

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання
науково-дослідного курсового проекту за фахом
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(освітня програма «Електричні машини і апарати»)
всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання науково-дослідного курсового проекту за фахом для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») всіх форм навчання / Укл.: І. М. Коцур, Д. О. Літвінов, Т. Є. Дівчук – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 100 с.

Укладачі:	І. М. Коцур, доцент, канд.техн.наук, Д. О. Літвінов, старш. викл., Т. Є. Дівчук, старш. викл.
Рецензент	Д.С. Яримбаш, доцент, докт. техн. наук
Відповідальний за випуск	Г.В. Дьомічева, зав.лаб.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол № 8
від «22» березня 2018р.

Затверджено до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол № 8
від «29» березня 2018р

ЗМІСТ

1 Мета та задачі курсового проекту.....	4
2 Завдання, обсяг та зміст курсового проекту.....	5
3 Методичні вказівки по розділам курсового проекту.....	7
3.1 Основи теорії трансформаторів струму.....	7
3.2 Автоматизоване проектування ТС.....	8
3.3 Розрахунок магнітної системи ТС по заданим технічним вимогам.....	8
3.4 Визначення густини струму в обмотках.....	9
3.5 Розрахунок головної ізоляції.....	15
3.6 Попередній розрахунок розмірів магнітної системи трансформатора.....	21
3.7 Математичне забезпечення автоматизованого проектування.....	25
3.8 Розрахунок електродинамічної стійкості трансформатора.....	26
3.9 Розрахунок погрішностей трансформатора.....	27
3.10 Погрішності трансформатора.....	36
3.11 Тепловий розрахунок трансформатора струму.....	45
3.12 Механічний розрахунок.....	52
Контрольні питання для самоперевірки і контролю підготовленості студента до захисту проекту.....	53
Перелік посилань.....	55
Додаток А. Бланк завдання на курсовий проект.....	70
Додаток Б.....	71
Додаток В. Загальні технічні умови на ТС по ГОСТ 7746-78.....	74
Додаток Г. Електромагнітні характеристики витих кільцевих магнітопроводів.....	76
Додаток Е. Розміри обмотувальних проводів.....	83
Додаток Ж. Габаритні розміри трансформаторів струму.....	87
Додаток К. Загальні види ТС. Основні вузли ТС.....	91
Додаток Л.....	98

1 МЕТА ТА ЗАДАЧІ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Метою курсового проекту є поглиблене вивчення матеріалу з тематики “Трансформатори струму”, засвоєння основних питань, особливостей та інженерної методики проектування сучасних трансформаторів струму на базі використання новітніх досягнень у галузі розрахунку та виробництва трансформаторів струму; підготовка студентів до самостійного вирішення інженерних задач при проектуванні та розробці трансформатора струму. Проектування трансформаторів струму припускає не тільки виконання заданих технічних вимог щодо метрологічних характеристик, але й визначення такого технічного рішення і таких параметрів, які б забезпечували найкращі (оптимальні) значення показників якості. Ефективне рішення такої задачі можливо тільки на основі автоматизації процесу проектування, що забезпечує можливість комплексного застосування ЕОМ, зроблених математичних моделей і методів пошуку рішень

Задачі курсового проекту – розрахунок та проектування трансформаторів струму згідно технічного завдання

2 ЗАВДАННЯ, ОБСЯГ ТА ЗМІСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Технічне завдання

Курсовий проект по розробці трансформаторів струму студенти виконують відповідно з завданням, яке видається керівником проекту на спеціальному бланку. Завдання включає в себе такі параметри: номінальну напругу, номінальний первинний та вторинний струм, номінальну потужність, клас точності, кратність первинного струму; матеріал обмотувального проводу – мідь або алюміній.

У додатку А наведені технічні дані різних варіантів проєктованих вимірювальних трансформаторів струму. Завдання підібрані таким чином, що курсовий проект разом з дипломним проєктом складає єдину систему послідовно ускладнюючих взаємопов'язаних проєктів.

Обсяг курсового проекту

Курсовий проект по розробці вимірювальних трансформаторів струму складається з розрахункової та графічної частин.

Розрахункова частина являє собою пояснювальну записку, оформлення якої виконується на аркушах формату А4. Оформлення рисунків, графіків та креслень може виконуватись за допомогою графічних пакетів AutoCAD, SolidWorks або Компас.

Графічна частина курсового проекту складається з двох листів креслень формату А1: на першому листі подається загальний вигляд трансформатору струму з уздовжним та поперечним розрізами, на другому – окремі деталі та вузли трансформатору струму (згідно вказівок керівника проекту).

Зміст курсового проекту

Пояснювальна записка повинна включати всі розділи, вказані у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Орієнтований обсяг розділів, термін виконання та захисту курсового проекту

Назва	Обсяг, %	Час виконання, годин	Термін виконання завдання, тиждень
1	2	3	4
Вступ			
1 Розрахунок магнітної системи трансформатора струму (ТС)	14	8	1-3
2 Розрахунок електродинамічної стійкості ТС	4	2	3
3 Розрахунок похибок ТС	18	10	5
4 Аналіз роботи ТС при великих кратностях первинного струму	6	3	6
5 Тепловий розрахунок	8	4	7
6 Оптимізація ТС	10	7	9
7 Розрахунок вітростійкості ТС	2	1	9
8 Розробка конструкції ТС та її описання з урахуванням економії природних ресурсів і охорони навколишнього середовища	8	5	10
Усього	70%	40	10

На виконання креслень та оформлення пояснювальної записки відводиться 16 годин, що складає 30% від загального обсягу часу.

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ПО РОЗДІЛАМ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

У вступній частині курсового проекту необхідно стисло охарактеризувати завдання розвитку електротехнічної промисловості, відобразити шляхи розвитку трансформаторів струму, указати на перспективи розробки конструкції ТС.

Необхідно відзначити нові рішення технічних питань в області розробки ТС, які б забезпечили їх високий рівень, надійність та довговічність роботи.

3.1 Основи теорії трансформаторів струму

Трансформатор струму (ТС) відноситься до вимірювальних електричних апаратів, до яких пред'являються вимоги перетворення контрольованого струму до стандартної величини, що підлягає виміру, та ізолювання вимірювальних приладів від ланцюга високої напруги. ТС – це трансформатор, у якому при нормальних умовах застосування вторинний струм пропорційний первинному і при правильному включенні, здвигнутий щодо нього на кут, близький до нуля /1-3/.

З позиції особливостей електромагнітних процесів трансформатори струму можна розділяти на два типи: симетричний ТС із повною симетрією магнітного й електричного ланцюгів та несиметричний ТС, у якого симетрія порушена через неповне заповнення магнітопроводу витками вторинної обмотки, або через асиметричне розташування первинної обмотки щодо магнітної системи.

До першого типу ТС можна віднести однодіапазонні убудовані ТС /1-3/ при рівномірному розподілі вторинної обмотки на магнітопроводі; убудовані ТС у випадку, коли робоча секція вторинної обмотки рівномірно розподілена на магнітопроводі, а також шинні ТС із крученим тороподібним магнітопроводом. До другого типу - шинні ТС із прямокутним, шихтованим магнітопроводом і зосередженою (котушковою) вторинною обмоткою, ТС із магнітопроводом типу "З", багатодіапазонні убудовані ТС при роботі на малих коефіцієнтах трансформації, коли робоча секція вторинної обмотки займає на магнітопроводі сектор $\alpha_2 < 2\pi$ або займає дробове число шарів, ТС із U-образною або петльовою первинною обмоткою.

3.2 Автоматизоване проектування ТС

Процес навчального проектування ТС організується у переривчасто-діалоговому режимі, тобто етапи проектування на ЕОМ чергуються з аналізом, ручним розрахунком і коректуванням результатів. При цьому використовуються дворівнева математична модель і принцип декомпозиції задачі проектування ТС. Перший рівень математичної моделі ТС служить для визначення початкових значень геометричних розмірів магнітопроводу. На другому етапі проектування за допомогою детальної алгоритмічної математичної моделі здійснюється пошук оптимального варіанта ТС і ріст його метрологічних показників.

3.3 Розрахунок магнітної системи ТС по заданим технічним вимогам

Перший етап розрахунку ТС є попереднім та призначений для визначення початкових значень основних перемінних математичної моделі (геометричних розмірів магнітної системи – зовнішнього (D_n), внутрішнього ($D_{вн}$) діаметрів і висоти (h) магнітопроводу) з урахуванням технічних вимог, пропонованих до проектуваного трансформатора (номінальних значень первинного ($I_{1н}$) і вторинного ($I_{2н}$) струмів, кратності струму термічної стійкості ($n_{1т}$) класу напруги, класу точності, типу ізоляції т.д.). Види і послідовність розрахунків, виконуваних на першому етапі наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Зміст першого етапу проектування ТС

№	Початкові дані $I_{1н}$, $I_{2н}$, $n_{1т}$, тип ізоляції, клас напруги ТС, клас точності	
1.1	Визначення густини струму обмоток ТС – J_1 , J_2	
	1.1.1	Розрахунок термічної стійкості
	1.1.2	Розрахунок J_1
	1.1.3	Розрахунок J_2
1.2	Розрахунок числа витків обмоток	
1.3	Розрахунок ізоляції	
1.4	Попередній розрахунок геометрії магнітної системи ТС	

3.4 Визначення густини струму в обмотках

Обмотки ТС повинні задовольняти ряду технічних вимог: термічної і механічної стійкості, забезпечувати необхідний рівень електричної міцності ізоляції, технологічності т.п.

При виборі густини струму в обмотках найбільш істотний вплив можуть зробити вимоги до термічної стійкості обмоток. Термічна стійкість ТС визначається часом протікання струму короткого замикання яка може задаватися в технічному завданні на проектування, або приймається відповідно до /1-2/:

$t_{кз} = 4$ с для ТС на номінальну напругу до 35 кВ;

$t_{кз} = 3$ с для ТС на номінальну напругу до 220 кВ;

$t_{кз} = 1$ с для ТС на номінальну напругу 330 кВ і вище.

Струм термічної стійкості - найбільше діюче значення струму короткого замикання за час $t_{кз}$, який ТС витримує протягом цього проміжку без нагрівання струмоведучих частин до температур, що перевищують припустимі при струмах короткого замикання і без ушкоджень, що перешкоджають його подальшій справній роботі /1/. Для наближеної оцінки теплового стану обмоток використовується залежність (рис.3.1) припустимої температури обмоток (θ_t) від теплового ефекту розрахункового перемінного струму, що діє в перебіг часу $t_{кз} - (J^2 \cdot t)_{кз}$. Припустима температура обмоток ТС приймається по табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Припустимі температури струмопровідних частин ТС

Тип ізоляції ТС, прилягаючої до струмоведучих частин	$\theta_t, ^\circ\text{C}$	
	мідь	алюміній
Повітря	300	200
Ізоляція класу В	300	200
Суха ізоляція класів У та А	250	200
Масляна та паперово-масляна ізоляція	200	200

Температура ТС, що відповідає тривалому протіканню номінального струму, звичайно приймається $\theta_0=90^\circ$. З урахуванням прийнятих значень температур θ_t і θ_0 необхідно визначити по рисунку 3.1 тепловий ефект струму $(J^2 \cdot t)_t$ і $(J^2 \cdot t)_0$. Вважаючи, що усе виділене в розглянутому режимі тепло йде на нагрівання трансформатора, тепловий ефект у режимі короткого замикання

$$(J^2 \cdot t)_{\kappa 3} = (J^2 \cdot t)_t - (J^2 \cdot t)_0, \quad (3.1)$$

звідси густина струму термічної стійкості ТС (А/мм²)

$$J_{\kappa 3} = \sqrt{\frac{(J^2 \cdot t)_{\kappa 3}}{t_{\kappa 3}}}. \quad (3.2)$$

Кратність струму термічної стійкості апарата (n_{1T}), що представляє собою відношення струму термічної стійкості до діючого значення номінального первинного струму I_1 , задається у вихідних даних на проектування. З урахуванням значення n_{1T} густина номінального струму первинної обмотки (виходячи з тривалого нагрівання номінальним струмом)

$$J_{1H} = J_{\kappa 3} / n_{1T} \cdot K_{зан}, \quad (3.3)$$

де $K_{зан} = 1, 1.1, 1.5$ - коефіцієнт запасу по термічній стійкості.

Перетин первинної обмотки виходячи з густини струму термічної стійкості (мм²)

$$q_{1T} = \frac{I_{1H}}{J_{\kappa 3}} = \frac{n_{1T} \cdot I_1}{J_{\kappa 3}}. \quad (3.4)$$

Для номінального режиму можна записати аналогічне співвідношення:

$$q_{1H} = I_{1H} / J_{\kappa 3}. \quad (3.5)$$

Як розрахункове значення q_{1p} приймається найбільше зі значень q_{1T} та q_{1H} . Остаточне значення перетину первинної, обмотки (q_{np1}) приймається по сортаменту на використаний провід (додаток Е) за умови, що $q_{np1} \geq q_{1p}$. Умова ця гарантує забезпечення необхідної кратності термічної стійкості ТС. Марка проводу первинної обмотки визначається конструкцією проектного ТС. У ТС із литою ізоляцією на напругу до 10 кВ багатовиткова первинна обмотка виконується з голої шинної міді (додаток Е.1) з намотуванням її на ребро та ізоляцією між витками з електрокартону.

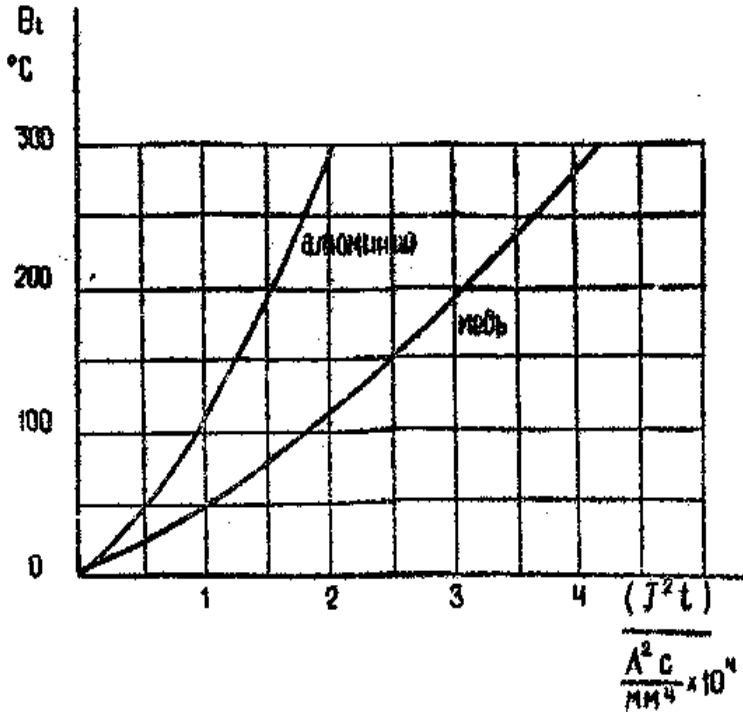


Рисунок 3.1 – Припустима температура обмотки в залежності від теплового ефекту розрахункового змінного струму

У ТС із паперовою ізоляцією первинна обмотка виконується з круглого проводу марки ПЛБД (АПЛБД) (при перетині $q_{npl} \leq 10 \dots 12 \text{ мм}^2$). При великих перетинах первинної обмотки застосовують мідний гнучкий провід ПВДО), ізольований двома шарами ізоляції та обпліткою з бавовняної пряжі (додаток Е.3). Струмопровідні жили проводу скручуються з окремих дрітків та провальцьовуються до одержання прямокутної форми. Коефіцієнт заповнення площі перетину проводу міддю дорівнює 0,8. Товщина ізоляції на дві сторони - 0,85 мм. При значних перетинах витка обмотки ($q_{npl} > 70 \text{ мм}^2$) його виконують з декількох рівнобіжних проводів. Розміри мідних і алюмінієвих проводів для одновиткових та багатовиткових первинних обмоток приведені у додатку Е.

3.4.1 Вторинна обмотка

Вторинна обмотка виконується з круглого проводу марки ПСД. При номінальному вторинній струмі 5 А звичайно використовують провід діаметром 1,81 мм, а при проектуванні ТС, призначених для роботи в закритих установках або при підвищеній температурі - провід діаметром 1,95...2,1 мм. При вторинному струмі 1 А діаметр проводу вибирають у межах 1,21...1,35 мм. Для використовуваних марок сталей кратність вторинного струму при номінальному навантаженні приймають не більш 40. Тому попередньо можна прийняти кратність вторинного струму рівній: $n_{2T} = n_{1T}$ при $n_{1T} \leq 40$ та $n_{2T} = 40$ при $n_{1T} \geq 40$.

Найбільший струм вторинної обмотки

$$I_{2кз} = I_{2н} \cdot n_{2T} . \quad (3.6)$$

З урахуванням прийнятого перетину проводу вторинної обмотки (q_{np2}) густина струму короткого замикання (А/мм²)

$$J_{2кз} = I_{2кз} / q_{np2} . \quad (3.7)$$

Якщо значення $J_{2кз} \leq I_{кз}$ (п.3.1), то вторинна обмотка вважається термічно стійкою. В іншому випадку ($J_{2кз} > I_{кз}$) необхідно збільшити перетин проводу вторинної обмотки або (якщо кратність термічної стійкості не обмежена, у технічному завданні) зменшити n_{1T} .

3.4.2 Визначення числа витків первинної обмотки

Практика конструювання ТС [1] показує, що ТС задовольняють технічним вимогам рівня, погрішностей [5] при мінімальному значенні МРС первинної обмотки $F_{1min} = 800 \dots 1000$ А. Це співвідношення може змінюватися в залежності від класу напруги ТС. При малих значеннях напруги (менше 35 кВ) внутрішній діаметр магнітопроводу (середня довжина) настільки зменшується, що ТС може бути виконаний з меншими значеннями МРС $F_{1min} = 600$ А. Збільшення кількості витків первинної обмотки зменшує погрішності ТС, але збільшує розміри первинної обмотки, що спричиняє збільшення маси провідникового матеріалу, розмірів і маси сталі магнітопроводу. Тому при визначенні числа витків первинної обмотки необхідно керуватися наступними розуміннями:

- в однодіапазонних ТС при $I_{In} \geq 1000$ А число витків $W_I=1$;
- при проектуванні ТС на два номінальних первинних струми (при $(I_{In \min} > 1000)$ з відношенням 1:2 - число витків $W_I = 2$. Перетин витка обмотки розраховується на менше значення номінальних струмів та при переході на більший струм обмотка з'єднується в дві рівнобіжні гілки;
- при проектуванні ТС на кілька (> 2) значень номінального первинного струму $I_{In1} \dots I_{Ini}$ необхідно для всіх значень струму визначити діапазон, у якому виконується співвідношення:

$$I_{Ini} \cdot W_{Ii} = \text{const.}$$

Припустимо, наприклад, що необхідно спроектувати відрізок серії ТС із номінальними первинними струмами $I_{In} = 15, 30, 40, 100, 150, 300, 600, 1000, 1500, 2000, 3000$ А. Для діапазону струмів $I_{In} = 15 \dots 600$ А номінальна кількість ампер-витків первинної обмотки, що задовольняє приведеній вище умові цілочисельності, дорівнює 600 А. При цьому число витків первинної обмотки можна розподілити по типовиконанню ТС у такий спосіб (табл.3.3):

Таблиця 3.3 – Розподілення числа витків первинної обмотки від первинного струму ТС

$F_1, \text{А}$	600						
$I_{Ini}, \text{А}$	15	30	40	100	150	300	600
W_{Ii}	40	20	15	6	4	2	1

Трансформатор з номінальними струмами 1000 А, 2000 А можна виконати з $W_I = 2$ і з розрахунковим струмом 1000 А. Аналогічно виконується первинна обмотка ТС зі струмами 1500 А та 3000 А ($W_I=2$, розрахунковий струм 1500 А). В останніх двох варіантах ТС при переході на великі первинні струми (2000 А та 3000 А) первинна обмотка з'єднується у дві рівнобіжні галузі.

3.4.3 Розрахунок розмірів первинної обмотки

При виконанні багатовиткової первинної обмотки з голої мідної шини, що має місце у ТС на напругу до 10 кВ, розміри обмотки у вікні магнітопроводу визначаються так (рис.3.2):

$b = b_{np}$ - більший розмір голої шини, мм;

d_1 - найбільший розмір перетину первинної обмотки, мм;

a_{np} - менший розмір голої шини, мм;

Δ_3 - товщина прокладки з електрокартону: $\Delta_3=0,8$ мм

$$d_1 = a_{np} \cdot w_1 + \Delta_3 \cdot (w_1 - 1). \quad (3.8)$$

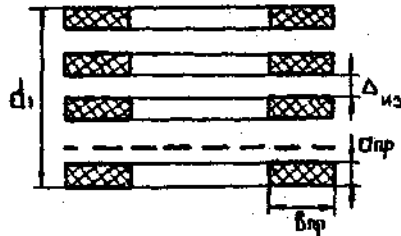
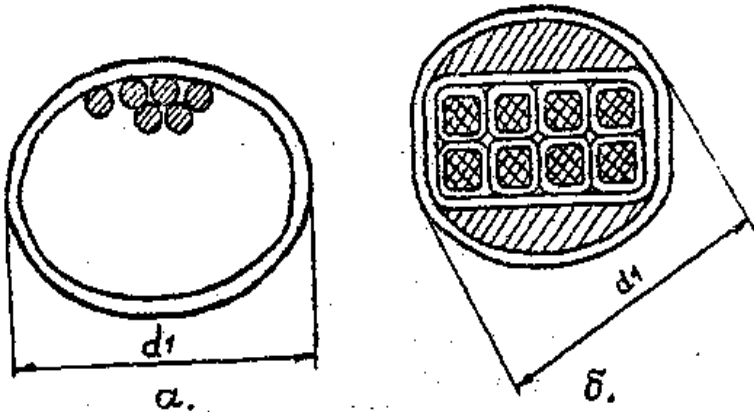


Рисунок 3.2 – Багатопровідна первинна обмотка з голої мідної шини

При виконанні багатовиткової первинної обмотки з ізованих провідників, їх розподіляють таким чином, щоб результуючий пере-

тин обмотки за формою був би як найближчим до кола (рис. 3.3.а). Найбільший розмір перетину d_1 первинної обмотки визначають з обліком власної ізоляції первинної обмотки, що накладається на неї. При значній відмінності перетину первинної обмотки від кола, що має місце при виконанні обмотки з прямокутного проводу ПВДО і великому перетині витка, може бути встановлена додаткова ізоляція, що наближає перетин первинної обмотки до кола. Найбільший розмір первинної обмотки d_1 визначається як діагональ фігури, утвореної провідниками у перетині обмотки (рис. 3.3.б).



