

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний
(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавр

(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему « Трансформатор струму напругою 245 кВ з номінальним струмом
600/1 А та елегазовою ізоляцією»

Виконав: студент 4 курсу, групи Е-412

Спеціальності 141- "Електроенергетика,
електротехніка, та електромеханіка"
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

Кирило ГРОХОТОВ

(ім'я та прізвище)

Керівник Людмила СКРУПСЬКА

(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр НОВІКОВ

(ім'я та прізвище)

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 П. Д. Андрієнко

“ 24 ” квітня 2026 року

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

Грохотову Кирилу Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Трансформатор струму напругою 245 кВ з номінальним струмом 600/1 А та елегазовою ізоляцією»

керівник проєкту (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 проєкту (роботи) 03.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) $U = 245$ кВ, $I = 600/1$ А, клас точності 0,2.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Огляд та аналіз існуючих конструкцій. 2 Вибір основних конструктивних форм проєктуємого трансформатора. 3 Розрахунок параметрів первинної обмотки. 4 Розрахунок параметрів вторинної обмотки. 5 Розрахунок ізоляції. Висновки.

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

1. НУЗП.671214.005 01СК – Трансформатор струму з елегазовою ізоляцією на 245 кВ - 1 арк. А1;

2. НУЗП.301117.005 02СК – Корпус - 1 арк. А1;

3. НУЗП.308711.005 03СК – Основа - 1 арк. А1;

4. НУЗП.684421.005 04СК – Магнітопровід - 1 арк. А1.

6. Консультанти розділів проєкту (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 проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування проєкту	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 проєкту	01.06.2026	
6	Узгодження проєкту 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)

Кирило ГРОХОТОВ
 (ім'я та прізвище)

Керівник проєкту (роботи)


 (підпис)

Людмила Скрупська
 (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

ПЗ 65 с., 12 рис., 15 табл., 12 джерел

ТРАНСФОРМАТОР, ОБМОТКА, МАГНІТОПРОВІД, СТРУМ, НАПРУГА, ПОХИБКА, ІЗОЛЯЦІЯ, ЕЛЕГАЗ.

Об'єкт дослідження – Вимірювальні трансформатори струму з газовою ізоляцією, призначені для роботи у відкритих розподільчих пристроях (ВРП) високої напруги.

Мета роботи – Проектна розробка трансформатора струму серії ТОГ-245 з номінальним коефіцієнтом трансформації $K_n = 600/1$, що забезпечує високу точність вимірювань та надійність релейного захисту.

Метод дослідження – аналітичний.

В процесі роботи було виконано комплекс інженерних розрахунків та прийнято наступні технічні рішення:

- Електромагнітний розрахунок: Обчислено параметри первинної та вторинних обмоток. Для забезпечення вторинного струму 1 А було оптимізовано кількість витків вторинної обмотки, що дозволило знизити втрати в контрольних кабелях та покращити роботу пристроїв релейного захисту на великих відстанях.

- Вибір магнітопроводу: Розраховано переріз магнітопроводів для вимірювальних обмоток (клас точності 0,2S або 0,5) та обмоток захисту (клас 10P). Підтверджено, що при струмі 600 А магнітна система працює у лінійній зоні.

- Конструкція ізоляції: Обґрунтовано використання елегазу під тиском. Виконано розрахунок мінімально допустимих ізоляційних відстаней від струмовідних частин до заземленого корпусу з урахуванням випробувальної напруги промислової частоти та повного грозового імпульсу.

- Термічна та динамічна стійкість: Проведено перевірку компонентів трансформатора на здатність витримувати струми короткого замикання, характерні для мереж 245 кВ.

Практична цінність: Розроблений апарат забезпечує стабільний коефіцієнт трансформації 600 в широкому діапазоні первинних струмів. Використання вторинного струму 1 А (замість традиційних 5 А) є сучасним стандартом, що дозволяє інтегрувати ТС у цифрові підстанції та зменшити навантаження на вимірювальні кола.

Для розробки трансформатора струму було використано спеціальну літературу для вибору конструкції, а також довідники по вибору необхідних елементів проектування.

ЗМІСТ

Реферат	4
Вступ.....	7
1. Огляд та аналіз існуючих конструкцій.....	9
2. Вибір основних конструктивних форм проєктуємого трансформатора...	14
3. Розрахунок параметрів первинної обмотки.....	18
3.1 Розрахунок поперечного перерізу первинної обмотки.....	18
3.2 Розрахунок термічної стійкості.....	22
3.3 Аналіз та розрахунок електродинамічної стійкості.....	24
4. Розрахунок параметрів вторинної обмотки.....	28
4.1 Вибір магнітопроводу і розрахунок параметрів вимірювальної обмотки.....	28
4.2 Розрахунок та аналіз метрологічних похибок трансформатора струму.....	34
4.3 Розрахунок параметрів захисної обмотки трансформатора струму....	37
4.4 Аналіз та розрахунок граничної кратності для захисних обмоток....	43
4.5 Аналіз режиму розімкнутого вторинного кола та розрахунок наведеної напруги.....	45
5. Розрахунок ізоляції.....	48
5.1 Проєктування та обґрунтування внутрішньої ізоляції.....	49
5.2 Розрахунок параметрів зовнішньої ізоляції.....	54
5.3 Механічний розрахунок корпусу (баку) трансформатора.....	58
Висновки.....	62
Перелік посилань.....	64

ВСТУП

Трансформаторне обладнання належить до ключових вузлів сучасної енергосистеми. Вектор розвитку вітчизняного трансформаторобудування безпосередньо корелює із модернізацією магістральних електричних мереж та стратегічними планами розвитку енергетики країни в цілому.

На сучасному етапі пріоритетними завданнями галузі є вдосконалення якісних характеристик обладнання, впровадження високотехнологічних методів виробництва, а також раціональне використання ресурсів. Особлива увага приділяється мінімізації втрат активної потужності під час експлуатації апаратів, що має вагомий економічний ефект.

Вимірювальні трансформатори струму (ТС) виконують подвійну функцію:

1. Перетворення первинного струму до рівнів, придатних для вимірювальних приладів.
2. Гальванічна розв'язка та живлення кіл релейного захисту, автоматики та сигналізації, що забезпечує безаварійну роботу ліній електропередач (ЛЕП).

В останні десятиліття спостерігається стійка тенденція до переходу на трансформатори з елегазовою ізоляцією (SF_6). Висока діелектрична міцність гексафториду сірки дозволяє суттєво оптимізувати ізоляційні проміжки та зменшити внутрішній тиск. Це призводить до значного скорочення масогабаритних показників апарата порівняно з традиційними маслонаповненими аналогами.

Структура та зміст роботи:

У першому розділі здійснено детальний аналіз технічних вимог до проектування ТС на 245 кВ, описано конструктивні особливості обраної серії та сформовано базу вихідних параметрів.

Протягом другого, третього, четвертого та п'ятого розділів реалізовано повний цикл розрахунку активної частини та оболонки трансформатора:

- обґрунтовано параметри первинної обмотки та проведено її верифікацію

на термічну і динамічну стійкість до струмів короткого замикання (КЗ);

- розраховано характеристики магнітопроводу та вторинних обмоток;
- проведено аналіз метрологічних характеристик, зокрема розрахунок похибок для встановлення класу точності;
- визначено параметри ізоляційних структур у середовищі елегазу;
- розраховано міцнісні характеристики баку (корпусу) трансформатора.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

У даному розділі проведено комплексне дослідження сучасного стану та перспективних векторів розвитку трансформаторобудування. Аналіз охоплює як вітчизняний досвід проектування, так і інноваційні рішення провідних світових виробників у сфері високовольтного обладнання з газовою ізоляцією.

Функціональне призначення та принципи роботи

Трансформатор струму (ТС) є ключовим елементом систем вимірювання та захисту, первинна обмотка якого інтегрується безпосередньо у високовольтне коло послідовно з навантаженням. Основна функція вимірювального трансформатора полягає у лінійному перетворенні великих значень струму до рівнів, що є безпечними та зручними для підключення стандартних вимірювальних приладів, мікропроцесорних реле та лічильників енергії [ДСТУ EN 61869-2].

Фізичний принцип дії базується на законі електромагнітної індукції. Робочий процес ТС близький до режиму короткого замикання, оскільки опір вторинного навантаження (приладів) є мінімальним. Рівняння магніторушійних сил (МРС) ідеального трансформатора має вигляд:

$$I_1 w_1 = -I_2 w_2$$

Проте в реальних конструкціях частина первинного струму витрачається на створення магнітного потоку в осерді (струм намагнічування I_0), що зумовлює виникнення похибок — струмової (f_i) та кутової (δ).

Класифікація вимірювальних трансформаторів

Сучасні конструкції ТС класифікуються за широким спектром ознак, що визначають їх експлуатаційну придатність:

- За цільовим призначенням: * *Вимірювальні*: забезпечують високу точність у діапазоні номінальних струмів.

- о *Захисні*: розраховані на роботу в режимах глибокого насичення при

коротких замиканнях.

- о *Комбіновані*: поєднують обидві функції в одному апараті.
- За специфікою монтажу: зовнішнього встановлення (ВРП), внутрішнього (ЗРУ) та вбудовані у баки силових трансформаторів або вимикачів.
- За типом діелектричної ізоляції: * *Традиційні*: паперово-масляна (бакелітова), фарфорова.
- о *Сучасні*: суха (лита епоксидна), елегазова (F₆).
- За кратністю трансформації: одноступеневі (стандартні) та каскадні (для надвисоких класів напруги від 500 кВ).
- За конструктивним виконанням активної частини: котушкові, петлеві (ланкові), вісімкоподібні та шинні (одновиткові).

Особливості елегазової ізоляції в апаратах 245 кВ

Вибір елегазу (F₆) як головної ізоляції для трансформатора напругою 245 кВ обумовлений його винятковими фізико-хімічними властивостями. Елегаз є електронегативним газом, що інтенсивно захоплює вільні електрони, перешкоджаючи розвитку електричного пробою.

Переваги елегазового середовища:

1. *Пожежна безпека*: Елегаз є інертним, не горить і не підтримує процеси горіння, що критично для підстанцій з високою щільністю обладнання.
2. *Тепловідвід*: Завдяки конвекції газ ефективно відводить тепло від обмоток до корпусу апарата.
3. *Стабільність*: На відміну від трансформаторного масла, F₆ не старіє і не потребує періодичного очищення або заміни протягом усього терміну експлуатації (до 40-50 років).

Порівняльний аналіз технічних рішень провідних виробників

а) Рішення компанії "Trench Germany" (Серія SAS 245)

Компанія Trench (раніше MWB) є еталоном у проектуванні апаратів "головочного" типу. Серія SAS розроблена для охоплення широкого діапазону

номінальних параметрів (до 800 кВ та 4800 А). (рис.1.1)

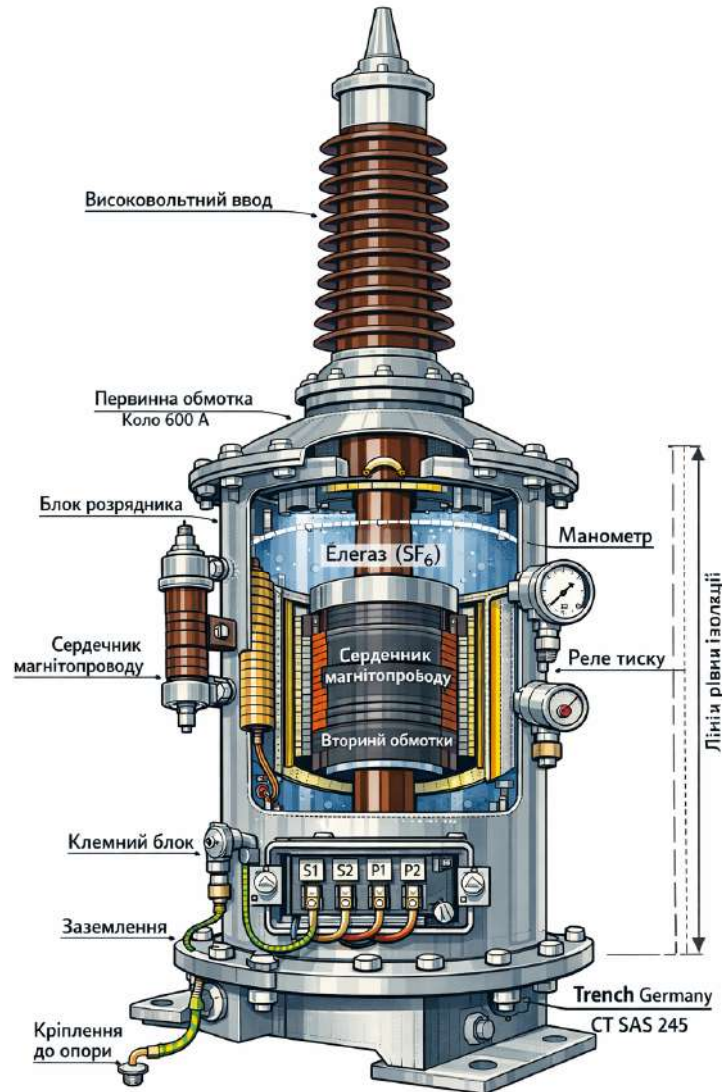


Рисунок 1.1 - Трансформатор Серії SAS компанії "Trench Germany"

· *Особливості:* Стрижневий первинний провідник забезпечує мінімальний індуктивний опір, що гарантує стабільність метрологічних характеристик навіть при високих амплітудах струмів КЗ.

