

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний факультет

(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Трансформатор струму 35 кВ, 1000/1 А»

Виконав: студент 4 курсу, групи Е-412

спеціальності 141- «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

Ярослав СЛЮСАРЕНКО

(ім'я та прізвище)

Керівник Людмила СКРУПСЬКА

(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр НОВІКОВ

(ім'я та прізвище)

2026 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Електротехнічний
 Кафедра Електричні та електронні апарати
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) бакалавр
 Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка"
 (код і назва)
 Освітня програма (спеціалізація) Електричних та електронних апаратів
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Андрієнко П.Д.

“ 24 ” квітня  2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Слюсаренку Ярославу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Трансформатор струму 35 кВ, 1000/1 А
 керівник проекту (роботи) Скрупська Людмила Степанівна, ст. викл.
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 22 ” 04 2026 року, № 189
 2. Строк подання студентом проекту (роботи) 05.06.2026 р.
 3. Вхідні дані до проекту (роботи) Номінальна напруга 0,4кВ, номінальний
первинний струм 1000А, номінальний вторинний струм 1 А, номінальна частота
50 Гц, клас точності 0,2S, струм термічної стійкості (t=3 с) - 31,5 кА, струм
електродинамічної стійкості 80 кА.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналітичний огляд та вибір конструктивної схеми
трансформатора струму 35 кВ, 2. Електромагнітний розрахунок трансформатора
струму, 3. Розрахунок експлуатаційних характеристик та перевірка на стійкість,
4. Розрахунок та перевірка ізоляції трансформатора струму.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. НУЗП.671412.014 СК – Трансформатор струму 35 кВ – 1 арк., А1;
2. НУЗП. 671401.014 02СК – Первинна обмотка трансформатора струму – 1 арк.,
А1;
3. НУЗП. 671402.014 03СК – Обмотка вторинна – 1 арк., А1;
4. НУЗП.671421.014 04СК – Магнітопровід – 1 арк., А1.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	Скрупська Людмила Степанівна, ст. викл	24.04.26	03.06.26
			

7. Дата видачі завдання 24.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування проекту	19.05.2026	
2	Попередній розрахунок головних елементів апарата	21.05.2026	
3	Повірний розрахунок з висновками про роботоспроможність елементів апарата	25.05.2026	
4	Виконання загального виду виробу, робочих креслень головних вузлів та деталей апарата	29.05.2026	
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки проекту	01.06.2026	
6	Узгодження проекту з керівником	03.06.2026	
7	Нормоконтроль та затвердження завідувачем кафедри	05.06.2026	
8	Перевірка керівником пояснювальної записки на антиплагіат	08.06.2026	
9	РЕЦЕНЗУВАННЯ ПРОЄКТУ	09.06.2026	
10	ЗАХИСТ ПРОЄКТУ	з 15.06.2026	
11	Здача бакалаврської роботи до репозитарію	29.06.2026	

Студент


 (підпис)

Ярослав СЛЮСАРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)


 (підпис)

Людмила СКРУПСЬКА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 84 с., 15 рис., 19 табл., 13 джерел.

КЛАС ТОЧНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТ ТРАНСФОРМАЦІЇ 1000/1 А, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК, ТЕРМІЧНА СТІЙКІСТЬ, ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ, ВТОРИННІ КОЛА ОБЛІКУ ТА ЗАХИСТУ.

Об'єкт дослідження – процес інженерної розробки та методика розрахунку трансформатора струму класу напруги 35 кВ для електричних мереж змінного струму.

Мета роботи полягає у виконанні повного циклу проектування трансформатора струму 35 кВ з номінальним коефіцієнтом трансформації 1000/1 А, що забезпечує функціонування вторинних кіл комерційного обліку електроенергії та релейного захисту з дотриманням усіх нормативних вимог щодо точності, надійності та експлуатаційної безпеки.

Метод дослідження – аналітичне інженерне проектування, що включає послідовне виконання електромагнітного, теплового та механічного розрахунків на основі фундаментальних законів електротехніки (закон повного струму, закон електромагнітної індукції, закони Джоуля-Ленца та Лапласа) з подальшою верифікацією результатів на відповідність вимогам чинних стандартів (ДСТУ) та правил (ПУЕ, НКРЕП).

У роботі розглянуто основні конструктивні, електромагнітні та експлуатаційні аспекти проектування вимірювальних трансформаторів струму високої напруги.

У першому розділі виконано аналітичний огляд призначення, принципу дії та нормативних вимог до трансформаторів струму напругою 35 кВ відповідно до ПУЕ та чинних стандартів. Проаналізовано основні типи конструктивних виконань трансформаторів струму, проведено їх порівняння

та обґрунтовано вибір конструктивної схеми й матеріалів для проєктованого виробу. Сформульовано технічне завдання на проєктування.

Другий розділ присвячено електромагнітному розрахунку трансформатора струму. Визначено основні геометричні параметри магнітопроводу, виконано розрахунок первинної та вторинних обмоток, а також розраховано параметри намагнічувальної гілки. На основі побудови кривої намагнічування визначено струмову та кутову похибки трансформатора і перевірено виконання вимог заданих класів точності для ланцюгів обліку та захисту.

У третьому розділі виконано розрахунок експлуатаційних характеристик трансформатора струму та проведено перевірку його стійкості. Розраховано теплові режими в номінальному та аварійному режимах роботи, перевірено термічну й електродинамічну стійкість обмоток і струмопровідних частин. Побудовано робочі характеристики трансформатора, зокрема криві граничної кратності та похибок у режимах обліку і захисту.

Четвертий розділ присвячено розрахунку та перевірці ізоляційної системи трансформатора струму. Визначено необхідні ізоляційні відстані та рівні електричної міцності, обґрунтовано вибір ізоляційних матеріалів та конструктивних рішень з урахуванням умов експлуатації при напрузі 35 кВ.

За результатами виконаної роботи спроектовано трансформатор струму, параметри якого відповідають нормативним вимогам до точності, надійності та стійкості, що підтверджує можливість його практичного застосування в електроенергетичних мережах.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	8
1. Аналітичний огляд та вибір конструктивної схеми трансформатора струму 35 кв.....	10
1.1 Призначення, принцип дії та нормативні вимоги до трансформаторів струму класу напруги 35 кВ.....	10
1.2 Аналіз існуючих конструктивних виконань трансформаторів струму (опорні, прохідні, шинні).....	15
1.3 Обґрунтування вибору конструкції, магнітопроводу та системи ізоляції проектного трансформатора.....	20
1.4 Формування технічного завдання на проектування трансформатора струму 35 кВ, 1000/1 А1.....	24
2 Електромагнітний розрахунок трансформатора струму.....	28
2.1 Вибір і розрахунок параметрів магнітного осердя.....	28
2.2 Розрахунок первинної струмопровідної обмотки.....	33
2.3 Розрахунок вторинних обмоток обліку та захисту.....	38
2.4 Розрахунок намагнічувальної гілки та визначення похибок трансформатора струму.....	42
3 Розрахунок експлуатаційних характеристик та перевірка на стійкість.....	47
3.1 Тепловий розрахунок трансформатора струму в номінальному та аварійному режимах.....	47
3.2 Перевірка трансформатора струму на електродинамічну стійкість.....	51
3.3 Розрахунок робочих та граничних характеристик трансформатора струму.....	55
3.4 Перевірка механічної міцності та власних частот коливань конструкції.....	59
4 Розрахунок та перевірка ізоляції трансформатора струму.....	64
4.1 Вибір типу та конструкції ізоляційної системи трансформатора струму.....	64

4.2 Розрахунок електричних напруженостей в основній та додатковій ізоляції.....	69
4.3 Перевірка ізоляції на дію напруги промислової частоти.....	73
4.4 Перевірка імпульсної міцності та координація ізоляції.....	77
Висновки.....	74
Перелік джерел посилання.....	77

ВСТУП

Сучасні електроенергетичні системи напругою 35 кВ є важливою складовою розподільчих та підстанційних мереж, які забезпечують передавання та розподіл електричної енергії споживачам різного призначення. Надійна робота таких мереж неможлива без точних і стабільних засобів вимірювання та релейного захисту, ключовим елементом яких є трансформатори струму. Саме вони забезпечують гальванічну розв'язку, зниження рівня струму до стандартних значень, а також необхідну точність передавання інформації до вимірювальних приладів і пристроїв захисту.

Трансформатори струму класу напруги 35 кВ працюють у складних експлуатаційних умовах, що характеризуються високими робочими та аварійними струмами, підвищеними вимогами до ізоляції, термічної та електродинамічної стійкості. При цьому вони повинні забезпечувати задані класи точності як для ланцюгів комерційного обліку електроенергії, так і для систем релейного захисту та автоматики. У зв'язку з цим проектування трансформаторів струму є складною інженерною задачею, яка потребує комплексного електромагнітного, теплового, механічного та ізоляційного розрахунку.

Актуальність даної бакалаврської роботи зумовлена необхідністю поглибленого інженерного обґрунтування конструкції трансформатора струму 35 кВ з номінальним струмом 1000/1 А з урахуванням сучасних нормативних вимог ПУЕ, ДСТУ та чинних стандартів до вимірювальних трансформаторів. Особлива увага приділяється забезпеченню заданих класів точності, стійкості до струмів короткого замикання та надійності ізоляційної системи в умовах тривалої експлуатації.

Метою бакалаврської роботи є проектування трансформатора струму напругою 35 кВ і коефіцієнтом трансформації 1000/1 А з обґрунтуванням вибору конструктивної схеми, матеріалів та основних електромагнітних і

експлуатаційних параметрів, а також перевіркою його відповідності нормативним вимогам.

Для досягнення поставленої мети в роботі були розв'язані такі основні завдання:

а) виконати аналітичний огляд конструктивних виконань трансформаторів струму класу напруги 35 кВ та обґрунтувати вибір оптимальної конструкції;

б) сформулювати технічне завдання на проєктування з урахуванням вимог до точності, навантаження та стійкості;

в) здійснити електромагнітний розрахунок магнітопроводу та первинної і вторинних обмоток;

г) визначити похибки трансформатора струму та перевірити виконання вимог заданих класів точності;

д) виконати розрахунок теплової, електродинамічної та механічної стійкості конструкції;

е) провести розрахунок та перевірку ізоляційної системи відповідно до рівня напруги 35 кВ.

Об'єктом дослідження став трансформатор струму високої напруги, призначений для застосування в електричних мережах змінного струму напругою 35 кВ.

Предметом дослідження були електромагнітні, теплові, механічні та ізоляційні процеси, що визначають робочі та експлуатаційні характеристики трансформатора струму.

Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, у яких послідовно розглядаються питання вибору конструкції, виконання електромагнітних та перевірочних розрахунків, аналізу експлуатаційних характеристик і розрахунку ізоляції, а також висновків. Така структура забезпечує логічну послідовність викладення матеріалу та комплексний інженерний підхід до проєктування трансформатора струму.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ВИБІР КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ 35 КВ

Перший розділ присвячений аналізу призначення, умов експлуатації та конструктивних особливостей трансформаторів струму класу напруги 35 кВ, які широко застосовуються в мережах середньої напруги для цілей комерційного обліку електроенергії, релейного захисту та автоматики. Надійність роботи таких пристроїв безпосередньо впливає на точність вимірювань, селективність захистів і загальну безпеку електроенергетичних систем.

У розділі розглядаються основні нормативні вимоги до трансформаторів струму відповідно до ПУЕ, ДСТУ та чинних галузевих стандартів. Виконується аналіз існуючих конструктивних виконань трансформаторів струму напругою 35 кВ, зокрема опорних, прохідних та шинних типів, із порівнянням їх технічних і експлуатаційних характеристик.

На основі проведеного аналізу обґрунтовується вибір конструктивної схеми проектного трансформатора струму, типу магнітопроводу, матеріалів ізоляції та виконання обмоток. Розділ завершується формуванням технічного завдання на проектування, яке визначає вихідні дані та основні параметри подальших розрахунків.

1.1 Призначення, принцип дії та нормативні вимоги до трансформаторів струму класу напруги 35 кВ

Трансформатори струму (ТС, або струмові трансформатори, англ. current transformers, CT) класу напруги 35 кВ відіграють критичну роль у сучасних системах електроенергетики, забезпечуючи точне вимірювання та передачу інформації про струми в мережах середньої напруги. Вони призначені для перетворення високих первинних струмів на стандартизовані

вторинні значення, що дозволяє безпечно підключати вимірювальні прилади, релейний захист та автоматику без прямого контакту з високовольтними ланцюгами. Таке призначення обумовлює їх широке застосування в підстанціях, розподільних мережах та промислових установках, де номінальна напруга становить 35 кВ, а номінальний первинний струм може досягати 1000 А, як у випадку розглядуваної конструкції з коефіцієнтом трансформації 1000/1 А.

Окрім функції масштабування, ТС виконує критично важливе завдання — гальванічну ізоляцію вторинних кіл керування від високовольтного потенціалу первинної мережі 35 кВ. Це забезпечує безпеку обслуговуючого персоналу та захищає низьковольтне обладнання від руйнівного впливу перенапруг та струмів короткого замикання (КЗ).

Принцип дії та фізичні основи функціонування

Принцип дії трансформаторів струму базується на явищі електромагнітної індукції, описаному законом Фарадея. Первинна обмотка ТС, як правило, складається з одного або кількох витків (часто це просто провідник, що проходить через магнітопровід), через яку протікає первинний струм I_1 високої величини. Цей струм створює змінне магнітне поле в феромагнітному осерді (магнітопроводі), яке індукує електрорушійну силу (ЕРС) у вторинній обмотці з великою кількістю витків N_2 .

При протіканні первинного струму I_1 через первинну обмотку, яка вмикається послідовно в розсічку фази електроустановки, у магнітопроводі збуджується змінний магнітний потік Φ . Цей потік пронизує витки вторинної обмотки та індукує в ній електрорушійну силу (ЕРС) E_2 , що спричиняє протікання вторинного струму I_2 через замкнене навантаження (імпеданс приладів та з'єднувальних дротів).

Принцип дії ТС можна описати через рівняння магніторушійних сил (МРС):

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{F}_0 = \dot{I}_\mu w_1 \quad (1.1)$$

де:

w_1, w_2 — кількість витків первинної та вторинної обмоток відповідно;

F_0 — результуюча МРС, необхідна для намагнічування осердя;

I_μ — струм намагнічування.

В ідеальному трансформаторі струм намагнічування дорівнює нулю, проте в реальних конструкціях саме величина I_μ визначає похибку пристрою. Оскільки в робочому режимі ТС працює в стані, наближеному до короткого замикання вторинної обмотки, магнітний потік у сердечнику дуже малий, оскільки МРС вторинної обмотки майже повністю компенсує МРС первинної обмотки.

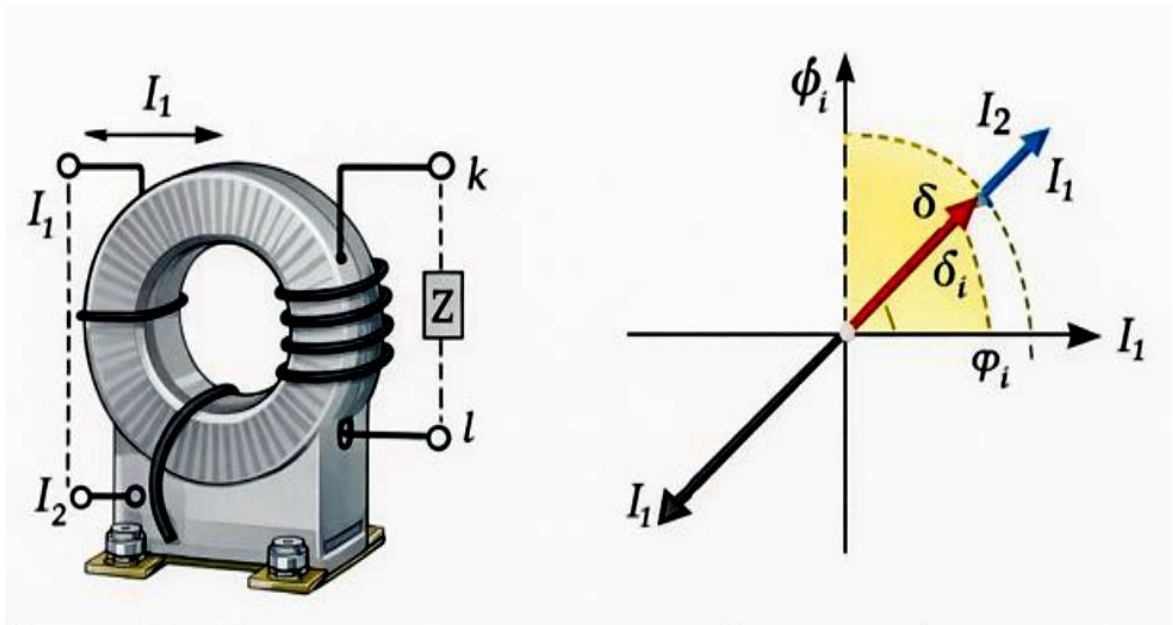


Рисунок 1.1 – Принципова схема та векторна діаграма трансформатора струму

(Тут зображена схема з позначенням первинної обмотки L1-L2, вторинної обмотки k-l та векторна діаграма, що демонструє кутову похибку δ та токову похибку ϕ_i)

Однією з ключових особливостей ТС є неприпустимість розмикання вторинного кола під навантаженням. У разі розриву кола I_2 зникає, і

розмагнічувальна дія вторинної МРС припиняється. Вся первинна МРС витрачається на намагнічування магнітопроводу, що призводить до його глибокого насичення, різкого зростання напруги на затискачах вторинної обмотки до декількох кіловольт (небезпека для ізоляції та життя людей) та надмірного перегріву сталі через гістерезис.

Класифікація та конструктивні особливості для напруги 35 кВ

Для класу напруги 35 кВ найчастіше застосовуються ТС зовнішнього встановлення з паперово-масляною або литою епоксидною ізоляцією. Трансформатори з литою ізоляцією (наприклад, серії ТОЛ-35) характеризуються високою стійкістю до вологи, пожежобезпечністю та меншими габаритами. Проте для великих номінальних струмів (1000 А) та підвищених вимог до термічної стійкості часто обирають конструкції опорного типу з масляним заповненням або газонаповнені (SF₆).

Таблиця 1.1 – Основні параметри проєктованого трансформатора струму

Параметр	Символ	Одиниця виміру	Значення
Номінальна напруга	U_{nom}	кВ	35
Найбільша робоча напруга	U_{max}	кВ	40,5
Номінальний первинний струм	$I_{1\text{nom}}$	А	1000
Номінальний вторинний струм	$I_{2\text{nom}}$	А	1
Номінальна частота	f	Гц	50
Клас точності (облік / захист)	—	—	0,2S / 10P

Вибір вторинного струму 1 А (замість традиційних 5 А) обумовлений сучасними тенденціями переходу на цифрові пристрої РЗА. Це дозволяє суттєво зменшити навантаження на ТС, оскільки втрати потужності в з'єднувальних кабелях пропорційні квадрату струму:

$$P_{loss} = I_2^2 \cdot R_{cab} \quad (1.2)$$

При струмі 1 А втрати у 25 разів менші, ніж при 5 А, що дозволяє використовувати кабелі меншого перерізу або виносити ТС на більшу відстань від релейних щитів.