а - провід круглого перетину;

б - провід ПВДО

Рисунок. 3.3 – Багатошарова первинна обмотка

3.5 Розрахунок головної ізоляції

3.5.1 Трансформатори з паперово-масляною ізоляцією

Точний розрахунок головної ізоляції досить складний, тому що необхідно враховувати характер розподілу електричного поля в ній як у номінальному режимі та режимі короткого замикання, так і при можливих перенапругах. Тому на практиці використовується спрощений метод розрахунку /1-3/.

У припущенні, що напруга подана на первинну обмотку 1, а зовнішня поверхня паперової ізоляції заземлена (рис. 3.4), розрахунок зводиться до визначення напруженості електричного поля (E , кВ/мм) між двома коаксіальними поверхнями з радіусами R і $d_1/2$.

$$E = \frac{U_{\text{розр}} \cdot K_{\text{зан}}}{d_1 / 2 \cdot \ln(2 \cdot R / d_1)}, \quad (3.9)$$

де:

$U_{\text{розр}}$ - розрахункове значення прикладеної напруги, кВ;

R - радіус зовнішньої поверхні ізоляції, мм;

d_1 - найбільший розмір перетину первинної обмотки, мм;

$K_{\text{зан}}$ - коефіцієнт запасу ($K_{\text{зан}} = 1,1 \dots 1,15$).

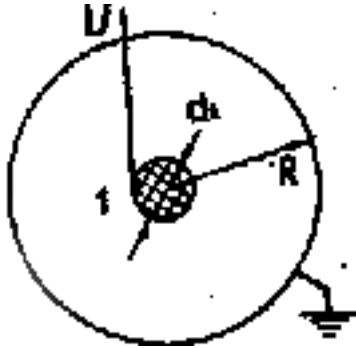


Рисунок 3.4 – Провід первинної обмотки з ізоляцією

У якості $U_{розр}$ варто приймати діюче значення найбільшої робочої фазної напруги для мереж з номінальною напругою 110 кВ і вище та діюче значення найбільшої робочої лінійної напруги для мереж з номінальною напругою до 35 кВ включно. Радіус зовнішньої поверхні ізоляції (мм):

$$R = \frac{d_1}{2} \cdot e^{\frac{2U_{розр} \cdot \kappa_{зан}}{E_p \cdot d_1}}. \quad (3.10)$$

У (3.10) напруженість електричного поля при робочій напрузі (E_p) приймається не більш ніж 4 кВ/мм [4]. (3.10) застосовується для розрахунку головної ізоляції обмоток U - образного і римовидного типу. При виконанні ТС на великі значення напруги доцільно з погляду зменшення ізоляційного проміжку поділяти головну ізоляцію на кілька ступіней [1-5].

Таблиця 3.4 – Значення найбільших робочих та іспитових напруг згідно ДСТ 1516.1-76

Номінальна напруга, кВ	Найбільша робоча напруга, кВ	Дослідна напруга, кВ
1	2	3
3	3.5	24
6	7.2	32
10	11.5	42
15	17.5	55
20	24	65

Продовження табл. 3.4

1	2	3
24	26.5	75
35	40.5	95
110	126	230
150	172	300
220	252	440
330	363	560
500	525	760

Після розрахунку розмірів головної ізоляції необхідно визначити по (3.9) значення напруженості електричного поля при іспитовій напрузі. Розрахункове значення напруженості електричного поля не повинне перевищувати 10 кВ/мм /4/.

3.5.2 Трансформатори з литою ізоляцією

Товщину головної ізоляції (мм) можна визначити:

$$\Delta_{из} = U_{розр} / E_p, \quad (3.11)$$

де E_p - середня напруженість електричного поля в литий ізоляції при робочій напрузі: $E_p = 2$ кВ/мм.

При виконанні ТС із литою ізоляцією на первинну обмотку накладають буферну ізоляцію з перфорованої та скляної стрічок. Однобічну товщину буферної ізоляції можна прийняти $\Delta_{буф} = 2$ мм. Мінімальна товщина головної литий ізоляції за умовами механічної міцності повинна бути не менш ніж 4 мм. Після розрахунку головної ізоляції необхідно визначити по (3.9) напруженість електричного поля в ізоляції при робочій і іспитовій напругах (див. табл. 3.4). Припустимі значення напруженості електричного поля /4/ приведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Допустимі значення напруженості електричного поля

Максимальна напруженості електричного поля при робочій напрузі	$E_{pmax} = 8$ кВ/мм
Допустима напруженість електричного поля при дослідній напруженості	$E_{pmax} = 20$ кВ/мм

При виконанні розрахунків по (3.11) радіус зовнішньої поверхні ізоляції (рис. 3.5) визначається (мм):

$$R = d_1 / 2 + \Delta_{\text{буф}} + \Delta_{\text{из}}. \quad (3.12)$$

3.5.3 Трансформатори з повітряною ізоляцією

При розрахунку ТС із повітряною ізоляцією відстань між обмотками визначається розрядною довжиною повітряного проміжку, для наближеної оцінки величини якого можна скористатися емпіричним виразом

$$\Delta_{\text{из}} = \frac{U_{\text{раз}} - 14}{0.316}. \quad (3.13)$$

де $\Delta_{\text{из}}$ – розрядна відстань від первинної обмотки, мм;

$U_{\text{раз}}$ – розрядна напруга, величина якої повинна забезпечити відсутність розрядів при будь-якій можливій перенапрузі, включаючи дослідну напругу, кВ.

При розрахунку ізоляції можна прийняти

$$U_{\text{раз}} = 1.4 \cdot U_{\text{вин}}.$$

Приведений вираз (3.13) справедливий при величині проміжку $\Delta_{\text{из}} < 1200$ мм. Первинна обмотка ТС із повітряною ізоляцією виконується у виді прямокутної шини, тому необхідно враховувати при визначенні радіуса зовнішньої поверхні ізоляції (мм) наступне (рис.3.5)

$$R = 0.707 \cdot b + \Delta_{\text{из}}, \quad (3.14)$$

b – розмір більшої сторони прямокутної шини, мм

Визначення внутрішнього діаметру магнітопроводу

При відомих розмірах первинної обмотки (d_1) та головної ізоляції ($\Delta_{\text{из}}$) діаметр вікна магнітопроводу (мм)

$$d_0 = d_1 + 2 \cdot \Delta_{\text{буф}} + 2 \cdot \Delta_{\text{из}}. \quad (3.15)$$

Кількість витків у шарі вторинної обмотки

$$W_{\text{сл2}} = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot \alpha_2 \cdot k_{\text{зан}}}{(360 \cdot d_{\text{np2}})}, \quad (3.16)$$

де α_2 – величина сектора заповнення магнітопроводу витками вторинної обмотки, град;

$K_{\text{зан}} = 0.8$ – коефіцієнт запасу, який враховує неповну намотку витків;

d_{np2} – діаметр ізолюваного проводу вторинної обмотки, мм.

Значення w_{cl2} округлюється до найближчого цілого числа. Кількість шарів вторинної обмотки

$$n_{cl2} = w_2 / w_{cl2} + 0.25. \quad (3.17)$$

Величина n_{cl2} округлюється до цілого числа. Сумарна товщина ізоляції (мм) вторинної обмотки (див. рис.3.5)

$$\Delta_{u2} = \Delta_{2m} + \Delta_{cl2}(n_{cl2} - 1) + \Delta_{n2}, \quad (3.18)$$

де:

Δ_{2m} – товщина ізоляції між вторинною обмоткою та магнітопроводом, мм; $\Delta_{2m} = 1$ мм;

Δ_{cl2} – товщина ізоляції між шарами вторинної обмотки, мм;

Δ_{n2} – товщина ізоляції зовнішньої поверхні вторинної обмотки, $\Delta_{n2} = 0.5$ мм.

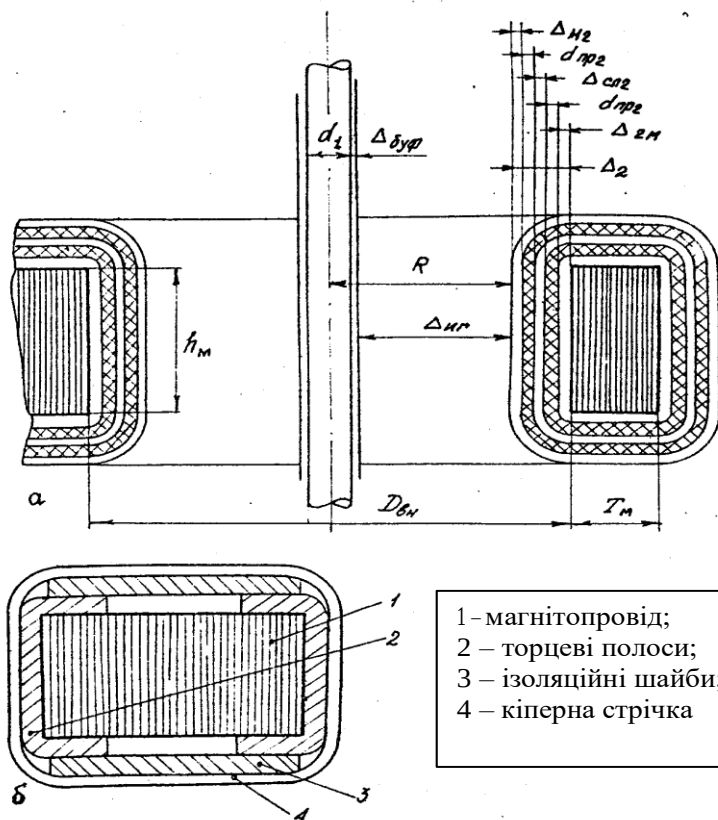
Товщина вторинної обмотки (мм)

$$2 \quad 2u \quad n_{cl2} \quad d_{np2}. \quad (3.19)$$

Внутрішній діаметр магнітопроводу

$$D_{BH} = d_0 + 2 \cdot \Delta_2. \quad (3.20)$$

Структура ізоляція у вікні тороподібного магнітопроводу ТС представлена на рис 3.5а. Співвідношення (3,15. ..3,20) приведені для тороїдального магнітопроводу ТС. Для інших конструкцій розміри вікна магнітопроводу необхідно визначати з урахуванням розташування вторинної обмотки на магнітопроводі і первинної обмотки у вікні трансформатора струму. Для ТС із прямокутним шихтованим магнітопроводом необхідно виконувати також розрахунок ширини вікна b_o . Послідовність розрахунку приведена у додатку Е.7.



а – будівля ізоляції у вікні тороподібного магнітопроводу ТС;

б – ізоляція магнітопроводу ТС

Рисунок 3.5 – Тороподібний магнітопровід ТС

3.6 Попередній розрахунок розмірів магнітної системи трансформатора

Значення внутрішнього діаметра тороподібного магнітопроводу ($D_{вн}$) чи ширина вікна прямокутного магнітопроводу (b_0) визначається при розрахунку головної ізоляції. Оптимальні розміри перетину і зовнішнього діаметра магнітопроводу визначаються у результаті пошукових розрахунків на ЕОМ. Для виконання цих розрахунків необхідно попередньо визначити початкові значення зовнішнього діаметра (D_H) і висоти (h_m) магнітопроводу.

Однозначно визначити активний перетин магнітопроводу (S_{cm}) і його висоту досить складно, тому що для ТС у залежності від необхідного класу точності в номінальному режимі і номінальній граничній кратності первинного струму значення індукції в магнітопроводі змінюється в досить широких межах. Розрахунок перетину магнітопроводу виконується для двох нормованих кратностей первинного струму у номінальному режимі ($K_{I1} = 0.05$ (або 0.5) та $K_{I1} = 1,0$) і номінальної граничної кратності ($K_{I1} = K_{I0}$). Для режиму граничної кратності струмова (f) погрішність може бути прийнята рівної 7% . Для інших кратностей первинного струму в номінальному режимі струмова погрішність визначається згідно додатку В.2 для заданого класу точності ТС. Характер розподілу магнітного потоку в магнітопроводі на даному етапі розрахунку враховується приблизно. Напруженість, магнітного поля в сталі магнітопроводу для всіх прийнятих кратностей первинного струму (А/м)

$$H_i = k_0 \cdot f_i \cdot I_{1н} \cdot K_{I1} \cdot w_1 / l_M, \quad (3.21)$$

де: α - величина сектора, займаного вторинною обмоткою на магнітопроводі, град;

l_M - середня довжина магнітопроводу, м.

Для першої ітерації можна прийняти:

а) при тороподібному магнітопроводі

$$l_M = 1,15 \cdot \tau \cdot D_{вн}, \quad (3.22)$$

б) при прямокутному

$$l_M = 2,15 \cdot (b_0 + h_0). \quad (3.23)$$

Для подальших розрахунків:

а) для тороподібного

$$l_M = \pi \cdot (D_{BH} + T_M), \quad (3.24)$$

б) для прямокутного шихтованого магнітопроводу

$$l_M = 2 \cdot (b_0 + h_0) + \pi \cdot T_M. \quad (3.25)$$

Величина K_0 залежить від класу напруги ТС, типу ізоляції, первинного струму, опору навантаження.

Можна прийняти:

а) для ТС на напруги від 10 кВ і нижче: $0,4 + 0,6 \cdot \alpha_2 / 360 < K_0 < 0,6 + 0,4 \cdot \alpha_2 / 360$

б) для ТС із напругою від 10 до 35 кВ: $0,6 + 0,4 \cdot \alpha_2 / 360 \leq K_0 \leq 1$;

в) для ТС із напругою вище 35 кВ: $K_0 = 1$.

По кривій намагнічування використовуваної марки сталі (додаток Г.1) визначається величина магнітної індукції в сталі B_{mi} (Тл), що для режиму граничної кратності (при $K_{i1} = K_{10}$) повинна бути не більше індукції насичення сталі. При невиконанні цього співвідношення, як розрахункове значення приймається індукція насичення сталі.

Площа активного перетину сталі магнітопроводу (m^2):

$$S_{cmi} = K_{12} \cdot I_{12} \cdot Z_2 / 200 \cdot \kappa_\phi \cdot w_{en} \cdot B_{mi}, \quad (3.26)$$

де $\kappa_\phi = 1,17$ - для режиму номінальної граничної кратності;

$\kappa_\phi = 1,11$ - для кратностей номінального режиму;

Z_2 - повний опір вторинного ланцюга, Ом.

для першої ітерації можна прийняти $Z_2 = Z_n$;

K_{12} - кратність вторинного струму, що відповідає розглянутій кратності первинного струму;

$$K_{I2} = K_{I1} \cdot (1 - 0,01 \cdot |f|). \quad (3.27)$$

Як вихідне значення площі перетину магнітопроводу (для наступної ітерації) приймається найбільше з отриманих значень, тобто:

$$S_{CT1} = \max(S_{CTi})$$

Оптимальне, по вкладенню активних матеріалів і технологічних вимог, співвідношення висоти (h_m) і ширини (T_m) перетин магнітопроводу лежить у межах:

$$h_m / T_m = 1 \dots 2$$

тому, якщо немає інших обмежень, висоту магнітопроводу (h_m , м) варто вибирати з нормалізованого ряду ширини смуг електротехнічної сталі з урахуванням співвідношення:

$$h_{\min} = \sqrt{S_{CT1} / k_c} \leq h_m \leq h_{\max} = \sqrt{2 \cdot S_{CT1} / k_c}. \quad (3.28)$$

де k_c - коефіцієнт заповнення перетину магнітопроводу сталлю:

$$k_c = (0,9 \dots 0,96).$$

Ширина пакета магнітопроводу (мм):

$$T_M = S_{cm} / k_c \cdot h_M. \quad (3.29)$$

Зовнішній діаметр магнітопроводу (м)

$$D_{nl} = D_{gn} + 2 \cdot T_M. \quad (3.30)$$

По отриманих розмірах уточнюються середня довжина магнітопроводу (l), активний опір вторинної обмотки (r_2) при температурі 90 °C:

$$r_2 = \rho_{np2} \frac{l}{q_{np2}} = 0.023 \frac{1.05(2 \cdot h_M + 2 \cdot T_M + 4 \cdot \Delta_2)}{q_{np2}} W_2, \quad (3.31)$$

та повний опір вторинного ланцюга ТС (Ом):

$$Z_2 = \sqrt{(r_2 + R_H)^2 + X_H^2}. \quad (3.32)$$

Розрахунок розмірів магнітної системи ТС виконується як ітераційний процес, що продовжується до збігу перетину магнітопроводу в попередній і наступній ітераціях з точністю до 5 %. Для визначення значення перетину магнітопроводу ТС, як правило, досить 2-3 ітерації. Розрахунки доцільно систематизувати у табличній формі. Після попереднього розрахунку геометричних розмірів магнітної системи ТС викреслюється її ескіз і складається специфікація ізоляції магнітопроводу /1-3/. Наступний розрахунок полягає у визначенні мас і вартості електротехнічної сталі магнітопроводу та провідникового матеріалу обмоток і виконується в такому порядку:

маса провідникового матеріалу вторинної (G_{np2}) і первинної (G_{np1}) обмоток (кг):

$$G_{np2} = \gamma_{np2} \cdot q_{np2} \cdot l_{\epsilon 2} \cdot w_2 \cdot 10^{-6}, \quad (3.33)$$

$$G_{np1} = \gamma_{np1} \cdot q_{np1} \cdot l_{\epsilon 1} \cdot w_1 \cdot 10^{-6}, \quad (3.34)$$

середня довжина витка вторинної і первинної обмоток (м):

$$l_{\epsilon 2} = 2 \cdot (h_M + T_M) + 4 \cdot \Delta_2, \quad (3.35)$$

$$l_{\epsilon 1} = \pi \cdot (b_0 + T_M + \Delta_2), \quad (3.36)$$

вартість проводу первинної і вторинної обмоток (в.о.):

$$C_{np1} = \Pi_{np1} \cdot G_{np1}; C_{np2} = \Pi_{np2} \cdot G_{np2}, \quad (3.37)$$

повна вартість проводу ТС:

$$C_{np} = C_{np1} + C_{np2}, \quad (3.38)$$

маса сталі (кг):вартість сталі (в.о.):

$$G_{CT} = \gamma_{CT} \cdot T_M \cdot h_M \cdot k_c \cdot 2 \cdot [h_0 + b_0 + 2 \cdot T_M], \quad (3.39)$$

для тороподібної магнітної системи:

$$G_{CT} = \gamma_{CT} \cdot l_M \cdot S_{CT}, \quad (3.40)$$

вартість сталі (грн):

$$C_{cm} = G_{cm} \cdot C_{cm}. \quad (3.41)$$

У (3.31... 3.41) позначено:

γ_{np1} , γ_{in2} – щільності провідникового матеріалу первинної, і вторинної обмоток та сталі магнітопроводу (кг/м^3), (для мідних проводів $\gamma_{in} = 8900 \text{ кг/м}^3$, для алюмінієвих $\gamma_{in} = 2700 \text{ кг/м}^3$, для електротехнічної сталі $\gamma_{cm} = 7600 \text{ кг/м}^3$);

ρ_{np} - питомий електричний опір матеріалу ($\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$) обмоток, при $t = 90^\circ\text{C}$ (для міді $\rho_{in} = 0.0223$, для алюмінію $\rho_{in} = 0.0375$);

C_{np1} , C_{np2} , C_{cm} – ціни проводів та електротехнічної сталі (в.о.).

Повна вартість активних матеріалів ТС (грн.):

$$CAM = C_{np} + C_{cm}. \quad (3.42)$$

Якщо виконати розрахунки по (3.22... 3.42) для декількох значень МРС первинної обмотки (F_1), то можна побудувати залежності $C_{np} = \varphi_1(F_1)$, $C_{cm} = \varphi_2(F_1)$, $CAM = \varphi_3(F_1)$ та визначити оптимальне число витків первинної і вторинної обмоток та перетин сталі магнітопроводу.

Приведені масово-габаритні співвідношення дозволяють визначити оптимальне співвідношення розмірів h_M і T_M магнітопроводу, що забезпечує його мінімальну масу:

$$\left(\frac{h_M}{T_M} \right)_{onm} = 1 + 0.785 \frac{\gamma_{CT} \cdot S_{CT} \cdot k_c}{\gamma_{np} \cdot q_{np2} \cdot w_2}. \quad (3.43)$$

Для ТС, у яких можна не враховувати масу первинної обмотки (убудовані, шинні й ін.)

$$\frac{h_M}{T_M} = 1 + 1.57 \cdot \frac{\gamma_{CT} \cdot S_{CT} \cdot k_c}{\gamma_{np}}. \quad (3.44)$$

Якщо співвідношення $\frac{h_M}{T_M} \gg 2$, то магнітопровід ТС необхідно

виконати складеним. Попередні розрахунки розмірів магнітопроводу при навчальному проектуванні доцільно виконувати без застосування програмного забезпечення ЕОМ з метою більш глибокого вивчення математичної моделі ТС, взаємозв'язків між її перемінними, розуміння сутності процесу оптимізації розмірів ТС.

3.7 Математичне забезпечення автоматизованого проектування

3.7.1 Оптимізація трансформаторів струму на ЕОМ

Розраховані на етапі попереднього проектування (п.3.6) геометричні розміри магнітопроводу використовуються для визначення області пошуку оптимального варіанта ТС. Тому що кількість варіюваних змінних при пошуку не більше трьох (зовнішній, внутрішній діаметри і висота магнітопроводу), то пошук доцільно організувати шляхом перегляду області припустимих рішень методом спрямованого перебору параметрів оптимізації.

3.7.2 Критерій оптимальності

На розглядаємі варіанти ТС та область пошуку накладаються, як параметричні (керуємі змінні), так і функціональні (на метрологічні характеристики) обмеження. При промисловому проектуванні в якості критерію оптимальності приймається вартість

Вартість активних матеріалів як функція конструктивних параметрів ТС із тороїдальним магнітопроводом представлена так:

$$F = C_{AM} = C_{CT} + C_{PP} = C_{CT} + C_{PP1} + C_{PP2} = \\ C_{CT} \cdot \gamma_{CT} \cdot h_M \cdot T_M \cdot k_c \cdot \pi \cdot (D_{BH} + T_M) + \\ C_{PP1} \cdot \gamma_{PP1} \cdot q_{np1} \cdot w_1 \cdot \pi \cdot (\Delta_2 + D_{BH} + T_M) + \\ C_{PP2} \cdot \gamma_{PP2} \cdot q_{np2} \cdot w_2 \cdot \pi \cdot (\Delta_2 + 2 \cdot (h_M + T_M))$$

Тому що критерій оптимальності є нелінійною функцією керованих змінних (КЗ), це обумовлює необхідність застосування методів нелінійного математичного програмування при пошуку оптимальних параметрів ТС.