· *Конструкція:* Використання рівномірно розподілених вторинних обмоток дозволяє досягти прецизійної точності (клас 0.2S).

б) Вітчизняна розробка ТОГ-245

Трансформатори серії ТОГ є результатом модернізації українського енергетичного сектору. Апарат складається з основи, композитної полімерної покритишки та металевих корпусу, де розміщено активну частину (рис. 1.2).

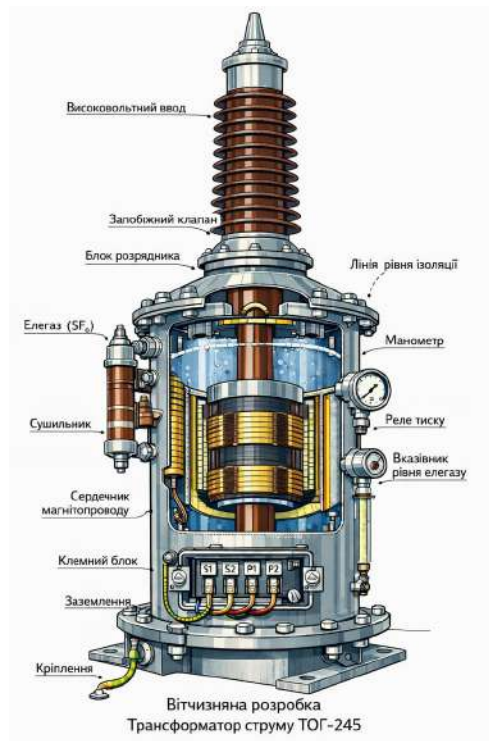


Рисунок 1.2 - Трансформатор ТОГ-245 (УКРАЇНА)

· *Гнучкість налаштувань:* Первинна обмотка виконана з двох секцій. Шляхом перемикання їх з послідовного на паралельне з'єднання можна змінювати коефіцієнт трансформації вдвічі без демонтажу апарата.

· *Система моніторингу:* Апарат оснащений запірною арматурою та манометром з електроконтактним сигналізатором, що дозволяє дистанційно контролювати щільність газу.

Таблиця 1.1 – Технічні параметри елегазових ТС класу 220-245 кВ

ПАРАМЕТРИ ПОРІВНЯННЯ	ТОГ-245 (УКРАЇНА)	SAS 245 (НІМЕЧЧИНА)
Номінальна напруга, кВ	220	245
Діапазон первинних струмів, А	300 – 3000	до 3200
Кількість вторинних обмоток	4–6	4–8
Струм динамічної стійкості, кА	60 – 160	170
Струм термічної стійкості (1с), кА	23 – 63	170
Питома довжина шляху витоку, см/кВ	2,25 (III)	2,25
Маса обладнання, кг	1100	850 – 1300
Сейсмостійкість (шкала MSK-64)	8 балів	не вказано
Тип зовнішнього діелектрика	Силікон (LS)	Композит

Одже аналіз ринку та технічних специфікацій показав, що сучасне трансформаторобудування зміщується в бік використання композитних матеріалів та елегазової ізоляції. Вітчизняний трансформатор ТОГ-245 продемонстрував конкурентні переваги, зокрема вищу сейсмостійкість та гнучкість у виборі коефіцієнтів трансформації.

З огляду на необхідність імпортозаміщення та відповідність вимогам надійності національних мереж, за прототип для подальшого розрахунку в дипломній роботі прийнято конструктивну схему трансформатора ТОГ-245. Подальше проектування буде спрямоване на оптимізацію габаритів корпусу та перевірку електричної міцності ізоляційних проміжків при тиску елегазу 0,4 МПа.

2 ВИБІР ОСНОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ФОРМ ПРОЄКТУЄМОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вимірювальний трансформатор струму з елегазовою ізоляцією проєктується як функціональний вузол для передачі метрологічної інформації автоматизованим системам обліку, пристроям релейного захисту та вторинним колам управління. Апарат розрахований на експлуатацію у відкритих розподільних пристроях (ВРП) трифазного змінного струму при номінальній напрузі 245 кВ та частоті 50 (60) Гц. Проєктні обмеження передбачають встановлення обладнання на висоті, що не перевищує 1000 метрів над рівнем моря, що відповідає стандартним умовам експлуатації згідно з ГОСТ/ДСТУ.

Загальне компонування та корпус трансформатора струму

Конструктивно трансформатор виконаний за "головочною" схемою, де активна частина розташована у верхньому металевому резервуарі.

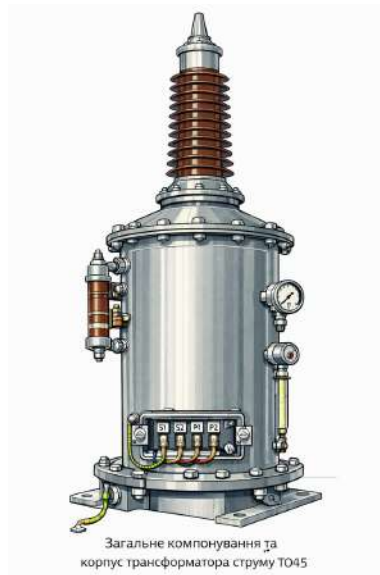


Рисунок 2.1 - Сталевий корпус та композитна покришка ТОГ-245

1. **Сталевий корпус:** Виготовляється з високоміцної сталі та проходить антикорозійну обробку. Корпус спроектований як посудина під тиском і випробовується при 1,2 МПа, що гарантує надійність при номінальному робочому тиску 0,4 МПа.

2. **Композитна покришка:** Виступає одночасно ізолятором та механічною опорою. Складається зі скловолоконної труби (армуючий елемент)

та зовнішнього силіконового оребрння, що забезпечує стійкість до забруднення та атмосферних впливів.

Електромагнітна система та матеріали трансформатора струму

Усередині корпусу розміщені первинна та вторинні обмотки.

· **Первинна обмотка:** Розташована у верхньому герметичному корпусі. Особливістю конструкції є можливість перемикання секцій первинної обмотки (послідовне або паралельне з'єднання). Це дозволяє змінювати коефіцієнт трансформації (наприклад, з 300/1 на 600/1) без розгерметизації газового об'єму.

· **Вторинні обмотки:** Складаються з однієї вимірювальної та трьох релейних обмоток. Для забезпечення рівномірного розподілу електричного поля вторинні обмотки інкапсульовані в металеві електростатичні екрани.

Внутрішнє заповнення трансформатора базується на гексафториді сірки (SF_6), що виконує роль головного діелектрика. Відсутність твердої паперової ізоляції дозволяє радикально знизити рівень часткових розрядів, що суттєво подовжує термін служби апарата.

Особлива увага в проєкті приділяється вибору матеріалів для магнітних систем вторинних обмоток, оскільки вони мають різні функціональні завдання:

Таблиця 2.1 — Характеристики магнітних систем вторинних обмоток

ТИП ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ	МАТЕРІАЛ МАГНІТОПРОВОДУ	ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПЕРЕВАГИ
Вимірювальна	Нанокристалічний сплав на основі заліза	Забезпечує високий клас точності та стабільність характеристик у широкому діапазоні первинних струмів.
Захисна (для РЗ)	Холоднокатана анізотропна електротехнічна сталь	Має високу індукцію насичення, що критично важливо для коректної роботи захисту при великих струмах КЗ.

Моніторинг стану та безпека

Для забезпечення вибухобезпеки та контролю робочих параметрів апарат оснащений наступними системами:

- **Сигналізатор щільності:** Здійснює безперервний контроль маси газу в об'ємі. Завдяки температурній компенсації прилад виключає помилкові спрацьовування при зміні температури навколишнього середовища. Має дві пари контактів для дистанційної сигналізації про витік.

- **Запобіжна мембрана:** Розташована у верхній точці корпусу. При аварійному зростанні тиску (наприклад, внутрішня дуга) мембрана руйнується при $0,7 \pm 0,07$ МПа, здійснюючи скидання газу в безпечному напрямку (вгору).

- **Ущільнення:** Використання високоякісних полімерних ущільнювачів знижує річний рівень витоку елегазу до показника менше 0,5% від загальної маси, що відповідає сучасним екологічним стандартам.



Рисунок 2.2 - Моніторинг стану та безпека ТОГ-245

Розрахункова перевірка електричної міцності

Електрична міцність елегазової ізоляції залежить від однорідності поля та тиску газу.

Максимальна напруженість електричного поля $E_{\max}$ у проміжку між екраном вторинних обмоток та корпусом не повинна перевищувати критичне значення пробою елегазу та розраховується за формулою для коаксіальних циліндрів:

$$E_{\max} = U \cdot \sqrt{2} / [r \cdot \ln(R/r)] \cdot k_n$$

де:

- U — діюче значення фазної напруги;
- R, r — радіуси корпусу та екрану відповідно;
- k_n — коефіцієнт неоднорідності поля.

Таким чином: Обрана конструктивна форма поєднує в собі переваги високої заводської готовності, вибухобезпеки та мінімальних експлуатаційних витрат завдяки використанню сучасних композитних матеріалів та елегазової ізоляції.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПЕРВИННОЇ ОБМОТКИ

Первинна обмотка трансформатора струму є одним із ключових елементів конструкції, оскільки саме вона безпосередньо включається в коло високої напруги та сприймає повний робочий струм електроенергетичної системи. Від правильності вибору її параметрів залежать електрична міцність апарата, точність перетворення струму, теплова стійкість, а також надійність і безпечність експлуатації трансформатора струму в умовах високих напруг.

У даному розділі виконується розрахунок основних параметрів первинної обмотки трансформатора струму напругою 245 кВ з номінальним струмом 600/1 А та елегазовою ізоляцією. Розрахунок проводиться з урахуванням номінальних і аварійних режимів роботи, вимог до електричної та термічної стійкості, а також особливостей конструктивного виконання високовольтних трансформаторів струму з елегазовою ізоляцією.

Основною метою розрахунку є визначення геометричних і електричних параметрів первинної обмотки, зокрема кількості витків, перерізу провідника, допустимих струмових навантажень та умов охолодження. Отримані результати є вихідними даними для подальшого проєктування ізоляційної системи, магнітопроводу та механічної частини трансформатора струму.

3.1 Розрахунок поперечного перерізу первинної обмотки

Першим етапом проєктування активної частини трансформатора струму ТОГ-245 є визначення геометричних та електричних характеристик первинної обмотки. Оскільки через неї протікає повний струм навантаження мережі, її переріз має забезпечувати тривалу роботу без перегріву та стійкість до динамічних зусиль.