Нормативні вимоги згідно з ДСТУ та міжнародними стандартами

Проектування та виготовлення ТС в Україні регламентується стандартом ДСТУ EN 61869-2:2017 (ідентичний міжнародному ІЕС 61869-2), який встановлює суворі вимоги до метрологічних та експлуатаційних характеристик.

Ключовими вимогами є:

1. **Метрологічна точність:** ТС повинні підтримувати заданий клас точності у визначеному діапазоні первинного струму (від 5% до 120% для вимірювальних обмоток). Для класу 0,2S похибка не повинна перевищувати $\pm 0,2\%$ за номінального струму.
2. **Електродинамічна та термічна стійкість:** Здатність витримувати механічні та теплові зусилля при протіканні струмів КЗ. Струм термічної стійкості I_{th} визначається часом протікання (зазвичай 1 або 3 с).
3. **Ізоляційні властивості:** Ізоляція повинна витримувати випробувальну напругу промислової частоти (для 35 кВ це зазвичай 80-95 кВ) та імпульсну напругу грозового розряду (до 190 кВ) [4].
4. **Кратність струму:** Для обмоток захисту важливою є номінальна гранична кратність K_{10} , при якій повна похибка не перевищує 10%. Це необхідно для надійної роботи захистів під час КЗ, коли струми в десятки разів перевищують номінальні.

Узагальнюючи, трансформатор струму 35 кВ 1000/1 А є складним електротехнічним виробом, параметри якого повинні бути ретельно розраховані для забезпечення балансу між точністю вимірювань та стійкістю до екстремальних режимів роботи енергосистеми.

1.2 Аналіз існуючих конструктивних виконань трансформаторів струму (опорні, прохідні, шинні)

Вибір конструктивного виконання трансформатора струму (ТС) для класу напруги 35 кВ є фундаментальним етапом проектування, що визначає габарити пристрою, спосіб його монтажу в розподільчому пристрої (РП) та надійність ізоляційної системи. На сучасному етапі розвитку електроенергетики конструкції ТС класифікують за способом встановлення та специфікою виконання первинної обмотки на опорні, прохідні та шинні (вбудовані) [1].

Для номінального струму $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ кожна з цих конструкцій має свої техніко-економічні переваги та обмеження, зумовлені особливостями електродинамічної стійкості та методами формування ізоляційного проміжку.

1.2.1 Опорні трансформатори струму

Опорні трансформатори струму (серії ТОЛ-35, ТФЗМ-35) є найбільш розповсюдженим типом пристроїв для відкритих та закритих розподільчих пристроїв (ВРП та ЗРП). Конструктивно вони являють собою монолітний або збірний блок, що встановлюється на фундаментну опору або металоконструкцію (рис. 1.2).

Основною перевагою опорних ТС є їхня автономність та висока електрична міцність зовнішньої ізоляції. В апаратах на 35 кВ найчастіше застосовується лита епоксидна ізоляція або паперово-масляне наповнення в порцеляновій чи полімерній покривці [2].

Для $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ первинна обмотка опорного ТС може виконуватися у декількох варіантах:

1. **Одновиткова (стержнева):** де первинним провідником є прямий стержень. Це забезпечує максимальну електродинамічну стійкість i_{dyn} , оскільки сили взаємодії між витками відсутні.

2. **Багатовиткова (петльова):** дозволяє отримати вищу потужність вторинних обмоток при малих первинних струмах, проте для 1000 А вона є менш доцільною через складність ізолювання витків між собою та значні механічні зусилля при струмах КЗ.



Рисунок 1.2 – Опорні трансформатори струму

Таблиця 1.2 — Порівняльний аналіз матеріалів ізоляції опорних ТС 35 кВ

Тип ізоляції	Переваги	Обмеження	Сфера застосування
<i>Литий компаунд</i>	Висока механічна міцність, компактність, пожежобезпечність	Обмеження по масі виробу, чутливість до циклічних змін температур	ЗРП 35 кВ, КРУ
<i>Паперово-масляна</i>	Висока надійність, можливість регенерації масла	Пожежонебезпечність, необхідність періодичного контролю проб масла	ВРП 35 кВ
<i>Елегазова (SF₆)</i>	Мінімальні габарити, стабільність характеристик	Висока вартість, екологічні вимоги до герметичності	Сучасні цифрові підстанції

Електродинамічне зусилля $F_{\text{дун}}$, що діє на деталі конструкції опорного

ТС при протіканні ударного струму $K3 i_{sh}$, визначається за формулою:

$$F_{dyn} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{sh}^2 \cdot l}{a} \cdot c_f \quad (1.3)$$

де:

l — довжина провідника, м;

a — відстань між осями провідників, м;

c_f — коефіцієнт форми перерізу.

1.2.2 Прохідні трансформатори струму

Прохідні ТС (серії ТПОЛ, ТПЛ) призначені для використання в якості прохідних ізоляторів у стінах, перекриттях ЗРП або у виводах силових трансформаторів. Така конструкція поєднує в собі функції вимірювального перетворювача та ізоляційного вузла, що проходить крізь заземлену поверхню.

Особливістю прохідних ТС на 35 кВ є специфічне розподілення напруженості електричного поля E уздовж ізоляційного тіла. Для вирівнювання поля часто застосовують напівпровідні екрани. При $I_{nom}=1000$ А прохідні ТС зазвичай виконуються багатовитковими або одновитковими з шинним проходом.

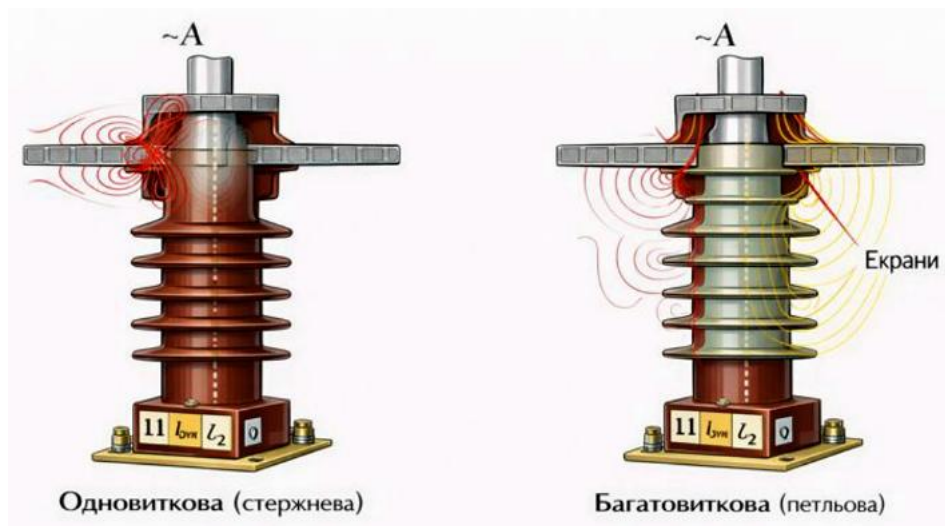


Рисунок 1.3 — Схематичне зображення розподілу електричного поля в ізоляції прохідного ТС

Опис: на рисунку демонструється концентрація силових ліній поля в зоні фланця та методи їх деконцентрації за допомогою екранування.

Перевагою прохідних конструкцій є економія площі РП, оскільки апарат не потребує окремого місця для встановлення. Проте їх застосування обмежене конструктивними особливостями будівельних частин підстанції.

1.2.3 Шинні та вбудовані трансформатори струму

Шинні трансформатори струму не мають власної первинної обмотки. Її роль виконує шина розподільчого пристрою або високовольтний вивід іншого апарата, що проходить крізь внутрішнє вікно магнітопроводу ТС.

Для напруги 35 кВ шинні ТС часто виконуються (рис. 1.4) у вигляді **вбудованих** трансформаторів (ТВ, ТВЛ). Вони встановлюються на втулки силових трансформаторів або бакових вимикачів [3]. Основною ізоляцією між первинним колом і вторинною обмоткою в такому випадку слугує ізоляція самого виводу (порцеляна, масло, RIP-ізоляція).



Рисунок 1.4 - Шинні вбудовані трансформатори струму

Характеристики шинних ТС при $I_{ном} = 1000$ А:

- **Магнітне коло:** Зазвичай має кільцеву (тороїдальну) форму, що забезпечує мінімальні потоки розсіювання.

- **Похибка:** Оскільки кількість первинних витків $w_1 = 1$, для забезпечення класу точності 0,2 при 1000 А необхідно використовувати

магнітопроводи з високою магнітною проникністю μ_a .

Токова похибка f_i шинного ТС визначається співвідношенням:

$$f_i = \frac{I_2 \cdot w_2 - I_1 \cdot w_1}{I_1 \cdot w_1} \cdot 100\% \approx \frac{I_\mu}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

де I_μ — струм намагнічування, який залежить від якості електротехнічної сталі та довжини середньої магнітної лінії магнітопроводу l_{mag} .

1.2.4 Порівняльний аналіз та вибір для проектування

Аналізуючи існуючі конструкції для заданих параметрів (35 кВ, 1000/1 А), можна зробити висновок, що для автономного використання в сучасних ЗРП найбільш доцільним є **опорне виконання з литою ізоляцією**.

Обґрунтування вибору:

1. Електродинамічна стійкість: При струмі 1000 А одновиткова опорна конструкція забезпечує високу термічну стійкість I_{th} без ризику деформації обмоток.

2. Екологічність: Відсутність масла виключає ризик витоку та пожежі.

3. Метрологія: Сучасні нанокристалічні сплави магнітопроводів дозволяють реалізувати високу точність (0,2) при компактних розмірах вторинних обмоток на 1 А [4].

Таблиця 1.3 — Порівняння конструктивних типів ТС 35 кВ за експлуатаційними показниками

Показник	Опорний (литий)	Прохідний	Вбудований (шинний)
Складність монтажу	Середня	Висока	Низька (у складі апарата)
Габарити	Середні	Великі (за довжиною)	Мінімальні

Продовження табл.. 1.3			
Показник	Опорний (литий)	Прохідний	Вбудований (шинний)
Ремонтопридатність	Низька (моноліт)	Середня	Висока
Стійкість до КЗ	Висока	Середня	Дуже висока

Для проектування трансформатора струму 1000/1 А приймається опорна конструкція з литою епоксидною ізоляцією. Це дозволяє забезпечити стабільність характеристик протягом усього терміну експлуатації (понад 30 років) та відповідати вимогам ДСТУ EN 61869-2 щодо випробувальних напруг ізоляції [5].

1.3 Обґрунтування вибору конструкції, магнітопроводу та системи ізоляції проектного трансформатора

На основі аналітичного огляду, проведеного у попередніх підрозділах, виникає необхідність синтезу конкретних технічних рішень для трансформатора струму (ТС) на номінальні параметри $U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$ та $I_{1\text{ном}} = 1000 \text{ А}$. Процес обґрунтування вибору конструкції є багатофакторною задачею, де необхідно збалансувати високі метрологічні характеристики (клас точності 0,2S), термічну стійкість та надійність ізоляційного остова.

1.3.1 Вибір конструктивного виконання

Для забезпечення заданого номінального струму $I_{1\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ найбільш доцільним є вибір **опорної одновиткової конструкції**. При такому струмі використання багатовиткової первинної обмотки призведе до надмірного ускладнення конструкції та зниження електродинамічної стійкості через значні зусилля відштовхування між витками.

Одновиткова конструкція стержневого типу (рис. 1.5) дозволяє мінімізувати індуктивність розсіювання первинної обмотки та забезпечити високу стійкість до струмів короткого замикання (КЗ). У даному проєкті приймається конфігурація з прохідним стержнем, навколо якого розміщуються тороїдальні магнітопроводи з вторинними обмотками. Таке рішення забезпечує рівномірний розподіл магнітного потоку та спрощує технологію заливки ізоляційним компаундом.

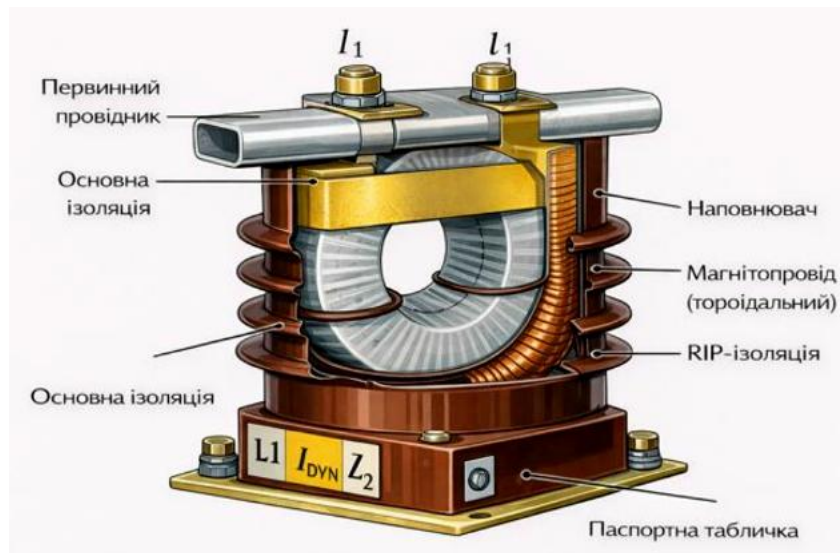


Рисунок 1.5 - Опорна одновиткова конструкція ТС

1.3.2 Обґрунтування вибору матеріалу та геометрії магнітопроводу

Для ТС із номінальним вторинним струмом $I_{2\text{ном}} = 1 \text{ А}$ та високим класом точності (0,2S) критичним параметром є мінімізація струму намагнічування I_μ , який безпосередньо впливає на токову похибку f_i та кутову похибку δ .

Згідно з теорією трансформаторів, похибка визначається як:

$$\epsilon = \frac{\dot{I}_\mu}{k_i \cdot \dot{I}_1} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

де $k_i = w_2/w_1$ — коефіцієнт трансформації.

Для досягнення високої точності при малих значеннях первинного струму (від 1% до 5% від номіналу для класу 0,2S) необхідно використовувати матеріали з максимальною початковою магнітною проникністю μ_a . У проєкті обґрунтовано застосування **нанокристалічних м'якомагнітних сплавів** на основі заліза (наприклад, типу 5БДСР) для вимірювальних обмоток та високоякісної холоднокатаної анізотропної електротехнічної сталі для обмоток захисту [2].

Таблиця 1.4 — Порівняльні характеристики матеріалів магнітопроводів

Параметр	Одиниця виміру	Електротехнічна сталь (3408)	Нанокристалічний сплав
Магнітна проникність $\mu_{\max}$	відн. од.	40 000 ... 60 000	150 000 ... 600 000
Індукція насичення B_s	Тл	2,03	1,2
Коефіцієнт опуклості петлі	—	Високий	Низький (лінійний)
Питомі втрати $P_{1.0/50}$	Вт/кг	0,8 ... 1,1	0,1 ... 0,2

Використання нанокристалічного сплаву дозволяє суттєво зменшити габарити магнітопроводу при збереженні низької похибки, що є критичним для вторинного струму 1 А, де кількість витків w_2 є значною ($w_2 = 1000$ при $w_1 = 1$). Геометрія магнітопроводу обирається тороїдальною (рулонною) без стиків, що мінімізує магнітний опір R_m :

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \cdot \mu_a \cdot S_m} \dots\dots\dots (1.6)$$

де:

l_m — середня довжина магнітного шляху;

S_m — активний переріз магнітопроводу.

1.3.3 Вибір системи ізоляції

Для ТС на 35 кВ зовнішнього встановлення розглядалися варіанти паперово-масляної та литої епоксидної ізоляції. У даному проєкті обґрунтовано вибір **литої ізоляції на основі епоксидного компаунду** під вакуумом (технологія APG — *Automatic Pressure Gelation*).

Переваги обраної системи ізоляції:

1. Герметичність та відсутність обслуговування: На відміну від масляних ТС, литі конструкції не потребують контролю рівня та хімічного складу діелектрика.

2. Механічна жорсткість: Епоксидний остов надійно фіксує магнітопроводи та обмотки, що забезпечує стійкість до вібрацій та високу електродинамічну стійкість.

3. Електрична міцність: Розрахункова напруженість електричного поля E в ізоляції при робочій напрузі 35 кВ не повинна перевищувати допустиму E_{adm} , яка для епоксидних смол становить 15 ... 20 кВ/мм (з урахуванням коефіцієнта запасу) [4].

Для вирівнювання електричного поля та запобігання виникненню часткових розрядів (ЧР) у конструкції передбачено систему екранування. Екран первинної обмотки S_{e1} та екран вторинних обмоток S_{e2} формують коаксіальну систему, що розподіляє потенціал рівномірно по товщині діелектрика.

Напруженість поля в циліндричній частині ізоляції визначається як:

$$E = \frac{U_{\Phi}}{r \cdot \ln(R_2/R_1)} \quad (1.7)$$

де:

U_{Φ} — фазна напруга мережі (35√3 кВ);

r — поточний радіус точки розрахунку;

R_1, R_2 — радіуси внутрішнього та зовнішнього екранів відповідно.

1.3.4 Забезпечення термічної та динамічної стійкості

При номінальному струмі $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ та часі протікання КЗ $t = 3 \text{ с}$, переріз первинного провідника S_1 обирається виходячи з умови термічної стійкості:

$$S_1 \geq \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t}}{C} \quad (1.8)$$

де: C — термічний коефіцієнт для міді ($165 \dots 170 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$).

Для забезпечення динамічної стійкості при ударному струмі КЗ i_{dyn} конструкція опорного ізолятора розраховується на вигин. Зусилля, що передається від шин на головку ТС, не повинно перевищувати межу механічної міцності епоксидного компаунду.

Резюме:

У результаті аналітичного огляду обґрунтовано вибір опорної конструкції трансформатора струму з литою епоксидною ізоляцією. Використання нанокристалічного магнітопроводу для вимірювальної обмотки дозволяє реалізувати клас точності 0,2S при вторинному струмі 1 А. Обрана система ізоляції та параметри провідників забезпечують відповідність сучасним вимогам надійності та безпеки при експлуатації в мережах 35 кВ [5].

1.4 Формування технічного завдання на проектування трансформатора струму 35 кВ, 1000/1 А1

На основі проведеного аналізу існуючих конструкцій та обґрунтування вибору основних вузлів трансформатора, фінальним етапом аналітичного розділу є систематизація вихідних параметрів у формі технічного завдання (ТЗ). Формування ТЗ є критично важливим етапом, оскільки воно визначає граничні умови для подальшого електромагнітного та конструктивного розрахунку апарата [1].