Алгоритм програми оптимізації ТС ґрунтується на методі спрямованого перебору КЗ у заданій області їхньої зміни. У процесі перебору відкидаються варіанти, що не задовольняють проектним обмеженням. У результаті роботи програми оптимізації формується безліч припустимих варіантів, а з неї в якості оптимального вибирається варіант із мінімальним значенням критерію.

3.7.3 Аналіз результатів розрахунку на ЕОМ і вибір оптимального варіанта

Оптимальний варіант ТС вибирається проектувальником з масиву розрахункових варіантів з урахуванням стандартизованої ширини смуг електротехнічної сталі. Тому що розрахунок на ЕОМ виконується при безупинній зміні керованих перемінних, тобто обраний оптимальний варіант ТС з урахуванням стандартизації значень висоти магнітопроводу може не збігатися з найкращим варіантом, визначеним ЕОМ без обліку технологічних обмежень. Після вибору оптимального варіанта ТС складається таблиця порівняння.

3.8 Розрахунок електродинамічної стійкості трансформатора

Електродинамічна стійкість ТС визначається струмом електродинамічної стійкості - найбільшим амплітудним значенням струму короткого замикання за час його протікання, що ТС витримує без ушкоджень, що перешкоджають його подальшій роботі /І-2/

Ціль розрахунку електродинамічної стійкості ТС - визначення граничного значення струму, при якому механічні напруги на вигин у матеріалі обмоток (σ) не перевищують значень, припустимих при короткочасних перевантаженнях і розрахунковій температурі θ (для міді $[\sigma]_{\text{дон}} = 60$ МПа і для алюмінію $[\sigma]_{\text{дон}} = 30$ МПа. Умову електродинамічної стійкості ТС можна записати так:

$$[\sigma] = \frac{F}{q_{\text{обм}}} \leq [\sigma]_{\text{дон}},$$

де F – зусилля, що діє на виток обмотки, Н;

$q_{\text{обм}}$ – площа поперечного переріза витка обмотки, м^2 .

При рівнобіжному розташуванні провідників первинної і вторинної обмоток коефіцієнт k_{ϕ} , що враховує взаємне розташування і

розміри провідників, залежить від відношення відстані між рівнобіжними провідниками (a) до довжини провідників (l).

Якщо $a/l < 0.2$, то

$$k_{\phi} = \frac{2 \cdot l}{a} \left(1 - \frac{a}{l} \right). \quad (3.45)$$

У випадку, коли $a/l \geq 0.2$, то

$$k_{\phi} = \frac{2 \cdot l}{a} \left(\sqrt{1 + (a/l)^2} - (a/l) \right). \quad (3.46)$$

Для багатьох конструкцій ТС первинну обмотку можна представити у виді кільця. Коефіцієнт форми контуру кільцевої первинної обмотки

$$k_{\phi} = \ln \frac{8 \cdot R_1}{r} - 0.75, \quad (3.47)$$

де r - радіус перетину первинної обмотки.

Для витка прямокутного перетину

$$k_{\phi} = \ln \frac{8 \cdot R_1}{r} - 0.5. \quad (3.48)$$

Граничне значення струму електродинамічної стійкості ТС

$$i_{\text{дин}} = \sqrt{\frac{[\sigma]_{\text{дон}} \cdot q_{\text{обм}}}{\kappa_{\phi} \cdot 10^{-7}}}, \quad (3.49)$$

повинне забезпечувати виконання співвідношення

$$i_{\text{дин}} = \kappa_{\text{дин}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1н}, \quad (3.50)$$

де $\kappa_{\text{дин}}$ - кратність струму електродинамічної стійкості ТС.

Відповідно до вимог ДСТ між струмами електродинамічної і термічної стійкості повинне виконуватися співвідношення

$$i_{\text{дин}} \geq 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1Т} = 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot n_{1Т} \cdot I_{1н}. \quad (3.51)$$

3.9 Розрахунок погрешностей трансформатора

Розрахункова математична модель ТС являє собою сукупність аналітичних співвідношень, що дозволяють визначити параметри трансформатора, і складається з ряду підмоделей:

- параметрів вторинного контуру;
- параметрів повного потоку розсіювання;
- розподілу магнітної індукції по довжині магнітопроводу;
- струму намагнічування з урахуванням нерівномірності розподілу магнітної індукції в магнітопроводі;
- погрішностей.

3.9.1 Параметри вторинного контуру

Результуючий магнітний потік на ділянці магнітопроводу над вторинною обмоткою визначається спаданням напруги на опорі:

$$\underline{Z}_2 = (R_n + r_2) + jX_n, \quad (3.52)$$

де R_n X_n – активна і реактивна складові опору навантаження, Ом;
 r_2 – активний опір вторинної обмотки, Ом:

$$r_2 = \frac{\rho_{np}}{q_{np}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{сл}} l_{в2i} \cdot W_{сли} = \frac{\rho_{np}}{q_{np}} \cdot W_{сл2} \times \left[\left(2T_m + 2h_m + 8\Delta_{2m} + 8 \frac{d_{np2}}{2} \right) (1 + (i-1)(8\Delta_{сл2} + 8d_{np2})) \right], \quad (3.53)$$

де $n_{сл}$ – кількість шарів вторинної обмотки

$$n_{сл \text{ розр}} = 1.2 \frac{w_2 \cdot d_{np2}}{l_{вн} \cdot \alpha_2}, \quad (3.54)$$

де $l_{вн}$ – довжина внутрішньої поверхні магнітопроводу;

$l_{вн} = \pi D_{вн}$ – для тороїдального магнітопроводу;

$l_{вн} = 2(h_0 + b_0)$ – для шихтованого магнітопроводу.

Значення $n_{сл \text{ розр}}$ округляється до найближчого цілого числа ($n_{сл}$), після чого виконується розкладка витків вторинної обмотки по шарах, викреслюється перетин вторинної обмотки і приводиться специфікація ізоляції обмотки /І-2/. При проектуванні багатодіапазонних убудованих ТС вторинна обмотка виконується у виді секцій, між якими залишається необмотана частина магнітопроводу (клини). При числі клинів $n_{кл}$ і величині сектора під нього $\alpha_{кл}$ (град) кількість шарів об-

МОТКИ

$$n_{\text{сл розр}} = 1.2 \frac{w_2 \cdot d_{\text{пр2}} \cdot 360}{l_{\text{вн}} (1 - n_{\text{кл}} \cdot \alpha_{\text{кл}} / 360) \cdot \alpha_2}. \quad (3.55)$$

Коефіцієнт 1.2 враховує нещільне намотування витків вторинної обмотки по внутрішній поверхні магнітопроводу. Для ТС задаються потужності навантаження у вторинному ланцюзі (S_n , ВА) і коефіцієнт потужності навантаження $\cos \varphi_n$. Звичайно $\cos \varphi_n = 0.8$. Повний опір навантаження (Ом)

$$Z_n = S_n / I_{2n}^2, \quad (3.56)$$

а складові опори навантаження (Ом)

$$R_n = Z_n \cos \varphi_n, \quad X_n = Z_n \sin \varphi_n. \quad (3.57)$$

При заданому навантаженні у вторинній обмотці наводиться ЕРС

$$E_{\text{м2}} = I_{2n} \cdot k_{12} \cdot Z_2, \quad (3.58)$$

де k_{12} - кратність вторинного струму.

Остаточне значення кратності вторинного струму може бути отримане при виконанні ітераційного рахунка (звичайно 2-3 ітерації) погрішностей після збігу значень струмової погрішності двох послідовних ітерацій з точністю $\leq 10\%$. Як початкове значення можна прийняти середнє значення погрішності для заданого класу точності і розглянутої кратності первинного струму (k_{12}).

Кут зрушення вектора ЕРС $E_{\text{м2}}$ щодо вектора вторинного струму I_2 , обумовлений, характером вторинного навантаження (град)

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_n}{R_n + r_2}. \quad (3.59)$$

3.9.2 Параметри повного потоку розсіювання

Під потоком розсіювання ТС приймемо векторну різницю між значенням повного магнітного потоку в магнітопроводі на середині ділянки, вільного від витків вторинної обмотки ($\Phi_{\text{сум}}$) і результируючим магнітним потоком на ділянці магнітопроводу під вторинною обмоткою ($\Phi_{\text{м2}}$). Амплітудне значення магнітного потоку розсіювання за умови рівності струмів первинної і вторинної обмоток може бути

виражене в такий спосіб (В6)

$$\Phi_{\sigma\pi} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot G_{\sigma} \cdot I_1 \cdot w_1, \quad (3.60)$$

де G_{σ} - провідність шляху повного потоку розсіювання, м.

Якщо провідність G_{σ} , визначену для деякого мінімально можливого кута (прийнятий $\alpha_{2\min} = 45^\circ$), позначити через $G_{\sigma\max}$, то можна побудувати залежність $G_{\sigma^*} = G_{\sigma} / G_{\sigma\max} = \varphi(\alpha_2)$ (рис.3.6), яку можна характеризувати як питому провідність шляху магнітного потоку розсіювання ТС одиничної висоти. Для ТС із висотою магнітопроводу dh провідність шляху потоку розсіювання:

$$dG_{\sigma} = G_{\sigma^*} \cdot dh = G_{\sigma^*} R_0 \cdot d\alpha, \quad (3.61)$$

де:

$$R_0 = (R_1 + R_2) / 2; \quad R_2 = (D_{cp} - d_1) / 2; \quad D_{cp} = (D_{вн} + D_{н}) / 2.$$

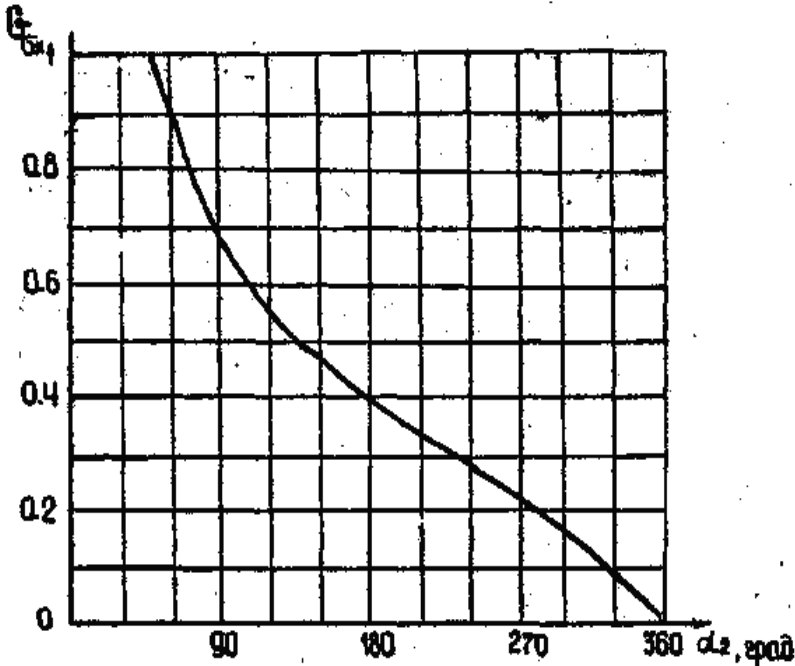


Рисунок 3.6 - Залежність питомої провідності шляху розсіювання від α_2

Значення провідностей для внутрішньої і зовнішньої областей ТС практично однакові, тому повну провідність шляху потоку розсі-

ювання ТС із магнітопроводом квадратного перетину можна одержати, інтегруючи (3.61) у межах від $\alpha = 0$ до $\alpha = 2\pi$.

$$G_{\sigma\kappa\theta} = \int_0^{2\pi} dG_{\sigma^*} R_0 d\alpha = 2\pi G_{\sigma^*} R_0. \quad (3.62)$$

При відмінності форми перетину магнітопроводу ТС від квадратної необхідно врахувати провідність області розміром $(h_m - T_m)$

$$\Delta G_{\sigma} = 2G_{\sigma^*} (h_m - T_m). \quad (3.63)$$

З обліком (3.63) провідність шляху потоку розсіювання ТС із магнітопроводом прямокутного перетину

$$G_{\sigma} = G_{\sigma\kappa\theta} + \Delta G_{\sigma} = G_{\sigma\kappa\theta} \left[\pi (D_{cp} - d_1) / 2 + 2h_m \right] \quad (3.64)$$

3.9.3 Розподіл магнітної індукції по довжині магнітопроводу

У загальному випадку вторинна обмотка може займати довільну кількість $n_{cl} = n + \alpha_2/360$ шарів, де $n=0,1,2...$ Загальна кількість витків вторинної обмотки (W_2) можна представити як суму W_y (числа витків, розташованих у всіх цілком заповнених шарах обмотки) і $W_{\hat{\varphi}}$ (числа витків останнього неповного шару, що займає на магнітопроводі сектор α_2), тобто

$$W_2 = W_y - W_{\hat{\varphi}},$$

Щільність потоку розсіювання в магнітопроводі такого ТС (Тл):

$$B_{\sigma\partial p} = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot G_{\sigma} \cdot I_{1n} \cdot w_1 \cdot k_{I1} \cdot (w_2 - w_y) / S_M \cdot w_2 = 1.77 \cdot 10^{-7} \cdot G_{\sigma} \cdot I_{1n} \cdot w_1 \cdot k_{I1} \cdot (w_2 - w_y) / S_M \cdot w_2 \quad (3.65)$$

Повний магнітний потік у магнітопроводі ТС ($\Phi_{\text{сум}}$) визначається накладенням магнітного потоку взаємоіндукції Φ_{m2} на повний магнітний потік розсіювання Φ_{σ} . Тому що складові вектора магнітної індукції $B_{m\varphi}$ і $B_{\sigma\partial p}$ від потоку взаємоіндукції збігаються по фазі, то їх можна скласти арифметично

$$B_{m2} = B_{m\varphi} + B_{\sigma\partial p} = I_{2n} k_{12} Z_2 / 222 \cdot S_M \cdot W_2. \quad (3.66)$$

З огляду на зрушення магнітних потоків взаємоіндукції і розсіювання, індукція повного магнітного потоку ($\Phi_{\text{сум}}$) у магнітопроводі

$$B_{\text{сум}} = \sqrt{B_{m2}^2 + B_{\sigma\partial p}^2}. \quad (3.67)$$

Вираз (3.67) справедливий для довільного розташування обмотки на магнітопроводі, однак при його використанні необхідно врахувати наступне :

- якщо вторинна обмотка займає менш одного шару ($n=0$), то $W_u = 0$,
- α_2 - величина сектора заповнення магнітопроводу вторинною обмоткою з урахуванням клина ($\alpha_2 < 2\pi$);
- якщо обмотка займає ціле число шарів ($n \geq 1$), то при розрахунках необхідно прийняти $W_u = W_2$, $\alpha_2 = 2\pi$,
- якщо обмотка займає дробове число шарів ($n \geq 1$), то W_u являє собою суму витків у всіх n повних шарах вторинної обмотки; α_2 – величина сектора, займаного ($W_2 - W_u$) витками вторинної обмотки в останньому шарі ($\alpha_2 < 2\pi$).

Вторинна обмотка убудованих ТС звичайно виконується у виді окремих секцій таким чином, що між секціями залишається необмотана частина магнітопроводу, необхідна для розташування клинів на місці установки трансформатора в адаптері. Дослідження впливу ширини клина на розподіл магнітної індукції в магнітопроводі і параметри ТС показують, що при відносній ширині клина:

$$K_{кл} = \alpha_{кл} / \alpha_{св} \leq 0.4$$

величину сектора під клин ($\alpha_{кл}$) необхідно включати в сектор заповнення магнітопроводу вторинною обмоткою.

Для виконання подальших розрахунків ТС використовується розрахункова модель (рис. 3.7), у якій вільна частина магнітопроводу ТС розсікається непарною кількістю радіальних площин до q (рис. 3.7, 3.8). При цьому утвориться парне число елементів i ($i=q-1$), розташованих між січними площинами $q, q+1$ (рис. 3.7 $q=11, i=10$). Обумовлена по (3.67) магнітна індукція $B_{сум}$ відповідає індукції в перетині $(q+1)/2$.

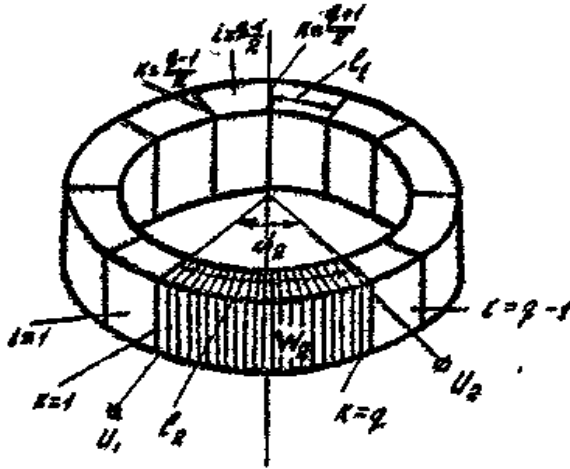


Рисунок 3.7 - Розрахункова модель ТС

Розподіл магнітної індукції уздовж вільної ділянки магнітопроводу з достатньою для практики ступенем точності може бути прийнято синусоїдальним (рис. 3.8) з максимумом у середині вільного від витків вторинної обмотки ділянки магнітопроводу при $k = (q+1)/2$.

$$B_k = \left\{ \left[B_\sigma \sin \left(\pi \frac{k}{q+1} \right) \right]^2 + B_{m2}^2 \right\}^{1/2}, \quad k=1,11, \quad (3.68)$$

де B_k - значення магнітної індукції в довільному перетині вільної ділянки магнітопроводу (Тл).

На ділянці магнітного ланцюга під вторинною обмоткою магнітна індукція приймається незмінною по довжині ділянки і визначається величиною магнітного потоку взаємодукції. З урахуванням прийнятої апроксимації на рис. 3.8 представлена залежність розподілу магнітної індукції по довжині магнітопроводу. З огляду на симетрію кривої $B(l_m)$ (рис. 3.8) відносно $(q+1)/2$ перетину магнітопроводу, усі подальші розрахунки досить виконати для половини вільної від витків вторинної обмотки ділянки магнітопроводу.

$$B_i = \frac{1}{2} [B_k(k=i) + B_k(k=i+1)]. \quad (3.69)$$

Складові напруженості магнітного поля в сталі i -го елемента магнітопроводу (А/м)

$$H_{ix} = H_i \cos \Psi_i; H_{iy} = H_i \sin \Psi_i. \quad (3.70)$$

Значення напруженості магнітного поля в сталі i -го елемента вільної частини магнітопроводу (H_i , А/м) і кута втрат у сталі (Ψ_i , град) визначаються по характеристиках $B_m(H)$ і $\Psi(B_m)$ (Додаток Г1). Аналогічно визначаються складові напруженості магнітного поля в сталі ділянки магнітопроводу під вторинною обмоткою

$$H_{.m2x} = H_{.m2} \cos \Psi_2; H_{.m2y} = H_{.m2} \sin \Psi_2. \quad (3.71)$$

Значення кута Ψ_2 (град), що залежить від величини і характеру навантаження, визначаються по (3.59). Результируюча МРС (F_0 , А) визначається геометричним підсумовуванням складових МРС по осях обраної системи координат

$$F_x = 2l_i \sum_{i=1}^{(q-1)/2} H_{ix} + H_{.m2x} \cdot l_2, \quad (3.72)$$

$$F_y = 2l_i \sum_{i=1}^{(q-1)/2} H_{iy} + H_{.m2y} \cdot l_2, \quad (3.73)$$

$$F_0 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad (3.74)$$

де $l_2 = l_m \alpha_2 / 360$ - довжина ділянки магнітопроводу під вторинною обмоткою, м;

$l_i = 0.1(l_m - l_2)$ - довжина елемента вільної ділянки магнітопроводу, м.

Кут зрушення (град) вектора результируючої МРС щодо осі X

$$\alpha = \arctg \frac{F_y}{F_x}. \quad (3.75)$$

Струм намагнічування (А) визначається за значенням повної МРС

$$I_0 = F_0 / W_1. \quad (3.76)$$

У випадку, коли $\xi \leq 0.25$, нерівномірність незначна, і доцільно застосувати більш простий алгоритм розрахунку при забезпеченні достатньої точності результатів. Суть алгоритму полягає у визначенні

еквівалентного значення магнітної індукції $B_{свз}$, що відповідає магнітному потоку, рівномірно розподіленому уздовж вільної частини магнітопроводу. Замінюючи дійсний нерівномірний розподіл магнітної індукції еквівалентним прямокутником з висотою $B_{свз}$, обумовленої по формулі Сімпсона, одержимо:

$$B_{свз} = \frac{1}{15} [B_{k(1)} + 2(B_{k(3)} + B_{k(5)} + B_{k(6)}) + 4(B_{k(2)} + B_{k(4)})] \quad (3.77)$$

де $B_{k(1)} \dots B_{k(6)}$ – значення магнітної індукції в перетинах до=1...6...6 вільної частини магнітопроводу (рис 3.8), Тл.

Для наступного розрахунку магнітопровід ТС представляє собою дві ділянки: ділянку під вторинною обмоткою довжиною l_2 (з величиною магнітної індукції в сталі $B_{м2}$) і ділянку довжиною $l_{св}=l_{м}-l_2$ (з магнітною індукцією в сталі $B_{свз}$). Результуюча МРС (А):

$$F_0 = \sqrt{F_{эx}^2 + F_{эy}^2},$$

де:

$$\left. \begin{aligned} F_{эx} &= H_{свз} \cdot l_{св} \cdot \cos \Psi_{св} + H_{м2} \cdot l_2 \cdot \cos \Psi_2, \\ F_{эy} &= H_{свз} \cdot l_{св} \cdot \sin \Psi_{св} + H_{м2} \cdot l_2 \cdot \sin \Psi_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.78)$$

Кут зрушення вектора результуючої МРС (щодо осі та струм намагнічування розраховуються по (3.75), (3.76).

3.10 Погрішності трансформатора

Струмова (%) і кутова (хвилини) погрішності ТС визначаються як відношення МРС намагнічування до МРС первинної обмотки з урахуванням кута зрушення (α) та вектора результуючої МРС:

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{I_0}{I_{1н} \cdot k_{I1}} \sin(\alpha + \varphi_2) \cdot 100, \\ \delta &= \frac{I_0}{I_{1н} \cdot k_{I1}} \cos(\alpha + \varphi_2) \cdot 3440. \end{aligned} \right\} \quad (3.79)$$

Тому що значення первинного струму ТС без виткової корекції завжди більше приведенного значення струму вторинної обмотки, те струмова погрішність завжди негативна.