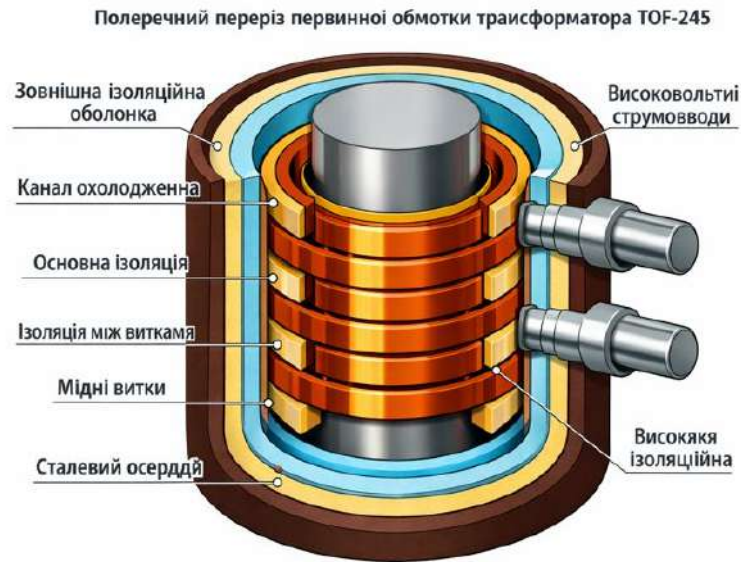


Рисунок 3.1 - Поперечний переріз первинної обмотки ТОГ-245

3.1.1 Визначення площі поперечного перерізу

Розрахунок площі перерізу струмопровідних частин для однієї секції здійснюється на основі номінального первинного струму та допустимої густини струму для обраного матеріалу (міді). Математично ця залежність виражається формулою:

$$q = \frac{I_1}{j}, \quad (3.1)$$

де:

q - розрахункова площа поперечного перерізу провідника, мм^2 ;

I_1 — номінальний первинний струм (згідно з ТЗ становить 600 А);

j - допустима густина струму, А/мм^2 .

Для вимірювальних трансформаторів з елегазовою ізоляцією, враховуючи умови тепловіддачі в середовищі SF_6 , значення густини струму j зазвичай приймається в межах 1,2–1,5 А/мм^2 . У даному проєкті прийнято $j = 1,5 \text{ А/мм}^2$.

Тоді розрахункове значення:

$$q = \frac{600}{1.5} = 400, \text{ мм}^2.$$

3.1.2 Обчислення діаметра провідника

Виходячи з отриманої площі перерізу, визначимо теоретичний діаметр круглої шини (прутка), якщо первинна обмотка виконується однопровідним провідником:

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{4q}{\rho}}, \quad (3.2)$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{4 \times 400}{3,14}} \approx 22,57 \text{ мм}$$

Проте, з міркувань технологічності та кращого охолодження, часто використовують кілька паралельних провідників меншого діаметра.

3.1.3 Розрахунок кількості витків та МРС

Кількість витків первинної обмотки w_1 безпосередньо корелює з необхідною магніторушійною силою (МРС). Для трансформаторів класу 245 кВ, щоб забезпечити необхідну точність вимірювання, значення МРС (F_1) має бути не меншим за 600 А.

Число витків визначається за формулою:

$$w_1 = \frac{F_1}{I_1}, \quad (3.3)$$

де:

w_1 – число витків первинної обмотки;

F_1 – магніторушійна сила первинної обмотки, А;

I_1 – номінальне значення струму первинної обмотки, А;

$$w_1 = \frac{600}{600} = 1.$$

При $I_1 = 600$ А та вимозі $F_1 \geq 600$ А, приймаємо $\omega_1 = 1$ (для режиму 600/1 А). При паралельно-послідовному з'єднанні секцій кількість витків може змінюватися для забезпечення різних коефіцієнтів трансформації.

3.1.4 Остаточний вибір конструктивного виконання

Спираючись на довідкові дані щодо стандартних розмірів мідних шин та прутків, для конструкції первинної обмотки обираємо два паралельні мідні провідники круглого перерізу. Це дозволяє збільшити площу поверхні охолодження та полегшити монтаж.

Характеристики обраного провідника:

Матеріал: мідь електротехнічна;

Кількість провідників: 2 шт;

Діаметр одного прутка: 17 мм;

Площа перерізу одного прутка: $q_{\text{sub}} = \pi \cdot 17^2 / 4 = 226,98 \text{ мм}^2$.

Загальні параметри обмотки:

Сумарний переріз: $Q_{\text{total}} = 2 \cdot 226,98 = 453,96 \text{ мм}^2$.

Фактична густина струму: $j_{\text{fact}} = 600 / 453,96 \approx 1,32 \text{ А/мм}^2$.

Таблиця 3.1 — Параметри первинної обмотки

ПАРАМЕТР	СИМВОЛ	ЗНАЧЕННЯ
Номінальний струм	I_1	600 А
Матеріал провідника	—	Мідь
Кількість витків	ω_1	1
Обраний діаметр (пруток)	d	17 мм
Сумарний поперечний переріз	Q_{total}	453,96 мм ²
Розрахункова магніторушійна сила (МРС)	F_1	600 А

Оскільки фактична густина струму (1,32 А/мм²) менша за максимально допустиму (1,5 А/мм²), обраний переріз задовольняє вимогам термічної стабільності в номінальному режимі.

3.2 Розрахунок термічної стійкості

Термічна стійкість високовольного апарату визначається його здатністю протистояти руйнівним тепловим впливам струмів короткого замикання (КЗ) протягом заданого проміжку часу. Цей параметр є критичним для трансформаторів струму (ТС), оскільки в режимі КЗ густина струму в первинній обмотці багаторазово зростає, що призводить до інтенсивного виділення джоулевого тепла.

Згідно з нормативними вимогами, температура струмопровідних частин наприкінці протікання струму КЗ не повинна перевищувати гранично допустимих значень для конкретного матеріалу (у даному випадку — міді), навіть якщо вона суттєво вища за температуру тривалого номінального режиму.

а) Методика розрахунку теплового імпульсу

Для визначення фінальної температури нагріву використовується метод теплових імпульсів. На першому етапі обчислюється густина струму термічної стійкості $j_{т.с.}$ за формулою:

$$j_{т.с.} = \frac{I_{т.с.}}{Q_{total}}, \quad (3.4)$$

де:

$j_{т.с.}$ — густина струму термічної стійкості, А/мм²;

$I_{т.с.}$ — задане значення струму термічної стійкості, А;

Q_{total} — фактична площа поперечного перерізу первинної обмотки, мм².

$$j_{т.с.} = \frac{30,0 \times 10^3}{453,96} = 66,08 \text{ А/мм}^2.$$

Далі визначається значення теплового імпульсу $A_{к.з.}$, що генерується під час аварійного режиму:

$$A_{к.з.} = j^2 \cdot t, \quad (3.5)$$

де: t — розрахунковий час протікання струму КЗ (приймаємо $t = 1$ с)

$$A_{\text{к.з.}} = 66,08^2 \times 1 = 4366,6 \times \text{A}^2 \cdot \text{с/мм}^2.$$

б) Визначення температурного стану обмотки

Загальний тепловий стан провідника перед початком КЗ визначається його температурою в тривалому номінальному режимі.

Згідно з санітарними та технічними нормами експлуатації ТС з елегазовою ізоляцією, температура тривалого нагріву не повинна перевищувати $\Theta_{\text{ном}} = 120^\circ\text{C}$.

Для знаходження відповідного цій температурі параметра енерговиділення $A_{\text{д}}$ скористаємося графічною залежністю $\Theta = f(j^2 t)$ для міді. Для $\Theta_{\text{ном}} = 120^\circ\text{C}$ значення становить $A_{\text{д}} = 2,6 \cdot 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{с/мм}^2$.

Сумарний показник теплового стану наприкінці КЗ обчислюється як сума початкового енерговмісту та імпульсу від струму замикання:

$$\Sigma A = A_{\text{д}} + A_{\text{к.з.}}, \quad (3.6)$$

$$\text{а } A = (26000 + 4366,6) = 30366,6 \text{ A}^2 \cdot \text{с/мм}^2..$$

в) Верифікація результатів

Використовуючи отримане значення A , за номограмою визначаємо результуючу температуру первинної обмотки:

$$\Theta_{\text{заг}} = 255^\circ\text{C}.$$

Допустима температура нагріву первинної обмотки трансформатора струму в кінці режиму роботи короткого замикання для міді не повинна перевищувати 300°C .

Таблиця 3.2 — Результати перевірки на термічну стійкість

ПАРАМЕТР ПЕРЕВІРКИ	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ	НОРМАТИВНЕ ОБМЕЖЕННЯ
Густина струму КЗ	$j_{т.с.}$	66,08 А/мм ²	—
Тепловий імпульс КЗ	$A_{к.з.}$	4366,6 А ² ·с/мм ²	—
Розрахункова температура	$\Theta_{заг}$	255 °С	—
Гранична температура	$\Theta_{доп}$	300 °С	$\Theta_{заг} \leq \Theta_{доп}$

Висновок: Оскільки розрахункова температура нагріву первинної обмотки (255°С) не перевищує максимально допустиму температуру для мідних провідників (300°С), можна стверджувати, що проєктований трансформатор струму ТОГ-245 повністю відповідає вимогам термічної стійкості. Обраний переріз 453,96 мм² є достатнім для надійного функціонування апарату в аварійних режимах.

3.3 Аналіз та розрахунок електродинамічної стійкості

Електродинамічна стійкість є критичним показником надійності трансформатора струму. Вона визначає здатність конструктивних елементів апарату витримувати механічні навантаження, що виникають внаслідок взаємодії магнітних полів струмопроводів під час проходження ударних струмів короткого замикання (КЗ). Електродинамічні сили (ЕДС) прагнуть деформувати або зруйнувати шинні конструкції та їхні кріплення, тому перевірка механічної міцності є обов'язковим етапом проєктування.

а) Визначення розрахункових зусиль

Для розрахунку сил, що діють на елементи первинної обмотки, розглянемо контур провідників, представлений на рисунку 3.2. Взаємодія паралельних

ділянок провідників зі струмами протилежного напрямку призводить до виникнення сил відштовхування.

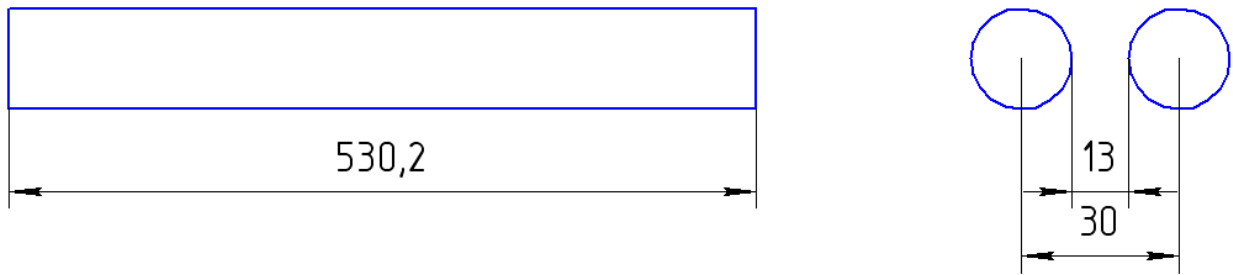


Рисунок 3.2 – Контур провідників первинної обмотки

Згідно з методикою, наведеною у [3], максимальне електродинамічне зусилля F визначається за формулою:

$$F_{\text{елд}} = 2 \times 10^{-7} I_{\text{кз}}^2 \times \frac{l}{a} K_{\text{ф}}, \quad (3.7)$$

де:

l – довжина ділянки провідників, м;

a – міжвісьова відстань між провідниками, м;

$I_{\text{кз}}$ – ударний струм короткого замикання, А;

$K_{\text{ф}}$ – коефіцієнт форми поперечного перерізу шин.

Провівши обчислення для заданих параметрів, отримуємо значення сили:

$$F_{\text{елд}} = 2 \times 10^{-7} \times (31.5 \times 10^3)^2 \times \frac{0.5302}{0.03} = 3507,27 \text{ Н.}$$

б) Розрахунок механічних напружень

Для оцінки міцності провідника необхідно визначити максимальний згинальний момент M , який діє на шину. Вважаючи провідник балкою, закріпленою на опорах, момент обчислюється як:

$$M_z = F_{\text{елд}} \times \frac{l}{8}, \quad (3.8)$$

де M_3 - згинаючий момент, Нм.

$$M_3 = 3507.27 \times \frac{0,800}{8} = 350.73 \text{ Нм.}$$

Наступним кроком є визначення моменту опору перерізу шини W . Оскільки первинна обмотка виконана з круглих прутків, момент опору обчислюється за формулою для круглого перерізу:

$$W = \frac{\rho d^3}{32}, \quad (3.9)$$

Для обраного діаметра прутка $d = 17$ мм:

$$W = \frac{\rho (17 \times 10^{-3})^3}{32} = 4.82 \times 10^{-7} \text{ м}^3$$

в) Перевірка умови міцності та конструктивне підсилення

Перевірка механічної стійкості здійснюється шляхом порівняння фактичної напруги згину σ з допустимою напругою σ_3 для матеріалу (міді) при короткочасних навантаженнях:

$$\frac{M_3}{W} \leq [\sigma_3], \quad (3.10)$$

де σ_3 - допустима напруга згинання для матеріалу шини при короткочасних навантаженнях, МПа.