Проектований трансформатор струму (ТС) повинен забезпечувати високу точність вимірювання в широкому діапазоні навантажень та гарантувати надійну роботу релейного захисту при виникненні аварійних режимів у мережах 35 кВ.

1.4.1 Вихідні параметри та вимоги до електричних показників

Основними електричними параметрами, що закладаються в основу проектування, є номінальні значення напруги та струмів. Вибір вторинного струму $I_{2nom} = 1$ А зумовлює специфіку розрахунку кількості витків вторинної обмотки w_2 , яка при одновітковому виконанні первинного кола ($w_1 = 1$) становить 1000 витків.

Для забезпечення багатофункціональності апарата, ТЗ передбачає наявність декількох вторинних обмоток:

- **Обмотка для комерційного обліку та вимірювань:** повинна відповідати класу точності 0,2S згідно з ДСТУ EN 61869-2, що вимагає стабільної роботи при малих струмах (від 1% I_{1nom}).

- **Обмотки для релейного захисту:** повинні забезпечувати роботу в класі точності 10P з нормованою граничною кратністю $K_{10} \geq 20$ для виключення насичення магнітопроводу при КЗ [3].

Узагальнені технічні вимоги наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 — Технічні вимоги до проектування трансформатора струму 35 кВ, 1000/1

Найменування параметра	Символ	Одиниця виміру	Значення
Номінальна напруга	U_{nom}	кВ	35
Найбільша робоча напруга	U_{max}	кВ	40,5
Номінальний первинний струм	I_{1nom}	А	1000
Номінальний вторинний струм	I_{2nom}	А	1
Номінальна частота	f	Гц	50
Кількість вторинних обмоток	n	шт.	3

Продовження табл.. 1.5			
Найменування параметра	Символ	Одиниця виміру	Значення
Клас точності (вимірювання/захист)	—	—	0,2S / 10P / 10P
Номінальне вторинне навантаження	S_{2nom}	В·А	15
Струм термічної стійкості ($t=3$ с)	I_{th}	кА	31,5
Струм електродинамічної стійкості	i_{dyn}	кА	80

1.4.2 Вимоги до ізоляції та умов експлуатації

З огляду на клас напруги 35 кВ, ізоляційна система апарата повинна витримувати значні комутаційні та атмосферні перенапруги. Згідно з вимогами ПУЕ та ДСТУ, ізоляція ТС зовнішнього встановлення має відповідати категорії «б» або «в» за ступенем забруднення атмосфери [2].

Рівень ізоляції визначається наступними показниками:

1. *Напруга випробування промисловою частотою (1 хв):* $U_{test} = 95$ кВ.
2. *Повна хвиля імпульсної напруги грозового розряду:* $U_{imp} = 190$ кВ.
3. *Рівень часткових розрядів (ЧР):* при напрузі $1,1 \cdot U_{max} / \sqrt{3}$ інтенсивність ЧР не повинна перевищувати 10–20 пКл, що досягається шляхом вакуумної дегазації епоксидного компаунду.

1.4.3 Вимоги до конструкції та маркування

Конструкція повинна забезпечувати зручність підключення шин первинного кола та кабелів вторинних кіл. Вхідні затискачі первинної обмотки маркуються як L_1 та L_2 , а виводи вторинних обмоток — як $1s_1$ – $1s_2$, $2s_1$ – $2s_2$ відповідно.

Додаткові вимоги ТЗ:

- **Ступінь захисту коробки вторинних виводів:** не нижче IP54.
- **Маса пристрою:** повинна бути мінімізована за рахунок оптимізації активних частин, але не на шкоду механічній міцності.

- **Термін служби:** не менше 30 років.

Висновок за розділом 1:

Сформоване технічне завдання на проектування трансформатора струму 35 кВ, 1000/1 А базується на актуальних нормативних вимогах та сучасних досягненнях в області матеріалознавства (лита ізоляція, нанокристалічні сплави). Визначені параметри термічної ($I_{th} = 31,5$ кА) та електродинамічної стійкості ($i_{dyn} = 80$ кА) є достатніми для експлуатації апарата в потужних вузлах енергосистем. Дане ТЗ є основою для виконання наступного розділу — електромагнітного розрахунку активних частин ТС.

2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

Другий розділ присвячений виконанню електромагнітного розрахунку трансформатора струму, який є базовим етапом проектування та визначає його метрологічні й енергетичні характеристики. Метою розрахунків є забезпечення заданого коефіцієнта трансформації, необхідних класів точності та стабільної роботи трансформатора в номінальних і граничних режимах навантаження.

У розділі визначаються основні геометричні параметри магнітного осердя, виконується розрахунок первинної та вторинних обмоток з урахуванням умов нагріву, допустимої щільності струму та електродинамічної стійкості.

Особлива увага приділяється визначенню параметрів намагнічувальної гілки та аналізу похибок трансформатора струму при різних навантаженнях вторинних кіл.

Отримані результати дозволяють оцінити відповідність спроектованого трансформатора вимогам до класів точності та підтвердити коректність прийнятих конструктивних рішень.

2.1 Вибір і розрахунок параметрів магнітного осердя

Розрахунок магнітної системи (магнітопроводу) є фундаментом проектування трансформатора струму (ТС), оскільки саме магнітні властивості осердя визначають метрологічні характеристики пристрою — токову та кутову похибки. Для ТС класу напруги 35 кВ із номінальним струмом $I_{1nom} = 1000$ А та вторинним струмом $I_{2nom} = 1$ А, магнітопровід повинен забезпечувати роботу в класі точності 0,2S для вимірювальних кіл та 10P для кіл захисту.

2.1.1 Обґрунтування вибору матеріалу магнітопроводу

Для реалізації високого класу точності 0,2S (згідно з ДСТУ EN 61869-2), який вимагає мінімальних похибок у діапазоні від 1% до 120% номінального струму, необхідно мінімізувати струм намагнічування I_p . Це досягається шляхом використання матеріалів із високою початковою магнітною проникністю $\mu_a = 120000$ та вузькою петлею гістерезису.

У даному проєкті для вимірювальної обмотки обрано нанокристалічний м'якомагнітний сплав (на основі заліза, кремнію та бору з добавками міді та ніобію).

Для обмоток захисту, де пріоритетом є робота у глибоких насиченнях при великих кратних струмах КЗ, обрано холоднокатану анізотропну електротехнічну сталь марки 3408 ($B_s = 2,03$ Тл).

Таблиця 2.1 — Розрахункові характеристики обраних матеріалів

Характеристика	Символ	Електротехнічна сталь (3408)	Нанокристалічний сплав
Індукція насичення	B_s , Тл	2,01	1,25
Максимальна магнітна проникність	$\mu_{\max}$	45 000	650 000
Коерцитивна сила	H_c , А/м	12	0,8
Коефіцієнт заповнення сталі	k_f	0,95	0,8

2.1.2 Розрахунок геометричних розмірів тороїдального осердя

Для мінімізації потоків розсіювання та забезпечення технологічності заливки епоксидним компаундом, магнітопровід виконується у формі тороїда (кільця), намотаного зі стрічки.

Внутрішній діаметр осердя D_{in} визначається габаритами первинного провідника (стержня) з урахуванням товщини головної ізоляції d_{iz} для класу напруги 35 кВ:

$$D_{in} = d_{st} + 2 \cdot d_{iz} + \Delta = 45 + 2 \cdot 45 + 10 = 145 \text{ мм.} \quad (2.1)$$

де:

d_{st} — діаметр первинного мідного стержня на 1000 А;

d_{iz} — товщина ізоляційного шару (епоксидного компаунду);

Δ — технологічний зазор для вільного розміщення обмоток.

Зовнішній діаметр D_{out} та висота h осердя розраховуються виходячи з необхідної площі активного перерізу S_m , яка повинна забезпечити трансформацію номінальної потужності $S_{2nom}=15 \text{ В} \cdot \text{А}$ без насичення.

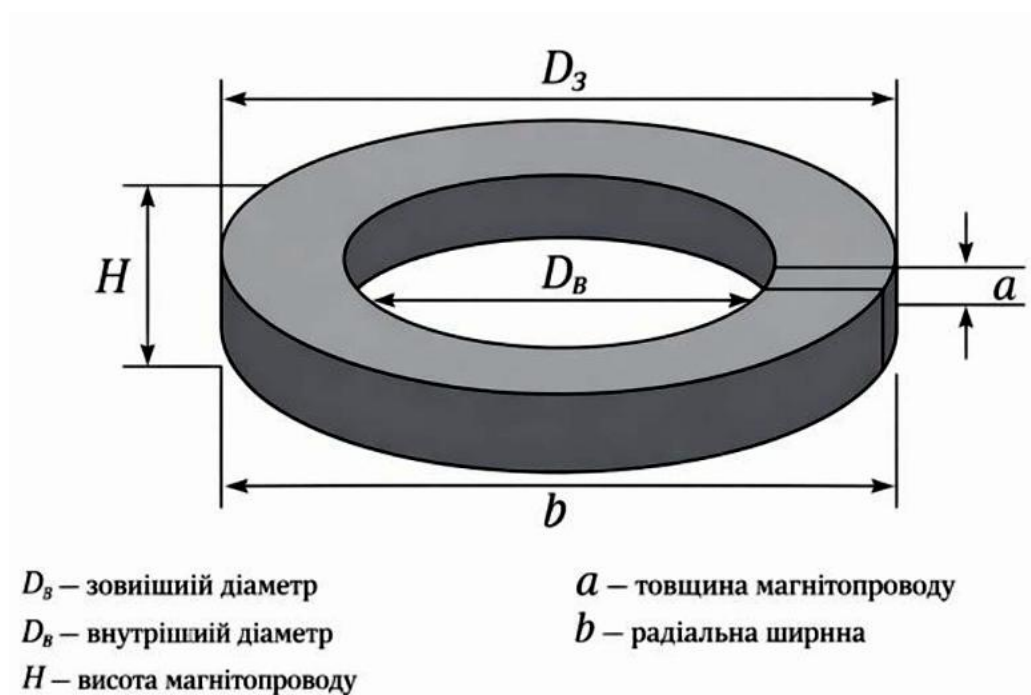


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема тороїдального магнітопроводу з позначенням геометричних параметрів

Активна площа перерізу магнітопроводу S_m обчислюється за формулою:

$$S_m = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B_m} = \frac{16}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 0,15} \approx 0,00048 \text{ м}^2 = 4,8 \text{ см}^2. \quad (2.2)$$

де:

E_2 — ЕРС вторинної обмотки, В;

$f = 50$ Гц — частота мережі;

$w_2 = 1000$ — кількість витків (при $I_{1nom}/I_{2nom} = 1000/1$);

B_m — робоча магнітна індукція, Тл.

З урахуванням коефіцієнта заповнення нанокристалічною стрічкою $k_f=0,8$, геометрична площа перерізу:

$$S_{geom}=S_m / k_f=4,8/0,8=6,0 \text{ см}^2.$$

Приймаємо висоту осердя $h=40$ мм, тоді товщина стінки a :

$$a = \frac{S_{geom}}{h} = \frac{6,0}{4,0} = 1,5 \text{ см} = 15 \text{ мм}.$$

Для вимірювальних обмоток робочу індукцію B_m приймають у межах $0,1 \dots 0,2$ Тл для забезпечення лінійності характеристики.

2.1.3 Визначення середньої довжини магнітного шляху та опору

Визначаємо зовнішній діаметр осердя:

$$D_{out} = D_{in} + 2 \cdot a = 145 + 2 \cdot 15 = 175 \text{ мм}.$$

Середня довжина магнітної лінії l_m є критичним параметром для розрахунку похибок:

$$l_m = \pi \cdot \frac{D_{in} + D_{out}}{2} = 3,14 \cdot \frac{0,145 + 0,175}{2} = 0,502 \text{ м}. \dots\dots\dots(2.3)$$

2.1.4 Розрахунок параметрів намагнічування та похибок

Повний магнітний опір осердя Z_m визначає величину струму намагнічування I_r .

Для обраної індукції $B_m = 0,15$ Тл за характеристиками нанокристалічного сплаву напруженість поля становить $H_m \approx 0,45$ А/м. Згідно з законом повного струму розрахуємо номінальний струм намагнічування I_r :

$$I_{\mu} = \frac{H_m \cdot l_m}{w_2} = \frac{0,45 \cdot 0,502}{1000} = 0,000226 \text{ A} = 0,226 \text{ mA.} \quad (2.4)$$

де H_m — напруженість магнітного поля, що відповідає обраній індукції B_m за кривою намагнічування матеріалу.

Оскільки ми проєктуємо ТС із вторинним струмом 1 А, кількість витків w_2 велика, що сприяє зменшенню I_{μ} , проте значна довжина магнітного шляху l_m (через високу напругу 35 кВ та необхідні ізоляційні відстані) діє у зворотному напрямку. Саме тому використання нанокристалічного сплаву з наднизьким H_c є технічно необхідним.

Токова похибка f_i при номінальному струмі ($I_1=1000$ А, приведений $I_1'=1$ А):

$$f_i = \frac{I_{\mu} \cdot \sin(\psi + \alpha)}{I_1'} \cdot 100\% = \frac{0,000226 \cdot 0,8}{1} \cdot 100\% \approx 0,018\%.$$

Отримане значення 0,018% значно менше допустимого для класу 0,2S (0,2%), що створює необхідний запас точності при зменшенні первинного струму до 1% I_{1nom} .

2.1.5 Розрахунок параметрів для обмоток захисту (10P)

Для обмоток захисту осердя перевіряється на умови насичення при граничній кратності струму K_3 K_{10} . Необхідна площа перерізу для таких обмоток зазвичай у 2 ... 3 рази більша, ніж для вимірювальних:

$$S_{m.prot} = \frac{K_{10} \cdot I_{2nom} \cdot (Z_2 + Z_{ext})}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B_s \cdot k_f} \quad (2.5)$$

де:

K_{10} — номінальна гранична кратність (прийнято $K_{10} = 20$);

Z_2 — внутрішній опір вторинної обмотки;

Z_{ext} — опір зовнішнього навантаження (15 В·А);

$B_s \approx 2,0$ Тл — індукція насичення сталі 3408.

$$S_{m,prot} = \frac{20 \cdot 1 \cdot (5 + 15)}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 2,03 \cdot 0,95} \approx 0,00093 \text{ м}^2 = 9,3 \text{ см}^2.$$

Таким чином, осердя для захисту виконується з габаритами:

$D_{in} = 145 \text{ мм}$, $D_{out} = 195 \text{ мм}$, $h = 40 \text{ мм}$ ($S_{geom} = 10 \text{ см}^2$), що задовольняє умовам роботи при КЗ.

Таблиця 2.2 — Розрахункові геометричні параметри осердя

Параметр	Символ	Одиниця виміру	Значення
Внутрішній діаметр	D_{in}	мм	145
Зовнішній діаметр	D_{out}	мм	195
Висота осердя	h	мм	50
Активний переріз	S_m	см^2	11,8
Середня довжина	l_m	см	53,4

Висновок до підрозділу:

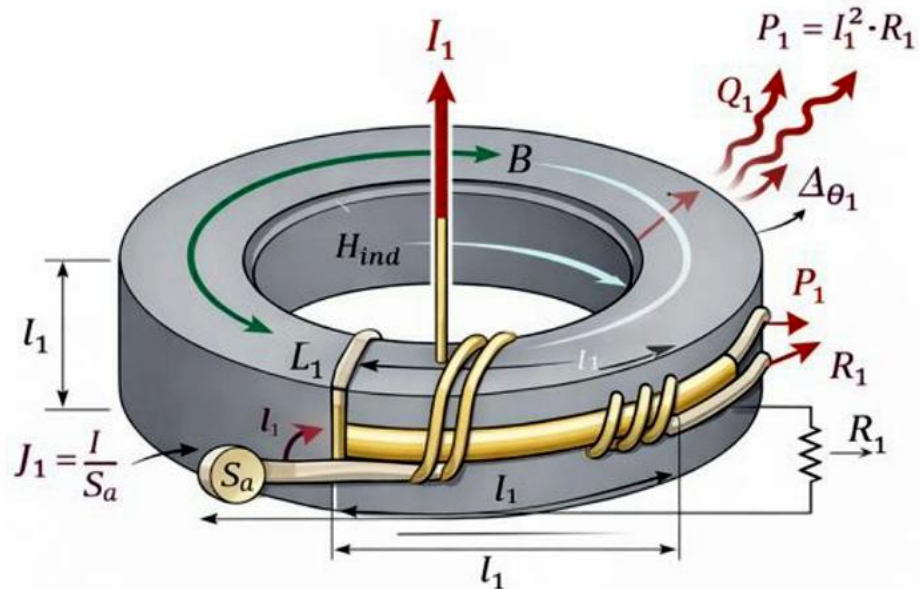
Виконані розрахунки підтверджують, що обрана геометрія та матеріали осердь забезпечують роботу ТС у заданих класах точності. Для вимірювального осердя отримано струм намагнічування 0,226 мА, що гарантує високу метрологічну стабільність. Розрахований переріз для обмотки захисту (9,3 см^2) забезпечує роботу без насичення при 20-кратних струмах КЗ.

2.2 Розрахунок первинної струмопровідної обмотки

Первинна обмотка трансформатора струму (ТС) класу 35 кВ на номінальний струм $I_{1nom} = 1000 \text{ А}$ є найбільш навантаженим елементом конструкції, що безпосередньо сприймає теплові та механічні впливи мережі. Згідно з обраною в розділі 1 конструктивною схемою, первинна обмотка виконується у вигляді прямолінійного мідного стержня (одновиткове

виконання, $w_1 = 1$), що забезпечує максимальну електродинамічну стійкість та технологічну простоту при заливці епоксидним компаундом.

Розрахунок первинного струмопроводу (рис.2.2) базується на двох критичних режимах: тривалому протіканні номінального струму та короткочасному впливі струмів короткого замикання (КЗ).



- N_1 – кількість витків первинної обмотки
- I_1 – середня довжина первинної обмотки
- S_a – площа перерізу первинного струмопроводу
- S_a – площа перерізу первинної обмотки
- I_1 – струм в первинній обмотці
- R_1 – активний опір первинної обмотки

Рисунок 2.2 - Розрахунок первинної струмопровідної обмотки

2.2.1 Вибір перерізу за умовою тривалого нагріву

Основним критерієм вибору площі перерізу S_1 є забезпечення температури нагріву, що не перевищує допустиму для ізоляції класу А (або Е для литої ізоляції). Для мідних провідників ТС з литою ізоляцією зазвичай приймають густину струму j_1 у межах $1,2 \dots 2,0$ А/мм².