3.10.1 Формуляр розрахунку погрішностей

Розрахунок виконується для наступних значень кратності первинного струму та опору навантаження

K_{II}	0.05	0.2	0.5	1.0	1.2	1.0
Z_n	$Z_{n\text{ ном}}$				$Z_{n\text{ min}}$	0

Розрахункові значення кратностей первинного струму (K_{II}) при опорі $Z_{n\text{ ном}}$ приймаються залежно від класу точності по табл. В.2 (Додаток В). Значення опору $Z_{n\text{ min}}$ вибирається відповідно до табл. В.2, В 3.1-3.2 (Додаток В). За результатами розрахунку будуються залежності для всіх значень кратності первинного струму ($B(I_m)$), а також залежності струмової $f(I_1^*)$ і кутової $\delta(I_1^*)$ погрішностей. Розрахункові значення f й δ повинні розташовуватися усередині припустимої області зміни погрішностей.

В випадку застосування виткової корекції на графіку необхідно показати криву дійсної струмової погрішності й погрішності ТС з номінальним числом вторинних витків.

3.10.2 Розрахунок трансформатора струму при більших кратностях первинного струму

Для даного режиму роботи виконуються розрахунки максимальної кратності вторинного струму $K_{I2\text{ max}}$, залежності граничної кратності ТС (K_{I0}) від опору вторинного навантаження (Z_n), номінальної граничної кратності первинного струму (K_{I0}), ЕРС на кінцях розімкнутої вторинної обмотки. При цьому використовується поняття повної погрішності ТС, під якою мається на увазі виражене у відсотках діюче значення різниці між добутком номінального коефіцієнта трансформації на миттєве дійсне значення вторинного струму та миттєвим значенням первинного струму в сталому режимі /1-3/

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{w_{2n}}{w_1} \cdot i_2 - i_1 \right)^2 dt}$$

Повна погрішність ТС може бути визначена і як відносна МРС намагнічування ТС

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F_1} \cdot 100 = \frac{H \cdot l_M}{I_1 \cdot w_1} \cdot 100 \quad (3.80)$$

або

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{I_2 \cdot Z_2 \cdot l_M}{4 \cdot I_1 \cdot k_\phi \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot S_M \cdot w_1} \cdot 100 \quad (3.81)$$

З ростом первинного струму (I_1) збільшується струм у вторинній обмотці (I_2), що обумовлює ріст ЕРС вторинної обмотки та магнітної індукції в сталі магнітопроводу ТС. При зміні величини магнітної індукції у магнітопроводі до значення $B_{\mu m}$, що відповідає максимально-му значенню похідної магнітної проникності стали по індукції ($d\mu/dB = \max$) відбувається зменшення повної погрішності (ε) ТС. У розглянутому режимі більших кратностей первинного струму магнітна індукція у магнітопроводі значно більше значення $B_{\mu m}$. Значення магнітної індукції $B_{\mu m}$ для різних марок електротехнічної сталі перебуває в діапазоні 0,7...0...0,9Тл. Магнітна індукція у магнітопроводі при більших кратностях первинного струму наближається до значення індукції глибокого насичення стали. При цьому різке зменшення магнітної проникності стали обумовлює значне збільшення струму намагнічування, отже, відповідно й струмової погрішності ТС.

3.10.3. Розрахунок максимальної кратності вторинного струму

Максимальна кратність вторинного струму ТС визначається індукцією насичення матеріалу магнітопроводу ($B_{\text{нас}}$); значенням магнітної індукції, збільшення якої на 1 % приводить до збільшення напруженості магнітного поля в сталі на 50 %. Максимальна кратність вторинного струму визначається, як відношення вторинного струму при магнітній індукції у магнітопроводі, рівній індукції насичення, до величини вторинного струму у номінальному робочому режимі, тобто

$$k_{I2\max} = \frac{I_{2\max}}{I_{2\text{ном}}} \cdot 100$$

Значення вторинного струму (A) відповідної індукції насичення, можна визначити з виразу

$$I_{2\max} = \frac{B_{\max} \cdot S_M \cdot w_2 \cdot 4 \cdot k_\phi \cdot f_1}{Z_2} \cdot 100 \quad (3.82)$$

У режимі більших кратностей форма вторинного струму істотно відрізняється від синусоїди, тому для номінального режиму роботи ТС приймаємо значення $k_\phi > 1.11$. Точне значення k_ϕ у режимі більших кратностей визначити складно, тому значення $I_{2\max}$, обумовлене з (3.82) при $k_\phi = 1.11$, є досить наближеним. З іншого боку, з ростом первинного струму, значення I_2 , E_2 , $B_{\max}$ ростуть доти, поки не наступить режим насичення. При досягненні індукції насичення припиняється (у випадку ідеальної характеристики намагнічування) зміна I_2 , E_2 , $B_{\max}$. Однак, з огляду на те, що при досягненні режиму насичення магнітна індукція B_m у дійсності трохи зростає, необхідно прийняти до уваги деяке зростання I_2 й E_2 за допомогою апроксимуючого співвідношення

$$k_{I2\max} = \frac{B_{\text{нас}}}{B_{\text{ном}}} + (2 \dots 5), \quad (3.83)$$

де $B_{\text{ном}}$ - значення магнітної індукції у магнітопроводі ТС при номінальному режимі, Тл.

Значення найбільшої кратності вторинного струму розраховується для трьох випадків:

$$\begin{aligned} I_{1*} &= 100\%, Z_n = Z_{\text{ном}}; \\ I_{1*} &= 120\%, Z_n = Z_{\text{нmin}}; \\ I_{1*} &= 100\%, Z_n = 0 \end{aligned} \quad (3.84)$$

$B_{\text{ном}}$ відповідає розрахунковому значенню магнітної індукції на ділянці магнітопроводу під вторинною обмоткою для перерахованих випадків. Розрахунки представляються в табличній формі (див. табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Розрахунок максимальної кратності вторинного струму

$B_{\text{нас}}$	H ($B_{\text{нас}}$)	1.01^* $B_{\text{нас}}$	$H(1.01^*)$ $B_{\text{нас}}$	I_{1*}	Z_n	$B_{\text{ном}}$	Розрахункове значення $K_{I2\max}$	Дійсне значення $K_{I2\max}$
Тл	А/м	Тл	А/м	%	Ом	Тл	-	-
				100	$Z_{\text{ном}}$			
				120	$Z_{\text{нmin}}$			
				100	0			

Розрахункові значення $K_{I2 \max}$, визначені з (3.83), необхідно зрівняти із кратністю термічної стійкості ТС (n_{IT}). При цьому, якщо розрахункове значення кратності вторинного струму $K_{I2 \max} < n_{IT}$, то дійсне значення кратності струму у вторинній обмотці дорівнює розрахунковому значенню $K_{I2 \max}$. У випадку, якщо $K_{I2 \max} > n_{IT}$, то дійсна кратність вторинного струму $K_{I2 \max} = n_{IT}$.

3.10.4. Розрахунок граничної кратності

Гранична кратність ТС – найбільше значення кратності первинного струму, при якому повна погрішність при заданому вторинному навантаженні не перевищує значень по табл. В.4 (Додаток В). При розрахунку граничної кратності необхідно враховувати ту обставину, що розрахунки ТС у області великих індукцій є досить наближеними. Крім того, характер кривої намагнічування в області значень індукцій, близьких до індукції насичення, обумовлює різкий ріст напруженості магнітного поля в сталі та погрішностей ТС. І, нарешті, розкид характеристик намагнічування навіть однієї й тієї ж марки сталі приводить до відмінності дійсної характеристики намагнічування $B_m(H)$ магнітопроводу від розрахункової. Тому не слід розраховувати ТС на найбільше припустиме ($\varepsilon_{\text{доп}}$) значення погрішності розглянутого режиму (див. табл. В.4 (Додаток В)). Доцільно у якості розрахункового значення повної погрішності прийняти величину погрішності $\varepsilon_{\text{расч}} = (0,5 \dots 0,7) \varepsilon_{\text{доп}}$.

Ціль даного розрахунку - визначення залежності граничної кратності ТС від величини вторинного навантаження. При виконанні розрахунку необхідно задатися рядом значень граничної кратності ($K_{10}=1; 5; 10; 20; 40; 50$), для них визначити МРС намагнічування

$$F_{\text{ок}} = (0,5 \dots 0,7) \cdot \varepsilon_{\text{доп}} \cdot \kappa_{10} \cdot I_{1н} \cdot w_1 / 100 \quad (3.85)$$

і напруженість магнітного поля в сталі магнітопроводу (А/м)

$$H_{\text{ок}} = F_{\text{ок}} / l_M \quad (3.86)$$

По характеристиці намагнічування використововуваної марки сталі (табл. Г.1) необхідно для кожного значення $H_{\text{ок}}$ визначити значення магнітної індукції у магнітопроводі B_{mk} . При прийнятому розрахунковому значенні повної погрішності $\varepsilon_{\text{расч}}$ кратність вторинного струму можна приблизно вважати

$$K_{I2} = K_{10} \cdot (1 - 0,01 \cdot \varepsilon_{\text{расч}}) \quad (3.87)$$

Повний опір вторинного ланцюга ТС (Z_{2K}), що включає послідовно з'єднані вторинну обмотку з опором r_2 і навантаження з опором Z_H (Ом)

$$Z_{2K} = \frac{E_{2K}}{I_{2H} \cdot K_{I2}} = \frac{4.44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_M \cdot B_{mk}}{I_{2H} \cdot K_{I2}}. \quad (3.88)$$

Опір вторинного навантаження, при якому забезпечується прийняте на початку розрахунку значення граничної кратності

$$Z_{HK} = Z_{2K} - Z_2. \quad (3.89)$$

Розрахунки, виконані для всіх перерахованих значень граничної кратності, представляються у табличній формі (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку граничної кратності ТС

K_{10}	F_{OK}	H_{OK}	B_{mk}	K_{I2}	Z_{2K}	Z_{HK}	S_H
-	A	A/м	Тл	-	Ом	Ом	B·A
1							
5							
·							
·							
·							

По отриманим розрахунковим даним (табл. 3.7) необхідно побудувати залежність $K_{10}=f(S_H)$, де значення потужності (B·A)

$$S_H = Z_{HK} \cdot I_{2H}^2. \quad (3.90)$$

На тім же графіці потрібно побудувати залежність $K_{10}=f(S_H)$ за даними розрахунку на ЕОМ і зрівняти отримані результати.

3.10.5. Розрахунок номінальної граничної кратності

Номінальна гранична кратність ТС – що, гарантує трансформатору струму гранична кратність (K_{10H}) при номінальному вторинному навантаженні ($Z_H = Z_{Hном}$). Для визначення початкового значення граничної кратності необхідно знайти граничне значення індукції даної марки стали ($B_{пред}$), під яким розуміють таке її значення, збільшення якого на 10 % приводить до збільшення напруженості магнітного поля в стабі на 50 %. Початкове значення граничної кратності

$$K_{I1} = \frac{B_{пред}}{0.95 \cdot B_{ном}}, \quad (3.91)$$

де $B_{ном}$ - значення індукції, прийняте з розрахунку погрішностей ТС при $I_1^* = 100\%$ й $Z_H = Z_{Hном}$, Тл (табл. 3.6).

Отримане початкове значення кратності первинного струму використовується при розрахунку погрішностей ТС по викладеній у п. 3 методиці розрахунку. Повна погрішність ТС розраховується по (3.80). Якщо виявиться, що повна погрішність менш $0,5\varepsilon_{дон}$, то необхідно трохи збільшити первісне значення граничної кратності й знову виконати розрахунок погрішностей ТС. Цей ітераційний процес закінчується, якщо повна погрішність ТС

$$0.5 \cdot \varepsilon_{дон} < \varepsilon < \varepsilon_{дон}$$

У випадку, коли повна погрішність ТС виявляється більше значення кратності первинного струму необхідно зменшувати доти, поки значення повної погрішності не буде задовольняти цій умові.

3.10.6. Розрахунок напруги на кінцях розімкнутої вторинної обмотки

Для ТС справедливо рівняння МРС

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$$

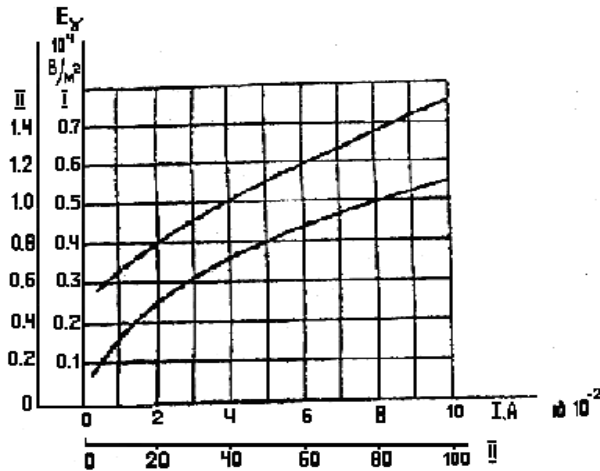


Рисунок 3.9 – Залежність $E_{y0} = f(H_0)$

ТС включається в мережу послідовно, тобто його первинний струм залишається незмінним при незмінному режимі роботи мережі. У цьому випадку розмикання вторинної обмотки приводить до різкого зростання намагнічування, тому що первинний струм є в цьому випадку струмом намагнічування ($I_0=I_1$), що спричиняє значне збільшення магнітного потоку у магнітопроводі. При цьому у вторинній обмотці індуктується значна ЕРС. У розглянутому режимі ТС працює аналогічно пік-трансформатору. При великому значенні синусоїдального за формою струму намагнічування магнітна система ТС сильно насичується. Через нелінійність характеристики намагнічування ($B_m(H)$) матеріалу магнітопроводу в кривій магнітного потоку буде втримуватися третя гармоніка, тобто форма кривої магнітного потоку буде сплющеною. Сплющена крива зміни магнітного потоку ЕРС, що наводить у вторинній обмотці

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}. \quad (3.92)$$

Максимальне значення ЕРС може досягати значної величини, що становить небезпеку для обслуговуючого персоналу. Для практичного визначення ЕРС на кінцях розімкнутої вторинної обмотки використовують залежності $E_{уд} = \varphi(H_0)$ (рис. 3.9).

Значення напруженості магнітного поля в сталі (А/м) у розглянутому режимі

$$H_0 = I_{1н} \cdot w_1 / l_M. \quad (3.93)$$

ЕРС вторинної обмотки (кВ)

$$E_2 = E_{уд} \cdot w_2 \cdot S_M \cdot 10^{-3}. \quad (3.94)$$

Найбільше значення ЕРС і форму $i_0(t)$, можна визначити також шляхом графічного диференціювання залежності $\Phi_0 = \varphi(t)$.

Після визначення ЕРС необхідно перевірити виткову ізоляцію проведення вторинної обмотки на електричну міцність. Пробивна напруга ізоляції між двома проводами ПСД становить 1.4 кв.

Умова електричної міцності виткової ізоляції вторинної обмотки представляється у вигляді $(E_2/w_2) \leq 1.4$ кВ/вит.

3.10.7 Виткова корекція трансформатора

Найбільш простим способом зменшення погрішності ТС є виткова корекція - зменшення струмової погрішності ТС шляхом зміни числа витків вторинної обмотки /1-3/. Питання виткової корекції необхідно вирішувати в тому випадку, коли розрахункове значення струмової погрішності: $f \geq 0.5 f_{\text{доп}}$, де $f_{\text{доп}}$ – граничне значення струмової погрішності необхідного класу точності проектного ТС (додаток В). При незмінному первинному струмі ТС, зі зменшенням номінального числа витків вторинної обмотки (w_2) відбувається збільшення вторинного струму $I_2 = I_1/w_2$. Якщо прийняти, що збільшення вторинного струму відбувається пропорційно зменшенню числа вторинних витків, то при відмотуванні частини вторинних витків вторинний струм

$$I_{2om} = I_2 + I_{2н} \cdot w_{om} / w_{2н}, \quad (3.95)$$

де I_2 - дійсне значення вторинного струму ТС із номінальним числом ($w_{2н}$) витків, А;

w_{om} - число відмотаних вторинних витків.

Струмову погрішність можна розрахувати таким способом

$$\begin{aligned} f_{om} &= \frac{I_{2om} - I_{2н}}{I_{2н}} 100 = \frac{(I_2 + I_{2н} \cdot w_{om} / w_{2н}) - I_{2н}}{I_{2н}} 100 = \\ &= \frac{I_2 - I_{2н}}{I_{2н}} 100 + \frac{I_{2н}}{I_{2н}} \cdot \frac{w_{om}}{w_{2н}} \cdot 100 = -f + \frac{100}{w_{2н}} \cdot w_{om}, \end{aligned} \quad (3.96)$$

де f - струмова погрішність ТС із номінальним числом вторинних витків, %. Погрішність ця завжди негативна, тому що дійсне значення вторинного струму $I_2 < I_{2н}$. (3.96) показує, струмова погрішність ТС із витковою корекцією залежить як від "ціни" витка ($100 / w_{2н}$), так і від кількості відмотаних витків. У ТС із невеликими номінальними первинними струмами "ціна" одного витка виходить дуже велика і при відмотуванні навіть одного витка струмова погрішність (4 %) може перейти в область позитивних значень та перевищити значення погрішності ТС із номінальним числом вторинних витків ($w_{2н}$). Мінімальне значення струмової погрішності в номінальному режимі роботи ТС із номінальним числом витків відповідає (додаток В) струму $I_{1*} = 1,2 \cdot I_{1н}$ і опору навантаження $Z_n = Z_{нmin}$. Тому розраху-

нок погрішності ТС із витковою корекцією варто починати з цього режиму роботи.

3.11 Тепловий розрахунок трансформатора струму

Згідно спрощеної теорії нагріву ТС розглядається як однорідне тіло, яке рівномірно випромінює тепло в оточуюче середовище всією поверхнею. Кількість теплоти, що передається в оточуюче середовище, приймається пропорційним різниці температур між ТС і навколишнім середовищем та не залежним від абсолютного значення цих температур. Прийняті допущення дозволяють характеризувати тепловий стан трансформатора таким чином. Якщо при роботі ТС з постійним первинним струмом втрати складають Δp , то за час dt в ньому виділяється кількість теплоти

$$dQ = \Delta p \cdot dt.$$

Одна частина цієї теплоти dQ_c йде на приріст температури трансформатора

$$dQ_c = c \cdot G \cdot d\theta,$$

де c - повна теплоємність ТС, тобто кількість теплоти, що необхідна для підвищення температури ТС на 1°C ; G - маса ТС.

Інша складова dQ_α визначає кількість теплоти, що виділяється трансформатором в оточуюче середовище за час, якщо при цьому підвищення температури ТС складає $\Delta\theta$

$$dQ_\alpha = \alpha \cdot S \cdot \Delta\theta \cdot dt,$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні ТС площею S .

Загальний вираз теплового балансу ТС

$$\Delta p \cdot dt = c \cdot G \cdot d\theta + \alpha \cdot S \cdot \Delta\theta \cdot dt. \quad (3.97)$$

Тепловий розрахунок ТС включає розрахунок в номінальному режимі роботи та в режимі граничних кратностей первинного струму. Для вирішення рівнянь теплового балансу (3.97) необхідно визначити втрати у трансформаторі.

3.11.1 Розрахунок втрат в елементах конструкції

Сумарні втрати в елементах конструкції ТС (Вт)

$$\Delta p = \Delta p_{\text{з1}} + \Delta p_{\text{з2}} + \Delta p_{\text{см}}, \quad (3.98)$$

де - $\Delta p_{\text{з1}}$ втрати в первинній обмотці ТС, Вт;

$\Delta p_{\text{з2}}$ - втрати у вторинній обмотці ТС, Вт;

$\Delta p_{\text{см}}$ - втрати в сталі магнітопроводу, Вт.

Електричні втрати в обмотках ТС (Вт)

$$\Delta p_{\text{э}} = \kappa_{\text{д}} \cdot I^2 \cdot r = \kappa_{\text{д}} \cdot I^2 \cdot \rho \frac{l}{q} = \kappa_{\text{д}} \cdot J^2 \cdot q \cdot \rho \cdot l, \quad (3.99)$$

де $\kappa_{\text{д}}$ - коефіцієнт збільшення втрат; I - діюче значення струму для даного режиму роботи ТС, А; J - густина струму в обмотці, А/мм²; ρ - питомий електричний опір при робочій температурі, Ом•мм²/м; l - повна довжина провідників обмотки, м; q - площа перетину витка обмотки, мм².

Точний розрахунок коефіцієнта збільшення втрат $\kappa_{\text{д}}$ достатньо складний, тому при практичних розрахунках його доцільно, визначати з кривих (рис. 3.10), при цьому лінійні розміри провідника a , b , d_1 , Δ_1 підставляються в мм, а перетин провідника q - в мм².

Втрати в сталі магнітопровода (Вт)

$$\Delta p_{\text{см}} = P_{1/50} \cdot B_m^2 \cdot (h_M \cdot T_M \cdot k_c) \cdot l_M \cdot 7800, \quad (3.100)$$

де $P_{1/50}$ - значення питомих втрат, відповідних індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц, приймаються по табл. 3.8. Значення підставляються в (3.100) в м.

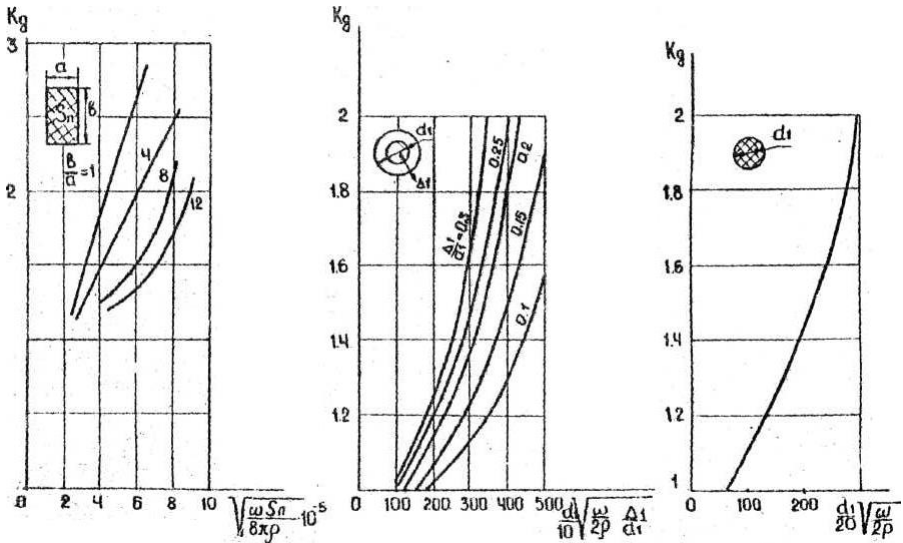


Рисунок 3.10 – До розрахунку коефіцієнта збільшення втрат

Таблиця 3.8 – Питомі втрати в сталі

Марка сталі	3411	3413	3414
$P_{1/50}$, Вт/кг	1.1	0.8	0.7

3.11.2 Робота ТС в номінальному режимі

Теплопередача від джерела втрат до охолоджуючого середовища можлива завдяки тому, що всі матеріали мають теплопровідність. Враховуючи, що теплопровідність провідникових матеріалів та сталі магнітопровода значно перевищує теплопровідність ізоляційних матеріалів, перепадом температури в елементах конструкції звичайно нехтують.