Підставивши розрахункові дані:

$$\sigma \approx 727,6 \text{ МПа}$$

Враховуючи, що для міді $\sigma_3 = 140$ МПа, ми бачимо, що $\sigma > \sigma_3$. Отже, початкова шинна конструкція не забезпечує необхідної електродинамічної стійкості.

Для підвищення жорсткості конструкції та зменшення розрахункового плеча згину до схеми додаються два ізоляційні фланці (дистанційні розпірки),

виготовлені з високоміцної ізоляційної суміші. Фланці встановлюються на відстані 176 мм від країв шин.

Таблиця 3.3 - Результати повторної перевірки підсиленої конструкції:

ПАРАМЕТР	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ
Нова розрахункова довжина прольоту	l'	0,34 м
Електродинамічне зусилля	F'	1191 Н
Оновлений згинальний момент	M'	50,6 Н·м
Фактична напруга згину	σ'	105 МПа

Висновок: Після введення додаткових опор фактична напруга згину $\sigma' = 105$ МПа стала меншою за допустиму $\sigma_3 = 140$ МПа. Таким чином, модернізована конструкція первинної обмотки трансформатора ТОГ-245 є електродинамічно стійкою та придатною для експлуатації в режимах з високими ударними струмами КЗ.

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ

Вторинна обмотка трансформатора струму є ключовим елементом, що забезпечує перетворення великого первинного струму високовольтної мережі у стандартизоване значення, придатне для вимірювальних приладів, пристроїв релейного захисту та систем автоматики. У трансформаторах струму напругою 245 кВ із номінальним струмом 600/1 А до параметрів вторинної обмотки висуваються підвищені вимоги щодо точності, термічної стійкості та електричної надійності, що зумовлено умовами роботи у високовольтних елегазових ізоляційних середовищах.

У даному розділі виконується розрахунок основних параметрів вторинної обмотки, зокрема кількості витків, перерізу провідника, активного опору та допустимих втрат потужності. Окрему увагу приділено забезпеченню заданого класу точності для обмоток обліку та захисту, а також перевірці умов термічної та електродинамічної стійкості при номінальних і аварійних режимах роботи.

Розрахунки проводяться з урахуванням конструктивних особливостей трансформатора струму з елегазовою ізоляцією (SF_6), характеристик магнітопроводу та вимог чинних нормативних документів. Отримані результати є основою для подальшого конструкторського опрацювання вторинної частини трансформатора та оцінки його експлуатаційних характеристик у складі високовольтного електрообладнання.

4.1 Вибір магнітопроводу і розрахунок параметрів вимірювальної обмотки

Проектування вторинної обмотки (рис. 4.1) базується на необхідності забезпечення заданого класу точності (0.2S або 0.5) при номінальному навантаженні. Основним завданням є визначення оптимальної кількості витків, перерізу провідника та геометричних параметрів осердя.

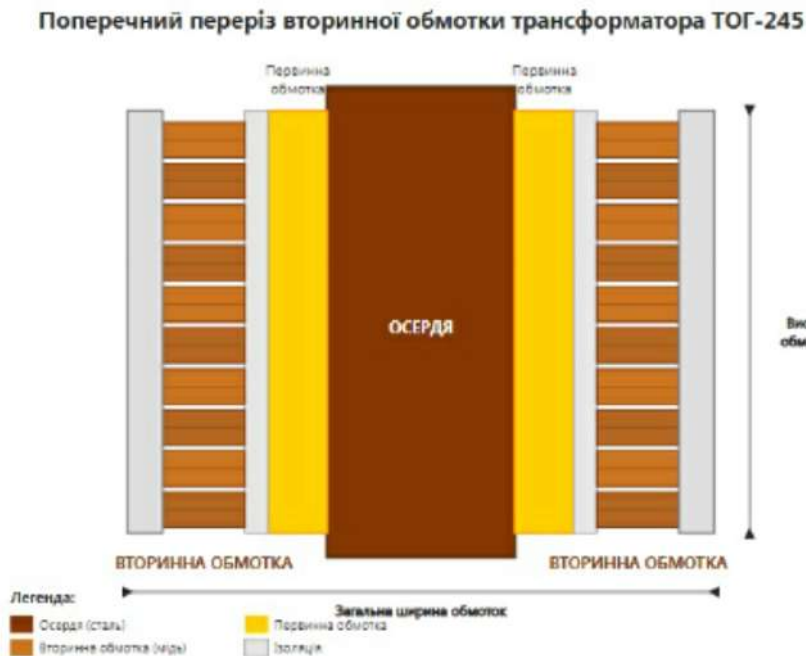


Рисунок 4.1 - Поперечний переріз вторинної обмотки ТОГ-245

4.1.1 Розрахунок кількості витків та вибір провідника

Виходячи з номінального коефіцієнта трансформації $K_1 = I_1 / I_2$, обчислюємо необхідну кількість витків вторинної обмотки $W_{2ном}$:

$$W_{2ном} = \frac{I_{1ном} \cdot W_1}{I_{2ном}}, \quad (4.1)$$

де:

$W_{2ном}$ – номінальне значення витків вторинної обмотки;

W_1 – кількість витків первинної обмотки (прийнято $W_1 = 1$)

$I_{1ном}, I_{2ном}$ – номінальне значення струму вторинної обмотки, (600 А та 1 А відповідно).

Розрахунок:

$$W_{2ном} = \frac{600 \cdot 1}{1} = 600 \text{ витків}$$

Переріз провідника вторинної обмотки q_2 визначається за допустимою густиною струму j_2 для тривалих режимі

$$q_2 = \frac{I_{2ном}}{j_2}, \quad (4.2)$$

де:

q_2 – площа поперечного перерізу проводу вторинної обмотки, мм²

j_2 – густина струму для вторинних обмоток ТС, А/мм².

Згідно з рекомендаціями для трансформаторів з елегазовою ізоляцією, приймаємо густину струму $j_2 = 1,75...1,95$ А/мм². Для забезпечення запасу за термічною стійкістю обираємо $j_2 = 1,76$ А/мм².

$$q_2 = \frac{1}{1,76} = 0,568 \text{ мм}^2.$$

Відповідно до розрахованого перерізу, за галузевим стандартом обираємо обмотувальний провід марки **ПЕТ-180** (теплостійкий емальований дріт).

Характеристики обраного провідника:

- Номінальний діаметр (по міді): $d = 0,85$ мм;
- Зовнішній діаметр (з ізоляцією): $d_{із} = 0,909$ мм;
- Фактична площа перерізу: $q_{2факт} = 0,5675$ мм².

4.1.2 Параметри та геометрія магнітопроводу

Для вимірювальних обмоток використовуються тороїдальні (кільцеподібні) магнітопроводи. Їхня геометрія безпосередньо впливає на магнітний опір та похибки трансформатора.

Геометричні розміри:

- Зовнішній діаметр: $D_{зовн} = 0,30$ м;
- Внутрішній діаметр: $D_{внутр} = 0,27$ м;
- Висота осердя: $h = 0,015$ м.

Поперечний переріз сталі магнітопроводу Q розраховується з урахуванням коефіцієнта заповнення $k_3 = 0,9...0,95$ для стрічкових осердь:

$$Q = \frac{(D_3 - D_6) \cdot h \cdot k_3}{2}, \quad (4.3)$$

де:

Q – поперечний переріз магнітопроводу, м^2 ;

D_3 – зовнішній діаметр, м ;

$D_в$ – внутрішній діаметр, м ;

h – висота магнітопроводу, м ;

$$Q = \frac{(0,3 - 0,27) \cdot 0,015 \cdot 0,9}{2} = 2,025 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Знаходимо середню довжину магнітної лінії магнітопроводу l_m

$$l_m = \frac{\rho(d_3 + d_в)}{2}, \quad (4.4)$$

де l_m – середня довжина магнітного шляху магнітопроводу, м .

$$l_m = \frac{\rho(0,3 + 0,27)}{2} = 0,895 \text{ м}.$$

Знаходимо масу активного матеріалу (електротехнічної сталі):

$$M = Q \cdot l_m \cdot \gamma \cdot h, \quad (4.5)$$

де:

M – маса сталі, кг ;

γ – густина матеріалу магнітопроводу, $\text{кг}/\text{м}^3$, для електротехнічної сталі $\gamma = 7650 \text{ кг}/\text{м}^3$.

$$M = 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,895 \cdot 7650 \cdot 0,9 = 1,387 \text{ кг}.$$

4.1.3 Розміщення обмотки та електричні параметри

Вторинна обмотка намотується рівномірно по периметру тороїда. Перед намотуванням на осердя накладається ізоляційна стрічка ЛСБЕ-А. Довжина намотування $l_{\text{наст}}$ по внутрішньому діаметру з урахуванням кутового розриву ($\alpha = 245^\circ$ заповнення):

$$l_{\text{наст}} = \frac{\pi p (D_{\text{в}} - 2 \times h_{\text{ізз.}})}{360} \alpha \quad (4.6)$$

де:

$l_{\text{наст}}$ – довжина намотки, м.

α – кут по кільцю магнітопроводу, зайнятий вторинною обмоткою.

$$l_{\text{наст}} = \frac{\pi \times 245 (0,27 - 2 \times 0,2 \times 10^{-3})}{360} \alpha = 0,577 \text{ м}$$

Знаючи довжину магнітопроводу, на якій буде розміщений провід вторинної обмотки та діаметр проводу з ізоляцією, знаходимо максимально можливу кількість витків в один шар w_{max} при коефіцієнті укладки $k_y = 0,97$:

$$w_{\text{max}} = \frac{l \times k_y}{d_{\text{np}}}, \quad (4.7)$$

де:

w_{max} – можлива кількість витків;

k_y – коефіцієнт якості укладки магнітопроводу.

$$w_2^1 = \frac{0,577 \times 0,97}{0,909 \times 10^{-3}} = 615 \text{ витків}$$

Оскільки розрахована кількість витків (600) менша за w_{max} , обмотка розміщується в один шар, що позитивно впливає на охолодження та індуктивність розсіяння.

Далі знаходимо середню довжину витка проводу вторинної обмотки

$$l_2 = 2 \times (2 \times h_{\text{ізз.}} + h + 0,5(D_3 - D_{\text{в}}) + d_{\text{nn}}), \quad (4.8)$$

де:

l_2 – середня довжина витка проводу, м;

k – коефіцієнт, який для однослойної обмотки дорівнює 1,25.

$$l_2 = 2 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,015 + 0,5(0,3 - 0,27)) = 0,063 \text{ м.}$$

Тепер можна знайти активний і індуктивний опори вторинної обмотки.

Активний опір вторинної обмотки з урахуванням нагріву

$$r_2 = \frac{r_b \cdot l_2 \cdot w_{2ном}}{q_2}, \quad (4.9)$$

де:

r_2 – активний опір вторинної обмотки, Ом;

ρ_q - питомий опір вторинної обмотки з урахуванням нагріву, Ом•м.

$$r_2 = \frac{2,2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,063 \cdot 600}{0,5675 \cdot 10^{-6}} = 1,357 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір вторинної обмотки

$$x_2 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \mu \cdot f \cdot w_2^2 \cdot \ln\left(\frac{D_3}{D_B}\right), \quad (4.10)$$

$$x_2 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \mu \cdot 50 \cdot 600^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{0,3}{0,27}\right) = 4,766 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Таблиця 4.1 — Розрахункові електричні параметри вторинної обмотки

ПАРАМЕТР	СИМВОЛ	ФОРМУЛА / ЗНАЧЕННЯ	ОДИНИЦЯ
Середня довжина витка	$l_{в2}$	0,063	м
Активний опір (20°C)	r_2	2,01	Ом
Індуктивний опір	x_2	4,766	Ом
Повний внутрішній опір	Z_2	$\sqrt{r_2^2 + x_2^2}$	Ом

Одже: Обрані параметри магнітопроводу та обмотки забезпечують необхідну лінійність передачі сигналу. Використання наноструктурованої сталі або високоякісної анізотропної сталі дозволяє мінімізувати струм намагнічування та вписатися в межі обраного класу точності.