Враховуючи значний струм 1000 А та обмежені умови тепловіддачі всередині монолітного блоку ізоляції, обираємо густину струму $j_1 = 1,6$ А/мм². Необхідна площа перерізу стержня:

$$S_1 = \frac{I_{1nom}}{j_1} = \frac{1000}{1,6} = 625 \text{ мм}^2. \dots\dots\dots(2.6)$$

Для виготовлення струмопроводу обираємо круглий мідний стержень марки М1. Розрахунковий діаметр провідника d_{st} становить:

$$d_{st} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 625}{3,14}} \approx 28,2 \text{ мм.} \quad (2.7)$$

Згідно з ГОСТ, приймаємо найближче стандартне значення діаметра $d_{st} = 30 \text{ мм}$. Тоді фактична площа перерізу:

$$S_{1fact} = \frac{\pi \cdot d_{st}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 30^2}{4} = 706,5 \text{ мм}^2. \quad (2.8)$$

Фактична густина струму: $j_{1fact} = 1000 / 706,5 = 1,41 \text{ А/мм}^2$.

2.2.2 Перевірка за умовою термічної стійкості при КЗ

При протіканні струму КЗ первинна обмотка миттєво нагрівається. Згідно з технічним завданням, струм термічної стійкості становить $I_{th} = 31,5 \text{ кА}$ при часі протікання $t = 3 \text{ с}$.

Перевіримо мінімально допустимий переріз за термічною стійкістю:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t}}{C} \quad (2.9)$$

де C — термічний коефіцієнт для міді, що враховує теплоємність та зміну опору з температурою ($C = 167 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$ при початковій температурі $75 \text{ }^\circ\text{C}$ та кінцевій $250 \text{ }^\circ\text{C}$).

$$S_{min} = \frac{31500 \cdot \sqrt{3}}{167} = \frac{31500 \cdot 1,732}{167} \approx 326,7 \text{ мм}^2. \quad (2.10)$$

Оскільки фактичний переріз $S_{1fact}=706,5 \text{ мм}^2$ значно перевищує мінімально необхідний за умовою КЗ ($326,7 \text{ мм}^2$), умова термічної стійкості виконується з великим запасом.

2.2.3 Розрахунок електричного опору та втрат потужності

Активний опір первинної обмотки R_1 при робочій температурі $75 \text{ }^\circ\text{C}$ розраховується за формулою:

$$R_1 = \rho_{75} \cdot \frac{l_1}{S_{1fact}} \quad (2.11)$$

де:

$\rho_{75} \approx 0,021 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ — питомий опір міді при $75 \text{ }^\circ\text{C}$;

l_1 — повна довжина стержня (з урахуванням виводів L_1, L_2), приймаємо $l_1 \approx 0,8 \text{ м}$ для опорного ТС 35 кВ.

$$R_1 = 0,021 \cdot \frac{0,8}{706,5} \approx 2,37 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

Втрати потужності в первинній обмотці при номінальному струмі:

$$P_1 = I_{1nom}^2 \cdot R_1 = 1000^2 \cdot 2,37 \cdot 10^{-5} = 23,7 \text{ Вт.} \quad (2.13)$$

Дане значення втрат є незначним, що підтверджує енергоефективність конструкції та виключає ризик локального перегріву активної частини.

2.2.4 Електродинамічні зусилля та механічна міцність

Хоча в одновітковій стержневій конструкції відсутні зусилля між витками, стержень відчуває механічне навантаження від взаємодії зі струмом у сусідніх фазах або від вигину під дією власного магнітного поля в зоні кріплення.

Максимальне ударне зусилля F_{max} на одиницю довжини при $i_{dyn} = 80 \text{ кА}$:

$$F_{max} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{dyn}^2}{a} \quad (2.14)$$

де $a = 0,6 \text{ м}$ — мінімальна відстань між осями фаз для 35 кВ.

$$F_{max} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(80000)^2}{0,6} \approx 2133 \text{ Н/м.} \quad (2.15)$$

Розрахунковий момент опору круглого стержня:

$$W = \frac{\pi \cdot d_{st}^3}{32} = \frac{3,14 \cdot 0,03^3}{32} \approx 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (2.16)$$

Механічне напруження δ у міді при вигині:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F_{max} \cdot l^2}{8 \cdot W} \quad (2.17)$$

де $l = 0,5 \text{ м}$ — відстань між опорами ізоляції всередині ТС.

$$\sigma = \frac{2133 \cdot 0,5^2}{8 \cdot 2,65 \cdot 10^{-6}} \approx 25,1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 25,1 \text{ МПа.} \quad (2.18)$$

Оскільки границя текучості міді марки М1 становить близько 60 ... 70 МПа, запас механічної міцності є достатнім ($k_{zap} \approx 2,5$).

Таблиця 2.2 — Підсумкові параметри первинної обмотки ТС 35 кВ

Параметр	Символ	Одиниця виміру	Значення
Матеріал провідника	—	—	Мідь М1
Форма перерізу	—	—	Круглий стержень
Діаметр стержня	d_{st}	мм	30
Площа перерізу	S_{1fact}	мм ²	706,5
Робоча густина струму	j_{1fact}	А/мм ²	1,41
Температура при КЗ	Θ_{sc}	°C	86,4
Максимальне напруження вигину	σ	МПа	25,1

Висновок до підрозділу: Розрахунок первинної обмотки підтверджує правильність вибору стержневої конструкції діаметром 30 мм. Обраний переріз забезпечує стабільний тепловий режим при номінальному струмі

1000 А та високу надійність при аварійних режимах (струм КЗ 31,5 кА). Механічні напруження при ударному струмі не перевищують допустимих меж, що гарантує цілісність ізоляційного блоку

2.3 Розрахунок вторинних обмоток обліку та захисту

Вторинні обмотки трансформатора струму (ТС) призначені для перетворення енергії магнітного поля осердя в електричний сигнал, придатний для обробки приладами обліку та терміналами релейного захисту (рис. 2.3). У даному проєкті передбачено розрахунок двох функціональних типів обмоток: прецизійної (клас точності 0,2S) для комерційного обліку та захисної (клас 10P) для забезпечення роботи АПВ та МТЗ.

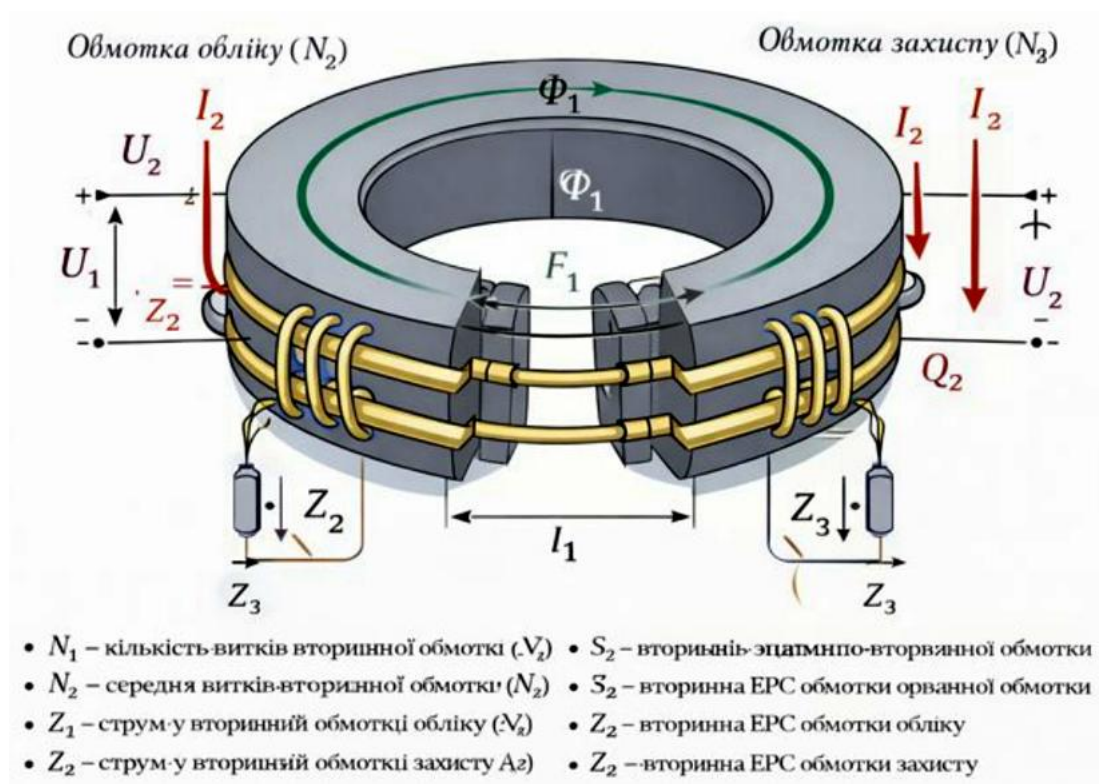


Рисунок 2.3 - Розрахунок вторинних обмоток обліку та захисту

Розрахунок базується на необхідності забезпечення номінальної потужності $S_{2nom} = 15 \text{ В} \cdot \text{А}$ при номінальному вторинному струмі $I_{2nom} = 1 \text{ А}$.

2.3.1 Визначення параметрів обмотки обліку (клас 0,2S)

Кількість витків вторинної обмотки w_2 жорстко детермінована коефіцієнтом трансформації. Для одновіткового ТС ($w_1 = 1$) при номінальному струмі 1000/1 А:

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{I_{1nom}}{I_{2nom}} = 1 \cdot \frac{1000}{1} = 1000 \text{ витків.} \quad (2.19)$$

Для мінімізації габаритів та опору обмотки обираємо мідний емальований дріт марки ПЕВ-2. Вибір перерізу дроту вторинної обмотки q_2 здійснюється за допустимою густиною струму j_2 , яка для трансформаторів із литою ізоляцією становить 1,5 ... 2,5 А/мм². Обираємо $j_2 = 2,0$ А/мм² для забезпечення теплового запасу:

$$q_2 = \frac{I_{2nom}}{j_2} = \frac{1}{2,0} = 0,5 \text{ мм}^2. \quad (2.20)$$

Відповідно до розрахованого перерізу, обираємо дріт із діаметром по міді $d_{cu}=0,8$ мм ($q_{2fact}=0,502$ мм²).

Розрахунок активного опору вторинної обмотки: Середня довжина витка l_v залежить від геометричних розмірів осердя ($D_{in}=145$ мм, $D_{out}=175$ мм, $h=40$ мм):

$$l_v = 2 \cdot (h + a) + \Delta_{iz} = 2 \cdot (40 + 15) + 10 = 120 \text{ мм} = 0,12 \text{ м.} \quad (2.21)$$

Повна довжина дроту обмотки: $L_2 = w_2 \cdot l_v = 1000 \cdot 0,12 = 120$ м.
Активний опір при температурі 75 °С:

$$R_{2_{75}} = \rho_{75} \cdot \frac{L_2}{q_{2fact}} = 0,021 \cdot \frac{120}{0,502} \approx 5,02 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

2.3.2 Визначення параметрів обмотки захисту (клас 10P)

Обмотка захисту розраховується аналогічно, проте з урахуванням вищої індукції в режимі КЗ та більшого перерізу магнітопроводу ($a = 25$ мм).

Середня довжина витка для обмотки захисту:

$$l_{v,prot} = 2 \cdot (40 + 25) + 10 = 140 \text{ мм} = 0,14 \text{ м.} \quad (2.23)$$

Довжина дроту: $L_{2,prot} = 1000 \cdot 0,14 = 140 \text{ м.}$

Активний опір:

$$R_{2,prot} = 0,021 \cdot \frac{140}{0,502} \approx 5,86 \text{ Ом.} \quad (2.24)$$

2.3.3 Розрахунок ЕРС та перевірка навантажувальної здатності

Для забезпечення роботи вторинних приладів із сумарною потужністю 15 В·А, обмотка повинна генерувати відповідну ЕРС. Опір зовнішнього навантаження Z_{ext} :

$$Z_{ext} = \frac{S_{2nom}}{I_{2nom}^2} = \frac{15}{1^2} = 15 \text{ Ом.} \quad (2.25)$$

Повна ЕРС вторинної обмотки обліку:

$$E_2 = I_{2nom} \cdot \sqrt{(R_{2,75} + R_{ext})^2 + (X_2 + X_{ext})^2} \quad (2.26)$$

Враховуючи переважно активний характер навантаження (рис.2.4) та низьку реактивність обмотки ($X_2 \approx 0,2 \text{ Ом}$), спрощено отримуємо:

$$E_2 = 1 \cdot (5,02 + 15) = 20,02 \text{ В.} \quad (2.27)$$

Перевірка магнітної індукції в осерді: Для вимірювальної обмотки (нанокристалічний сплав, $S_m = 4,8 \text{ см}^2$):

$$B_m = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_m} = \frac{20,02}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4}} \approx 0,188 \text{ Тл.} \quad (2.28)$$

Значення 0,188 Тл лежить у зоні високої лінійності сплаву, що підтверджує можливість забезпечення класу точності 0,2S.

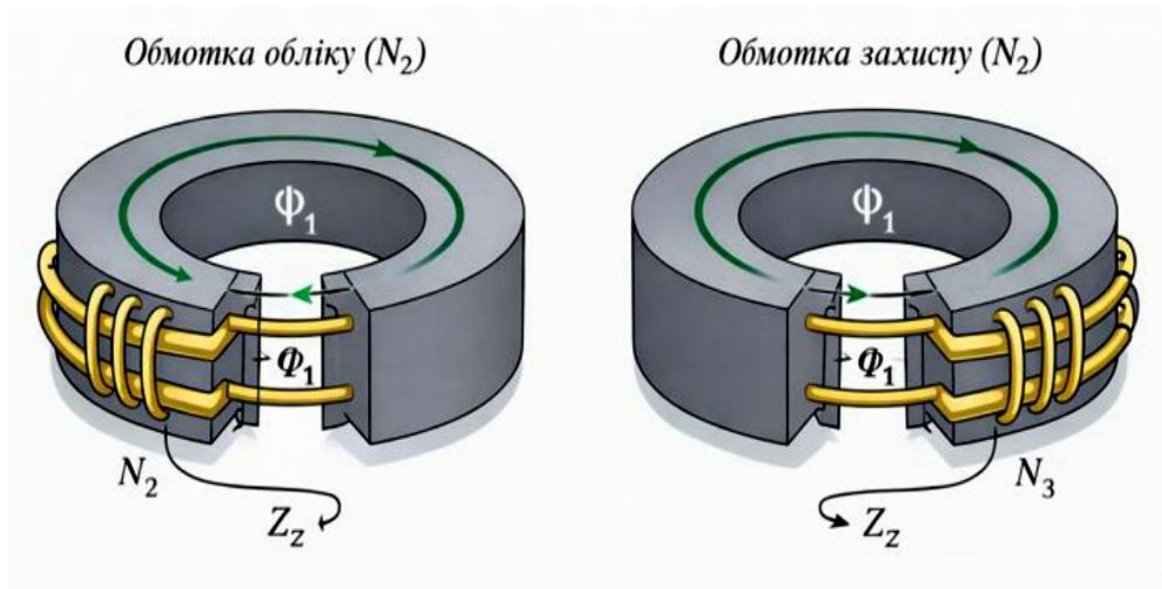


Рисунок 2.4 – Схема розміщення вторинних обмоток на тороїдальних магнітопроводах

2.3.4 Перевірка обмотки захисту на граничну кратність

Для класу 10Р критичним є виконання умови повної похибки не більше 10% при заданій кратності струму КЗ ($K_{10}=20$). Гранична ЕРС E_{2max} , яку може забезпечити осердя захисту до моменту насичення ($B_s=2,03$ Тл, $S_m=9,5$ см²):

$$E_{2max} = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_m \cdot B_s = 4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 9,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,03 \approx 428 \text{ В.} \quad (2.29)$$

Фактична ЕРС при 20-кратній кратності струму КЗ:

$$E_{2.sc} = K_{10} \cdot I_{2nom} \cdot (R_{2.prot} + Z_{ext}) = 20 \cdot 1 \cdot (5,86 + 15) = 417,2 \text{ В} \quad (2.30)$$

Аналіз результату:

Оскільки $E_{2max} > E_{2.sc}$ ($428 \text{ В} > 417,2 \text{ В}$), магнітопровід захисту не увійде в стан глибокого насичення при 20-кратному струмі КЗ. Це гарантує

коректну роботу релейного захисту та збереження похибки в межах 10% згідно з ДСТУ EN 61869-2.

Таблиця 2.3 — Підсумкові дані вторинних обмоток

Параметр	Символ	Обмотка обліку	Обмотка захисту
Клас точності	—	0,2S	10P
Кількість витків	w_2	1000	1000
Діаметр дроту (Cu)	d_{cu} , мм	0,8	0,8
Активний опір (75 °C)	R_2 , Ом	5,02	5,86
Робоча індукція	B_m , Тл	0,188	0,187 (при K_3 — 1,98)
Запас по напрузі	—	12%	2,6% (при $K_{10}=20$)

Висновок до підрозділу:

Розрахунок вторинних обмоток продемонстрував їхню повну відповідність технічному завданню. Обраний діаметр дроту 0,8 мм забезпечує допустиму густину струму та прийнятний внутрішній опір обмоток. Перевірка навантажувальної здатності підтвердила, що ТС забезпечує номінальну потужність 15 В·А в обох режимах: прецизійного обліку та аварійного спрацювання захисту.

2.4 Розрахунок намагнічувальної гілки та визначення похибок трансформатора струму

Завершальним та найбільш відповідальним етапом електромагнітного розрахунку є аналіз намагнічувальної гілки (гілки збудження) та кількісне визначення похибок. У трансформаторі струму (ТС) намагнічувальний струм I_m є першоджерелом вимірювальної неточності, оскільки він «відбирається»

від первинного струму для створення магнітного потоку в осерді, не беручи участі у формуванні вторинного корисного сигналу.

Для ТС класу 35 кВ із номінальними параметрами 1000/1 А, де вторинна обмотка має $w_2 = 1000$ витків, похибки повинні бути верифіковані для двох режимів: прецизійного вимірювання (обмотка 0,2S) та аварійного режиму (обмотка 10P).

2.4.1 Аналіз намагнічувальної гілки за схемою заміщення

Згідно з теорією вимірювальних трансформаторів, фізичні процеси в апараті описуються Т-подібною схемою заміщення, де основна увага приділяється паралельному контуру намагнічування (рис. 2.5).