Перепад температури в ізоляції магнітопровода (°C)

$$\Delta\theta_{IM} = \frac{\Delta p_{CT}}{\lambda_{IM} \cdot S_{IM}} \cdot \Delta_{2M}, \quad (3.101)$$

де Δ_{2M} - сумарна товщина ізоляції, накладеної поверх магнітопровода, м; S_{IM} - площа поверхні ізоляції, м²; λ_{IM} - результуючий коефіцієнт теплопровідності ізоляції, Вт/(м·°C).

Перепад температури в ізоляції вторинної обмотки

$$\Delta\theta_{H2} = \frac{\Delta p_{\Sigma 2} + \Delta p_{CT}}{\lambda_{H2} \cdot S_{H2}} \cdot \Delta_{H2}, \quad (3.102)$$

де Δ_{H2} - сумарна товщина (м); S_{H2} - площа поверхні (м²); λ_{H2} - результуючий коефіцієнт теплопровідності ізоляції, накладеної поверх вторинної обмотки [Вт/(м²·°C)].

Перепад температури в ізоляції первинної обмотки

$$\Delta\theta_{H1} = \frac{\Delta p_{\Sigma 1}}{\lambda_{H1} \cdot S_{H1}} \cdot \Delta_{H1}. \quad (3.103)$$

Для даних елементів конструкція ізоляції виконується звичайно багат шаровою з різних матеріалів. В цьому випадку результуючий коефіцієнт теплопровідності ізоляції Вт/(м²·°C)

$$\lambda_H = \frac{\Delta_H}{\Delta_{H1} / \lambda_{H1} + ... + \Delta_{Hi} / \lambda_{Hi}}. \quad (3.104)$$

Тут $\Delta_{H1}....\Delta_{Hi}$ - товщина шарів багат шарової ізоляції, м;

$\lambda_{H1}....\lambda_{Hi}$ - теплопровідності шарів ізоляції з різних матеріалів, Вт/(м²·°C)

Значення теплопровідностей ізоляційних матеріалів приведені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Теплопровідність ізоляційних матеріалів

Матеріал	Вт/(м ² ·°C)
Трансформаторне масло	0.164
Бавовняна стрічка	0.27
Лакоткані	0.25
Папір сухий	0.12
Папір промаслений	0.14
Електрокартон	0.18
Епоксидний компаунд з наповнювачем Епоксидний компаунд без наповнювача Емаль, фарфор	0.53 0.2 1.55

Для робочих температур трансформатора струму відведенням тепла шляхом випромінювання можна нехтувати і вважати, що все

тепло відводиться шляхом конвективного теплообміну. При цьому підвищення температури нагрітої поверхні трансформатора над температурою охолоджуючого середовища ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta\theta_{\text{ПОВ}} = \frac{\sum \Delta p_i}{\alpha_T \cdot S}, \quad (3.105)$$

де α_T - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Коефіцієнти тепловіддачі для різних охолоджуючих середовищ приведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Значення коефіцієнтів тепловіддачі

Охолоджуюче середовище	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
Повітря при природному охолодженні	20
Повітря при швидкості обдува 10 м/с Трансформаторне масло	40
при природному охолодженні	110
Епоксидний компаунд	6.5
Фарфор	14-18

У деяких конструкціях ТС вторинна обмотка виконується у вигляді багатопарової котушки /1-3/. В цьому випадку максимальне перевищення температури обмотки над температурою охолоджуючого середовища, що має місце в центрі котушки ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta\theta_{2\text{max}} = \Delta\theta_{\text{ПОВ}} + \Delta\theta_{\text{И2}} + \Delta\theta_{\text{КАТ}}, \quad (3.106)$$

де $\Delta\theta_{\text{ПОВ}}$ - перевищення температури зовнішньої поверхні котушки над температурою охолоджуючого середовища $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta\theta_{\text{И2}}$ - перепад температури в ізоляції котушки $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta\theta_{\text{КАТ}}$ - перепад температури в котушці $^{\circ}\text{C}$.

Середнє перевищення температури обмотки ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta\theta_{2\text{CP}} = \Delta\theta_{\text{ПОВ}} + \Delta\theta_{\text{И2}} + \frac{2}{3} \cdot \Delta\theta_{\text{КАТ}}. \quad (3.107)$$

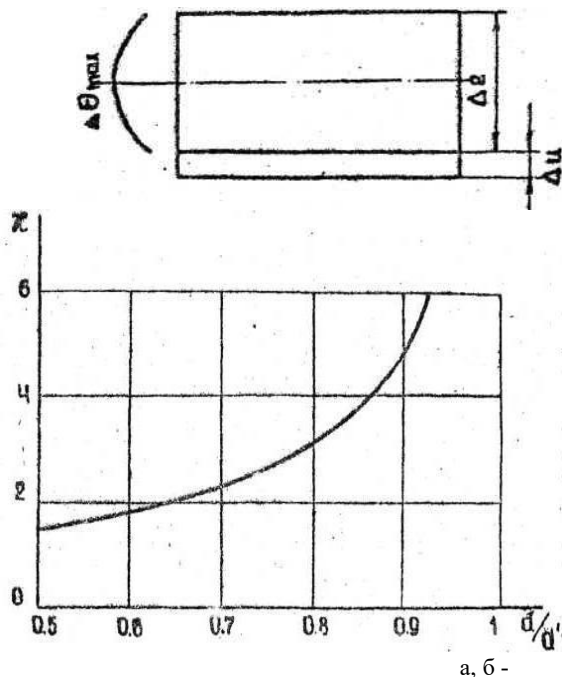


Рисунок 3.11 – До теплового розрахунку вторинної обмотки

Перепад температури у котушці (°C)

$$\Delta\theta_{\text{КАТ}} = \frac{\varphi_{\text{CH2}} \cdot \rho_{\text{ПР}} \cdot J^2 + \Delta p_{\text{СТ}} \cdot b_{\text{К}}^2}{8 \cdot \lambda_{\text{ЭКВ}}} \quad (3.108)$$

де φ_{CH2} - коефіцієнт заповнення котушки дротом ($\varphi_{\text{CH2}} = 0.6, \dots, 0.8$); $\lambda_{\text{ЭКВ}}$ - еквівалентна теплопровідність ізоляції котушки Вт/(м·°C)

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \wp \cdot \lambda_{\text{И}}.$$

Значення $\wp$ вибираються по рис. 3.11б; $\lambda_{\text{И}}$ - по табл. 3.10, $b_{\text{К}}$ - товщина котушки, м (рис. 3.11а).

Перепад температури в ізоляції котушки (°C)

$$\Delta\theta_{\text{И2}} = \frac{\varphi_{\text{CH2}} \cdot \rho_{\text{ПР}} \cdot J^2 \cdot \Delta_{\text{Н2}} \cdot b_{\text{К}}}{2 \cdot \lambda_{\text{И}}} \quad (3.109)$$

де Δ_{H2} - товщина ізоляції котушки, м

Перевищення температури зовнішньої поверхні котушки над температурою охолоджуючого середовища ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta\theta_{\text{пов}} = \frac{\varphi_{\text{CH2}} \cdot \rho_{\text{ПР}} \cdot J^2 + \Delta p_{\text{СТ}}}{2 \cdot \alpha_T} \cdot b_K, \quad (3.110)$$

де α_T - коефіцієнт тепловіддачі охолоджуючого агента (табл.3.10).

Температура даного елементу конструкції (θ_i) визначається температурою охолоджуючого середовища ($\theta_{\text{охл}}$), перевищенням зовнішньої поверхні ТС над температурою охолоджуючого середовища ($\Delta\theta_{\text{пов}}$) і сумарним перепадом температури ($\Delta\theta_i$) по всіх елементах від джерела тепла до охолоджуючої поверхні

$$\theta_i = \theta_{\text{охл}} + \Delta\theta_{\text{пов}} + \sum_{i=1}^n \Delta\theta_{\text{и}i}. \quad (3.111)$$

Допустима температура, при якій гарантується тривала працездатність ТС, повинна бути не більш $90^{\circ}\text{C} / 6/$.

3.11.3 Робота ТС при великих кратностях первинного струму

Тепловий стан ТС при великих значеннях первинного струму може бути оцінений при допущенні, що процес протікає без теплообміну трансформатора з охолоджуючим середовищем, а вся теплота йде на приріст температури трансформатора. При виконанні розрахунків у якості розрахункових величин приймаються:

n_{1T} - кратність струму термічної стійкості ТС;

t_{K3} - час протікання струму термічної стійкості, с;

B_{max} - значення магнітної індукції з урахуванням дійсної кратності вторинного струму (табл. 3.6 при $I_{1K} = 100\%$, $Z_H = Z_{H \text{ ном}}$).

По приведених в п. 3.11.1 виразах необхідно розрахувати втрати в елементах конструкції. При цьому опори обмоток необхідно привести до температур, допустимих для режиму великих кратностей первинного струму

$$r_{\theta} = r_{90} \cdot (1 + 0.00424 \cdot \theta_K). \quad (3.112)$$

Температура даного елементу конструкції (°C)

$$\theta_{iK} = \theta_{iH} + \frac{\Delta p_{iK}}{C_i \cdot G_i} \cdot t_{K3}, \quad (3.113)$$

де θ_{iH} - температура даного елементу в номінальному режимі роботи ТС °C. Можна прийняти гранично допустиму температуру апарату для номінального режиму $\theta_{iH} = 90$ °C; G_i - маса елементу конструкції, кг; Δp_{iK} - втрати в елементі при протіканні струму короткого замикання, Вт; C_i - питома теплоємність матеріалу даного елементу конструкції, Дж/(кг·°C).

Значення теплопровідності різних матеріалів приведені в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Питома теплоємність деяких матеріалів ТС

Матеріал	C, Дж/(кг·°C)
Мідь	390
Алюміній	910
Сталь	480
Бавовняна стрічка	250

Температура режиму великих кратностей первинного струму розраховується для первинної і вторинної обмоток, та магнітопроводу. Розраховані температури повинні бути менше гранично допустимих для короткочасного режиму протікання великих струмів.

Коефіцієнт запасу по нагріву в режимі короткого замикання

$$K_{зАП\theta} = 2 - \frac{\theta_{iK}}{\theta_{iдоп}}.$$

Враховуючи наближений характер розрахунку теплових процесів, необхідно, щоб $K_{зАП\theta} \geq 1.1$.

3.12 Механічний розрахунок

Для ТС зовнішньої установки при достатньо великих розмірах апарату необхідно виконати механічний розрахунок по /1-3/.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТА ДО ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ

1. Чому режим холостого ходу є неприпустимим для ТС?
2. Чому при розгляді ТС не можна зневажати струмом намагнічування?
3. Чи може бути дорівнювати нулю струмова погрішність ТС із коефіцієнтом трансформації, рівним номінальному?
4. Чому при зміні навантаження у вторинному ланцюзі ТС потік розсіювання залишається незмінний?
5. Пояснити характер зміни погрішностей ТС при зміні первинної обмотки?
6. Як впливає зміна ампер-витків первинної обмотки на погрішності ТС?
7. Якими критеріями керуються при визначенні числа витків первинної обмотки?
8. У чому сутність виткової корекції погрішностей трансформатора?
9. Поясните співвідношення між струмами електродинамічної стійкості, струмом термічної стійкості і струмом короткого замикання мережі?
10. Пояснити форму кривої магнітного потоку в магнітопроводі ТС у режимі великих кратностей первинного струму.
11. Пояснити форму кривої ЕРС, що наводиться у вторинній обмотці ТС при розмиканні її кінців.
12. Як впливають властивості матеріалу магнітопроводу ТС на метрологічні показники трансформатора?
13. Пояснити підхід до розрахунку МДС у ТС несиметричних конструкцій.
14. Поясните, чому максимальна кратність вторинного струму при роботі ТС із $Z_H = 0$ більше ніж $Z_H = Z_{H \text{ ном}}$?
15. Дійсна номінальна гранична кратність ТС менше розрахункової. Як це відіб'ється на роботі релейного захисту?
16. У чому перевага П-образної схеми заміщення ТС перед Т-образною?

17. Як змінюються метрологічні показники ТС, якщо дійсне навантаження ТС вище розрахункової?

18. Чому при визначенні довжини шляху потоку розсіювання можна зневажити шляхом замикання його по сталі магнітопроводу?

19. Чому дія потоку розсіювання найбільше сильно виявляється у режимах коротко замкнутої вторинної обмотки і при малих вторинних навантаженнях?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

Основний

1. Трансформаторы тока /В.В. Афанасьев., Н.М.Адоньев., В.М.Кибель и др.а ін. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд, 1989.- 416 с.
2. Автоматизированное проектирование трансформаторов тока: Учеб. пособие / Г.В. Пуйло., В.П.Шевченко., В.В.Гололобов – Одеса: ОПУ 1993.- 118 с.
3. Моделирование и автоматизация проектирования измерительных преобразователей тока / Стогний Б.С., Кириленко А.В., Пуйло Г.В. и др.
4. Чунихин А.А., Жаворнков М.А., Аппараты высокого напряжения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
5. Бачурин Н.И. Трансформаторы тока. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 376 с.
6. ГОСТ 7746-89 «Трансформаторы тока. Общие технические условия».

Додатковий

7. Власенко Р. В. Аналіз енергетичних процесів в трифазному силовому активному фільтрі з використанням спектрального моделювання / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 12-18.
8. Міщенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 19-28.
9. Трушевський В. Е. Застосування автоматичних стрілок тролейбусу як детекторів в системах світлофорного авторегулювання / В. Е. Трушевський // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 29-31.
10. Ершов А. В. Конвективный и лучистый теплообмен при плавлении проволоки в струе дуговой плазмы / А. В. Ершов, Е. А. Зеленина // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 37-42.
11. Крисан Ю. О. Модернізація лабораторного стенда дослідження асинхронного електропривода / Ю. О. Крисан // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 49-54.
12. Ярымбаш Д. С. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса графитации при модернизации боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Вісник

СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 132/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. 2012. С. 93–100

13. Сивокобыленко В. Ф. Совершенствование пусковых органов бавр в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой / В. Ф. Сивокобыленко, С. В. Деркачев // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 61-67.

14. Килимник И.М. Повышение эффективности обработки информации при регистрации контролируемых параметров в системах автоматического управления / И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2007. – № 1. – С. 68 – 73

15. Ткаченко С. Н. Энергосистема будущего. Концепция smart grid. Специфика реализации на Украине / С. Н. Ткаченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 68-73.

16. Ярымбаш Д.С. Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при прессовании заготовок подовых блоков / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрунный // Електротехніка та електроенергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2006. – № 2. – С. 56 – 60.

17. Немудрый И. Ю. Повышение эффективности преобразования энергии в ветроэлектрических установках с аэродинамической мультипликацией / И. Ю. Немудрый // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 79-86.

18. Андриенко П.Д. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Електромашинобудування та електрообладнання, 2006. №66 – С. 291–293.

19. Морозов Д. І. Вентильний двигун постійного струму на базі синхронної машини оберненої конструкції / Д. І. Морозов, І. С. Шевченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 6-12.

20. Власенко Р. В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 20-27.

21. Ярымбаш С. Т. Идентификация характеристик системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора методами математического моделирования / С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш, Д. А. Литвинов // Матеріали МНТК «ПАЭП. Теорія і практика». – Харьков, 2010. – С. 320–324.

22. Михайленко В. В. Аналіз електромагнітних процесів у дванадцяти-пульсному напівпровідниковому перетворювачі з п'ятизонним регулюванням вихідної напруги / В. В. Михайленко, В. І. Чибеліс, Ю. П. Орлиця, О. Р. Трофименко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 28-31.
23. Андриенко П. Д. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонаполненного электрооборудования / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, Л. С. Скрупская // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 32-40.
24. Ярымбаш Д. С. Анализ электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2014. №6 – С. 11 – 21.
25. Задорожная И. Н. Анализ свойств систем автоматического управления двухмассовым электроприводом при синтезе параметров на основе стандартных характеристических полиномов / И. Н. Задорожная, Н. А. Задорожний // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 54-58.
26. Ярымбаш Д. С. Численно-полевой анализ электромагнитных и электротепловых процессов в шинных пакетах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Ползуновский вестник. – 2013. – №4–2. – С. 216–222
27. Тиховод С. М. Моделирование переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 59-68.
28. Кулинич Э. М. Уточнение модели автоматизированного управления двухкомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона / Э. М. Кулинич // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 69-76.
29. Волков В. А. Оценка возможности осуществления гидроаккумуляции на существующих гидроэлектростанциях днепровского каскада Украины / В. А. Волков // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 77-82.
30. Ярымбаш, Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.
31. Ярымбаш, Д.С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 64 – 69.

32. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2005. - №1. – с. 74 – 76.

33. Ярымбаш, Д. С. *Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока* / Д. С. Ярымбаш // *Науковий вісник НГУ* – 2015. – №3. – С.95–102.

34. Ярымбаш, Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш // *Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність*. – 2011, С. 229 – 233.

35. Ярымбаш, Д. С. *Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука пресса* / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // *Вісник кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2007. – №4 (45) Частина 1. – С. 53–55.

36. Ярымбаш, Д. С. *Особенности распределения магнитных потоков в режиме неробочого ходу силовых трансформаторов* / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 2. - С. 5-12.

37. Ярымбаш Д. С. *Особенности назначения параметров короткого замыкания силовых трансформаторов средствами полевой моделирования* / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 12-17.

38. Yarymbash D.S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D.S.Yarymbash, A.M. Oleinikov // *Russian Electrical Engineering*, 2015, Vol.86, Issue 2, pp. 86 – 92.

39. Ярымбаш Д.С. *Моделирование температурных режимов электро-технологической системы «индукторы - мундштук» на подготовительном этапе тура прессования* / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрунный // *Електротехніка та електроенергетика*. 2006. № 1. - С. 56-60.

40. Коцур М.И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования / М.И. Коцур, // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2013 –№1 – С.31-36.

41. Коцур, М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / М. И. Коцур, // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2014 – №1 – С. 32 – 36.

42. Коцур М. И. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. В. Близняков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №1/8(73). – С.27-30.

43. Андриенко П.Д. Применение методов математического моделирования для определения параметров индуктора / П.Д. Андриенко, И.М. Коцур, Д.С. Ярымбаш // Вестник СевНТУ – Севастополь, 2008. – Вып. 88. – С. 117 – 120.

44. Коцур, М. И. Повышение эффективности электропривода вентиляторных установок / М. И. Коцур, И. М. Коцур, Н. С. Иваницкий, Д. А. Кравченко, В. Г. Савельев // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. №25(101) – С. 9 – 16.

45. Ярымбаш Д. С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов / Д. С. Ярымбаш // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. №2. – С. 72–76.

46. Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. - №4 – С. 49-54.

47. Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50.

48. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций / Д. С. Ярымбаш, Ю.В. Даус // Електротехніка та електроенергетика. - 2014 - № 1 - С. 74-78.

49. Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Oliinyk, A. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, 2017, Catalog Number CFP17CDT-USB, pp. 452-457.

50. Ярымбаш, Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика – 2017. – №1 – С. 24 – 30.

51. Дивчук, Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М.

Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Электротехника та електроенергетика*. – 2017. – № 2. – С. 56-66.

52. Kotsur, M. A New Approach of the Induction Motor Parameters Determination in Short-Circuit Mode by 3D Electromagnetic Field Simulation [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kotsur // *International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, October 17th - 20th, Lviv, Ukraine, 2017, pp. 207-210

53. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2017, pp. 88-91

54. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей / Д. С. Ярымбаш, И. М. Климиник, С. Т. Ярымбаш // *Электротехника та електроенергетика*. – 2012. – № 2. – С. 55 – 61.

55. Yarymbash D. Features of Defining Three-Phase Transformer No-Load Parameters by 3D Modeling Methods [Text] / D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk, D. Litvinov // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2017, pp. 132-135.

56. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018.

57. Yarymbash, D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018.

58. Дивчук, Т.Е. Особенности определения параметров силовых трансформаторов методами схемно-полевого моделирования / Дивчук, Т.Е., Д. К. Мимоход, С. А. Кутилин, А. Е. Кузнецов, Ю. В. Гуразда, И. С. Сирых // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2017. – № 1. – С. 61-70.

59. Ярымбаш, Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // *«Электротехника и электромеханика»*. – 2012. №1. – С. 49 – 54.

60. Ярымбаш, Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. // *Вісник Кременного тока*

менчуцького державного політехнічного університету. – 2006, Вип. 3/2006(38), – С. 53 – 55.

61. Малюшевская А.П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах / АП Малюшевская, АЯ Дмитришин, СО Топоров // Електротехніка та електроенергетика – 2015. - №1. – С. 21-25.

62. Верещаго Е.Н. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. - №2. – С. 40-46.

63. Ярымбаш Д. С. Анализ энергоэффективности конструкции торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 26-34.

64. Иванков В. Ф. Электротепловые расчетные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В. Ф. Иванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 41-53

65. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія. 2014. – С. 131 – 136.

66. Ярымбаш Д. С. Влияние расположения заготовок электродов на распределение удельной мощности в керне печи Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 5-11

67. Ivankov V. F. Calculation of CFD-thermal models of oil-cooled transformer equipment / V. F. Ivankov, A. V. Basova // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 19-32.

68. Ципленков Д. В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д. В. Ципленков, П. Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика. 2015. № 1. С. 77–82.

69. Костін М. О. Енергетичні спектри випадкових процесів тягових напруг і струмів електротранспорту / М. О. Костін // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 71-80

70. Літвінов Д. О. Схемно-польове моделювання теплових процесів в асинхронних двигунах / Д. О. Літвінов, О. О. Шлянін, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремідловська, Ріхам Матар // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 71-78

71. Остренко М. В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными

условиями импедансного типа / М. В. Остренко, С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 33-42.