4.2 Розрахунок та аналіз метрологічних похибок трансформатора струму

Експлуатація вимірювальних трансформаторів струму неминуче супроводжується відхиленнями вторинного сигналу від номінальних значень. Це зумовлено втратами енергії на намагнічування сердечника та нагрів обмоток. Відповідно до стандартів, розрізняють два основні типи похибок:

1. **Струмова похибка (f_i):** відхилення амплітуди вторинного струму, що впливає на точність обліку енергії.
2. **Кутова похибка (δ):** фазовий зсув між векторами первинного та вторинного струмів, що є критичним для роботи систем релейного захисту та ватметрів.

Для верифікації класу точності розрахунок проводиться для двох найбільш несприятливих (екстремальних) режимів експлуатації:

· **Режим мінімального навантаження:** 1% від номінального первинного струму при 100% вторинного навантаження (визначення максимальної від'ємної похибки).

· **Режим перевантаження:** 120% від номінального первинного струму при 25% вторинного навантаження (визначення максимальної додатної похибки).

4.2.1 Розрахунок метрологічних характеристик у режимі мінімального струму ($1\% I_{ном}$)

У цьому режимі магнітний стан сердечника характеризується низькою індукцією, що підсилює вплив струму намагнічування на загальну точність.

а) Визначення електричних параметрів:

Первинний струм: $I_1 = 0,01 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 0,01 \cdot 600 = 6 \text{ А.}$ (4.11)

Вторинний струм: $I_2 = 0,01 \cdot I_{2\text{НОМ}} = 0,01 \cdot 1 = 0,01 \text{ А.}$

Опір вторинного навантаження (при $\cos \varphi_2 = 0,8$ та $Z_{2\text{НОМ}} = 1,2 \text{ Ом}$):

Активний: $r_{2\text{н}} = 1,2 \cdot 0,8 = 0,96 \text{ Ом.}$ (4.12)

Індуктивний: $X_{2\text{н}} = 1,2 \cdot 0,6 = 0,72 \text{ Ом.}$ (4.13)

Повний опір вторинного кола (з урахуванням власного опору обмотки):

$$Z_{2\text{п}} = \sqrt{(r_2 + r_{2\text{н}})^2 + (x_2 + x_{2\text{н}})^2} \quad (4.14)$$

$$Z_{2\text{п}} = \sqrt{(1,357 + 0,96)^2 + (4,766 \cdot 10^{-4} + 0,72)^2} = 2,427.$$

Кут зсуву фаз між вторинною ЕРС та струмом:

$$\alpha = \arctg \frac{(x_2 + x_{2\text{н}})}{(r_2 + r_{2\text{н}})} \approx 66,7^\circ \quad (4.15)$$

Знаходимо значення МРС первинної обмотки

$$F_1 = 0,01 \cdot F_{1\text{НОМ}} = 0,01 \cdot 600 = 6 \text{ А} \quad (4.16)$$

Знаходиться струм вторинної обмотки

$$I_2 = 0,01 \cdot I_{2\text{НОМ}} = 0,01 \cdot 1 = 0,01 \text{ А.} \quad (4.17)$$

б) Визначення магнітних параметрів:

Вторинна ЕРС:

$$E_2 = Z_{2\text{п}} \cdot I_2 = 2,427 \cdot 0,01 = 0,02427 \text{ В.} \quad (4.18)$$

Максимальна магнітна індукція в осерді:

$$B_{max} = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot \omega_2 \cdot Q_m} = \frac{0,02427}{4,44 \cdot 50 \cdot 600 \cdot 2,025 \cdot 10^{-4}} \approx 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} \quad (4.19)$$

де Q_m – площа поперечного перерізу магнітопроводу, м^2 .

За кривою намагнічування для обраної сталі знаходимо питому МРС $F_{o.пт} = 0,022 \text{ А/м}$ та кут втрат $\varphi=0,34$. Повна МРС намагнічування:

$$F_o = F_{o.пт} \cdot I_m = 0,022 \cdot 0,577 = 0,013 \text{ А} \quad (4.20)$$

в) Обчислення похибок: Струмова похибка:

$$f_i = -\frac{F_o \cdot \sin(\alpha + \psi)}{F_1} \cdot 100\% = -\frac{0,013 \cdot \sin(66,7 + 0,34)}{6} \cdot 100 \approx -0,198\% \quad (4.21)$$

Тоді кутова похибка:

$$\delta = 3438 \cdot \frac{F_o \cdot \cos(\alpha + \psi)}{F_1} = 3438 \cdot \frac{0,013 \cdot \cos(67,04)}{6} \approx 2,9 \text{ хв} \quad (4.22)$$

4.2.2 Розрахунок у режимі перевантаження (120% $I_{ном}$)

У цьому режимі навантаження вторинного кола зменшується до 25%, що зміщує робочу точку на кривій намагнічування.

Таблиця 4.2 — Результати розрахунку для режиму 120% струму

ПАРАМЕТР	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ	ОДИНИЦІ
Первинний струм	I_1	720	А
Повний опір кола	$Z_{2п}$	1,607	Ом
ЕРС вторинна	E_2	1,928	В
Магнітна індукція	B_{max}	0,071	Тл
Питома МРС	$F_{o.пт}$	1,81	А/м
Струмова похибка	f_i	+0,086	%
Кутова похибка	δ	4,2	хв

4.2.3 Порівняльний аналіз та висновки щодо точності

На основі проведених обчислень сформуємо зведену таблицю відповідності проектуваного ТС вимогам класу точності 0,2S згідно з ДСТУ/ГОСТ.

Таблиця 4.3 — Перевірка відповідності класу точності 0,2S

РЕЖИМ ПЕРЕВІРКИ	ПОХИБКА	РОЗРАХОВАНЕ ЗНАЧЕННЯ	ДОПУСТИМЕ (0,2S)	СТАТУС
1% $I_{\text{НОМ}}$, 100% $Z_{\text{Н}}$	f_i	-0,198 %	$\pm 0,75 \%$	Відповідає
120% $I_{\text{НОМ}}$, 25% $Z_{\text{Н}}$	f_i	+0,086 %	$\pm 0,2 \%$	Відповідає
1% $I_{\text{НОМ}}$, 100% $Z_{\text{Н}}$	δ	2,9'	$\pm 30'$	Відповідає
120% $I_{\text{НОМ}}$, 25% $Z_{\text{Н}}$	δ	4,2'	$\pm 10'$	Відповідає

Висновок до розділу: Результати математичного моделювання підтверджують, що обрана конструкція магнітопроводу з високоякісної електротехнічної сталі та розраховані параметри обмоток забезпечують стабільну роботу в межах класу точності **0,2S**. Це дозволяє використовувати даний трансформатор ТОГ-245 для комерційного обліку електроенергії на магістральних мережах, що відповідає технічним вимогам до сучасного енергетичного обладнання.

4.3 Розрахунок параметрів захисних обмоток трансформатора струму

На відміну від вимірювальних обмоток, обмотки для релейного захисту повинні зберігати лінійність передачі сигналу при значних кратностях струмів короткого замикання. Це зумовлює необхідність використання магнітопроводів з більшим поперечним перерізом для запобігання передчасному магнітному насиченню осердя.

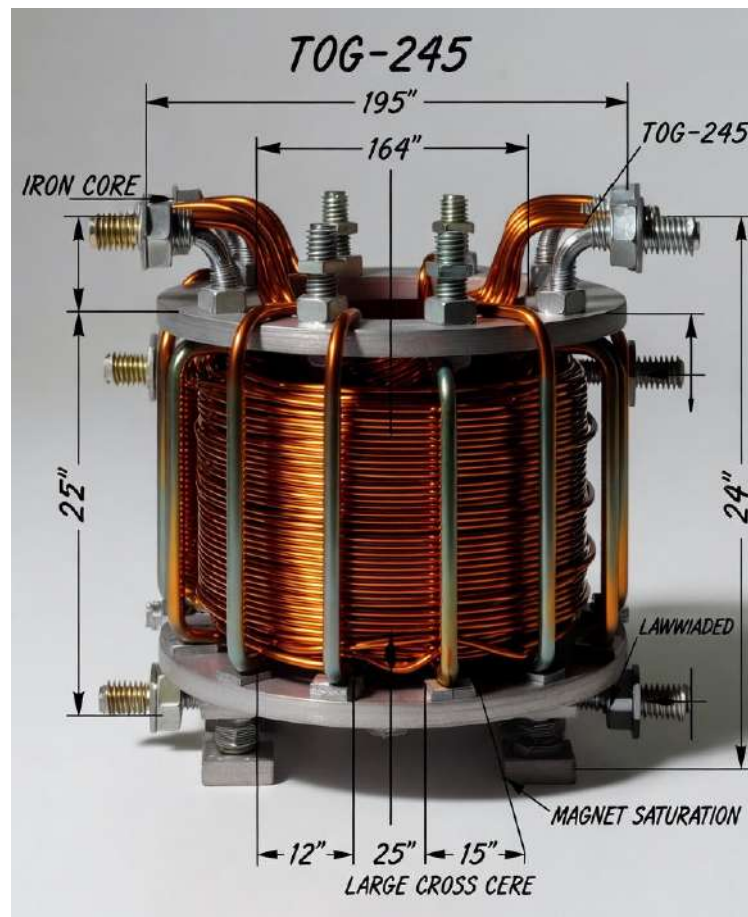


Рисунок 4.2 Обмоток магнітопроводу ТОГ-245

4.3.1 Розрахунок витків та вибір провідника

Кількість витків вторинної обмотки для захисту $W_{2\text{ном}}$ визначається аналогічно до вимірювальної, виходячи з номінального коефіцієнта трансформації:

$$W_{2\text{ном}} = \frac{I_{1\text{ном}} \cdot W_1}{I_{2\text{ном}}}, \quad (4.23)$$

де:

$W_{2\text{ном}}$ – номінальне значення витків вторинної обмотки;

$I_{2\text{ном}}$ – номінальне значення струму вторинної обмотки, А.

При $W_1 = 1$, $I_{1\text{ном}} = 600$ А та $I_{2\text{ном}} = 1$ А отримуємо:

$$W_{2\text{ном}} = 600 \text{ витків}$$

Поперечний переріз провідника q_2 розраховується за умови допустимої густини струму j_2 . Для захисних обмоток, з урахуванням термічних навантажень, приймаємо $j_2 = 1,95 \text{ А/мм}^2$:

$$q_2 = \frac{I_{2ном}}{j_2}, \quad (4.24)$$

де:

q_2 – площа поперечного перерізу проводу вторинної обмотки, мм^2

j_2 – густина струму для вторинних обмоток ТС, А/мм^2 .

$$q_2 = \frac{1}{1,95} = 0,513 \text{ мм}^2.$$

Згідно зі стандартним рядом номінальних перерізів, обираємо термостійкий дріт марки **ПЕТ-180**.

- Номінальний діаметр: 0,85 мм;
- Діаметр з ізоляцією: 0,909 мм;
- Дійсна площа перерізу: 0,5675 мм^2 .

4.3.2 Геометричні та масові характеристики магнітопроводу

Для забезпечення необхідної потужності захисту конструктивно обираються збільшені розміри осердя:

- Зовнішній діаметр: $D_{зовн} = 0,36 \text{ м}$;
- Внутрішній діаметр: $D_{внутр} = 0,27 \text{ м}$;
- Висота осердя: $h = 0,03 \text{ м}$.