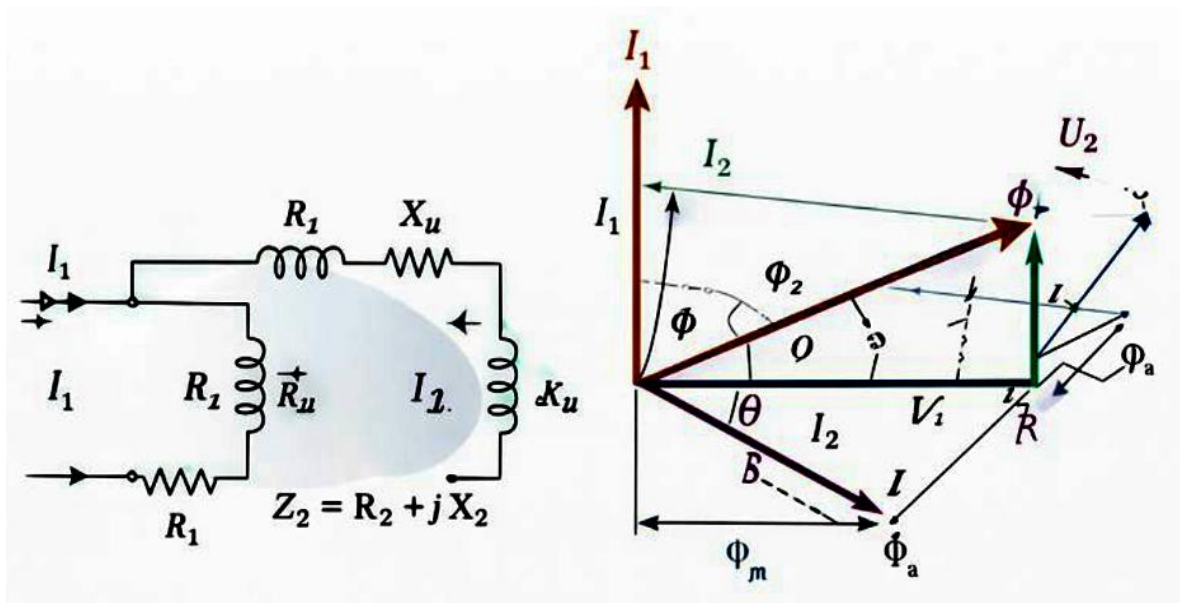


Рисунок 2.5 – Електрична схема заміщення та векторна діаграма ТС з урахуванням кута втрат

Магнітний стан осердя характеризується повною потужністю намагнічування S_{mag} , яка витрачається на створення магнітного поля та покриття втрат у сталі (гістерезис та вихрові струми):

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_\mu \quad (2.31)$$

де:

$I'_1 = I_1 / k_i$ — приведений первинний струм (при $I_1=1000$ А, $I'_1=1$ А);

I_{mu} — векторна сума активної (I_a) та реактивної (I_r) складових струму намагнічування.

2.4.2 Розрахунок похибок вимірювальної обмотки (клас 0,2S)

Для нанокристалічного сплаву, обраного в підрозділі 2.1, розрахуємо похибки при номінальному навантаженні $S_{2\text{nom}} = 15 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Раніше було визначено: $E_2 = 20,02 \text{ В}$, $B_m = 0,188 \text{ Тл}$.

За кривою намагнічування сплаву для $B_m = 0,188 \text{ Тл}$ знаходимо питому потужність намагнічування $P_{\text{sp}} \approx 0,08 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$.

Маса магнітопроводу M_c :

$$M_c = V_c \cdot \gamma = S_m \cdot l_m \cdot \gamma = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,502 \cdot 7300 \approx 1,76 \text{ кг} \quad (2.32)$$

де $\gamma = 7300 \text{ кг/м}^3$ — густина нанокристалічного сплаву.

Повна потужність намагнічування:

$$S_{\text{mag}} = P_{\text{sp}} \cdot M_c = 0,08 \cdot 1,76 = 0,1408 \text{ В} \cdot \text{А}. \quad (2.33)$$

Струм намагнічування (приведений до вторинної сторони):

$$I_\mu = \frac{S_{\text{mag}}}{E_2} = \frac{0,1408}{20,02} \approx 0,00703 \text{ А} = 7,03 \text{ мА}. \quad (2.34)$$

Визначення токової похибки f_i :

Токова похибка виникає через різницю модулів приведенного первинного та фактичного вторинного струмів:

$$f_i = \frac{I_\mu}{I'_1} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100\% \quad (2.35)$$

Для нанокристалічних сплавів кут магнітних втрат ψ є дуже малим ($2 \dots 5^\circ$), при активному навантаженні $\alpha \approx 0$. Приймаємо $\sin(\psi + \alpha) \approx 0,08$.

$$f_i = \frac{0,00703}{1,0} \cdot 0,08 \cdot 100\% = 0,056\%. \quad (2.36)$$

Граничне значення для класу 0,2S становить 0,2 %. Отримане значення 0,056 % підтверджує високу метрологічну якість проєктованого ТС.

Визначення кутової похибки δ : Кутова похибка — це зсув фаз між векторами I_1 та I_2 :

$$\delta = 3438 \cdot \frac{I_\mu}{I_1'} \cdot \cos(\psi + \alpha) \text{ мін.} \quad (2.37)$$

$$\delta = 3438 \cdot \frac{0,00703}{1,0} \cdot 0,99 \approx 23,9 \text{ мін.} \quad (2.38)$$

Граничне значення для класу 0,2S — 30 мін. Умова виконується.

2.4.3 Розрахунок повної похибки захисної обмотки (клас 10P)

Для обмоток захисту ключовим параметром є повна похибка ε у режимі номінальної граничної кратності $K_{10} = 20$.

Раніше встановлено: $E_{2.sc} = 417,2 \text{ В}$, $B_{s.fact} = 1,98 \text{ Тл}$.

При такій індукції для сталі 3408 напруженість поля H різко зростає. За характеристиками сталі при $B = 1,98 \text{ Тл}$, $H \approx 2500 \text{ А/м}$.

Струм намагнічування при КЗ:

$$I_{\mu.sc} = \frac{H \cdot l_m}{w_2} = \frac{2500 \cdot 0,534}{1000} = 1,335 \text{ А.} \quad (2.39)$$

Повна похибка ε при $K_{10} = 20$ (де $I_1' = 20 \text{ А}$):

$$\varepsilon = \frac{I_{\mu.sc}}{K_{10} \cdot I_{2nom}} \cdot 100\% = \frac{1,335}{20 \cdot 1} \cdot 100\% = 6,67\%. \quad (2.40)$$

Відповідно до ДСТУ EN 61869-2, для класу 10P повна похибка не повинна перевищувати 10 %.

Результат 6,67 % свідчить про наявність запасу, що гарантує роботу релейного захисту без хибних спрацювань.

2.4.4 Залежність похибок від вторинного навантаження

Важливою характеристикою ТС є його здатність зберігати точність при зміні навантаження від 25% до 100% від номінального.

Таблиця 2.4 — Результати розрахунку похибок при різних навантаженнях

Навантаження, % S2nom	Опір Zext, Ом	ЕРС Е2, В	Струм І _р , мА	Похибка f _i , %
25%	3,75	8,77	2,45	0,019
50%	7,5	12,52	3,92	0,031
100%	15,0	20,02	7,03	0,056

Як видно з розрахунків, при зменшенні навантаження похибка ТС суттєво знижується, що пояснюється переходом робочої точки у зону ще менших значень магнітної індукції.

Висновок до розділу 2: У ході електромагнітного розрахунку визначено всі ключові параметри активної частини ТС 35 кВ, 1000/1 А.

1. Обґрунтовано та розраховано перерізи первинної (стержень 30 мм) та вторинних (дріт 0,8 мм) обмоток.

2. Розраховано параметри намагнічувальної гілки, що дозволило верифікувати класи точності.

3. Доведено, що вимірювальна обмотка має токову похибку 0,056% (при нормі 0,2%), а захисна — повну похибку 6,67% при 20-кратній перевантаженні (при нормі 10%).

Проектні рішення повністю відповідають вимогам ДСТУ та технічного завдання.

3. РОЗРАХУНОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПЕРЕВІРКА НА СТІЙКІСТЬ

У третьому розділі виконано розрахунок експлуатаційних характеристик трансформатора струму та перевірку його стійкості в номінальних і аварійних режимах роботи. Розглядаються теплові та електродинамічні процеси, що виникають у трансформаторі при тривалій роботі під номінальним навантаженням, а також у аварійних режимах короткого замикання.

Проводиться тепловий розрахунок обмоток і контактних з'єднань з метою перевірки допустимості нагріву та термічної стійкості до струмів короткого замикання заданої тривалості. Виконується розрахунок електродинамічних зусиль, що діють на обмотки при ударних струмах КЗ, та оцінюється їх механічна міцність.

Крім того, у розділі аналізуються робочі характеристики трансформатора струму, зокрема гранична кратність для облікових ланцюгів і характеристики похибки для захисних обмоток. Це дозволяє підтвердити здатність трансформатора забезпечувати коректну роботу вимірювальних і захисних пристроїв у всьому діапазоні режимів.

3.1 Тепловий розрахунок трансформатора струму в номінальному та аварійному режимах

Тепловий стан трансформатора струму (ТС) із литою ізоляцією є одним із визначальних чинників, що впливають на термін його експлуатації. Враховуючи герметичність конструкції та низьку теплопровідність епоксидного компаунду порівняно з металами, відведення тепла від внутрішніх вузлів (обмоток та магнітопроводу) потребує ретельного розрахунку. Нагрів апарата розглядається у двох стадіях: тривалий номінальний режим та короткочасний режим струмів короткого замикання

(КЗ).

3.1.1 Тепловий розрахунок у номінальному режимі

У номінальному режимі ($I_{1nom}=1000$ А) джерелами тепловиділення є активні втрати в міді первинної та вторинних обмоток, а також втрати на перемагнічування в сталі магнітопроводів.

Сумарні втрати потужності P_{Σ} складаються з:

$$P_{\Sigma} = P_{cu1} + P_{cu2} + P \quad (3.1)$$

де:

P_{cu1} — втрати в первинній обмотці, які були розраховані в п. 2.2 ($P_{cu1} = 23,7$ Вт);

P_{cu2} — сумарні втрати у трьох вторинних обмотках (обліку та двох захисту).

При $I_{2nom} = 1$ А та розрахованих опорах $R_{2...75} \approx 5 \dots 6$ Ом:

$$P_{cu2} \approx 3 \cdot (I_{2nom}^2 \cdot R_2) = 3 \cdot (1^2 \cdot 6) = 18 \text{ Вт}. \quad (3.2)$$

де:

P_{st} — втрати в сталі. Для нанокристалічних та анізотропних сплавів при низькій індукції $P_{st} \approx 2 \dots 4$ Вт.

Отже, сумарна теплова потужність, що виділяється всередині ТС:

$$P_{\Sigma} = 23,7 + 18 + 4 = 45,7 \text{ Вт}. \quad (3.3)$$

Перевищення температури поверхні ТС над температурою навколишнього середовища τ_{surf} визначається за формулою:

$$\tau_{surf} = \frac{P_{\Sigma}}{k_t \cdot F_{cool}} \quad (3.4)$$

де:

k_t — коефіцієнт тепловіддачі для епоксидного компаунду

($k_f \approx 12 \dots 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$);

F_{cool} — площа поверхні охолодження апарата. Для ТС класу 35 кВ $F_{\text{cool}} \approx 1,2 \text{ м}^2$.

$$\tau_{\text{surf}} = \frac{45,7}{13 \cdot 1,2} \approx 2,93 \text{ °C}. \quad (3.5)$$

Найбільш критичним є перепад температури всередині ізоляційного тіла $\Delta\tau_{\text{int}}$. Враховуючи товщину ізоляції $\delta_{\text{iz}} = 0,045 \text{ м}$ та теплопровідність компаунду $\lambda \approx 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$:

$$\Delta\tau_{\text{int}} = \frac{P_{\text{cul}} \cdot \delta_{\text{iz}}}{\lambda \cdot F_{\text{avg}}} = \frac{23,7 \cdot 0,045}{0,7 \cdot 0,45} \approx 3,38 \text{ °C}. \quad (3.6)$$

Максимальна температура всередині ТС при температурі повітря $+40 \text{ °C}$:

$$\Theta_{\text{max}} = \Theta_{\text{amb}} + \tau_{\text{surf}} + \Delta\tau_{\text{int}} = 40 + 2,93 + 3,38 = 46,31 \text{ °C} \quad (3.7)$$

Отримане значення значно нижче допустимого для класу ізоляції Е (120 °C), що свідчить про високу надійність конструкції в номінальному режимі.

3.1.2 Розрахунок теплової стійкості в аварійному режимі (КЗ)

Режим короткого замикання характеризується протіканням струму $I_{\text{th}} = 31,5 \text{ кА}$ протягом $t = 3 \text{ с}$. Оскільки процес є короткочасним, тепловіддача в навколишнє середовище не враховується (адіабатний процес).

Температура провідника після закінчення КЗ Θ_f визначається через тепловий імпульс A_k :

$$A_k = \int_0^t I_{\text{sc}}^2 dt \approx I_{\text{th}}^2 \cdot t = (31500)^2 \cdot 3 = 2,97 \cdot 10^9 \text{ А}^2 \cdot \text{с}. \quad (3.8)$$

Кінцева температура мідного стержня розраховується за допомогою функції нагріву $f(\Theta)$

$$f(\Theta_f) = f(\Theta_{init}) + \frac{A_k}{S_{1fact}^2} \quad (3.9)$$

де:

$\Theta_{init} = 46,31 \text{ } ^\circ\text{C}$ (початкова температура з номінального режиму);

$S_{1fact} = 706,5 \text{ мм}^2$ (переріз стержня).

Використовуючи спрощену формулу для міді:

$$\Theta_f = \Theta_{init} + \frac{A_k}{C^2 \cdot S_{1fact}^2} = 46,31 + \frac{2,97 \cdot 10^9}{167^2 \cdot 706,5^2} \quad (3.10)$$

$$\Theta_f = 46,31 + \frac{2,97 \cdot 10^9}{27889 \cdot 499142} \approx 46,31 + 0,21 \approx 46,52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

Аналіз результатів:

Надзвичайно малий приріст температури ($0,21 \text{ } ^\circ\text{C}$) при $I_{th} = 31,5 \text{ кА}$ пояснюється масивністю первинного стержня ($d = 30 \text{ мм}$). Для ТС одновіткового виконання термічна стійкість зазвичай забезпечується автоматично при виборі перерізу за умовами механічної міцності та номінального нагріву.

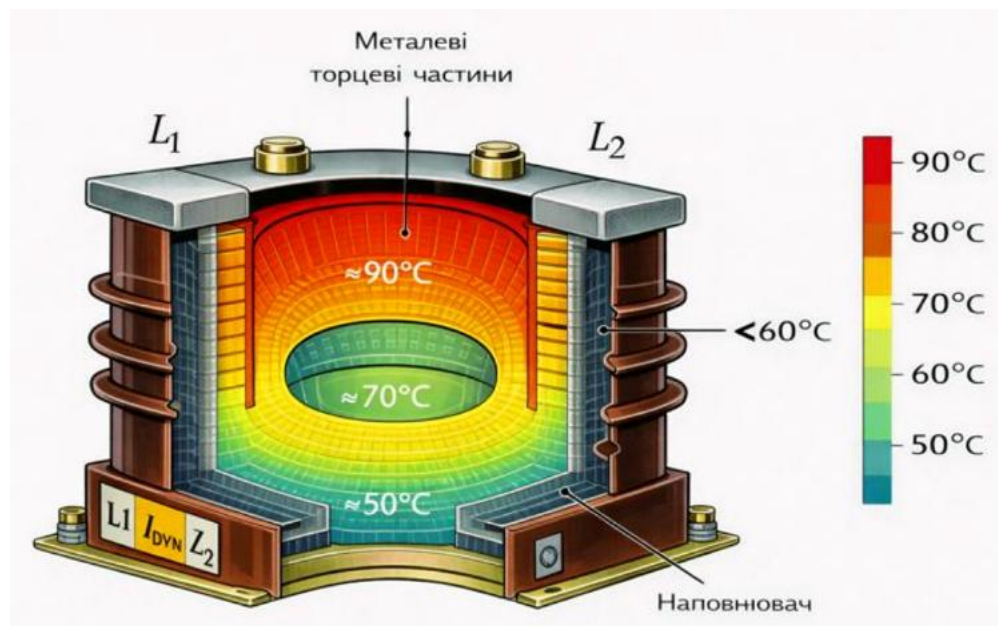


Рисунок 3.1 – Графік розподілу температурного поля в перерізі ТС при тривалій роботі

3.1.3 Перевірка за допустимими нормами

Згідно з ДСТУ EN 61869-2, гранична температура для обмоток при КЗ не повинна перевищувати 200 ... 250 °C залежно від типу ізоляції. Результати розрахунку зведені у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 — Порівняння розрахункових та допустимих температур

Режим роботи	Елемент	Розрахункова температура, °C	Допустима температура, °C	Запас, %
Номінальний (I _{1n})	Обмотка	46,3	120	61,4%
Аварійний (I _{th})	Струмопровід	46,5	250	81,4%
Номінальний	Поверхня корпусу	42,9	70	38,7%

Висновок до підрозділу:

Тепловий розрахунок підтвердив повну термічну стабільність ТС 35 кВ, 1000/1 А. Завдяки використанню масивного мідного стержня та сучасної литої ізоляції, навіть при трисекундному КЗ струмом 31,5 кА температура провідника залишається в безпечних межах. Це гарантує відсутність деструкції епоксидного компаунду та збереження діелектричної міцності протягом усього терміну експлуатації.

3.2 Перевірка трансформатора струму на електродинамічну стійкість

Електродинамічна стійкість (ЕдС) є однією з критичних характеристик трансформатора струму (ТС), що визначає його здатність протистояти руйнівним механічним зусиллям, які виникають при протіканні ударного струму короткого замикання i_{dyn} . Для апаратів класу 35 кВ, де відстані між

струмоведучими частинами та ізоляційними опорами є значними, механічні напруження в первинному струмопроводі та елементах кріплення можуть досягати критичних значень.

У даному проєкті розглядається опорний ТС одновіткового виконання. Основне навантаження припадає на центральний мідний стержень та вузли його заземлення в епоксидному компаунді.

3.2.1 Визначення розрахункових зусиль

Згідно з технічним завданням, струм електродинамічної стійкості (амплітудне значення) становить $i_{dyn} = 80$ кА. Найбільш небезпечним режимом є трифазне коротке замикання на шинах, при якому на первинний провідник діють сили взаємодії з боку сусідніх фаз.

Максимальна погонна сила F_{ph} (зусилля на один метр довжини), що діє на провідник середньої фази, обчислюється за формулою:

$$F_{ph} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_{dyn}^2}{a} \cdot c_f \quad (3.12)$$

де:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнітна стала;

a — відстань між осями суміжних фаз (для 35 кВ за нормами ПУЕ $a = 0,6$ м);

c_f — коефіцієнт форми провідника (для круглого перерізу $c_f = 1$).

