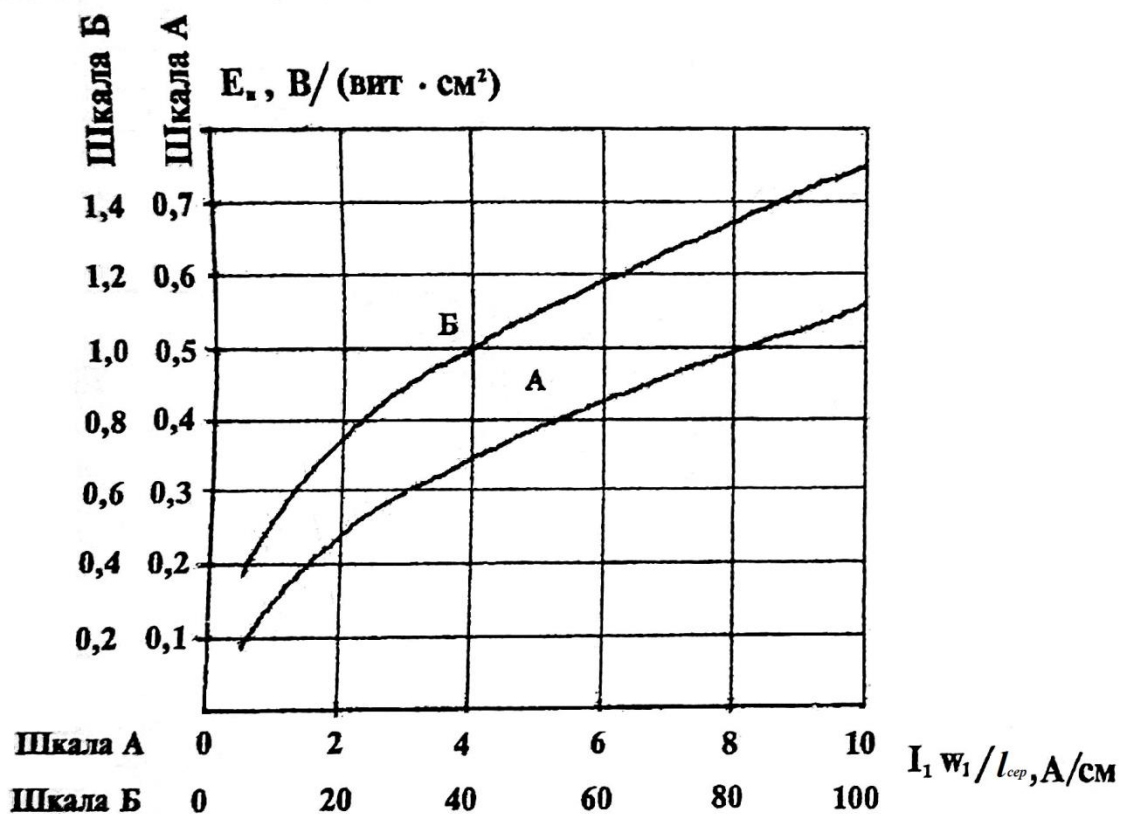


Рисунок 12 – Залежності питомої ЕРС (В/(вит. · см²)), що виникає на розімкнених кінцях вторинної обмотки ТС, від питомої МРС первинної обмотки (А/см).

Значення ЕРС на розімкнених кінцях вторинної обмотки розраховують за формулою:

$$E_{max} = E_n \cdot w_2 \cdot q_{магн}. \quad (58)$$

Для проектованого ТС значення номінальної МРС первинної обмотки становить $I_{1н} \cdot w_1 = 500 \cdot 4 = 2000 \cdot 1 = 2000$ (А). Довжина середньої лінії магнітопроводу, згідно виконаних розрахунків, становить $l_{сер} = 750,8$ мм = 75,08 см. У відповідності до графіку рис. 12, відношення $\frac{I_{1н} \cdot w_1}{l_{сер}} = \frac{2000}{75,08} \approx 26,64$ (А/см), а на графіку кривої **Б** йому відповідає значення $E_n = 0,8406$ В/(вит. · см²). Загальна кількість витків вторинної обмотки $w_2 = 1000$ витків; переріз магнітопроводу для останнього розрахунку класу точності ТС становить $q_{магн} = 852,6$ мм² = 8,526 см². За формулою (58) розраховуємо ЕРС на розімкнених кінцях вторинної обмотки: $E_{max} = 0,8406 \cdot 1000 \cdot 8,526 =$