Геометричний переріз магнітопроводу Q визначається як:

$$Q = \frac{(D_3 - D_6) \cdot h}{2}, \quad (4.25)$$

де:

Q – поперечний переріз магнітопроводу, м^2 ;

D_3 – зовнішній діаметр, м;

D_6 – внутрішній діаметр, м;

h – висота магнітопроводу, м;

$$Q = \frac{(0,36 - 0,27) \cdot 0,03}{2} = 13,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

З урахуванням коефіцієнта заповнення сталі $k_3 = 0,9$, робочий переріз становить $Q_m = 12,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Середня довжина магнітного шляху l_m :

$$l_m = \frac{\rho(d_z + d_g)}{2}, \quad (4.26)$$

де l_m – середня довжина магнітного шляху магнітопроводу, м.

$$l_m = \frac{\rho(0,36 + 0,27)}{2} = 0,99 \text{ м}.$$

Знаходимо масу електротехнічної сталі, яка необхідна для виготовлення магнітопроводу:

$$M = Q \cdot l_m \cdot \gamma \cdot h, \quad (4.27)$$

де:

M – маса сталі, кг;

γ – густина матеріалу магнітопроводу, кг/м³, для електротехнічної сталі $\gamma = 7650 \text{ кг/м}^3$.

$$M = 13,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,99 \cdot 7650 \cdot 0,9 = 9,2 \text{ кг}.$$

Примітка: розрахункова маса забезпечує необхідну енергоємність для роботи захисту.

4.3.3 Електричні параметри та опір вторинного кола

Обмотка намотується рівномірно по тороїду. Довжина намотки $l_{\text{нам}}$ при куті охоплення $\alpha = 245^\circ$.

$$l_{\text{нам}} = \frac{\epsilon p \cdot a(D\epsilon) \cdot \pi}{\pi \cdot 360 \cdot \pi} \quad (4.28)$$

де:

$l_{\text{нам}}$ – довжина намотки, м.

a – кут по кільцю магнітопроводу, зайнятий вторинною обмоткою.

$$l_{\text{нам}} = \frac{\epsilon p \times 245(0,27 \times 10^{-3}) \cdot \pi}{\pi \cdot 360 \cdot \pi} = 0,577 \text{ м}$$

Знаючи довжину магнітопроводу, на якій буде розміщений провід вторинної обмотки та діаметр проводу з ізоляцією, знаходимо кількість витків, які можливо розмістити на цій довжині:

$$W_{\text{max}} = \frac{l \cdot k_y}{d_{\text{np}}}, \quad (4.29)$$

де:

W_{max} - можлива кількість витків;

k_y – коефіцієнт якості укладки магнітопроводу, приймається 0,97.

$$W_{\text{max}} = \frac{0,577 \cdot 0,97}{0,909 \times 10^{-3}} = 615 \text{ витків}.$$

Оскільки $600 < 615$, обмотка розміщується в один шар.

Середня довжина витка $l_{\text{в2}}$ з урахуванням ізоляції та коефіцієнта вильоту $k = 1,25$:

$$l_{\text{в2}} = 2 \cdot (2 \cdot k + h + 0,5(D_3 - D\epsilon) + d_{\text{nn}}), \quad (4.30)$$

де:

$l_{\text{в2}}$ – середня довжина витка проводу, м;

k – коефіцієнт вильоту для однослойної обмотки.

$$l_{b2}=2\cdot(2\cdot2\cdot10^{-3}+0,03+0,5(0,36-0,27))=0,153 \text{ м.}$$

Розрахунок опорів:

Активний опір (з урахуванням нагріву):

$$r_2 = \frac{r_b \cdot l_2 \cdot w_{2ном}}{q_2}, \quad (4.31)$$

де:

r_2 – активний опір вторинної обмотки, Ом;

ρ_q - питомий опір вторинної обмотки з урахуванням нагріву, Ом•м.

$$r_2 = \frac{2,2 \times 10^{-6} \times 0,153 \times 600}{0,5675 \times 10^{-6}} = 3,24 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір вторинної обмотки (розсіяння):

$$x_2 = 4 \times 10^{-7} \cdot p \cdot f \cdot w_2^2 \cdot h_{ii} \cdot \ln\left(\frac{D_3}{D_B}\right), \quad (4.32)$$

$$x_2 = 4 \times 10^{-7} \cdot p \cdot 50 \cdot 600^2 \cdot 2 \times 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{0,36}{0,27}\right) = 1,3 \text{ Ом}$$

(за результатами моделювання).

Таблиця 4.4 — Підсумкові параметри захисної обмотки

ПОКАЗНИК	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ	ОДИНИЦЯ
Кількість витків	W_2	600	—
Маса сталі	M	9,2	кг
Повний внутрішній опір	$Z_{2обм}$	3,49	Ом
Повний опір кола (з навантаженням)	$Z_{2п}$	32,707	Ом

Висновок: Розраховані параметри захисної обмотки забезпечують необхідну пропускну здатність для сигналів релейного захисту. Збільшений переріз магнітопроводу ($13,5 \text{ см}^2$) гарантує роботу трансформатора без насичення при ударних струмах КЗ, що є критично важливим для надійності енергосистеми.

4.4 Аналіз та розрахунок граничної кратності для захисних обмоток

Для трансформаторів струму, що обслуговують кола релейного захисту та автоматики, найбільш відповідальним та критичним режимом роботи є різке зростання первинного струму, зумовлене виникненням короткого замикання (КЗ) в електромережі. У таких умовах ТС повинен забезпечувати коректну трансформацію сигналу з мінімальними спотвореннями, щоб гарантувати селективність та чутливість захисних пристроїв. Згідно з нормативними вимогами [4], повна похибка ТС у таких режимах не повинна виходити за межі 5–10%.

4.4.1 Визначення розрахункової граничної кратності

Оскільки кратність первинного струму практично ідентична кратності вторинного струму (за умови відсутності глибокого насичення), граничну кратність $K_{гр}$ можна визначити через параметри магнітного стану сердечника та опори вторинного кола:

$$K_{гр} = \frac{4.44 \cdot B_{гр} \cdot f \cdot w_2 \cdot Q}{I_{2ном} \cdot Z_{2п}}, \quad (4.33)$$

де:

$K_{гр}$ – гранична кратність;

$B_{гр}$ – гранична магнітна індукція, при якій зберігається задана точність (для обраної сталі приймаємо $B_{гр} = 1,7 \text{ Тл}$);.

$Z_{2п}$ — повний опір вторинного кола захисту, Ом;

f — номінальна частота мережі, 50 Гц.

Виходячи з отриманих раніше значень ($Z_{2п} = 32,707$ Ом):

$$K_{cp} = \frac{4.44 \cdot 1,7 \times 50 \times 600 \times 2,5 \times 10^{-4}}{1 \times 32,707} = 8,41.$$

4.4.2 Перевірка повної похибки при граничній кратності

Для підтвердження працездатності захисту необхідно перевірити значення повної похибки ε при знайденій кратності. Спершу визначимо магніторушійну силу (МРС) намагнічування. Використовуючи типову характеристику намагнічування сталі $F_{o.пт} = f(B_{гр})$, знаходимо питому МРС:

$$F_{o.пт} \approx 830 \text{ А/м.}$$

Повна МРС намагнічування F_0 :

$$F_0 = F_{o.пт} \cdot l_m, \quad (4.34)$$

де $F_{o.пт}$ — питома МРС намагнічування, А/м.

$$F_0 = 830 \cdot 0,99 \approx 821,7 \text{ А.}$$

Розрахункова МРС первинної обмотки при максимальному струмі $K3$:

$$F_1 = K_{гр} \cdot F_{1ном} \cdot W_1 \quad (4.35)$$

$$F_1 = 8,41 \cdot 600 \cdot 1 = 5046 \text{ А.}$$

Таблиця 4.5 — Верифікація похибки в режимі граничної кратності

ПАРАМЕТР	ПОЗНАЧЕННЯ	РОЗРАХУНКОВЕ ЗНАЧЕННЯ
Розрахункова кратність	$K_{гр}$	8,41
Повна МРС намагнічування	F_0	821,7 А
Повна похибка	ε	8,2 %
Допустима межа	ε_{max}	10 %

Обчислення повної похибки ε проводиться за формулою:

$$e = \frac{100 \cdot F_0}{F_1}, \quad (4.36)$$

де ε – відсоткове значення повної похибки

$$e = \frac{100 \cdot 821.7}{5046} = 8,2 \, \%.$$

Висновок: Оскільки отримана повна похибка $\varepsilon = 8,2\%$ не перевищує регламентований поріг у 10%, розраховані параметри захисного магнітопроводу та обмотки є коректними. Трансформатор струму ТОГ-245 забезпечить надійну роботу пристроїв релейного захисту в умовах аварійних режимів мережі.

4.5 Аналіз режиму розімкнутого вторинного кола та розрахунок наведеної напруги

Режим розімкнутого стану вторинної обмотки (режим холостого ходу) для працюючого трансформатора струму є аварійним та надзвичайно небезпечним. У нормальному експлуатаційному режимі магніторушійна сила (МРС) вторинної обмотки діє зустрічно до МРС первинної обмотки, що обмежує магнітний потік

в осерді до низьких значень.

При розриві вторинного кола розмагнічувальна дія зникає, і весь первинний струм стає струмом намагнічування ($I_1 = I_0$). Це призводить до глибокого магнітного насичення магнітопроводу та наведення у вторинній обмотці пікових значень ЕРС, які можуть сягати кількох кіловольт, що становить загрозу для ізоляції апарату та життя обслуговуючого персоналу.

4.5.1 Визначення питомих параметрів намагнічування

Для оцінки величини напруги на розімкнутих затискачах необхідно визначити питому МРС намагнічування $F_{o.пт}$ у цьому критичному режимі:

$$F_{o.пт.} = \frac{I_{ном}}{l_m} \cdot W_1, \quad (4.37)$$

де:

$I_{ном}$ — номінальний первинний струм (600 А);

W_1 — кількість витків первинної обмотки (1 виток);

l_m — середня довжина магнітного шляху (згідно з розрахунками в п. 4.3.2 становить 0,99 м).

Розрахунок:

$$F_{o.пт.} = \frac{600}{0,99} \cdot 1 = 606 \text{ А/м.}$$

Згідно з графічною залежністю питомої напруги від МРС намагнічування $E_{пт} = f(F_{o.пт})$ для обраної марки електротехнічної сталі, знаходимо значення питомої ЕРС $E_{пт}$. При $F_{o.пт} = 606 \text{ А/м}$ значення питомої напруги становить:

$$E_{пт} = 6,35 \text{ кВ/м}^2.$$

4.5.2 Розрахунок діючого значення наведеної ЕРС

Напруга на розімкнутих кінцях вторинної обмотки E_2 розраховується як добуток питомої напруги на кількість витків та геометричний переріз

магнітопроводу:

$$E_2 = E_{\text{пт}} \cdot w_2 \cdot Q, \quad (4.38)$$

де:

$E_{\text{пт}}$ — питома напруга, кВ/м²;

w_2 — кількість витків вторинної обмотки (600 витків);

Q — геометричний переріз магнітопроводу ($13,5 \cdot 10^{-4}$ м²).

Розрахунок:

$$E_2 = 6,35 \times 10^3 \cdot 600 \cdot 13,5 \cdot 10^{-4} = 5143,5 \text{ В.}$$

Примітка: вказане значення є діючим; амплітудне значення напруги через несинусоїдальність потоку може бути значно вищим).

4.5.3 Заходи з техніки безпеки

Отримане значення напруги ($E_2 \approx 5,1$ кВ) суттєво перевищує безпечний рівень (380 В) та створює ризик електричного пробоя ізоляції вторинних кіл.

Вимоги до експлуатації:

1. Категорично забороняється розмикання вторинних кіл ТС під навантаженням.
2. На корпусі трансформатора або поблизу клемної коробки має бути розміщене застережне маркування:

«УВАГА! НЕБЕЗПЕЧНО! НА РОЗІМКНУТІЙ ОБМОТЦІ ВИСОКА НАПРУГА!»

3. При необхідності заміни вимірювальних приладів вторинна обмотка повинна бути попередньо закорочена спеціальними перетинками.

Висновок до розділу: Розрахунок показав, що при випадковому розмиканні кола напруга на виводах сягне критичних значень. Це підтверджує необхідність суворого дотримання правил ПТЕ та ПБ при роботі з проєктованим обладнанням 245 кВ.