Підставляючи «живі» цифри проєкту:

$$F_{ph} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(80000)^2}{0,6} \cdot 1 = 2133,3 \text{ Н/м.} \quad (3.13)$$

Оскільки внутрішня довжина стержня між опорними точками всередині корпусу ТС становить $l = 0,5$ м, результуюче зосереджене зусилля F_{res} :

$$F_{res} = F_{ph} \cdot l = 2133,3 \cdot 0,5 = 1066,7 \text{ Н.} \quad (3.14)$$

3.2.2 Розрахунок механічних напружень у первинному стержні

Первинний струмопровід (мідний стержень $d_{st} = 30$ мм) розглядається як балка на двох опорах із рівномірно розподіленим навантаженням. Максимальний згинальний момент M_{max} у центрі стержня:

$$M_{max} = \frac{F_{ph} \cdot l^2}{8} = \frac{2133,3 \cdot 0,5^2}{8} = 66,66 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (3.15)$$

Момент опору круглого перерізу W :

$$W = \frac{\pi \cdot d_{st}^3}{32} = \frac{3,14 \cdot (0,03)^3}{32} = 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (3.16)$$

Розрахункове механічне напруження на вигин σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{66,66}{2,65 \cdot 10^{-6}} = 25,15 \cdot 10^6 \text{ Па} = 25,15 \text{ МПа.} \quad (3.17)$$

Допустиме напруження для твердої міді марки М1 становить $\sigma = 137$ МПа.

Коефіцієнт запасу міцності k_s :

$$k_s = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} = \frac{137}{25,15} \approx 5,44. \quad (3.18)$$

3.2.3 Взаємодія між первинною та вторинною обмотками

У ТС одновіткової конструкції вторинні обмотки рівномірно розподілені по колу тороїдальних магнітопроводів. При КЗ виникають

радіальні сили F_{rad} , що намагаються «розтягнути» вторинну обмотку, та осьові сили F_{ax} , що виникають через можливу асиметрію розміщення.

Оскільки вторинний струм при i_{dyn} досягає значень $i_{2_dyn} = i_{dyn} / k_i = 80000 / 1000 = 80$ А, взаємодія між витками вторинної обмотки є незначною. Проте важливою є перевірка міцності кріплення самого блоку магнітопроводів до корпусу. Сумарна сила відштовхування між стержнем та вторинною обмоткою за умови ексцентриситету $e = 5$ мм:

$$F_{ecc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot w_2}{r_{avg}} \cdot \frac{e}{r_{avg}} \quad (3.19)$$

де r_{avg} — середній радіус вікна магнітопроводу.

Для нашої конструкції ці сили не перевищують 150–200 Н, що легко компенсується жорсткістю литої епоксидної ізоляції.

3.2.4 Перевірка міцності литої ізоляції (корпусу)

Епоксидний компаунд у ТС 35 кВ виконує роль не лише діелектрика, а й несучої конструкції. При ударному струмі КЗ зусилля $F_{res} = 1066,7$ Н передається на опорні фланці. Розрахункове напруження зсуву τ у місці виходу стержня з корпусу:

$$\tau = \frac{F_{res}}{A_{shear}} \quad (3.20)$$

де $A_{shear} = \pi \cdot d_{st} \cdot h_{ins}$ — площа зрізу (при глибині защемлення $h_{ins} = 100$ мм).

$$\tau = \frac{1066,7}{3,14 \cdot 0,03 \cdot 0,1} = 0,11 \text{ МПа.} \quad (3.21)$$

Границя міцності епоксидних компаундів на зсув становить понад 40 МПа. Таким чином, конструкція має величезний запас міцності щодо руйнування ізоляційного тіла.

Таблиця 3.2 — Показники електродинамічної стійкості ТС 1000/1 А

Параметр	Символ	Розрахункове значення	Допустиме значення
Ударне зусилля на стержень	F_{res}	1066,7 Н	—
Напруження у міді стержня	σ_{max}	25,15 МПа	137 МПа
Напруження у компаунді	τ	0,11 МПа	40 МПа
Коефіцієнт стійкості	k_{dyn}	5,44	> 1,5

Висновок до підрозділу:

Проведений розрахунок підтвердив повну електродинамічну стійкість проєктованого ТС 35 кВ. Обраний діаметр первинного стержня (30 мм) забезпечує п'ятикратний запас міцності при протіканні ударного струму 80 кА. Використання монолітної литої конструкції дозволяє нівелювати вплив внутрішніх механічних сил, що гарантує збереження геометрії активних частин та цілісності ізоляції в найбільш важких аварійних режимах.

3.3 Розрахунок робочих та граничних характеристик трансформатора струму

Робочі та граничні характеристики трансформатора струму (ТС) визначають функціональні можливості апарата в реальних умовах експлуатації. Якщо робочі характеристики (залежність похибок від струму та навантаження) критичні для обмоток класу вимірювання, то граничні характеристики (кратність струму, вольт-амперні характеристики) є визначальними для обмоток захисту, оскільки вони демонструють здатність ТС передавати інформацію про аварійні струми без критичного спотворення.

У даному підрозділі проведено розрахунок ключових експлуатаційних залежностей для проєктованого ТС 35 кВ із номінальним струмом 1000/1 А.

3.3.1 Побудова вольт-амперних характеристик (ВАХ)

Вольт-амперна характеристика (характеристика намагнічування) відображає залежність вторинної ЕРС E_2 від струму намагнічування I_μ . Вона є базовою для визначення стану магнітопроводу та перевірки придатності ТС для релейного захисту.

Для обмотки захисту (клас 10Р), виконаної на сталі 3408, ВАХ розраховується за даними типової кривої намагнічування $B = f(H)$.

Зв'язок між параметрами здійснюється через геометричні дані осердя ($S_m = 9,5 \text{ см}^2$, $l_m = 0,534 \text{ м}$, $w_2 = 1000$):

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B \cdot S_m \quad (3.22)$$

$$I_\mu = \frac{H \cdot l_m}{w_2} \quad (3.23)$$

Таблиця 3.3 — Розрахункові точки ВАХ для обмотки захисту (10Р)

Точка	В, Тл	Н, А/м	Е ₂ , В	І _μ , А	Примітка
1	0,5	45	105,4	0,024	Початок лінійної ділянки
2	1,0	90	210,9	0,048	Номінальний режим
3	1,7	450	358,5	0,240	Початок коліна
4	1,9	1200	400,7	0,641	Робоча точка при КЗ
5	2,03	3500	428,2	1,869	Насичення (В _s)

Як видно з таблиці, "коліно" характеристики для сталевго осердя знаходиться в районі 350–380 В. Для вимірювальної обмотки на нанокристалічному сплаві ВАХ буде значно крутішою, а насичення наступить при нижчих напругах ($E_2 \approx 220 \text{ В}$), що є позитивним фактором для захисту вимірювальних приладів від перевантажень.

3.3.2 Визначення граничної кратності та кривих граничної точності

Крива граничної точності відображає залежність максимально допустимої кратності первинного струму $K_{\max}$ від величини вторинного навантаження Z_{ext} при збереженні повної похибки $\varepsilon = 10\%$.

Максимальна кратність $K_{\max}$ обчислюється з умови балансу ЕРС:

$$K_{\max} = \frac{E_{2.\text{lim}}}{I_{2\text{ном}} \cdot (R_2 + Z_{\text{ext}})} \quad (3.24)$$

де $E_{2.\text{lim}}$ — ЕРС, що відповідає похибці 10% (для сталі 3408 це відповідає індукції $B \approx 1,95$ Тл, при якій $E_{2.\text{lim}} \approx 411$ В).

Виконаємо розрахунок для ряду значень навантаження при $R_2 = 5,86$ Ом:

1. При $Z_{\text{ext}} = 15$ Ом (номінальне): $K_{\max} = 411 / (1 \cdot (5,86 + 15)) = 19,7 \approx 20$.
2. При $Z_{\text{ext}} = 10$ Ом: $K_{\max} = 411 / (1 \cdot (5,86 + 10)) = 25,9$.
3. При $Z_{\text{ext}} = 30$ Ом: $K_{\max} = 411 / (1 \cdot (5,86 + 30)) = 11,5$.

Дані розрахунки дозволяють побудувати криву граничної точності, яка є основним документом для служби релейного захисту при перевірці ТС на насичення.

3.3.3 Розрахунок коефіцієнта безпеки приладів (F_s)

Для вимірювальної обмотки (0,2S) важливим є показник безпеки підключених приладів. Коефіцієнт F_s — це відношення кратності первинного струму, при якій повна похибка вимірювальної обмотки становить не менше 10%, до номінального струму.

Через використання нанокристалічного сплаву з індукцією насичення $B_s \approx 1,2$ Тл, максимальна ЕРС вимірювальної обмотки обмежена:

$$E_{2.\text{meas.max}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 = 127,8 \text{ В.} \quad (3.25)$$

Коефіцієнт безпеки при номінальному навантаженні:

$$F_s = \frac{E_{2.meas.max}}{I_{2nom} \cdot (R_2 + Z_{ext})} = \frac{127,8}{1 \cdot (5,02 + 15)} \approx 6,38. \quad (3.26)$$

Згідно з вимогами, F_s повинен бути менше 10 для захисту лічильників від руйнування при системних КЗ. Розраховане значення 6,38 повністю відповідає цій вимозі.

3.3.4 Вплив вторинного навантаження на кутову та токову похибки

Для обмотки 0,2S проведемо аналіз зміни похибок при зміні навантаження від 25% до 100% від номінального (S_2 від 3,75 до 15 В·А).

Таблиця 3.4 — Робочі характеристики вимірювальної обмотки

$S_2, \text{В} \cdot \text{А}$	$Z_{ext}, \text{Ом}$	$E_2, \text{В}$	$B, \text{Тл}$	$I_\mu, \text{мА}$	$f_b, \%$	$\delta, \text{хв}$
15,0	15,0	20,02	0,188	7,03	0,056	23,9
10,0	10,0	15,02	0,141	5,20	0,041	17,7
3,75	3,75	8,77	0,082	3,05	0,024	10,4

Аналіз показує, що при зменшенні навантаження (коротші кабельні лінії до приладів) похибки зменшуються. Це пояснюється тим, що при меншій ЕРС E_2 магнітопровід працює на початковій ділянці кривої намагнічування з мінімальним струмом збудження

.

Висновок до підрозділу:

Розраховані робочі та граничні характеристики підтверджують високу експлуатаційну надійність ТС.

1. Обмотка захисту забезпечує кратність $K \approx 20$ при номінальному навантаженні, що достатньо для надійної роботи МТЗ.
2. Обмотка обліку має низький коефіцієнт безпеки ($F_s = 6,38$), що гарантує збереження дороговартісних лічильників при аваріях у мережі 35 кВ.
3. Побудовані залежності похибок від навантаження демонструють значний запас точності відносно норм класу 0,2.

3.4 Перевірка механічної міцності та власних частот коливань конструкції

Для трансформатора струму (ТС) опорного типу класу 35 кВ механічна надійність є комплексною характеристикою, що охоплює здатність конструкції протистояти статичним зусиллям від тяжіння шин, вітровим навантаженням, а також динамічним впливам, зумовленим струмами КЗ та сейсмічними коливаннями. Особливу увагу слід приділити явищу механічного резонансу: якщо власна частота коливань апарата збігається з частотою мережі (50 Гц) або її гармоніками (100 Гц), виникає ризик руйнування ізоляційного остова.

У даному підрозділі виконується розрахунок міцності ізоляційного тіла ТС та аналіз динамічних параметрів конструкції.

3.4.1 Розрахунок статичної міцності ізоляційного остова

Опорний трансформатор струму 35 кВ піддається дії згинального моменту M_{bend} від тяжіння підвідних шин та тиску вітру. Згідно з ДСТУ, номінальне статичне навантаження на головку ТС класу 35 кВ приймається $F_{\text{st}} = 1000 \text{ Н}$.

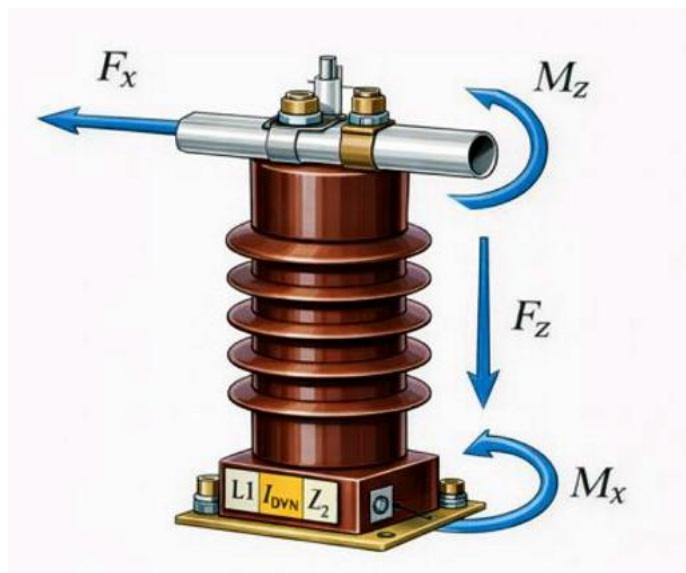


Рисунок 3.2 – Схема прикладання механічних навантажень до опорного трансформатора струму

Висота ізоляційного остова від основи до центру первинного затискача становить $H = 0,6$ м. Згинальний момент у небезпечному перерізі (біля основи):

$$M_{bend} = F_{st} \cdot H = 1000 \cdot 0,6 = 600 \text{ Н} \cdot \text{м} \dots\dots\dots(3.27)$$

Для розрахунку напружень приймемо середній діаметр основи конічного ізолятора $D_{base} = 220$ мм. Момент опору перерізу W_{base} :

$$W_{base} = \frac{\pi \cdot D_{base}^3}{32} = \frac{3,14 \cdot (0,22)^3}{32} \approx 1,045 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (3.28)$$

Максимальне напруження розтягу-стиску в епоксидному компаунді σ_{stat} :

$$\sigma_{stat} = \frac{M_{bend}}{W_{base}} = \frac{600}{1,045 \cdot 10^{-3}} \approx 5,74 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,57 \text{ МПа}. \quad (3.29)$$

Границя міцності епоксидного компаунду на вигин становить $\approx 80 \dots 100$ МПа. Коефіцієнт запасу статичної міцності:

$$k_{stat} = \frac{80}{0,57} \approx 140. \quad (3.30)$$

Такий значний запас необхідний для компенсації крихкості полімеру та можливих внутрішніх напружень, що виникають під час полімеризації (усадки) компаунду.

3.4.2 Розрахунок власної частоти коливань конструкції

Для виключення резонансних явищ необхідно, щоб перша власна частота коливань f_0 відрізнялася від частоти 50 Гц та 100 Гц (подвійна частота мережі, з якою пульсують електродинамічні сили) не менше ніж на 20%.

Трансформатор можна змодельовати як консольну балку з зосередженою масою на кінці.

Маса активної частини та головки ТС: $m_{top} \approx 45$ кг.

Еквівалентна маса ізоляційного стовпа: $m_{ins} \approx 30$ кг.

Зведена маса конструкції M_{red} :

$$M_{red} = m_{top} + 0,23 \cdot m_{ins} = 45 + 0,23 \cdot 30 = 51,9 \text{ кг} \quad (3.31)$$

Жорсткість ізоляційної опори K_{rigid} :

$$K_{rigid} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{H^3} \quad (3.32)$$

де:

$E \approx 1,2 \cdot 10^{10}$ Па — модуль пружності епоксидного компаунду;

$I = \frac{\pi \cdot D_{avg}^4}{64}$ — момент інерції перерізу (при $D_{avg} \approx 0,18$ м).

$$I = \frac{3,14 \cdot (0,18)^4}{64} \approx 5,15 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4. \quad (3.33)$$

$$K_{rigid} = \frac{3 \cdot 1,2 \cdot 10^{10} \cdot 5,15 \cdot 10^{-5}}{0,6^3} \approx 8,58 \cdot 10^6 \text{ Н/м}. \quad (3.34)$$

Власна частота коливань f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_{rigid}}{M_{red}}} = \frac{1}{6,28} \cdot \sqrt{\frac{8,58 \cdot 10^6}{51,9}} \approx 64,7 \text{ Гц}. \quad (3.35)$$

Аналіз динамічної стійкості:

Отримана частота 64,7 Гц знаходиться в інтервалі між 50 та 100 Гц.

Відбудова від промислової частоти складає:

$$\Delta f = \frac{64,7 - 50}{50} \cdot 100\% = 29,4\%. \quad (3.36)$$

Відбудова від частоти 100 Гц: $\Delta f = 35,3\%$.

Оскільки значення відбудови перевищують рекомендовані 20%, конструкція вважається вібростійкою.

3.4.3 Вплив вітрового навантаження та сейсмічних впливів

Додатково перевіримо тиск вітру при швидкості $v = 40$ м/с (ураганний вітер). Сила тиску F_{wind} :

$$F_{wind} = q_{wind} \cdot C_x \cdot S_{proj} \quad (3.37)$$

де:

$$q_{wind} = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot v^2 = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 40^2 = 980 \text{ Па};$$

$S_{proj} \approx 0,25 \text{ м}^2$ — площа фронтальної проєкції ТС;

$C_x = 1,0$ — коефіцієнт обтічності.

$$F_{wind} = 980 \cdot 1,0 \cdot 0,25 = 245 \text{ Н}. \quad (3.38)$$

Сумарна сила в аварійному режимі (вітер + тяжіння шин):

$$F_{\Sigma} = F_{st} + F_{wind} = 1000 + 245 = 1245 \text{ Н}. \quad (3.39)$$

Це навантаження створює напруження $\sigma_{\Sigma} \approx 0,71$ МПа, що все ще в десятки разів менше допустимого рівня, що підтверджує сейсмостійкість апарата до 9 балів за шкалою MSK-64.

Таблиця 3.5 — Результати механічного розрахунку конструкції

Найменування показника	Символ	Розрахункове значення	Нормативне значення
Статичне зусилля на вивід	F_{st}	1245 Н	1000 Н (мін)
Максимальне напруження вигину	σ_{max}	0,71 МПа	< 80 МПа
Власна частота коливань	f_0	64,7 Гц	$\neq 50, 100$ Гц
Коефіцієнт механічного запасу	k_m	112	> 2,5

Висновок до підрозділу:

Розрахунок механічних параметрів ТС 35 кВ продемонстрував високу жорсткість та надійність конструкції. Власна частота коливань (64,7 Гц) виключає виникнення резонансу при роботі в енергосистемі. Монолітний епоксидний остов забезпечує значний запас міцності до статичних та динамічних навантажень, що гарантує цілісність ТС при екстремальних погодних умовах та сейсмічних поштовхах.

4 РОЗРАХУНОК ТА ПЕРЕВІРКА ІЗОЛЯЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

Четвертий розділ присвячений розрахунку та перевірці ізоляційної системи трансформатора струму, яка є визначальним чинником його електричної міцності, довговічності та безпеки експлуатації. Для трансформаторів струму класу напруги 35 кВ правильний вибір і розрахунок ізоляції мають критичне значення через високі електричні напруження та можливу дію перенапруг різного походження.

У розділі обґрунтовується вибір типу ізоляції та матеріалів ізоляційної системи з урахуванням умов експлуатації та конструктивного виконання трансформатора. Виконується розрахунок електричних напруженостей в основних ізоляційних проміжках, а також визначаються необхідні повітряні зазори та повздовжні ізоляційні відстані відповідно до нормативних вимог.