7167 В. Оскільки розраховане значення перевищує 350 В, у паспорт трансформатора заносять запис: **Увага! Небезпечно! На розімкнутій обмотці висока напруга.**

2.6. Розрахунок динамічної стійкості трансформатора струму

На рис. 13 показано струмовідний контур первинної обмотки ТС типу ТФУМ. Прийнемо значення середньої відстані між «ногами» первинної обмотки $h_{сер} = 1,6 \cdot R = 1,6 \cdot 137 = 219$ мм, у відповідності до рис. 5, висота $l = y + H = 336 + 2038 = 2374$ мм, радіус $R = 137$ мм. З вихідних даних на проектування слідує, що ТС не повинен руйнуватися при паралельному з'єднанні секцій первинної обмотки внаслідок дії сил, які виникають при проходженні по витку ($w_1 = 1$) струму $I_d = K_d \cdot I_{1н} = I_{1н} \cdot K_t \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} = 2000 \cdot 33 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} = 168$ кА.

Сила відштовхування, яка виникає між вертикальними ділянками витка w_1 , у відповідності до рис. 13 б), визначається за формулою:

$$F_{1дин} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_d^2 \cdot \frac{2 \cdot (D - h_{сер})}{h_{сер}}, \quad (59)$$

де μ_0 – магнітна стала; D – діагональ прямокутника зі сторонами l та $h_{сер}$.

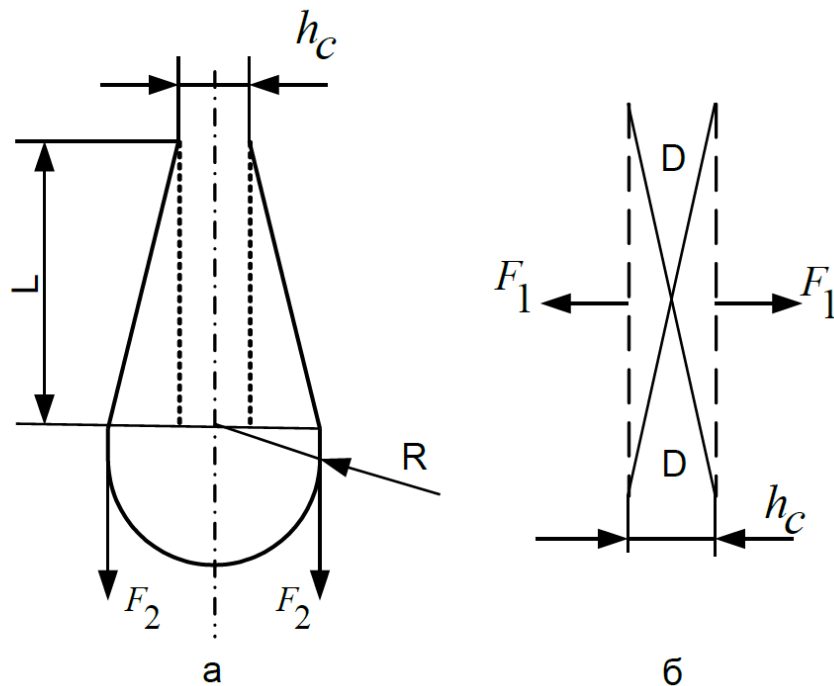


Рисунок 13 – До розрахунку електродинамічних сил в первинній обмотці ТС.

За формулою (59) одержуємо значення електродинамічної сили:

$$F_{1\text{дин}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \pi} \cdot 168000^2 \cdot \frac{2 \cdot (\sqrt{2374^2 + 219^2} - 219)}{219} \approx 56210 \text{ (Н)}.$$

Для запобігання деформації та руйнації провідників первинної обмотки від дії струму електродинамічної стійкості виконують бандажування (зтягування) вертикальних частин обмотки витками стрічки з синтетичного волокна, яка витримує навантаження на розрив 500 Н. Відповідно, бандажування має бути виконано у кількості витків, що не менше ніж:

$$N_{61} = \frac{F_{1\text{дин}}}{500} = \frac{56210}{500} \approx 113 \text{ (витків)}.$$

Для визначення електродинамічної сили, яка діє на розрив радіально викривленої частини первинної обмотки (рис. 13 а)), використовують формулу:

$$F_{2\text{дин}} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_{\text{д}}^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{R}{r_1} \right) - 0,75 \right), \quad (60)$$

де r_1 – зовнішній радіус джгута провідників первинної обмотки.