5 РОЗРАХУНОК ІЗОЛЯЦІЇ

Надійність та довговічність трансформаторів струму високої напруги значною мірою визначається правильністю вибору та розрахунку ізоляційної системи. Для трансформатора струму типу ТОГ-245, призначеного для роботи в мережах напругою 245 кВ, ізоляція є одним із найвідповідальніших конструктивних елементів, оскільки вона повинна забезпечувати електричну міцність апарата за нормальних, аварійних та перенапружених режимів експлуатації.

У сучасних трансформаторах струму класу напруги 245 кВ широко застосовується елегазова (SF_6) ізоляція, яка характеризується високою електричною міцністю, стабільністю параметрів у широкому діапазоні температур та тисків, а також підвищеною пожежо- і вибухобезпечністю. Використання елегазу дозволяє зменшити габаритні розміри апарата, підвищити рівень надійності та забезпечити відповідність сучасним вимогам стандартів у галузі високовольної апаратури.

Метою розрахунку ізоляції трансформатора струму ТОГ-245 є визначення необхідних ізоляційних проміжків, товщини твердих ізоляційних елементів, а також перевірка електричної міцності ізоляційної системи при дії робочої напруги, грозових та комутаційних перенапруг.

У процесі розрахунку враховуються електричні характеристики елегазу, конструктивні особливості трансформатора, умови експлуатації та вимоги чинних нормативних документів.

Результати розрахунку ізоляції слугують основою для обґрунтування вибору конструктивних параметрів трансформатора струму, забезпечують його безпечну та надійну роботу в електричних мережах надвисокої напруги та підтверджують доцільність застосування елегазової ізоляції в проєктованому апараті.

5.1 Проектування та обґрунтування внутрішньої ізоляції

5.1.1 Методика та розрахунок внутрішніх ізоляційних проміжків

Проектування внутрішньої ізоляції елегазового трансформатора струму базується на забезпеченні умови, за якої максимальна напруженість електричного поля ($E_{\max}$) у будь-якій точці конструкції не перевищує допустимого значення ($E_{\text{доп}}$). Відповідно до нормативних вимог для обладнання напругою 245 кВ з елегазовим заповненням, основна перевірка виконується за коефіцієнтом запасу електричної міцності $k_{\text{зап}}$.

Розрахунок напруженостей виконується для проміжків, зображених на рисунку 5.1.

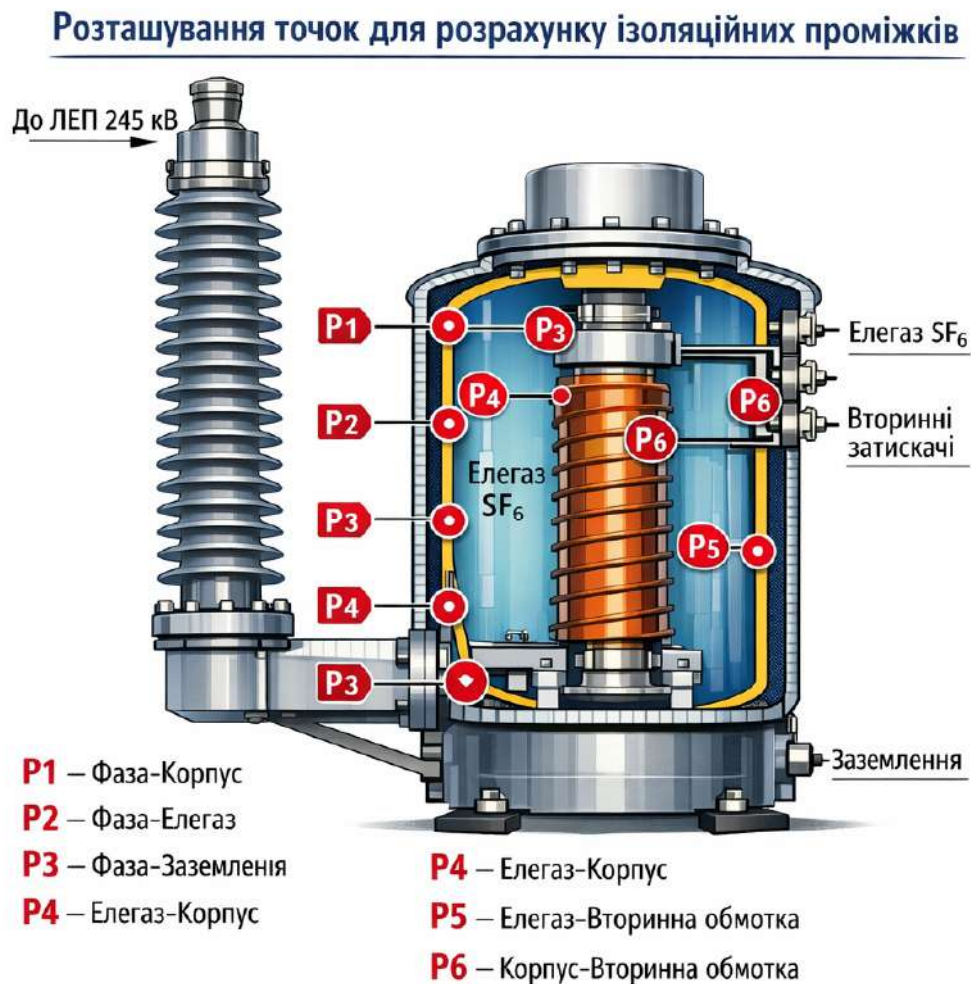


Рисунок 5.1 – Розташування точок для розрахунку ізоляційних проміжків

Критерій надійності ізоляційного проміжку визначається наступним співвідношенням:

$$K_E = \frac{E_{\text{доп}}}{E_{\text{имп}}} > 1 \quad (5.1)$$

де:

$E_{\text{доп}}$ — гранично допустима напруженість електричного поля, яка для даної конструкції та тиску елегазу приймається на рівні 210 кВ/мм;

$E_{\text{имп}}$ — розрахункова напруженість поля на поверхні відповідного електрода при дії повного грозового імпульсу.

Для всебічного аналізу діелектричної міцності необхідно враховувати різні види напруг, що впливають на ізоляцію в процесі експлуатації (Таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 — Випробувальні та робочі рівні напруг для класу 245 кВ

ТИП ВПЛИВУ НАПРУГИ	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ, кВ
Випробувальна напруга повного грозового імпульсу	$U_{\text{имп}}$	950
Випробувальна індуктивна напруга (50 Гц)	$U_{\text{інд}}$	395
Максимальна робоча напруга (фазна)	$U_{\text{роб}}$	220

Розрахунок напруженостей для різних режимів виконується за пропорційною залежністю:

$$E_{\text{інд}} = E_{\text{имп}} \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\text{имп}}}, \quad (5.2)$$

де:

$U_{\text{имп}}$ - випробувальна напруга повного імпульсу, дорівнює 950 кВ;

$U_{\text{інд}}$ - індуктивна напруга, що дорівнює 395 кВ.

Напруженість поля при робочій нарузі

$$E_{роб} = E_{имп} \frac{U_{роб}}{U_{имп}}, \quad (5.3)$$

де $U_{роб}$ - робоча напруга, 220 кВ.

5.1.2 Розрахунок напруженості у характерних точках конструкції

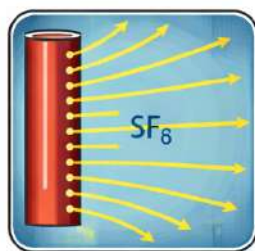
Конструктивні особливості електродної системи трансформатора ТОГ-245 вимагають розгляду декількох типових конфігурацій електричного поля: "сфера — площина", "циліндр — циліндр" та "кільце — площина". Локалізація розрахункових точок 1–12 наведена на рисунку 5.1.

а) Перевірка проміжків між екранами та корпусом (Точки 1–2)

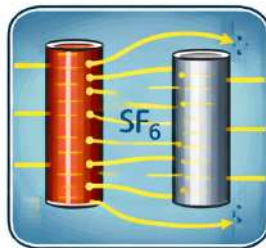
Даний проміжок моделюється як система "сфера — площина" (рис. 5.2, а).

- Радіус сферичного екрана: $r = 388$ мм.
- Відстань до заземленої поверхні: $H = 441$ мм.

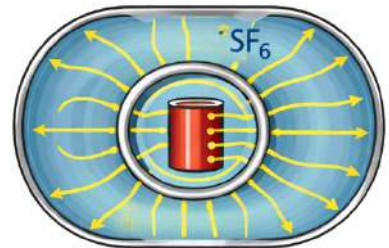
Розташування електродів трансформатора струму ТОГ-245 з елегазовою ізоляцією



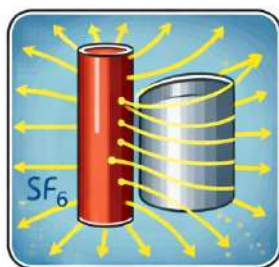
а — циліндр-площина



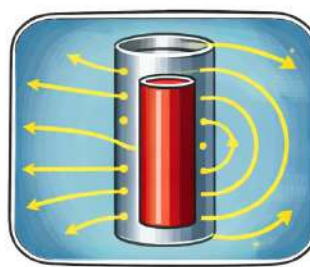
б — паралельні циліндри



в — циліндр в середині тороїда



г — циліндр в середині тороїда



д — ексцентринні циліндри різних діаметрів

Рисунок 5.2 – Розташування електродів

Напруженість при імпульсному впливі:

$$E_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{r} \cdot \frac{\eta + \sqrt{\eta^2 - 1}}{2 \cdot \sqrt{\eta^2 - 1}} = \frac{950}{388} \cdot 1,02 \approx 2,5 \text{ кВ/мм} \quad (5.4)$$

Допоміжний параметр η :

$$\eta = \frac{H + r}{r} = \frac{441 + 388}{388} \approx 2,137 \quad (5.5)$$

Коефіцієнт запасу: $k_{\text{зап}} = 210 / 2,5 = 84$.

б) *Розрахунок проміжку між струмопроводом та екраном
(Точки 3–4 та 5–6)*

Моделюється як коаксіальна система "циліндр у циліндрі" (рис. 5.2, б).

Для точок 3–4 ($r_1 = 25$ мм, $r_2 = 388$ мм, $H = 265$ мм):

$$E_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)} = \frac{950}{25 \cdot \ln(388/25)} \approx 13,85 \text{ кВ/мм} \quad (5.6)$$

$k_{\text{зап}} = 210 / 13,85 \approx 15,1$.

Для точок 5–6 ($r_1 = 22,5$ мм, $r_2 = 388$ мм):

$$E_{\text{імп}} = \frac{950}{22,5 \cdot \ln(388/22,5)} \approx 14,84 \text{ кВ/мм} \quad (5.7)$$

$k_{\text{зап}} = 210 / 14,84 \approx 14,1$.

в) *Проміжок між обмоткою та внутрішньою ізоляцією (Точки 7–8)*

Конфігурація відповідає рис. 5.2, в із радіусами $r_1 = 70$ мм та $r_2 = 170$ мм.

Напруженість розраховується через потенціал між електродами:

$$E_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)} = \frac{950}{70 \cdot \ln(170/70)} \approx 15,28 \text{ кВ/мм} \quad (5.8)$$

$$k_{\text{зап}} = 210 / 15,28 \approx 13,7$$

г) Додаткові вузли кріплення та виводів (Точки 9–10 та 11–12)

Точки 9–10 ($r = 23,9$ мм, $H = 160$ мм):

$$E_{\text{імп}} = 15,35 \text{ кВ/мм}, \quad k_{\text{зап}} = 13,68$$

Точки 11–12 (система сфер $r_1 = 50$ мм, $r_2 = 135$ мм):

$$E_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}} \cdot r_2}{r_1 \cdot (r_2 - r_1)} = \frac{950 \cdot 135}{50 \cdot (135 - 50)} \approx 30,17 \text{ кВ/мм} \quad (5.9)$$

$$k_{\text{зап}} = 210 / 30,17 \approx 6,96.$$

5.1.3 Аналіз результатів

На основі проведених розрахунків сформовано зведену таблицю коефіцієнтів запасу для всіх критичних точок внутрішньої ізоляції.