72. Курись Л. В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. № 1. - С. 4-10.

73. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 11-16.

74. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности силовоточных разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 17-20.

75. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников, А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26-33.

76. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34-38.

77. Yarymbash, D. S. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method / D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, M. I. Kotsur, D. O. Litvinov // Radio Electronics, Computer Science, Control. - 2018. - № 1. - P. 65-74.

78. Курись Л. В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. № 1. - С. 4-10.

79. Ярымбаш Д.С. Анализ энергоэффективности торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 23 - 30.

80. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 11-16.

81. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности силовоточных разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 17-20.

82. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников,

А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26–33.

83. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34–38.

84. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 46–49.

85. Шкрабець Ф. П. Техніко-економічна оцінка оптимального рівня напруги для електроживлення робочих горизонтів глибоких шахт / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук, А. В. Кожевников, А. В. Акулов // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 50–54.

86. Волков В. А. Совершенствование частотного пуска гидроагрегата гидроаккумулирующей электростанции в насосном режиме / В. А. Волков, Д. В. Довбишук // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 55–61.

87. Літвінов В. В. Удосконалення методу оцінювання надійності схем релейного захисту / В. В. Літвінов, Я. С. Саченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 62–69.

88. Дьяченко В. В. Формирование программы энергосбережения для систем электроснабжения / В. В. Дьяченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 70–76.

89. Тиховод С. М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 5-14.

90. Коваленко М. А. Автономний експериментальний стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 15-20.

91. Дівчук, Т.Є. Уточнюючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей / Т.Є. Дівчук, Д.С. Яримбаш, С.Т. Яримбаш, І.М. Килимник, М.І. Коцур, Ю.С. Безверхня // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2018. – N 2. - С. 6-15.

92. Іванков В. Ф. Верифікація методів електротеплових розрахунків електричних реакторів без сталі / В. Ф. Іванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 26-34

93. Токмаков И. В. Моделирование электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях на основе использования полиномов чебышёва / И. В. Токмаков // *Электротехника та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 35-41.

94. Сидорец В. Н. Особенности анализа распределения тока высокой частоты в осесимметричных электродах электрохирургических инструментов / В. Н. Сидорец, А. Г. Дубко // *Электротехника та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 42-47.

95. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // *Электротехника та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 48-54.

96. Андриенко П.Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука пресса / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // *Разработка рудных месторождений*. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163 – 167.

97. Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования электромагнитного поля в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам печи графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // *Электротехника*. – М.: Знак. – №2. 2015. – С. 44 – 50.

98. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // *Электротехника та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 65-70.

99. Міщенко Т. М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів / Т. М. Міщенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 81-86.

100. Скалько Ю. С. Удосконалення групового регулювання гідроагрегатів дніпровської гес за допомогою нечіткої логіки / Ю. С. Скалько // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 95-99.

101. Коцур М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко // *Электротехника та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 5-11.

102. Дивчук, Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М.

Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2017. – № 2. – С. 56-66.

103. Малюшевська А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короточасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 18-24.

104. Yarymbash, D. Enhancing the effectiveness of calculation of parameters for short circuit of threephase transformers using field simulation methods / D. Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4, № 5 (94). - P. 22-28.

105. Цабенко М. В. Системи антипомпажного керування відцентровим компресором / М. В. Цабенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 35-41.

106. Слободенюк Ю. О. Модель розрахунку миттєвих параметрів режиму системи тягового електропостачання при русі електровозу / Ю. О. Слободенюк, О. В. Бялобржеський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 42-48.

107. Ярымбаш Д.С. Особенности обработки данных регистрации электрических параметров электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 2014. №2 – С. 59 – 65.

108. Ярымбаш Д. С. Оценка погрешности сенсоров тока автоматизированной системы управления технологическим процессом графитации / Д.С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – № 03(79) – 2011

109. Чередник Н. Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки при паралельній та автономній роботі з урахуванням явища насичення магнітної системи генератора / Н. Г. Чередник, О. В. Бялобржеський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 49-56.

110. Ярымбаш Д.С. Идентификация параметров электродинамической стойкости короткой сети мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2012. Вип. 3/2012 (19). – С. 487 – 490

111. Власенко Р. В. Корекція алгоритму визначення заданого струму силового активного фільтра на основі теорії фрізе в умовах несиметрії / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 57-63.

112. Ярымбаш Д.С. Особенности оптимизации электрических режимов графитации / Д.С. Ярымбаш // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса, 2014. – №15 (91). – С. 215 – 219.

113. Yarymbash, D. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuitfield modelling methods / D. Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3, № 5 (93). – P. 6-11.

114. Малюшевська А. П. Вплив морфологічних особливостей конденсаторних полімерних плівок на їх деформаційні властивості / А. П. Малюшевська, Г. М. Ющишина // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 13-18.

115. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров торцевых ошинок печей сопротивления прямого действия / Д.С. Ярымбаш, А. М.Олейников, С. Т.Ярымбаш, И.М. Килимник // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. №36. –С. 466–470

116. Андрієнко П. Д. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу / П. Д. Андрієнко, С. І. Шило, О. О. Каплієнко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 51-58.

117. Золотаревский А. И. Исследование спектральной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков в диапазоне низких частот / А. И. Золотаревский, С. П. Лушин // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 6-11.

118. Малюшевська А. П. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров, В. І. Гунько // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 12-17.

119. Ярымбаш Д.С. Повышение эффективности использования фотопанелей на солнечных электростанциях / Д. С. Ярымбаш, Ю. В. Даус // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2015. - № 1. - С. 22-28

120. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и электротепловых процессов в области торцевых шинных пакетов печей графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. №11. – С. 60–68.

121. Качан Ю. Г. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових перешкод у камерних печах / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, А. В. Сибір // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 18-23.

122. Василенко О. В. Модель крокового двигуна для дослідження систем автоматичного позиціонування в ECAD / О. В. Василенко, Є .Л. Жавжаров // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 31-38.

123. Ярымбаш Д.С. Особенности распределения электрической мощности нагрева в керне печи графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2013. – вип.. 37. – С. 94 – 100

124. Дзензерский В. А. Разработка алгоритма автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Пласин, В. В. Лисунова // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 39-47.

125. Ярымбаш Д.С. Идентификация температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений керна в процессе графитации / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. №2. – С. 66 – 70.

126. Алексеевский Д. Г. Определение рабочей области иппн в составе электрохимической системы взу с переменной скоростью вращения / Д. Г. Алексеевский, П. Д. Андриенко, К. О. Турышев, О. О. Панкова // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 79-85.

127. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета токов короткого замыкания мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2012. - № 1. - С. 23-30

128. Зиновкин В. В. Влияние нестационарных электромагнитных процессов на электрохимические параметры в синхронном электроприводе / В. В. Зиновкин, Н. Л. Антонов, Ю.А. Крисан // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 6-17.

129. Zirka S. E. Topological transient models of three-phase five-limb transformer / S. E. Zirka, Y. I. Moroz, C. M. Arturi, D. Bonnman // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 18-25.

130. Ярымбаш Д.С. Метод частотной адаптации уравнений Максвелла для переменного тока к рекуррентным уравнениям в формулировках для постоянного тока / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Автоматизація процесів та управління. – Севастополь. 2014. – С. 203 – 206

131. Мацуї А. М. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора / А. М. Мацуї, В. О. Кондратець // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 38-49.

132. Ярымбаш Д.С. Выбор критерия энергоэффективности боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність – 2012.

133. Паталах Д. Г. Численный безытерационный метод моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях / Д. Г. Паталах, С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 50-55.

134. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации электрических параметров контура печи графитации переменного тока методами полевого моделирования и оптимизации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. Вип. 15/2014. – Севастороль. 2014. – С. 108 – 112.

135. Дивчук Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, М. И. Коцур, Ю. Безверхняя // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 56-66.

136. Лаврич Ю. М. Методологічний підхід до побудови енергоощадної системи аварійного освітлення / Ю. М. Лаврич, Л. М. Погоріла, А. Ю. Подчасов // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 67-73.

137. Шутенко О. В. Анализ динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов арг, в исправных высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / О. В. Шутенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 74-83.

138. Лобов В. Й. Управління газоповітряною енергетичною установкою промислового підприємства / В. Й. Лобов, К. В. Лобова, А. В. Даць // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 84-95.

139. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 5-13.

140. Китаев А. В. Схемы замещения электрических машин / А. В. Китаев, В. Л. Агбомассу, В. И. Глухова // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 14-26.

141. Верещаго Е. Н. Модель электрической дуги в MATLAB / SIMULINK / Е. Н. Верещаго, В. И. Костюченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 40-46.

142. Ершов А. В. Влияние магнитного поля проводника на течение металла на торце проволоки в дуговом разряде / А. В. Ершов, Е. А. Зеленина // *Электротехника та електроенергетика*. - 2013. - № 2. - С. 62-65.

143. Пожуєв В. І. Визначення ефективності існуючих гідроенергетичних систем / В. І. Пожуєв, В. В. Радченко, Ф. П. Шкрабець, В. Г. Кучер, В. П. Кобець // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2013. - № 2. - С. 71-76.

144. Олейников А.М. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами / А.М. Олейников, Л.Н. Канов, Ю.В. Матвеев, Е.И. Зарицкая // *Электротехника та електроенергетика*. – 2010. – № 2. – С.62 – 67

145. Гребеников В.В. *Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами* / В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2009. - №2. - С. 57-60.

146. Андриенко П. Д. *Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта* / П. Д. Андриенко, В. Д. Лобода, А. В. Мищенко // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2001. – № 1. – С. 55–58.

147. Канов Л. Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока / Л. Н. Канов // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2004. – № 1. – С. 5–9.

148. Лучко, А. Р. *Имитационное моделирование электромагнитных процессов в магнитосвязанных электрических цепях* [Текст] / А. Р. Лучко, Т. В. Попова // *Электротехніка та електроенергетика*. - 2009. - № 1. - С. 16-22

149. Яримбаш Д. С. Розрахунок параметрів головних шинних пакетів секцій печей графітації змінного струму [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш – Електрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. ISBN 978-617-529-171-9 Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/2682>

150. Килимник І. М. Диференціальні рівняння : навчальний посібник / І. М. Килимник, Д. С. Яримбаш. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – 102 с. ISBN 978-617-529-197-9 Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3376>

Додаток А
Бланк завдання на курсовий проект

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра _____

Дисципліна _____

Спеціальність _____

Курс _____ Група _____ Семестр _____

ЗАВДАННЯ
на курсовий проект (роботу) студентів

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема проекту (роботи): _____

2 Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи): _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи): _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): _____

6. Дата видачі завдання: _____

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Вихідні дані для проектування трансформаторів струму

Но мер ва- рі- ан- та	Номі- наль- на на- пруга, кВ	Номіна- льний первин- ний струм, А	Номі- наль- ний вторин- ний струм, А	Номі- нальна потуж- ність, ВА	Клас точ- ності	Кое- фіці- єнт тран- сфор- мації	Крат- ність пер- вин- ного струму	Кое- фіці- єнт дина- мічної стій- кості	Кое- фіці- єнт поту- жності
	U _н	I _{1н}	I _{2н}	S _{2н}	К _л	K ₁₀	n _{1Г}	n _{1Д}	cos φ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15	15	1	3	1	16	30	150	0.8
2	15	15	2	3	0.2	8	37	140	0.8
3	24	30	5	7	0.2	7	32	170	0.8
4	24	30	1	7	1	32	37	130	0.8
5	27	25	5	10	3	20	30	120	0.8
6	27	40	2	10	1	44	33	130	0.8
7	27	45	5	10	0.2	10	42	125	0.8
8	27	40	2	10	0.2	25	39	150	0.8
9	220	75	2	40	3	25	90	200	0.8
10	150	75	1	30	0.2	76	65	150	0.8
11	110	75	5	20	3	27	70	160	0.8
12	110	75	2	20	0.2	39	75	165	0.8
13	150	80	1	25	1	80	70	125	0.8

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	150	80	5	25	0.5	20	70	130	0.8
15	150	100	5	10	1	21	60	140	0.8
16	15	15	5	3	0.5	4	30	160	0.8
17	150	100	2	30	3	51	70	150	0.8
18	220	75	2	40	0.2	40	80	190	0.8
19	220	150	5	30	0.2	32	75	200	0.8
20	110	50	1	20	0.2	16	70	240	0.8
21	110	50	5	20	0.5	26	70	240	0.8
22	110	75	1	20	0.5	32	70	240	0.8
23	110	100	5	20	0.2	80	70	160	0.8
24	110	150	1	40	0.5	10	70	240	0.8
25	110	200	1	40	0.2	16	70	200	0.8
26	220	600	5	40	0.2	32	90	120	0.8
27	220	800	1	40	0.5	25	90	120	0.8
28	220	1500	5	60	0.2	80	70	100	0.8
29	220	2000	5	20	0.2	44	70	90	0.8
30	220	3000	1	20	0.5	51	70	90	0.8
31	33	100	5	3	0.5	10	32	169	0.8
32	33	150	5	3	0.5	25	37	150	0.8
33	33	300	5	10	0.5	44	30	110	0.8
34	33	600	5	10	0.5	10	37	120	0.8
35	33	1200	5	25	0.5	70	54	56	0.8

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
36	35	500	1	40	0.5	44	49	145	0.8
37	35	2000	5	40	0.5	80	57	145	0.8
38	35	3000	5	63	0.5	80	49	125	0.8
39	35	40	5	63	0.5	25	18	130	0.8
40	35	50	5	20	0.5	76	24	78	0.8
41	35	75	5	20	0.5	39	55	100	0.8
42	35	100	5	20	0.5	80	42	98	0.8
43	35	150	5	20	0.5	25	37	80	0.8
44	35	200	5	25	0.5	39	51	80	0.8
45	35	400	5	25	0.5	27	55	141	0.8
46	35	800	5	25	0.5	44	12	70	0.8
47	35	1000	5	63	0.5	39	50	130	0.8
48	35	1500	5	63	0.5	37	46	100	0.8
49	35	2000	5	80	0.5	76	34	90	0.8
50	66	200	1	6.3	0.5	27	18	96	0.8
51	66	350	5	6.3	0.5	37	20	74	0.8
52	66	600	5	10	0.5	51	30	90	0.8
53	66	1200	5	10	0.5	39	36	96	0.8
54	132	200	1	25	0.5	18	34	70	0.8
55	132	300	5	25	0.5	44	32	50	0.8
56	132	400	5	25	0.5	25	30	80	0.8
57	132	300	1	20	0.5	37	28	60	0.8

Додаток В

Загальні технічні умови на ТС по ГОСТ 7746-78

Таблиця В.1 - Номінальні параметри трансформаторів струму

Найменування параметра	Значення параметра
Номінальна напруга трансформатора струму $U_{ном}$, кВ	0,66; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750
Найбільша робоча напруга $U_{нр}$, кВ	0,8; 7,2; 12; 17,5; 24; 26,5; 30; 40,5; 126; 172; 252; 363; 525; 787
Номінальний первинний струм трансформатора $I_{1ном}$, А	1; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 800; 1000; 1200; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 8000; 10000; 12000; 14000; 16000; 18000; 20000; 25000; 28000; 30000; 32000; 35000; 40000
Номінальний вторинний струм $I_{2ном}$, А	1, 5
Номінальне вторинне навантаження $S_{2ном}$ з коефіцієнтом потужності $\cos\varphi=0,8$, ВА	1; 2; 2,5; 3; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 90; 100; 120

Таблиця В.2 - Межі допустимих погрешностей вторинних обмоток для вимірів

Клас точності	Первинний струм от номінального, %	Межі допустимих погрешностей		Межі вторинного навантаження з $\cos\varphi = 0,8$, % від $Z_{ном}$
		струмової, %	кутової, хв	
0,2	5	0,75	30	25...100
	20	0,35	15	
	100... 120	0,2	10	
0,5	5	1,5	90	25...100
	20	0,75	45	
	100... 120	0,5	30	

Продовження таблиці В.2

1	5	3,0	180	25... 100
	20	1,5	90	
	100... 120	1,0	60	
3	50...120	3,0	не нормується	50... 100
5	50... 120	5,0	не нормується	50... 100
10	50... 120	10,0	не нормується	50... 100

Таблиця В.3 - Нижня межа вторинних навантажень трансформаторного струму з номінальною вторинною навантаженістю менше 15 ВА

Номінальне вторинне навантаження $S_{2\text{ном}}$, ВА	2,5	5	10
Нижня межа вторинного навантаження Z_2 с $\cos\varphi=0.8$, % от $Z_{2\text{ном}}$	50	75	37,5

Таблиця В.4 - Нижня межа вторинних навантажень трансформаторів струму з номінальним вторинним навантаженням більш 60 ВА

Номінальне вторинне навантаження Z_n , ВА	60
Нижня межа вторинного навантаження Z_2 при $\cos\varphi_n=0.8$, Ом	$15/I_{2\text{ном}}$

Таблиця В.5 - Межі допустимих погрішностей вторинних обмоток для захисту

Клас точності	Межі допустимих погрішностей		
	При номінальному первинному струмі		При струмі номінальної граничної кратності
	струмова, %	кутова, хв	повна погрішність
5P	1	60	5%
10P	3		10 %

Додаток Г

Електромагнітні характеристики витих кільцевих магнітопроводів

Таблиця Г.1 - Характеристики намагнічування електротехнічних сталей 3405 товщиною 0,35 мм та залежність кута втрат від індукції

Магнітна індукція В, Тл	Напруженість магнітного поля Н, А/м		Кут втрат ψ , гр.ел			
	Характеристика намагнічування магнітопроводу		Характеристика намагнічування готового ТС		Характеристика кута втрат	
	краща	гірша	краща	гірша	краща	гірша
1	2	3	4	5	6	7
0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	39,00	17,0
0,001	0,042	0,100			39,05	17,1
0,002	0,084	0,200			39,10	17,2
0,003	0,125	0,300			39,15	17,3
0,004	0,168	0,400			39,20	17,4
0,005	0,210	0,500			39,25	17,5
0,006	0,252	0,600			39,30	17,6
0,007	0,294	0,700			39,35	17,7
0,008	0,336	0,800			39,40	17,8
0,009	0,378	0,900			39,45	17,9
0,010	0,42	1,000	0,42	1,20	39,50	18,0
0,011	0,459	1,08			39,55	18,25
0,012	0,498	1,16			39,60	18,50
0,013	0,537	1,24			39,65	18,75
0,014	0,576	1,32			39,70	19,00
0,015	0,615	1,40			39,75	19,25
0,016	0,654	1,48			39,80	19,50
0,017	0,693	1,56			39,85	19,75
0,018	0,732	1,64			39,90	20,00
0,019	0,771	1,72			39,95	20,25
0,020	0,810	1,80	0,81	2,16	40,00	20,50
0,021	0,849	1,867			40,15	20,7
0,022	0,888	1,934			40,30	20,9
0,023	0,927	2,001			40,45	21,1

Продовження табл. Г.1

1	2	3	4	5	6	7
0,024	0,966	2,068			40,60	21,3
0,025	1,005	2,135			40,75	21,5
0,026	1,044	2,202			40,90	21,7
0,027	1,083	2,269			41,05	21,9
0,028	1,122	2,336			41,20	22,1
0,029	1,161	2,403			41,35	22,3
0,030	1,200	2,470	1,20	2,96	41,50	22,5
0,031	1,232	2,538			41,65	22,7
0,032	1,264	2,606			41,80	22,9
0,033	1,296	2,674			41,95	23,1
0,034	1,328	2,742			42,10	23,3
0,035	1,360	2,810			42,25	23,5
0,036	1,392	2,878			42,40	23,7
0,037	1,424	2,946			42,55	23,9
0,038	1,456	3,014			42,70	24,1
0,039	1,488	3,082			42,85	24,3
0,040	1,520	3,150	1,52	3,78	43,0	24,5
0,041	1,551	3,20			43,1	24,65
0,042	1,582	3,25			43,2	24,80
0,043	1,613	3,30			43,3	24,95
0,044	1,644	3,35			43,4	25,10
0,045	1,675	3,40			43,5	25,25
0,046	1,706	3,45			43,6	25,40
0,047	1,737	3,50			43,7	25,55
0,048	1,768	3,55			43,8	25,70
0,049	1,799	3,60			43,9	25,85
0,050	1,830	3,65	1,83	4,38	44,0	26,00
0,06	2,064	4,064			45,2	27,2
0,07	2,298	4,478			46,4	28,4
0,08	2,532	4,892			47,6	29,6
0,09	2,766	5,306			48,8	30,8
0,10	3,000	5,720	3,00	6,86	50,0	32,00
0,11	3,164	6,036			50,6	32,65

Продовження табл.Г.1

1	2	3	4	5	6	7
0,12	3,328	6,352			51,2	33,30
0,13	3,492	6,668			51,8	33,95
0,14	3,656	6,984			52,4	34,60
0,15	3,820	7,300			53,0	35,25
0,16	3,984	7,616			53,6	35,90
0,17	4,148	7,932			54,2	36,65
0,18	4,312	8,248			54,8	37,20
0,19	4,476	8,564			55,4	37,85
0,20	4,640	8,880	4,64	10,70	56,0	38,50
0,21	4,769	9,202			56,45	38,95
0,22	4,898	9,524			56,90	39,40
0,23	5,027	9,846			57,35	39,85
0,24	5,156	10,168			57,8	40,30
0,25	5,285	10,490			58,25	40,75
0,26	5,414	10,812			58,70	41,20
0,27	5,543	11,134			59,15	41,65
0,28	5,672	11,456			59,60	42,10
0,29	5,801	11,778			60,05	42,55
0,30	5,930	12,100	5,93	14,50	60,50	43,00
0,31	6,077	12,36			60,85	43,3
0,32	6,224	12,62			61,20	43,6
0,33	6,371	12,88			61,55	43,9
0,34	6,518	13,14			61,90	44,2
0,35	6,665	13,40			62,25	44,5
0,36	6,812	13,66			62,60	44,8
0,37	6,959	13,92			62,95	45,1
0,38	7,106	14,18			63,30	45,4
0,39	7,253	14,44			63,65	45,7
0,40	7,400	14,70	7,40	17,60	64,00	46,0
0,41	7,511	14,96		17,92	64,25	46,25
0,42	7,622	15,22		18,24	64,50	46,50
0,43	7,733	15,48		18,56	64,75	46,75
0,44	7,844	15,74		18,88	65,00	47,00