За формулою (60) одержуємо значення електродинамічної сили:

$$F_{2\text{дин}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \pi} \cdot 168000^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{137}{0,5 \cdot 84} \right) - 0,75 \right) \approx 1220 \text{ (Н)}.$$

Відповідно, для компенсації цієї сили необхідне бандажування радіально викривленої частини первинної обмотки кількістю витків $N_{62} = \frac{F_{2\text{дин}}}{500} = \frac{1220}{500} \approx 3 \text{ (витки)}.$

За виконаними розрахунками всі параметри проектного ТС відповідають умовам завдання на проектування.

Додаток 1

Таблиця 1

Залежність питомої МРС намагнічування F_n від індукції B_{max} для стрічкових магнітопроводів з електротехнічної сталі марки 3411 при частоті 50 Гц

B_{max} , Тл	F_n , А/м		B_{max} , Тл	F_n , А/м	
	Нижчий сорт сталі	Вищий сорт сталі		Нижчий сорт сталі	Вищий сорт сталі
0,002	0,75	0,22	0,105	8,1	5,42
0,004	1,05	0,44	0,11	8,3	5,6
0,006	1,35	0,66	0,115	8,5	5,82
0,008	1,65	0,88	0,12	8,7	6,05
0,01	1,85	1,1	0,125	8,9	6,1
0,012	2,05	1,25	0,13	9,1	6,25
0,014	2,25	1,39	0,135	9,31	6,37
0,016	2,45	1,53	0,14	9,5	6,5
0,018	2,65	1,67	0,145	9,7	6,62
0,02	2,85	1,81	0,15	9,9	6,75
0,022	3,05	1,93	0,155	10,1	6,87
0,024	3,25	2,05	0,16	10,3	7,01
0,026	3,45	2,17	0,165	10,5	7,13
0,028	3,6	2,29	0,17	10,7	7,25
0,03	3,8	2,41	0,175	10,9	7,37
0,032	3,95	2,52	0,18	11,1	7,5
0,034	4,1	2,64	0,185	11,3	7,67
0,036	4,25	2,67	0,19	11,6	7,75
0,038	4,45	2,88	0,195	11,8	7,92
0,04	4,6	3	0,2	12	8,11
0,042	4,75	3,1	0,25	14,8	10,2
0,044	4,95	3,2	0,3	17	10,8
0,046	5,1	3,3	0,35	18,5	11,8
0,048	5,3	3,4	0,4	20	12,5
0,05	5,45	3,5	0,45	21,6	13,2
0,052	5,61	3,6	0,5	23,1	14,3
0,054	5,75	3,7	0,55	24,6	14,7
0,056	5,9	3,8	0,6	26,8	15,9
0,058	5,95	3,9	0,65	29,3	17,1
0,06	6,11	4	0,7	31,6	17,7
0,062	6,32	4,15	0,75	34,2	19,2
0,07	6,55	4,3	0,8	37,3	20
0,075	6,77	4,45	0,85	39,6	20,6
0,08	7,12	4,6	0,9	43,6	22
0,085	7,3	4,75	0,95	47,3	22,8