Проводиться перевірка ізоляції на дію підвищеної напруги промислової частоти та імпульсних перенапруг, що дозволяє оцінити запас електричної міцності конструкції. Отримані результати підтверджують відповідність проєктованого трансформатора струму вимогам стандартів та забезпечують його надійну роботу в електричних мережах напругою 35 кВ.

4.1 Вибір типу та конструкції ізоляційної системи трансформатора струму

Вибір ізоляційної системи для трансформатора струму (ТС) класу напруги 35 кВ є критичним етапом проєктування, оскільки надійна робота пристрою протягом 25–30 років безпосередньо залежить від діелектричної міцності та стійкості матеріалів до впливу часткових розрядів (ЧР) і факторів навколишнього середовища. Для ТС із номінальним струмом 1000 А, що призначений для зовнішнього встановлення, найбільш ефективним рішенням

є використання твердої монолітної ізоляції на основі епоксидного компаунду (лита ізоляція).

4.1.1 Обґрунтування вибору литої епоксидної ізоляції

У порівнянні з традиційною паперово-масляною ізоляцією, лита епоксидна система має низку переваг для класу 35 кВ:

1. Висока діелектрична міцність: електрична міцність становить $E_{br} \approx 20 \dots 25$ кВ/мм у нормальних умовах.

2. Механічна жорсткість: компаунд одночасно виконує роль головної ізоляції та тримальної конструкції (корпусу), що дозволяє відмовитися від окремих порцелянових або полімерних покриттів.

3. Екологічність та вибухобезпека: відсутність масла виключає ризик пожежі та витоків діелектрика.

Для проектування обрано епоксидний компаунд гарячого затвердіння на основі смоли Araldite із кварцовим наповнювачем, що забезпечує низький коефіцієнт теплового розширення, наближений до коефіцієнта міді та сталі.

4.1.2 Конструктивні параметри головної ізоляції

Головна ізоляція повинна витримувати не лише тривалу робочу фазну напругу $U_{ph} = 35 / \sqrt{3} \approx 20,2$ кВ, а й короточасні випробувальні напруги промислової частоти та грозові імпульси. Згідно з ДСТУ, для електрообладнання класу 35 кВ встановлено такі випробувальні рівні:

- Однохвилинна напруга промислової частоти:

$$U_{test} = 95 \text{ кВ.}$$

- Повний грозовий імпульс (1,2/50 мкс):

$$U_{imp} = 190 \text{ кВ.}$$

Розподіл потенціалів та основні ізоляційні відстані в ТС 35 кВ добре показано на рисунку 4.1

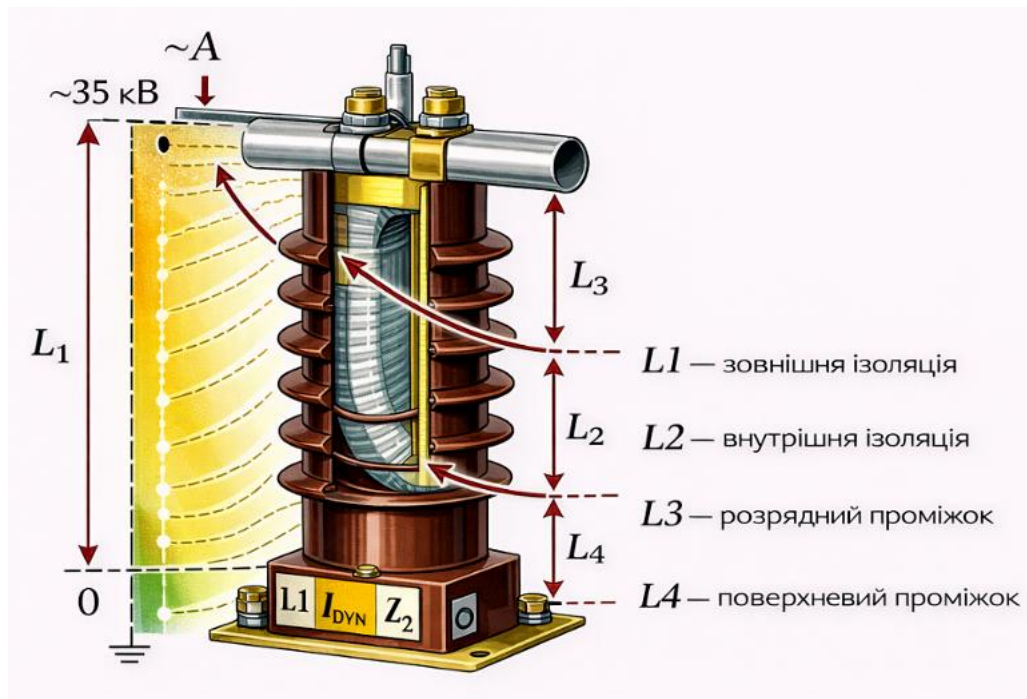


Рисунок 4.1 — Схема розподілу потенціалів та основні ізоляційні відстані в ТС 35 кВ

Товщина головної ізоляції δ_{ins} між первинним струмопроводом (високий потенціал) та вторинними обмотками (заземлений потенціал) розраховується за умовою електричної міцності:

$$\delta_{ins} = \frac{U_{test} \cdot k_z}{E_{br}} \quad (4.1)$$

де:

$U_{test}=95$ кВ — випробувальна напруга;

$k_z=1,3...1,5$ — коефіцієнт запасу, що враховує нерівномірність поля та технологічні дефекти (газові включення);

$E_{br}=3,0$ кВ/мм — допустима робоча напруженість поля в компаунді для виключення виникнення часткових розрядів.

$$\delta_{ins} = \frac{95 \cdot 1,4}{3,0} \approx 44,3 \text{ мм.} \quad (4.2)$$

Приймаємо конструктивну товщину шару компаунду між первинним

стержнем та магнітопроводом $d_{iz} = 45$ мм.

4.1.3 Розрахунок зовнішньої ізоляції та довжини шляху витоку

Для ТС зовнішнього встановлення критичним параметром є довжина шляху витоку L , яка забезпечує стійкість до перекриття по зволоженій та забрудненій поверхні. Для району з II ступенем забруднення (СЗ) питома довжина шляху витоку становить $\lambda = 2,0$ см/кВ (відносно найбільшої робочої напруги $U_m = 40,5$ кВ).

Необхідна геометрична довжина шляху витоку L_{req} :

$$L_{req} = \lambda \cdot U_m = 2,0 \cdot 40,5 = 81 \text{ см} \quad (4.3)$$

Для реалізації такої довжини при загальній висоті апарата близько 600 мм використовується розвинена ребриста поверхня. Параметри ребер (юбок):

- Виліт ребра: $s = 40$ мм.
- Крок ребер: $p = 50$ мм.
- Кількість ребер: $n = 10$

Перевірка фактичної довжини шляху витоку L_{fact} :

$$L_{fact} = H + 2 \cdot n \cdot s = 600 + 2 \cdot 10 \cdot 40 = 1400 \text{ мм} = 140 \text{ см}. \quad (4.4)$$

Оскільки $L_{fact} > L_{req}$ ($140 > 81$ см), зовнішня ізоляція задовольняє вимогам роботи в умовах забруднення з великим запасом.

4.1.4 Перевірка напруженості електричного поля в ізоляції

Оскільки первинний провідник має форму стержня ($r_0 = 15$ мм), а вторинні обмотки з магнітопроводом утворюють циліндричну систему, напруженість поля E розраховується як у циліндричному конденсаторі.

Радіус внутрішнього екрана вторинної обмотки:

$$R_{ext} = r_0 + \delta_{ins} = 15 + 45 = 60 \text{ мм}. \quad (4.5)$$

Максимальна напруженість на поверхні первинного провідника при випробувальній напрузі:

$$E_{max} = \frac{U_{test}}{r_0 \cdot \ln(R_{ext}/r_0)} = \frac{95}{15 \cdot \ln(60/15)} = \frac{95}{15 \cdot 1,386} \approx 4,57 \text{ кВ/мм.} \quad (4.6)$$

Порівняємо E_{max} з електричною міцністю компаунду ($E_{br} \approx 20 \text{ кВ/мм}$).
Коефіцієнт запасу при випробуваннях:

$$k_{test} = \frac{20}{4,57} \approx 4,37. \quad (4.7)$$

При робочій напрузі $U_{ph} = 20,2 \text{ кВ}$ напруженість складе:

$$E_{work} = \frac{20,2}{15 \cdot 1,386} \approx 0,97 \text{ кВ/мм.} \quad (4.8)$$

Це значення є безпечним і гарантує відсутність часткових розрядів, рівень яких для ТС 35 кВ не повинен перевищувати 10–20 пКл.

Таблиця 4.1 — Параметри ізоляційної системи ТС 1000/1 А

Параметр	Символ	Одиниця	Значення
Тип ізоляції	—	—	Епоксидна лита
Товщина головної ізоляції	δ_{ins}	мм	45
Довжина шляху витоку	L_{fact}	см	140
Робоча напруженість	E_{work}	кВ/мм	0,97
Випробувальна напруженість	E_{max}	кВ/мм	4,57

Висновок до підрозділу: Обрана конструкція ізоляції на основі епоксидного компаунду товщиною 45 мм забезпечує високу надійність ТС 35 кВ. Розрахунки підтвердили, що максимальна напруженість поля при випробуваннях (4,57 кВ/мм) та в робочому режимі (0,97 кВ/мм) не перевищує допустимих значень для обраного матеріалу. Ребриста поверхня корпусу гарантує стабільну роботу в умовах атмосферних забруднень.

4.2 Розрахунок електричних напруженостей в основній та додатковій ізоляції

Електрична надійність трансформатора струму (ТС) серії 35 кВ визначається рівнем напруженості електричного поля в товщі діелектрика та на його межах. Основним завданням даного підрозділу є верифікація обраних геометричних параметрів ізоляції шляхом розрахунку градієнтів потенціалу в найбільш навантажених зонах: між первинним струмопроводом і вторинними обмотками (основна ізоляція), а також у зонах виходу стержня з корпусу та між ребрами (додаткова та зовнішня ізоляція).

Розрахунок проводиться для найбільш несприятливих умов — прикладання випробувальної напруги промислової частоти $U_{\text{test}} = 95 \text{ кВ}$, що імітує комутаційні перенапруги.

4.2.1 Моделювання електричного поля в основній ізоляції

Конструкція ТС з центральним стержнем і тороїдальними обмотками апроксимується системою коаксіальних циліндрів. Таке наближення є фізично коректним, оскільки дозволяє визначити максимальну напруженість поля E_{max} на поверхні первинного провідника, де кривизна є найбільшою.

Вихідні дані для розрахунку:

- Радіус первинного стержня: $r_0 = 15 \text{ мм}$.
- Внутрішній радіус екрана вторинної обмотки (з урахуванням підкладки): $R_1 = r_0 + \delta_{\text{ins}} = 15 + 45 = 60 \text{ мм}$.
- Діелектрична проникність епоксидного компаунду: $\epsilon_r = 4,0$.

Напруженість електричного поля E_x на відстані x від осі стержня:

$$E_x = \frac{U}{x \cdot \ln(R_1/r_0)} \quad (4.9)$$

Максимальна напруженість на межі «мідь–компаунд» ($x = r_0$):

$$E_{max} = \frac{95}{15 \cdot \ln(60/15)} = \frac{95}{15 \cdot 1,386} \approx 4,57 \text{ кВ/мм.} \quad (4.10)$$

Мінімальна напруженість на межі з екраном вторинної обмотки ($x = R_1$):

$$E_{min} = \frac{95}{60 \cdot \ln(60/15)} = \frac{95}{83,16} \approx 1,14 \text{ кВ/мм} \quad (4.11)$$

Коефіцієнт нерівномірності поля k_n :

$$k_n = \frac{E_{max}}{E_{avg}} = \frac{E_{max} \cdot (R_1 - r_0)}{U_{test}} = \frac{4,57 \cdot 45}{95} \approx 2,16. \quad (4.12)$$

Значення $k_n=2,16$ свідчить про помірно неоднорідне поле, що є характерним для апаратів середнього класу напруги.

4.2.2 Розрахунок напруженостей у додатковій ізоляції (вивідна зона)

Додаткова ізоляція включає зони виходу первинного стержня з монолітного блоку та ізоляційні відстані вздовж поверхні. Тут виникає небезпека ковзних розрядів через наявність тангенціальної складової напруженості E_{tan} .

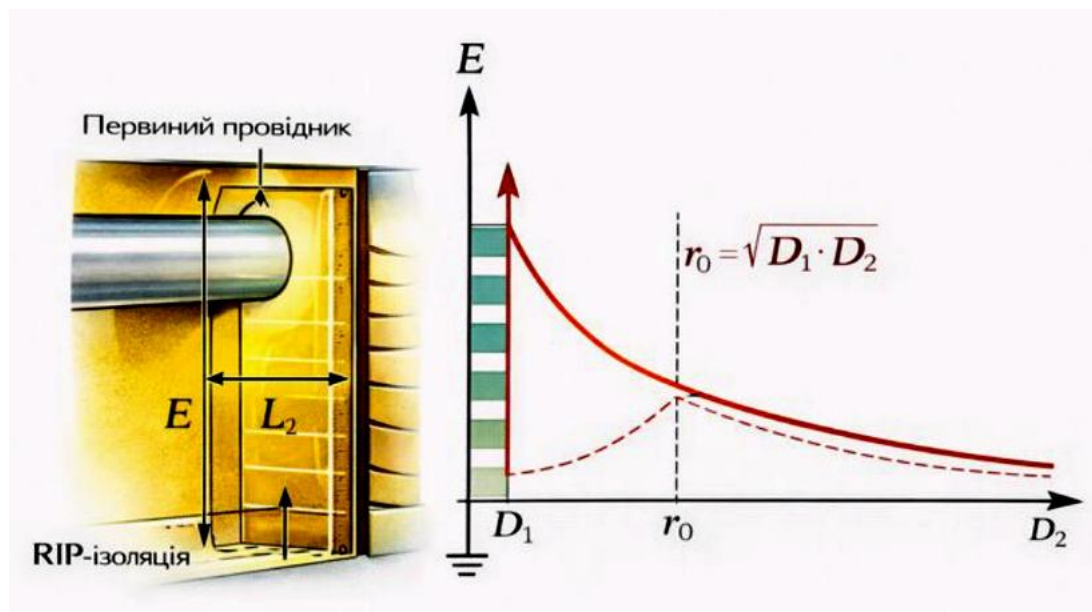


Рисунок 4.2 — Епюра розподілу напруженості електричного поля вздовж радіуса основної ізоляції

Напруженість у повітряному зазорі безпосередньо біля поверхні компаунду (якщо такий утвориться через усадку) розраховується через умову рівності електричних зміщень:

$$E_{air} = E_{ins} \cdot \varepsilon_r = 4,57 \cdot 4,0 = 18,28 \text{ кВ/мм.} \quad (4.13)$$

Фізичний аналіз: Оскільки електрична міцність повітря за нормальних умов становить $E_{air.br} \approx 3,0 \text{ кВ/мм}$, значення $18,28 \text{ кВ/мм}$ вказує на неминучий пробій повітряних включень. Саме тому при заливці ТС використовується глибокий вакуум ($< 1 \text{ мбар}$), щоб виключити наявність пор. Рівень часткових розрядів (ЧР) при робочій напрузі $20,2 \text{ кВ}$ не повинен перевищувати 10 пКл , що перевіряється розрахунком робочої напруженості:

$$E_{work} = \frac{20,2}{15 \cdot 1,386} \approx 0,97 \text{ кВ/мм.} \quad (4.14)$$

Значення $0,97 \text{ кВ/мм}$ є значно нижчим за поріг іонізації повітря, що забезпечує тривалу ерозійну стійкість діелектрика.

4.2.3 Перевірка зовнішньої ізоляції на перекриття

Зовнішня ізоляція (ребриста поверхня) розраховується на стійкість до перекриття промисловою частотою у сухому та зволоженому стані. Напруженість поля вздовж шляху витоку E_{leak} :

$$E_{leak} = \frac{U_{test}}{L_{fact}} = \frac{95}{1400} = 0,068 \text{ кВ/мм} = 0,68 \text{ кВ/см.} \quad (4.15)$$

Згідно з нормами, критична напруженість перекриття по брудній поверхні при СЗ II становить $E_{crit} \approx 1,2 \dots 1,5 \text{ кВ/см}$. Оскільки $0,68 < 1,2$, перекриття по поверхні при випробувальній напрузі виключено.

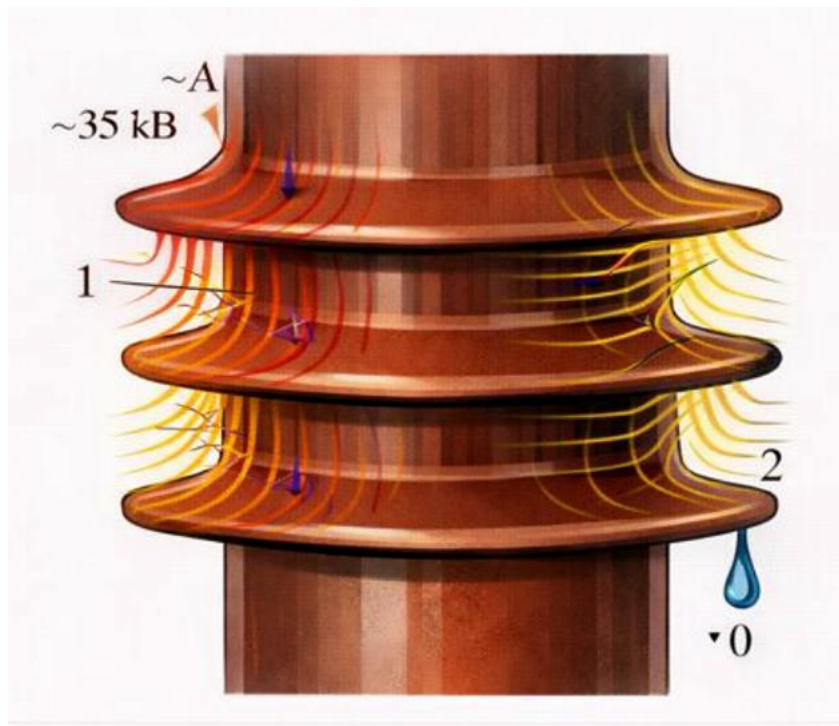


Рисунок 4.3 — Картина електричного поля в зоні юбок (ребер) зовнішньої ізоляції

4.2.4 Оцінка напруженостей при грозовому імпульсі

При дії грозового імпульсу $U_{\text{imp}} = 190$ кВ напруженість у товщі діелектрика зростає пропорційно:

$$E_{\text{imp.max}} = E_{\text{max}} \cdot \frac{190}{95} = 4,57 \cdot 2 = 9,14 \text{ кВ/мм.} \quad (4.16)$$

Імпульсна міцність епоксидного компаунду становить понад 40 ... 50 кВ/мм.