Продовження табл.Г.1

1	2	3	4	5	6	7
0,45	7,955	16,00		19,20	65,25	47,25
0,46	8,066	16,26		19,52	65,50	47,50
0,47	8,177	16,52		19,84	65,75	47,75
0,48	8,288	16,,78		20,16	66,00	48,00
0,49	8,399	17,04		20,48	66,25	48,25
0,50	8,510	17,30	8,51	20,80	66,50	48,50
0,51	8,60	17,60		21,16		
0,52	8,69	17,90		21,52		
0,53	8,78	18,20		21,88		
0,54	8,87	18,50		22,24		
0,55	8,96	18,80		22,60		
0,56	9,05	19,10		22,96		
0,57	9,14	19,40		23,32		
0,58	9,23	19,70		23,68		
0,59	9,32	20,00		24,04		
0,60	9,41	20,30	9,41	24,40	67,5	50,5
0,61	9,509	20,53		24,67		
0,62	9,608	20,76		24,94		
0,63	9,707	20,99		25,21		
0,64	9,806	21,22		25,48		
0,65	9,905	21,45		25,75		
0,66	10,004	21,68		26,02		
0,67	10,103	21,91		26,29		
0,68	10,202	22,14		26,56		
0,69	10,301	22,37		26,83		
70	10,400	2260	10,40	27,10	68,5	50,0
0,71	10,5	22,91		27,47		
0,72	10,6	23,22		27,84		
0,73	10,7	23,53		28,21		
0,74	10,8	23,84		28,58		
0,75	10,9	24,15		28,95		
0,76	11,0	24,46		29,32		
0,77	11,1	24,77		29,69		

Продовження табл.Г.1

1	2	3	4	5	6	7
0,78	11,2	25,08		30,06		
0,79	11,3	25,39		30,43		
0,80	11,4	25,70	11,40	30,80	68,5	48,5
0,81		26,09		31,27		
0,82		26,48		31,74		
0,83		26,87		32,21		
0,84		27,26		32,68		
0,85		27,65		33,15		
0,86		28,04		33,62		
0,87		28,43		34,09		
0,88		28,82		34,56		
0,89		29,21		35,03		
0,90	12,3	29,60	12,30	35,50	69,5	45,5
0,91		30,01		35,994		
0,92		30,42		36,488		
0,93		30,83		36,982		
0,94		31,24		37,476		
0,95		31,65		37,970		
0,96		32,06		38,464		
0,97		32,47		38,958		
0,98		32,88		39,452		
0,99		33,29		39,946		
1,00	13,6	33,70	13,60	40,440	69,5	41,5
1,01		34,12		40,944		
1,02		34,54		41,448		
1,03		34,96		41,952		
1,04		35,38		42,456		
1,05		35,80		42,960		
1,06		36,22		43,464		
1,07		36,64		43,968		
1,08		37,06		44,472		
1,09		37,48		44,976		
1,10	15,00	37,90	15,00	45,480	70,0	36,5

Продовження табл.Г.1

1	2	3	4	5	6	7
1,11		38,46		46,152		
1,12		39,02		46,824		
1,13		39,58		47,496		
1,14		40,14		48,168		
1,15		40,70		48,840		
1,16		41,26		49,152		
1,17		41,82		50,184		
1,18		42,38		50,856		
1,19		42,94		51,528		
1,20	16,40	43,50	16,40	52,200	70,0	31,5
1,21		44,32	16,55	53,184		
1,22		45,14	16,70	54,168		
1,23		45,96	16,85	54,152		
1,24		46,78		56,136		
1,25		47,60		57,120		
1,26		48,42		58,104		
1,27		49,24		59,088		
1,28		50,06		60,072		
1,29		50,88		61,056		
1,30	17,90	51,70	17,90	62,040	69,5	26,0
1,31		52,71		63,252		
1,32		53,72		64,464		
1,33		54,73		65,676		
1,34		55,74	18,35	66,888		
1,35		56,75		68,100		
1,36		57,76		69,312		
1,37		58,77		70,524		
1,38		59,78		71,736		
1,39				72,948		
1,40	18,80	61,80	18,80	74,160	68,0	21,0
1,41		63,80		76,56		
1,42		65,80		78,96		
1,43		67,80		81,36		

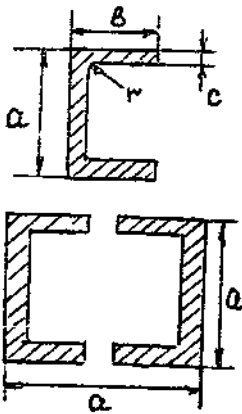
Продовження табл.Г.1

1	2	3	4	5	6	7
1,44		69,80		83,76		
1,45		71,80		86,16		
1,46		73,80		88,56		
1,47		75,80		90,96		
1,48		77,80		93,36		
1,49		79,80		95,76		
1,50	21,80	81,80	21,80	98,16	65,0	16,0
1,51		84,44		101,328		
1,52		87,08		104,496		
1,53		89,72		107,664		
1,54		92,36		110,832		
1,55	23,70	95,00	23,70	114,000	62,0	13,5
1,56		105,00		126,000		
1,57		115,00		138,000		
1,58		125,00		150,000		
1,59		135,00		162,000		
1,60	25,70	145,00	25,70	174,000	58,0	11,5
1,65	28,20	240	28,20	288	51,5	9,5
1,66				318		
1,67				348		
1,68				378		
1,69				408		
1,70	31,10	365	31,10	438	42,5	7,5
1,71	31,88	406				
1,72	32,66	447				
1,73	33,44	488				
1,74	34,22	529				
1,75	35,00	570	35,00	684	30,0	6,0
1,76		972		1166,4		
1,78		1776		2131,2		
1,80	40,00	2580	40,00	3096,0	17,0	4,5
1,82	43,00	4400	43,00	5280	12,5	4,0
1,84	46,00	6900	46,00	8280	10,0	3,5

Додаток Е

Розміри обмотувальних проводів

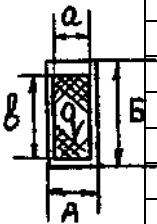
Таблиця Е.1 - Розміри шин коробчатого перетину

	a, мм	b, мм	c, мм	г, мм	q, мм ²
	75	35	4	6	520
	75	35	5,5	6	695
	100	45	4	8	775
	100	45	6	8	1010
	125	55	6,5	10	1370
	150	65	7	10	1785
	175	80	8	12	2440
	200	90	10	14	3435
	200	90	12	16	4040
	225	105	12,5	16	4680
	250	115	12,5	16	5450

Таблиця Е.2 - Максимальні розміри круглих проводів марок ПЭЛБД, АПЛБД, ПСД

Діаметр дроту, мм	Діаметр ізо- льованого про- воду, мм	Діаметр дроту, мм	Діаметр ізо- льованого про- воду, мм
1,16	1,41	1,35	1,6
1,2	1,46	1,4	1,65
1,25	1,5	1,45	1,7
1,3	1,55	1,74	1,99
1,81	2,05	3,28	3,60
1,88	2,15	3,53	3,85
1,96	2,22	3,80	4,12
2,02	2,30	4,10	4,43
2,10	2,38	4,50	4,83
2,26	2,57	5,20	5,53
2,44	2,75	тільки АПЭЛБД	
2,63	2,94	5,00	5,38
2,83	3,14	6,00	6,34
3,06	3,37	8,00	8,35

Таблиця Е.3 - Розміри проводу марки ПВДО



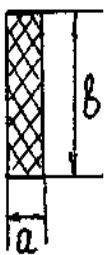
The technical drawing shows a cross-section of a cable with a central conductor of diameter 'b', surrounded by insulation of thickness 'A', and an outer jacket of thickness 'B'. The total outer diameter is labeled 'B'.

Розрахунковий перетин струмопровідної жили, мм ²	Розміри жили a x b, мм	Максимальні зовнішні розміри проводу А x Б, мм	Електричний опір при 20 °С, Ом/м
13,4	3,3 x 5,1	4,5 x 6,3	0,001354
15,5	3,8 x 5,1	5,0 x 6,3	0,001171
15,5	4,4 x 4,4	5,6 x 5,6	0,001171
18,0	4,4 x 5,1	5,6 x 6,3	0,001010
24,3	4,4 x 6,9	5,6 x 8,1	0,000757
21,0	5,1 x 5,1	6,3 x 6,3	0,000864
32,6	5,1 x 8,0	6,3 x 9,2	0,000557
44,0	5,1 x 10,8	6,3 x 12,1	0,000413
28,2	5,9 x 5,9	7,1 x 7,1	0,000643
38,0	6,9 x 6,9	8,1 x 8,1	0,000478
51,2	6,9 x 9,3	8,1 x 10,5	0,000355
51,2	8,0 x 8,0	9,2 x 9,2	0,000355
69,0	8,0 x 10,8	9,2 x 12,1	0,000263
80,0	3,0 x 12,8	9,2 x 13,8	0,000227

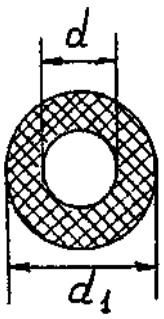
Таблиця Е.4 - Розміри мідної проволоки прямокутного перетину

	b, мм	a, мм	q, мм ²	a, мм	q, мм ²	a, мм	q, мм ²	a, мм	q, мм ²	a, мм	q, мм ²
	5	2.00	9,64			3.00	14,45			4.00	—
	6		11,64				—				23,14
	7,1		13,84				11,95				27,50
	8		15,64				14,45				31,14
	9		17,64				17,2				36,14
	10		19,64				19,45				39,14
	11,2		22,04				21,95				43,94
	12,5		24,64				24,45				49,14
	14		27,64				27,45				55,14
	15		29,64				30,7				59,10
	16		31,64				34,5				63,1
	20		—				36,95				79,5
	25		—				39,45				99,5
	28		—				49,52				112,0
	30		—				—				119,5

Таблиця Е.5 - Розміри мідних та алюмінієвих шин прямокутного перетину

	b, мм	a, мм
	10, 12	3, 4, 5, 6
	15	3, 4, 5, 6, 8, 10
	20	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12
	25	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15
	30, 40, 50, 60	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20
	80	5, 6, 8, 10, 12, 15
	100	5, 6, 8, 10, 12
	120	6, 8, 10, 12

Таблиця Е.6 - Розміри алюмінієвих шин трубчастого перетину

	d ₁ , мм	d, мм	d ₁ , мм	d, мм
	16	13	50	45
	20	17	55	50
	22	18	60	54
	30	27	70	64
	36	26	80	74
	30	25	80	72
	40	36	85	75
	40	35	95	90
	45	40	100	90

Додаток Ж **Габаритні розміри трансформаторів струму**

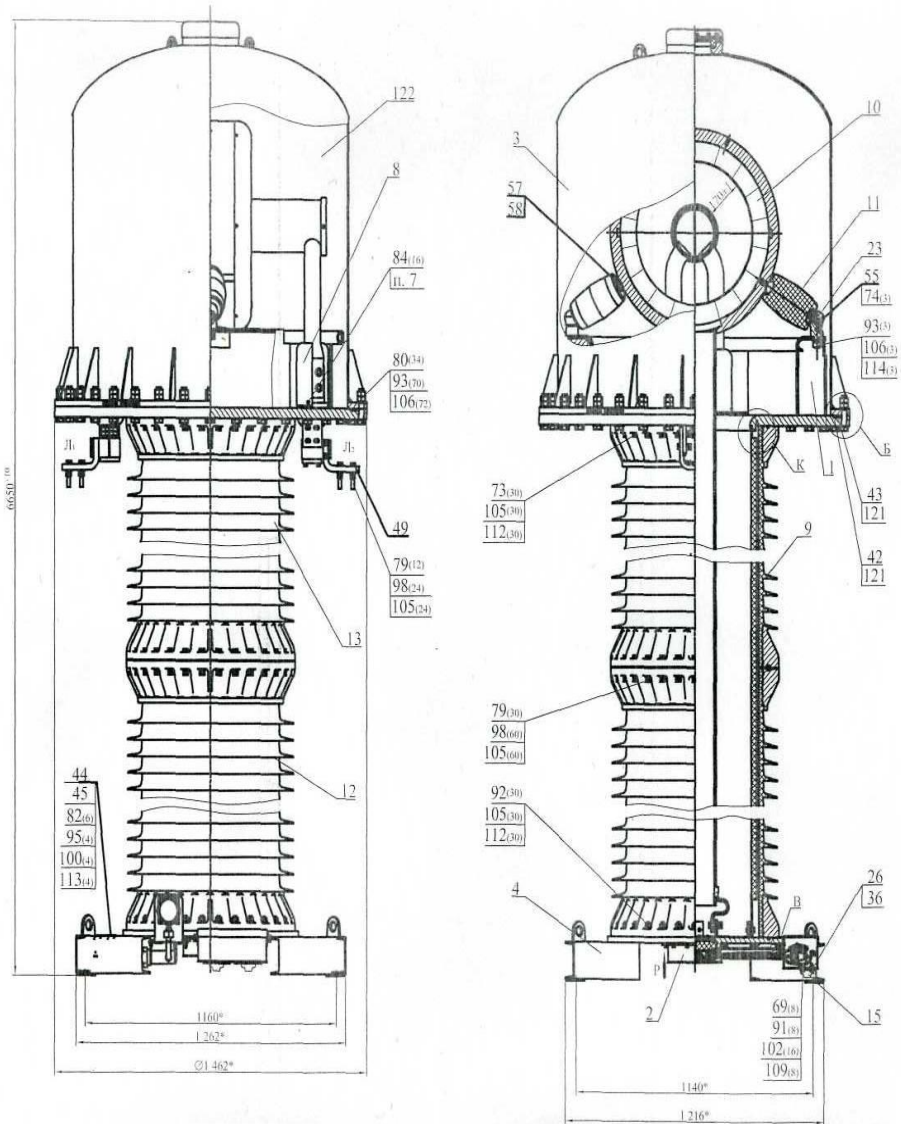


Рисунок Ж.1

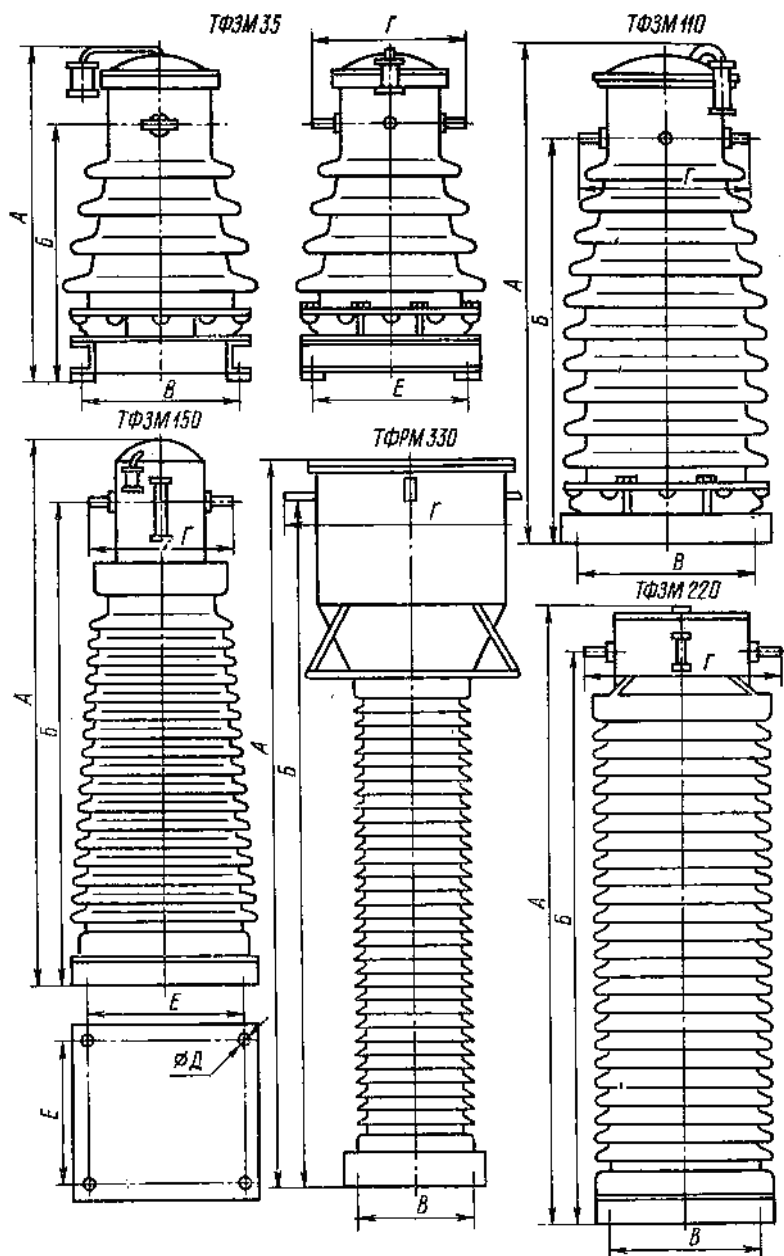


Рисунок Ж.2

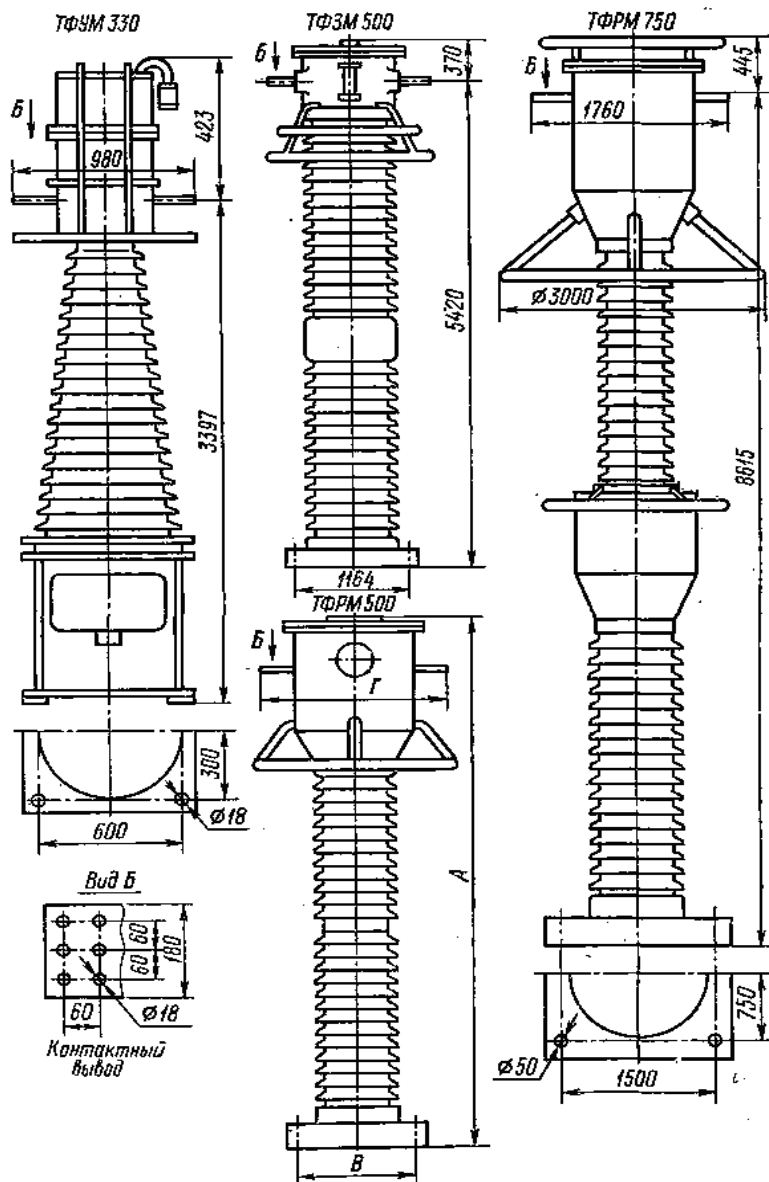


Рисунок Ж.3

Таблиця Ж.1 - Габаритні розміри ТС

Тип ТС	Розміри, мм					
	А	Б	В	Г	Д	Е
ТФЗМ35АУ1	860	680	490	550	-	490
ТФЗМ35АХЛ1	900	680	490	560	15	490
ТФЗМ35Б-1У1	1130	900	552	560	-	512
ТФЗМ35Б-ПУ1						
Варіант І	1080	880	552	560	18	512
Варіант ІІ	1070	860	552	68	18	512
ТФЗМ3ЗТ	1230	980	552	656	-	512
ТФЗМ110Б-1У1	1510	1230	512	560	-	552
ТФЗМ150А-1У1	2345	2050	726	-	-	810
ТФЗМ150Б-1У1	2640	2140	670	720	-	670
ТФЗМ150Б-ПУ1	2246	1870	810	720	-	720
ТФЗМ220Б-ШУ1	3080	2755	990	900	18	990
ТФЗМ220Б-1УУ1	3280	2850	990	1155	-	990
ТФЗМ220Б-1У1	3350	3080	740	920	-	740
ТФРМ330Б-1У1	4670	4340	1000	1702	-	600
ТФРМ330Б-ПУ1	4900	-	1000	1880	-	600
ТФРМ500БУ1	6320	-	1160	1880	30	1140
ТФРМ500Б-1У1	6400	-	1160	2085	30	1140