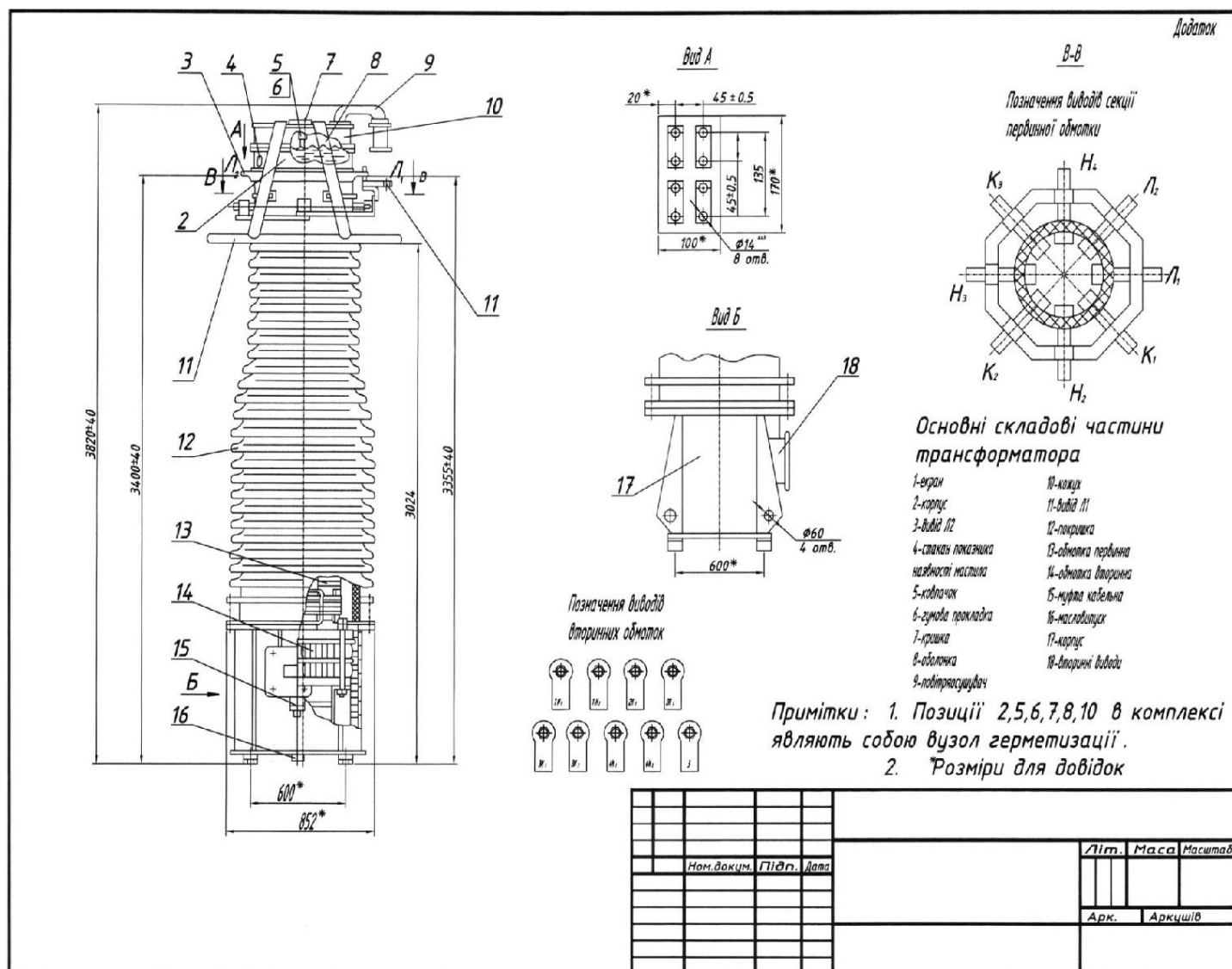
0,09	7,5	4,9	1	50,5	25,1
0,095	7,71	5,05	1,05	55,1	25,3
0,1	7,9	5,25	1,1	62	26,5

Таблиця 2

Залежність кута втрат ψ від індукції B_{max} для стрічкових магнітопроводів з електротехнічної сталі марки 3411 при частоті 50 Гц

B_{max} , Тл	ψ , °		B_{max} , Тл	ψ , °	
	Нижчий сорт сталі	Вищий сорт сталі		Нижчий сорт сталі	Вищий сорт сталі
0,01	24,6	17,1	0,15	41,2	37,3
0,125	25,6	18,5	0,2	43,5	39,3
0,015	26,5	19,3	0,25	45,6	40,6
0,02	27,8	21,5	0,3	47	41,6
0,025	29	23	0,35	48,7	42,3
0,03	30	24,5	0,4	50	42,7
0,035	31,2	25,4	0,45	51,9	43
0,04	31,8	27	0,5	53,2	43,1
0,045	32,5	28	0,55	54	43
0,05	33,2	28,5	0,6	55	42,5
0,06	34,5	30	0,65	56,2	42
0,07	35,5	31,2	0,7	58,2	41
0,08	36,5	32,2	0,8	58,3	39,5
0,09	37,5	33,4	0,9	58,9	37
0,1	38,1	34	1	59,1	34,2
0,125	40	35,5	1,1	58,5	30

Приклад креслення типового трансформатора струму типу ТФУМ



ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 61869-1:2017 «Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Загальні вимоги». – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 55 с.
2. ДСТУ EN 61869-2:2017 «Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Додаткові вимоги до трансформаторів струму». – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 57 с.
3. ДСТУ ІЕС 60044-1:2008 «Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Трансформатори струму». – Київ: Держспоживстандарт України, 2010. – 47 с.
4. Бачурин Н.И. Трансформаторы тока. — Л.: Энергия, 1964. — 376 с.
5. Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции. — М.: Энергоиздат, 1981. - 398 с.
6. Кучинский Т.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 366 с.
7. Аранасьев В.В. Трансформаторы тока. — Л.: Энергия, 1980. — 344 с.
8. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Под ред. В.В. Афанасьева. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 541 с.