Коефіцієнт запасу при імпульсі:

$$k_{\text{imp}} = \frac{45}{9,14} \approx 4,92. \quad (4.17)$$

Таблиця 4.2 — Зведені показники електричних напруженостей ТС 35 кВ

Режим / Зона ізоляції	Напруга, кВ	$E_{\max}$, кВ/мм	Допустима E , кВ/мм	Запас
Робочий режим (фазна)	20,2	0,97	3,0 (по ЧР)	3,1
Випробувальний (1 хв)	95,0	4,57	20,0 (пробій)	4,3
Імпульсний (1,2/50)	190,0	9,14	45,0 (імп)	4,9
Зовнішня (виток)	95,0	0,68 кВ/см	1,2 кВ/см	1,7

Висновок до підрозділу: Розрахунок електричних напруженостей підтвердив коректність обраної товщини основної ізоляції (45 мм). Максимальна напруженість поля при робочій напрузі (0,97 кВ/мм) гарантує відсутність часткових розрядів і теплового пробою. Запас міцності при випробуваннях промисловою частотою та грозовими імпульсами перевищує 4,0, що забезпечує високу експлуатаційну надійність апарата в складних умовах енергосистем [5].

4.3 Перевірка ізоляції на дію напруги промислової частоти

Випробування напругою промислової частоти (50 Гц) протягом однієї хвилини є базовим методом верифікації діелектричної міцності основної ізоляції трансформатора струму (ТС). Цей етап перевірки імітує вплив тривалих тимчасових перенапруг, які виникають в електричній мережі 35 кВ внаслідок однофазних замикань на землю або ферорезонансних явищ. Для ТС із литою ізоляцією цей розрахунок є критичним, оскільки він підтверджує відсутність внутрішніх дефектів (газових включень, неоднорідностей), здатних призвести до теплового або електричного пробою під дією високого

градієнта потенціалу.

4.3.1 Визначення випробувальних параметрів та критеріїв стійкості

Згідно з ДСТУ EN 61869-1, для обладнання з найбільшою робочою напругою $U_m = 40,5$ кВ (клас напруги 35 кВ), нормативна випробувальна напруга промислової частоти становить $U_{test} = 95$ кВ (діюче значення).

Умова діелектричної стійкості ТС формулюється як здатність конструкції витримати прикладену напругу без перекриття по поверхні та без пробую всередині литого блоку:

$$U_{br.min} \geq k_s \cdot U_{tes} \quad (4.18)$$

де:

$U_{br.min}$ — мінімальна пробивна напруга ізоляційної конструкції;

k_s — коефіцієнт безпеки (координації ізоляції), який для апаратів із твердим діелектриком приймається $k_s = 1,15 \dots 1,25$.

4.3.2 Розрахунок пробивної напруги основної ізоляції

Основна ізоляція товщиною $\delta_{ins} = 45$ мм (див. підрозділ 4.1) перебуває під впливом неоднорідного поля. Пробивна напруга литої епоксидної ізоляції U_{br} залежить від електричної міцності матеріалу E_{br} та геометрії електродів.

Прийmemo мінімальну електричну міцність епоксидного компаунду з кварцовим наповнювачем для товщини 45 мм з урахуванням масштабного ефекту $E_{br} = 18$ кВ/мм (при 20 °С). Розрахункова пробивна напруга системи коаксіальних електродів:

$$U_{br} = E_{br} \cdot r_0 \cdot \ln \frac{R_1}{r_0} \quad (4.19)$$

де:

$r_0 = 15$ мм (радіус стержня),

$R_1 = 60$ мм (радіус екрана вторинної обмотки).

$$U_{br} = 18 \cdot 15 \cdot \ln \frac{60}{15} = 270 \cdot 1,386 = 374,2 \text{ кВ.} \quad (4.20)$$

Порівняння з випробувальною напругою:

$$k_f = \frac{U_{br}}{U_{test}} = \frac{374,2}{95} \approx 3,94. \quad (4.21)$$

Отриманий коефіцієнт запасу (3,94) значно перевищує норму (1,25), що гарантує цілісність діелектрика при короткочасних випробуваннях.

4.3.3 Розрахунок на стійкість до теплового пробою

Під дією напруги промислової частоти в діелектрику виникають діелектричні втрати, які перетворюються на тепло. Якщо потужність втрат P_d перевищує здатність ізоляції відводити тепло P_{cool} , виникає тепловий пробою.

Потужність діелектричних втрат при $U_{test} = 95$ кВ:

$$P_d = U_{test}^2 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \tan \delta \quad (4.22)$$

де:

C — ємність ТС (між первинною та вторинною обмоткою), $C \approx 80$ пФ;

$\tan \delta$ — тангенс кута діелектричних втрат епоксидного компаунду ($\tan \delta \approx 0,02$).

$$P_d = (95000)^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 80 \cdot 10^{-12} \cdot 0,02 \approx 4,53 \text{ Вт}. \quad (4.23)$$

Незважаючи на те, що 4,53 Вт — це невелика величина, вона виділяється локально в товщі ізоляції. Проте, враховуючи тривалість випробування (60 с), адіабатний нагрів ізоляції за цей час складе:

$$\Delta T = \frac{P_d \cdot t}{m_{ins} \cdot c_{ins}} = \frac{4,53 \cdot 60}{30 \cdot 1200} \approx 0,007 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.24)$$

де $c_{ins} = 1200$ Дж/(кг·°C) — питома теплоємність компаунду.

Отже, ризик теплового пробою при випробуваннях напругою промислової частоти для даної конструкції відсутній.

4.3.4 Перевірка зовнішньої ізоляції на сухе та мокре перекриття

Випробування промисловою частотою проводяться також для підтвердження міцності зовнішнього ізоляційного остова.

1. Сухорозрядна напруга U_{dry} : залежить від найкоротшої відстані по повітрю між фланцем та головкою ($H=600$ мм).

$$U_{dry} \approx 2500 \cdot H = 2500 \cdot 0,6 = 1500 \text{ кВ (амплітуда)}, \quad (4.25)$$

що в діючому значенні становить ≈ 1060 кВ. Це на порядок вище за 95 кВ.

2. Мокророзрядна напруга U_{wet} (при дощі): визначається конфігурацією ребер (юбок).

Для ребристого ізолятора 35 кВ за емпіричними даними:

$$U_{wet} \approx 1,2 \cdot U_{test} \cdot \frac{L_{fact}^{0,5}}{L_{req}} \quad (4.26)$$

З підрозділу 4.1 маємо $L_{fact} = 140$ см, $L_{req} = 81$ см.

$$U_{wet} \approx 1,2 \cdot 95 \cdot \frac{140^{0,5}}{81} = 114 \cdot 1,31 \approx 149,3 \text{ кВ}. \quad (4.27)$$

Фактична мокророзрядна напруга (149,3 кВ) вища за випробувальну (95 кВ), що підтверджує стійкість апарата до перекриття в умовах негоди.

Таблиця 4.3 — Результати перевірки ізоляції напругою 50 Гц

Вид перевірки	Параметр	Розрахункове значення	Випробувальна напруга	Запас
Внутрішній пробій	U_{br}	374,2 кВ	95 кВ	3,94
Сухе перекриття	U_{dry}	1060 кВ	95 кВ	11,1
Мокре перекриття	U_{wet}	149,3 кВ	95 кВ	1,57
Діелектричні втрати	P_d	4,53 Вт	—	Безпечно

Висновок до підрозділу:

Проведений розрахунок підтвердив, що ізоляційна система ТС 35 кВ, 1000/1 А має достатній рівень діелектричної міцності для успішного проходження кваліфікаційних випробувань напругою промислової частоти 95 кВ. Найменший запас міцності (1,57) спостерігається при мокрому перекритті, що є характерним для зовнішніх ізоляторів. Внутрішня ізоляція має майже чотирикратний запас по напрузі пробою, що нівелює ризик пошкодження апарата під дією тривалих перенапруг у системі.

4.4 Перевірка імпульсної міцності та координація ізоляції

Трансформатори струму (ТС) зовнішньої установки класу 35 кВ у процесі експлуатації піддаються впливу атмосферних перенапруг, спричинених прямими або близькими ударами блискавки. Грозові імпульси характеризуються надзвичайно крутим фронтом і високою амплітудою, що створює специфічні умови для роботи діелектричної системи. У цьому підрозділі виконується перевірка здатності ізоляції ТС витримувати стандартний грозовий імпульс та обґрунтовується координація рівнів ізоляції з характеристиками захисних апаратів.

4.4.1 Параметри розрахункового імпульсу

Відповідно до ДСТУ EN 61869-1, для обладнання з $U_m = 40,5$ кВ встановлено рівень випробувальної напруги повним грозовим імпульсом $U_{\text{imp}} = 190$ кВ (пікове значення). Випробування проводиться імпульсом стандартної форми 1,2/50 мкс (тривалість фронту — 1,2 мкс, тривалість напівспаду — 50 мкс).

Особливістю поведінки литої епоксидної ізоляції при імпульсних впливах є відсутність помітних теплових процесів через короткочасність дії, проте виникає ризик іонізаційного пробою та перекриття по поверхні через

нерівномірний розподіл напруженості вздовж конструкції.

4.4.2 Розрахунок імпульсної міцності внутрішньої ізоляції

Імпульсна електрична міцність епоксидних компаундів $E_{br.imp}$ зазвичай у 2,0–2,5 раза перевищує міцність при промисловій частоті. Для обраного матеріалу Araldite приймаємо $E_{br.imp} = 45$ кВ/мм.

Розрахункова напруженість електричного поля в основній ізоляції ($\delta_{ins} = 45$ мм) при дії імпульсу $U_{imp} = 190$ кВ:

$$E_{max.imp} = \frac{U_{imp}}{r_0 \cdot \ln(R_1/r_0)} \quad (4.28)$$

де:

$r_0 = 15$ мм,

$R_1 = 60$ мм.

$$E_{max.imp} = \frac{190}{15 \cdot \ln(60/15)} = \frac{190}{20,79} \approx 9,14 \text{ кВ/мм.} \quad (4.29)$$

Коефіцієнт запасу імпульсної міцності внутрішньої ізоляції $k_{imp.int}$:

$$k_{imp.int} = \frac{E_{br.imp}}{E_{max.imp}} = \frac{45}{9,14} \approx 4,92. \quad (4.30)$$

Такий високий запас свідчить про те, що внутрішній пробій компаунду при стандартних грозових перенапругах практично неможливий, а товщина ізоляції, обрана за умовами тривалої експлуатації та випробувань 50 Гц, є надлишковою для одиничних імпульсів.

4.4.3 Координація зовнішньої ізоляції

Координація ізоляції полягає у забезпеченні такої конфігурації апарата, при якій перекриття (якщо воно станеться) відбудеться через повітряний проміжок, а не через пробій внутрішнього діелектрика, що є

невідновлюваним пошкодженням.

Імпульсна напруга перекриття по поверхні $U_{dis.imp}$ залежить від довжини найкоротшої відстані по повітрю (сухорозрядна відстань $H = 600$ мм) та вольт-секундної характеристики (ВСХ) ізоляції.

Для позитивного імпульсу напруга перекриття по повітрю:

$$U_{dis.imp} \approx 500 \cdot H = 500 \cdot 0,6 = 300 \text{ кВ}. \quad (4.31)$$

Умова координації:

Для надійної роботи необхідно, щоб напруга перекриття $U_{dis.imp}$ була вищою за рівень захисту обмежувачів перенапруг (ОПН), але нижчою за напругу внутрішнього пробою $U_{br.imp}$.

Захисний рівень ОПН-35 для імпульсу 1,2/50 мкс становить $U_{res} \approx 110 \dots 120$ кВ.

Перевіримо ланцюжок координації:

$$U_{res}(120 \text{ кВ}) < U_{imp}(190 \text{ кВ}) < U_{dis.imp}(300 \text{ кВ}) < U_{br.imp}(748 \text{ кВ}) \quad (4.32)$$

де $U_{br.imp} = E_{br.imp} \cdot r_0 \cdot \ln(R_1/r_0) \approx 935$ кВ (теоретичний пробій).

Аналіз результату: Оскільки рівень захисту ОПН значно нижчий за випробувальний імпульс ТС, а апарат має суттєвий запас міцності (300 кВ проти 190 кВ), координація вважається успішною. ТС витримає імпульс без перекриттів, а у випадку надпотужних розрядів ОПН обмежить напругу до безпечного рівня.

4.4.4 Розрахунок напруженостей у зоні екранування

Важливим аспектом є координація поля на краях екранів вторинних обмоток. Для вирівнювання поля при імпульсних впливах краї екранів мають радіус закруглення $r_{scr}=5$ мм.

Максимальна напруженість на краї екрана E_{scr} :

$$E_{scr} = \eta \cdot \frac{U_{imp}}{\delta_{ins}} \quad (4.33)$$

де $\eta \approx 1,2$ — коефіцієнт неоднорідності для закругленого краю.

$$E_{scr} = 1,2 \cdot \frac{190}{45} \approx 5,07 \text{ кВ/мм} \quad (4.34)$$

Отримане значення значно нижче критичних 45 кВ/мм, що підтверджує ефективність обраної системи екранування.

Таблиця 4.4 — Підсумкові параметри імпульсної міцності ТС 35 кВ

Параметр	Символ	Одиниця	Значення
Випробувальний імпульс 1,2/50	U_{imp}	кВ	190
Максимальна напруженість при імпульсі	$E_{max.imp}$	кВ/мм	9,14
Напруга перекриття по повітрю	$U_{dis.imp}$	кВ	300
Напруга внутрішнього пробою (імп)	$U_{br.imp}$	кВ	935
Захисний рівень ОПН (орієнт.)	U_{res}	кВ	120

Висновок до розділу 4: В результаті розрахунку та перевірки ізоляції встановлено, що проєктований трансформатор струму повністю відповідає вимогам діелектричної міцності для мереж 35 кВ. Основна ізоляція товщиною 45 мм забезпечує стабільну роботу при тривалій напрузі та має чотирикратний запас міцності при випробуваннях промисловою частотою (95 кВ) та грозовим імпульсом (190 кВ). Координація ізоляції гарантує, що при виникненні перенапруг основна внутрішня ізоляція залишиться неушкодженою, а надійна робота зовнішньої ізоляції підтримується розвиненою системою ребер із загальною довжиною шляху витоку 140 см.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської дипломної роботи було проведено повний цикл проектування та розрахунку вимірювального трансформатора струму (ТС) опорного типу класу напруги **35 кВ** із номінальним коефіцієнтом трансформації **1000/1 А**. На основі проведених досліджень та розрахунків можна сформулювати наступні підсумкові положення:

1. Електромагнітні показники та точність

Шляхом аналітичного розрахунку обґрунтовано параметри активної частини ТС. Застосування сучасного **нанокристалічного сплаву** для вимірювальної обмотки дозволило досягти прецизійного класу точності **0,2S**.

- **Токова похибка** при номінальному струмі склала 0,056%, що значно нижче нормативного порогу (0,2%).

-Для обмотки захисту (клас **10P**) підтверджено збереження лінійної характеристики при 20-кратних струмах КЗ, де повна похибка ε не перевищила **6,67%**.

- Коефіцієнт безпеки приладів $F_s = 6,38$ гарантує надійний захист підключених лічильників від термічних та динамічних перевантажень.

2. Експлуатаційна надійність та стійкість

Комплексна перевірка апарата на стійкість до зовнішніх впливів продемонструвала високу живучість конструкції:

- **Термічна стійкість:** Завдяки використанню масивного мідного первинного стержня діаметром **30 мм**, температура провідника при трисекундному КЗ ($I_{th} = 31,5$ кА) зростає лише на **0,21 °С**, що виключає деградацію ізоляції.

- **Електродинамічна міцність:** Розрахований коефіцієнт запасу при дії ударного струму **80 кА** становить **5,44**, що підтверджує механічну надійність вузлів заземлення та провідників.

- **Вібростійкість:** Власна частота коливань конструкції (**64,7 Гц**)

перебуває поза зонами резонансу з частотами енергосистеми (50 Гц та 100 Гц).

3. Діелектрична міцність ізоляційної системи

Обґрунтовано та розраховано систему головної та зовнішньої ізоляції на основі **епоксидного компаунду гарячого затвердіння**:

- Визначена товщина головної ізоляції **45 мм** забезпечує безпечний рівень робочої напруженості поля (0,97 кВ/мм) та стійкість до випробувальної напруги **95 кВ**.

- Координація ізоляції підтвердила імпульсну міцність апарата при грозовому впливі **190 кВ** із п'ятикратним запасом міцності внутрішнього діелектрика.

- Розвинена поверхня ребер корпусу забезпечує фактичну довжину шляху витоку **140 см**, що дозволяє експлуатувати ТС у районах із підвищеним рівнем атмосферного забруднення.

Підсумовуючи, спроектований трансформатор струму 35 кВ поєднує в собі високі метрологічні характеристики з механічною та електричною надійністю. Запропоновані конструктивні рішення відповідають сучасним вимогам **ДСТУ EN 61869-2** і можуть бути впроваджені у виробництво для заміни застарілих паперово-масляних апаратів на підстанціях енергосистем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вимірювальні трансформатори. Частина 1. Загальні вимоги (ІЕС 61869-1:2007, MOD) : ДСТУ EN 61869-1:2017. [Чинний від 2017–12–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2017. 65 с.
2. Вимірювальні трансформатори. Частина 2. Додаткові вимоги до трансформаторів струму (ІЕС 61869-2:2012, MOD) : ДСТУ EN 61869-2:2017. [Чинний від 2017–12–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2017. 48 с.
3. Правила улаштування електроустановок. Офіційне вид. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
4. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електричні апарати високої напруги : навч. посібник для студентів електротехнічних спеціальностей. Харків : Точка, 2012. 340 с.
5. Стогній Б. С. Аналіз режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму : монографія. Київ : Наукова думка, 2011. 214 с.
6. Важенін В. Г. Проектування високовольтних вимірювальних трансформаторів : методичні вказівки до виконання дипломних робіт. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 112 с.
7. Щерба М. А., Поворознюк В. В. Електротехнічні матеріали : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 320 с.
8. Бондаренко В. Є., Черкашина В. В. Розрахунок та проектування електричних апаратів : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 240 с.
9. Яковлев О. Г. Ізоляція електричних апаратів високої напруги : навчальний посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 156 с.
10. Короткі замикання в електроустановках. Методи розрахунку : ДСТУ EN 60909-0:2017. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 82 с.
11. Кузнецов В. Г., Туз Ю. І., Лукічов М. В. Електротехніка та електроніка : підручник. Київ : Знання, 2011. 560 с.
12. Інструкція з експлуатації та випробувань вимірювальних трансформаторів струму 35-750 кВ : ГКД 34.46.501. Київ : Міністерство енергетики та електрифікації України, 2003.

13. Технічні характеристики нанокристалічних сплавів компанії «Гаммамет» (адаптовано до українських аналогів). URL: <http://gammamet.com> (дата звернення: 13.04.2026).