Додаток К Загальні види ТС. Основні вузли ТС

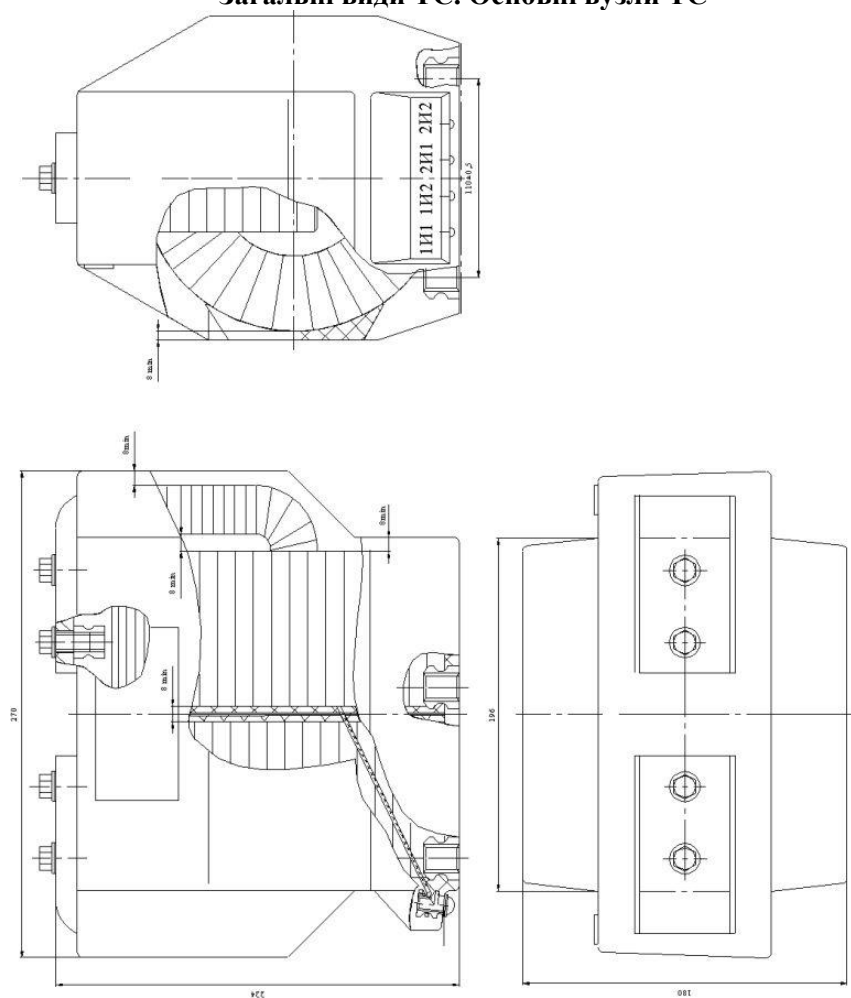


Рисунок К.1 – ТВЛ10

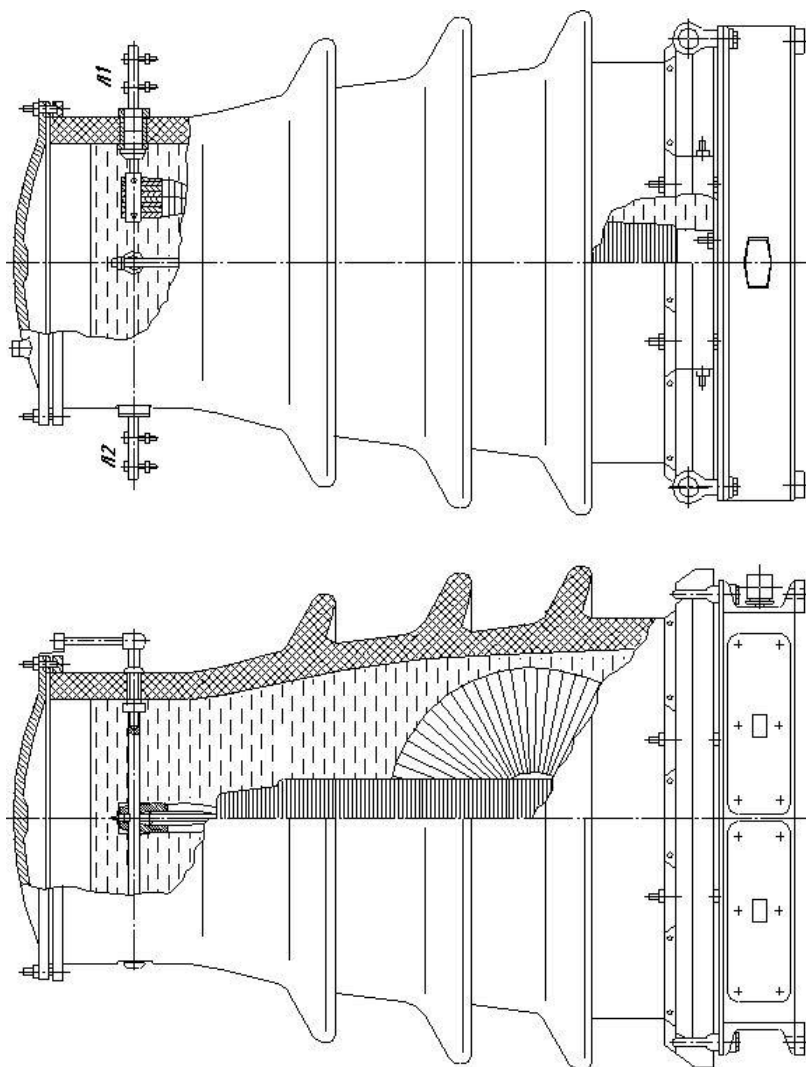


Рисунок К.2 – ТФН 35М

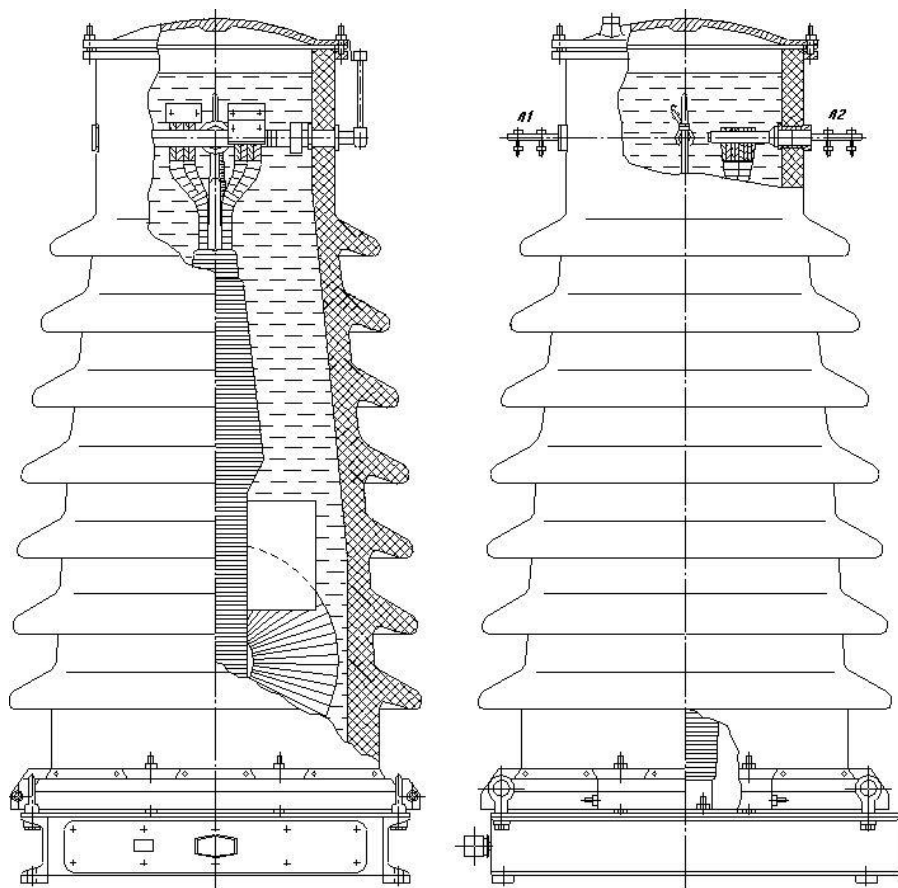


Рисунок К.3 – ТФН 110М

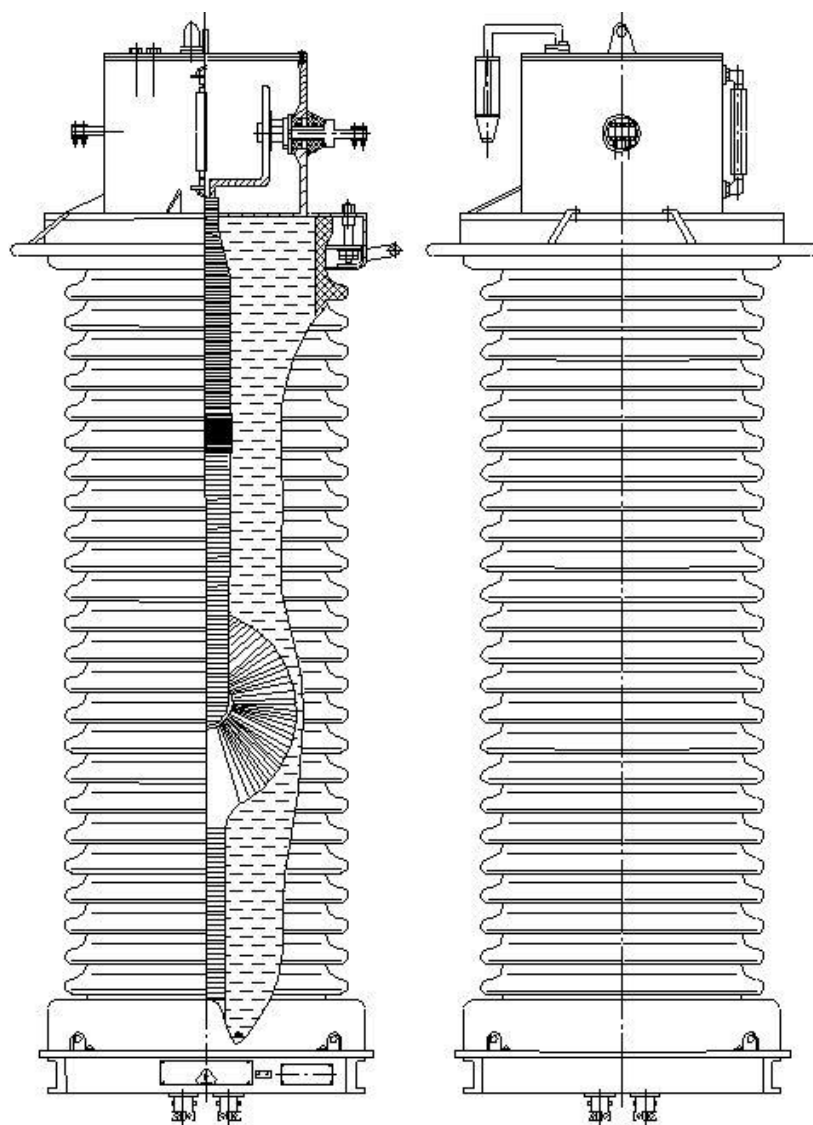


Рисунок К.4 – ТФЗМ 220

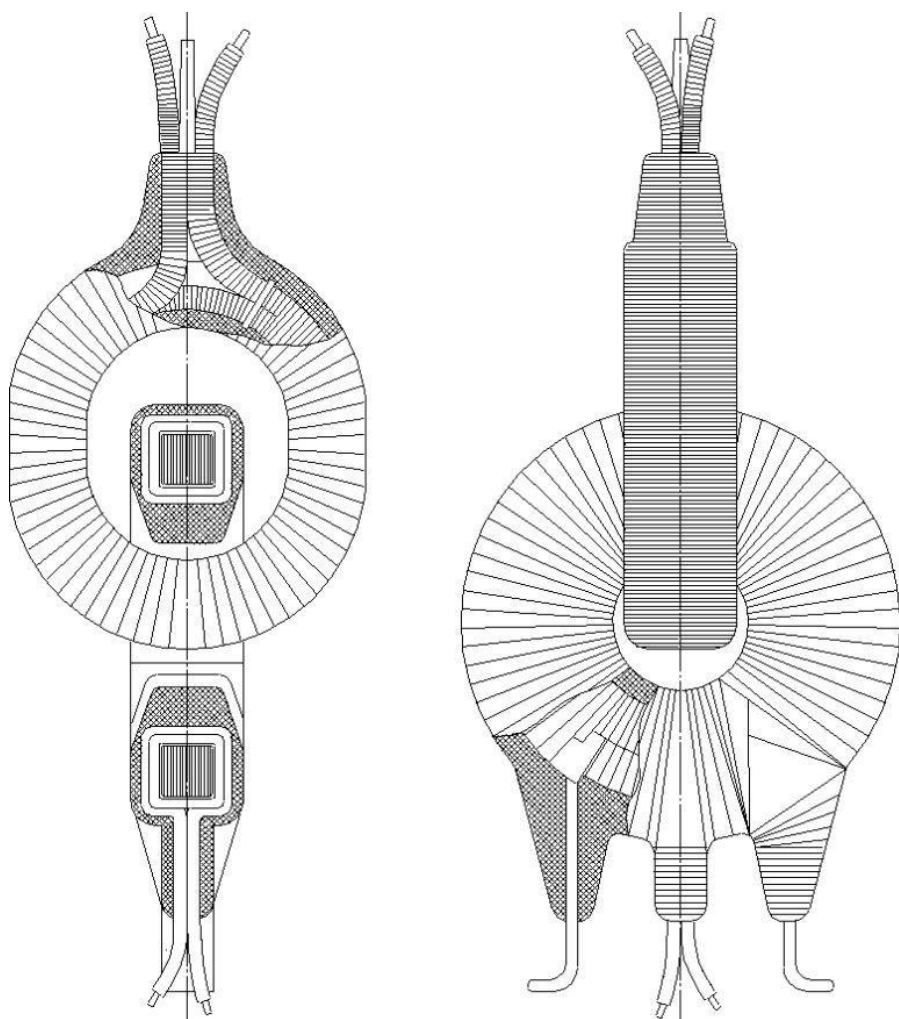


Рисунок К.5 – Активна частина трансформатора струму

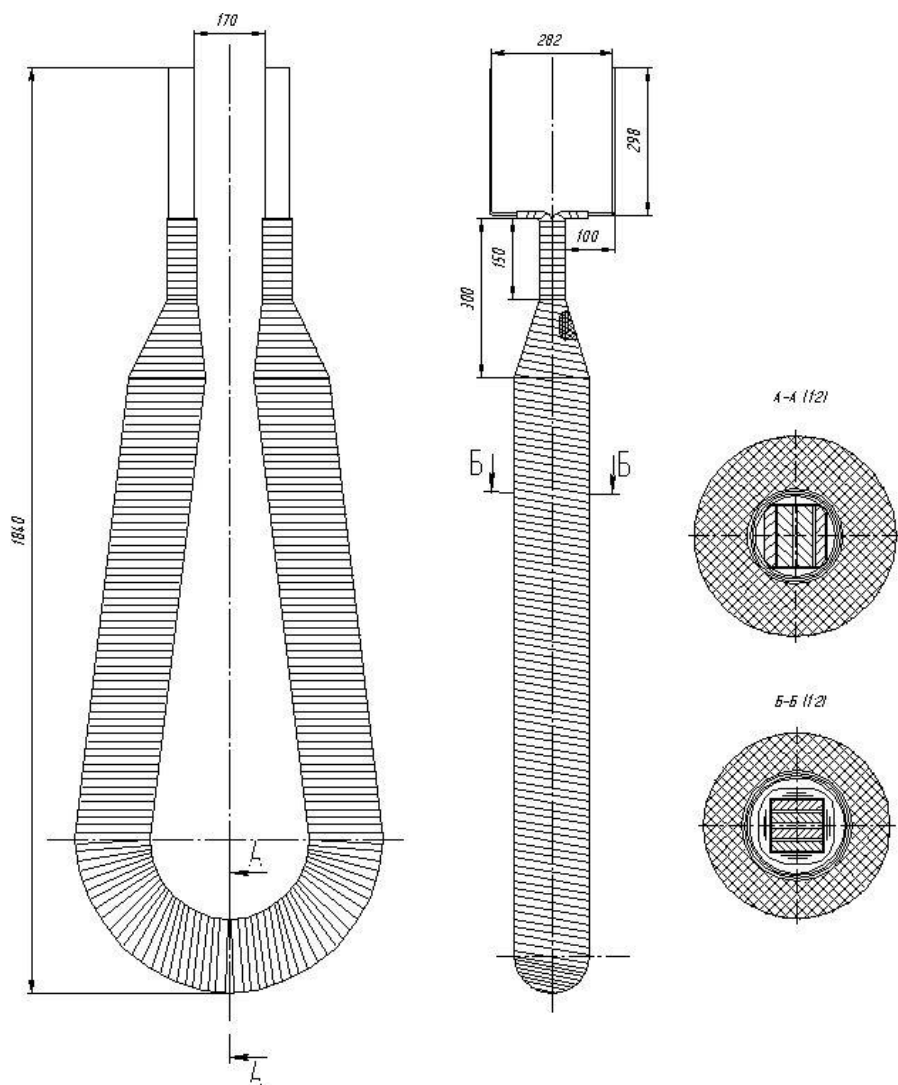


Рисунок К.6 – Первинна обмотка

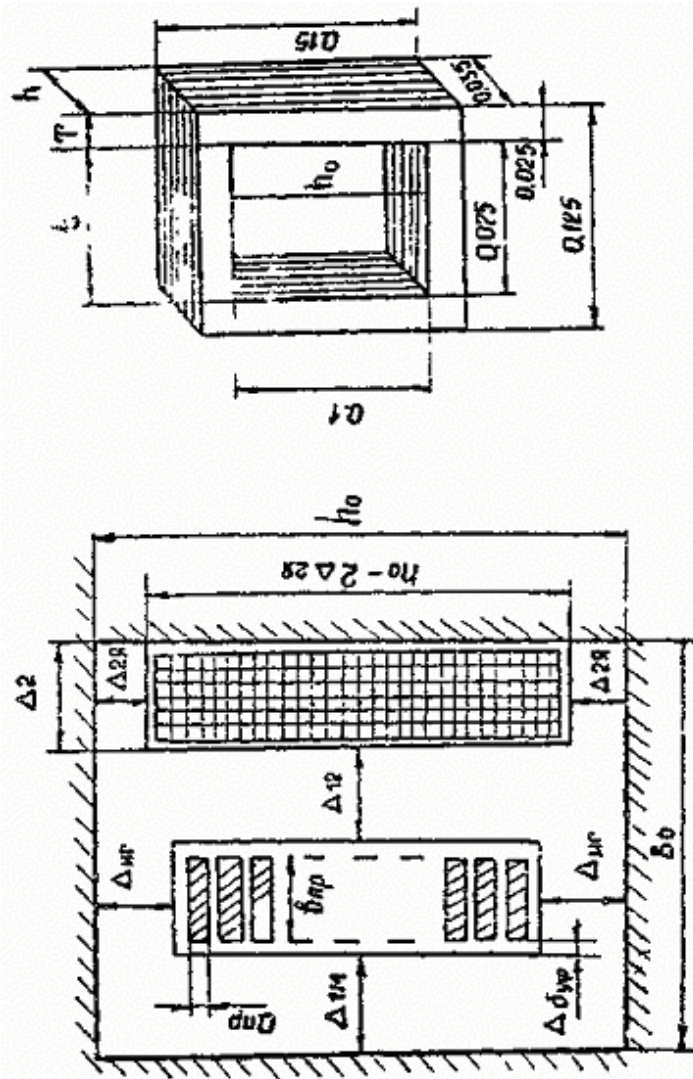


Рисунок К.7 - Розміщення обмоток у вікні шихтованого магнітопроводу

Додаток Л

Таблиця Л.1 - Основні терміни і визначення за ДСТ 18685-73

Клас точності ТС	Узагальнена характеристика ТС, обумовлена встановленими межами погрішностей, що допускаються, при заданих умовах роботи. Клас точності позначається числом, що дорівнює межі токової погрішності, що допускається, у відсотках при номінальному первинному струмі.
Первинна обмотка ТС	Обмотка, через котру протікає струм, що підлягає трансформації.
Вторинна обмотка ТС	Обмотка, по якій протікає трансформований (вторинний струм)
Обмотка ТС із відгалуженнями	Обмотка ТС, що має висновки від частини витків для одержання різних коефіцієнтів трансформації.
Обмотка ланкового типу ТС	Обмотка ТС, виконання так, що внутрішня ізоляція трансформатора конструктивно розподілена між первинною і вторинною обмотками, а взаємне розташування обмоток нагадує ланки ланцюга.
Обмотка U - образного типу ТС	Обмотка ТС, виконана так, що внутрішня ізоляція трансформатора нанесена в основному тільки на первинну обмотку, що має U-образну форму.
Обмотка римовидного типу ТС	Обмотка ТС, виконана так, що внутрішня ізоляція трансформатора нанесена в основному тільки на вторинну обмотку і її вивідні кінці, а самі обмотки утворюють римовидну форму.

Продовження таблиці Л.1

Вторинне навантаження	Повний опір зовнішнього вторинного ланцюга ТС, виражене в омах із указівкою коефіцієнта потужності. Вторинне навантаження може характеризуватися також удавану потужність у вольт-амперах, споживаної нею при даному коефіцієнті потужності при номінальному вторинному струмі.
Номінальне вторинне навантаження ТС	Значення вторинного навантаження, зазначене на паспортній табличці, при якому гарантується клас точності чи трансформатора гранична кратність.
Кратність первинного струму ТС	Відношення первинного струму ТС до його номінального значення.
Убудований ТС	ТС, первинною обмоткою якого служить введення електротехнічного пристрою.
Опорний ТС	ТС, призначений для установки на опорній площині.
Прохідний ТС	ТС, призначений для використання його як введення.
Шинний ТС	ТС, первинною обмоткою якого служи одна чи трохи паралельно включених шин розподільного пристрою.
Одноступінчатий ТС	ТС з однією ступінню трансформації струми
Каскадний ТС	ТС із декількома послідовними ступіннями трансформації струму.

Таблиця Л.2 - Дані попереднього розрахунку магнітної системи ТС (приклад заповнення).

N ітерації	K_{11}	f	K_{12}	$l_m, \text{м}$	$H_i, \text{А/м}$	$B_{mi}, \text{Тл}$	$S_{ст1}, \text{м}^2$	$S_{ст}, \text{м}^2$	$h_{min}, \text{м}$	$h_{max}, \text{м}$	$h_m, \text{м}$	$T_m, \text{м}$	$r_2, \text{Ом}$	$Z_2, \text{Ом}$
1	0,05	0,03	0,0485		2,45	0,0176	2,59							
	1,0	0,01	0,99	0,368	16,3	0,0286	3,25	6,34	0,0258	0,0373	0,035	0,0192	0,217	0,785
	12	0,07	11,16		1370	1,65	6,34							
2	0,05	0,03	0,0485		2,21	0,12	4,96							
	1,0	0,01	0,99	0,407	14,7	0,254	4,78	8,3	0,0296	0,418	0,035	0,025	0,234	0,8
	12	0,07	11,16		1238	1,65	8,3							
3	0,05	0,03	0,0485		2,19	0,0109	5,56							
	1,0	0,01	0,99	0,429	14	0,24	5,15	8,54	0,0298	0,0422	0,035	0,025		
	12	0,07	11,16		1174	1,65	8,45							

За результатами розрахунку виконується ескіз вікна магнітопроводу з розміщенням обмоток (рис.К.7) і заповнюється підсумкова таблиця, а також виконується ескіз магнітної системи з проставленням розмірів