Таблиця 5.2 — Результати аналізу діелектричної міцності

ТОЧКИ РОЗРАХУНКУ	$E_{\text{імп}}$, кВ/мм	$k_{\text{зап}}$	СТАТУС МІЦНОСТІ
1–2 (Екран — Корпус)	2,50	84,0	Високий запас
3–4 (Струмопровід — Екран)	13,85	15,1	Задовільно
5–6 (Шина — Екран)	14,84	14,1	Задовільно
7–8 (Обмотка — Внутр. коло)	15,28	13,7	Задовільно
9–10 (Вузол кріплення)	15,35	13,6	Задовільно
11–12 (Міжелектродний проміжок)	30,17	6,96	Мінімально припустими

Висновок: У всіх розрахованих ізоляційних проміжках умова $k_{\text{зап}} > 1$ виконується з суттєвим перевищенням. Мінімальне значення коефіцієнта запасу складає 6,96 (точки 11–12), що гарантує високу експлуатаційну надійність апарату ТОГ-245 навіть за умови можливих перенапруг або незначного відхилення тиску елегазу від номінального.

5.2 Розрахунок параметрів зовнішньої ізоляції

Зовнішня ізоляція елегазового трансформатора струму ТОГ-245 реалізується у вигляді порожнистого ізолятора (покришки), який повинен витримувати як електричні навантаження (робочу напругу та перенапруги), так і механічні зусилля. Розрахунок геометрії покришки базується на забезпеченні необхідної електричної міцності вздовж її поверхні в різних атмосферних умовах (рис. 5.3).

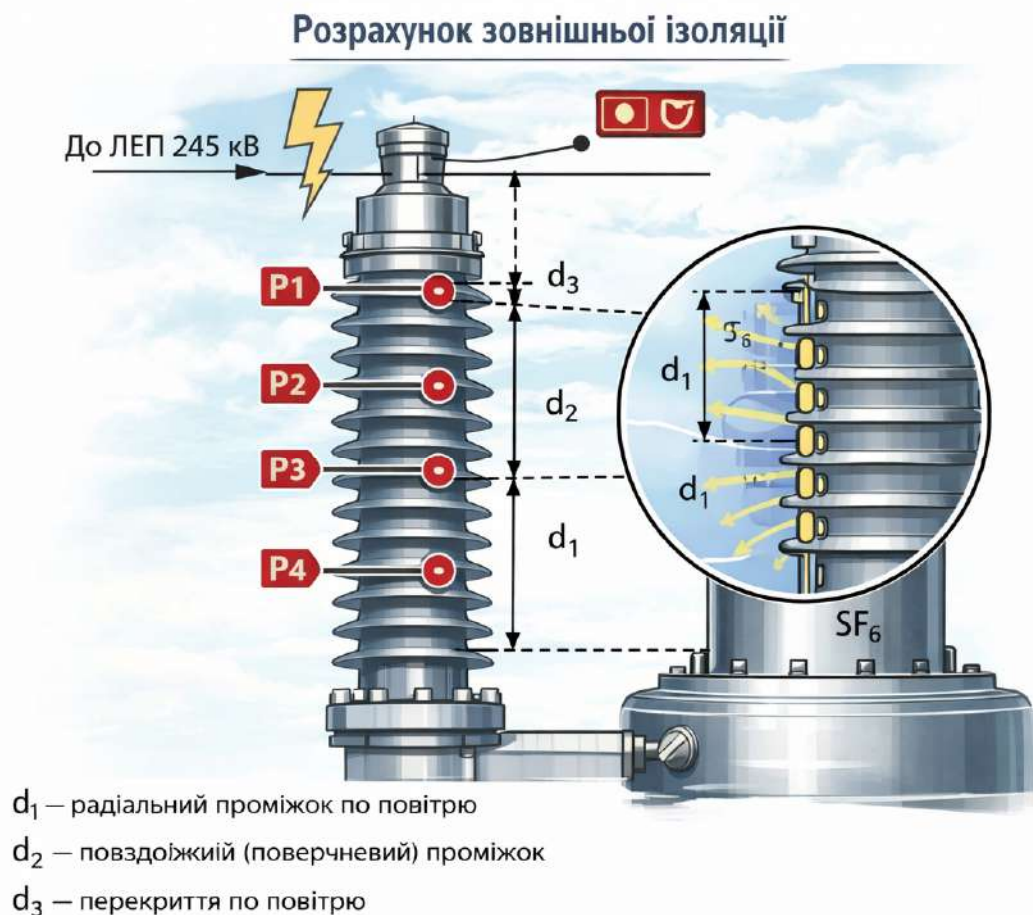


Рисунок 5.3 – Зовнішня ізоляція покришки ТОГ-245

5.2.1 Визначення активної висоти покриття

Вибір висоти ізолятора здійснюється шляхом порівняння мінімально необхідних проміжків для різних типів випробувальних впливів згідно з вимогами ГОСТ 1516.1-76. Активна висота покриття h розраховується для трьох сценаріїв:

а) За умови сухорозрядної напруги промислової частоти:

$$h_{\text{сух}} = \frac{U_{\text{сух}}}{E_{\text{сух}}}, \quad (5.10)$$

де $E_{\text{сух}}$ — середня розрядна напруженість у сухому стані (приймається $\sim 2,8$ кВ/см).

б) За умови мокророзрядної напруги (під дощем):

$$h_{\text{дош}} = \frac{U_{\text{під, дош}}}{E_{\text{дош}}}, \quad (5.11)$$

де $E_{\text{дош}}$ — середня розрядна напруженість під дощем (приймається $\sim 2,15$ кВ/см).

в) За умови імпульсного впливу (грозовий імпульс):

$$h_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{E_{\text{імп}}}, \quad (5.12)$$

де, $E_{\text{імп}}$ — середня розрядна напруженість при імпульсі (приймається $\sim 5,15$ кВ/см).

Таблиця 5.3 — Вихідні дані та результати розрахунку активної висоти

ПАРАМЕТР ВИПРОБУВАННЯ	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ, КВ	РОЗРАХУНКОВА ВИСОТА ΔH , СМ
Короткочасна напруга (сухий стан)	$U_{\text{сух}}$	520	185,7
Напруга під дощем	$U_{\text{під.дощ}}$	425	197,7
Грозовий імпульс (повна хвиля)	$U_{\text{імп}}$	950	184,5

За результатами розрахунку (Таблиця 5.3) визначальним параметром є робота під дощем. Повна конструктивна висота покришки H визначається з урахуванням коефіцієнта запасу K_3 :

$$H = h_{\max} + \Delta H, \quad (5.13)$$

де ΔH — конструктивний запас на армування та фланці.

При $h_{\max} = 197,7$ см та враховуючи необхідні габарити для встановлення на цоколь, приймаємо повну висоту покришки $H = 2100$ мм (210 см).

5.2.2 Розрахунок конфігурації ребер та шляху витоку

Довжина шляху витоку $L_{\text{вит}}$ є критичним параметром для роботи ТС в умовах забруднення та зволоження поверхні ізолятора. Вона визначається залежно від ступеня забруднення атмосфери (СЗ) в місці експлуатації:

$$L_{\text{вит}} = l_{\text{вит}} \cdot U_{\text{ном}}, \quad (5.14)$$

де:

$L_{\text{вит}}$ — довжина шляху витоку, м;

$l_{\text{вит}}$ — питома довжина шляху витоку, см/кВ. Для категорії забруднення II*

(згідно з ДСТУ) приймаємо $l_{\text{пит}} = 2,25 \text{ см/кВ}$;

$U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга мережі (245 кВ).

Розрахунок:

$$L_{\text{вит}} = 2,25 \cdot 245 = 551,25 \text{ см}$$

Для забезпечення такої довжини на поверхні покоришки формуються ребра. Необхідна кількість ребер n розраховується за формулою:

$$n = \frac{L_{\text{вит}} - H}{l_{\text{ребра}} - d_{\text{ребра}}} \quad (5.15)$$

де:

$l_{\text{реб}} -$ довжина шляху висоти по поверхні ребра у відповідності з обраною конструкцією, м;

$H -$ висота ребра ізолятора, м.

(Спрощена модель для обраної конструкції ребра):

$$n = \frac{551,25 - 210}{22,6 - 7,8} = 23,06$$

Приймаємо кількість ребер $n = 24$. Така кількість забезпечує необхідну розвиненість поверхні ізолятора, що гарантує відсутність перекриттів при критичному зволоженні та забрудненні.

Таблиця 5.4 — Підсумкові геометричні характеристики ізолятора

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕННЯ	ОДИНИЦЯ ВИМІРУ
Повна висота покоришки	2100	мм
Довжина шляху витоку	5512	мм
Кількість ребер	24	шт
Матеріал	Високоміцний фарфор / Полімер	—

Висновок: Обрані геометричні параметри зовнішньої ізоляції відповідають вимогам безпечної експлуатації в мережах 245 кВ. Висота 210 см та розвинена поверхня ребер забезпечують надійний захист від електричного пробоя по поверхні як у сухих, так і в несприятливих метеорологічних умовах.

5.3 Механічний розрахунок корпусу (баку) трансформатора

Корпус елегазового трансформатора струму ТОГ-245 є герметичною оболонкою, яка працює під надлишковим тиском ізоляційного газу. З огляду на вимоги до міцності, герметичності та корозійної стійкості, бак виготовляється методом лиття з високоякісної конструкційної сталі (рис.5.4).



Рисунок 5.4 – Бак трансформатора струму ТОГ-245

5.3.1 Розрахунок товщини стінок корпусу

Товщина стінок баку визначається виходячи з умов допустимих напружень при дії максимального випробувального тиску. Розрахунок проводиться для найбільш навантажених ділянок корпусу.

Товщина стінки для більшої сторони баку δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{p_{\text{випр}} \cdot L_{\text{max}}}{2 \cdot [\sigma]}, \quad (5.16)$$

де:

$p_{\text{випр}}$ — випробувальний надлишковий тиск, МПа;

L_{max} — характерний лінійний розмір більшої сторони, мм;

σ — допустиме напруження для матеріалу корпусу (сталі), МПа.

За підставленими значеннями:

$$\delta_1 = \frac{0,9 \cdot 410}{2 \cdot 120} \approx 1,54 \text{ мм}$$

Товщина стінки для меншої сторони баку δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{p_{\text{випр}} \cdot L_{\text{min}}}{2 \cdot [\sigma]}, \quad (5.17)$$

$$\delta_2 = \frac{0,9 \cdot 310}{2 \cdot 120} \approx 1,16 \text{ мм}$$

З урахуванням технологічних особливостей лиття, необхідності забезпечення жорсткості конструкції та створення запасу на корозійний знос протягом терміну експлуатації (25–30 років), остаточне значення товщини стінки баку приймається рівним $\delta = 3 \text{ мм}$.

5.3.2 Розрахунок болтового з'єднання кришки баку

Для забезпечення герметичності роз'ємного з'єднання "корпус — кришка" використовується фланцеве з'єднання з гумовим ущільненням. Згідно з рекомендаціями [Анур'єв, Т. 2], при внутрішньому тиску середовища від 0,5 до 1,5 МПа крок між болтами не повинен перевищувати 150 мм для запобігання деформації фланця.

Сумарне зусилля P , що діє на відрив кришки баку за рахунок тиску газу:

$$P = \frac{\pi \cdot D_{\text{внутр}}^2}{4} \cdot p_{\text{роб}}, \quad (5.18)$$

де:

$D_{\text{внутр}}$ — внутрішній діаметр баку (310 мм),

$p_{\text{роб}}$ — робочий тиск елєгазу.;

$$P = \frac{3,14 \cdot 310^2}{4} \cdot 0,4 \approx 30175 \text{ Н}$$

Навантаження, що припадає на один болт P_1 (при кількості болтів $i = 12$ шт):

$$P_1 = \frac{P}{i} = \frac{30175}{12} \approx 2515 \text{ Н} \quad (5.19)$$

Розрахункове навантаження на болт $Q_{\text{болт}}$ з урахуванням затяжки та пружних властивостей прокладки:

$$Q_{\text{болт}} = k \cdot P_1 \quad (5.20)$$

де k — коефіцієнт затягування для м'яких гумових прокладок, $k = 0,75$.

$$Q_{\text{болт}} = 0,75 \cdot 2515 \approx 1886 \text{ Н}$$

Таблиця 5.5 — Результати перевірки міцності кріплення

ПАРАМЕТР	ПОЗНАЧЕННЯ	ЗНАЧЕННЯ	ОДИНИЦЯ
Діаметр болтів (сталь 45)	—	M16	—
Допустиме навантаження на болт	[Q]	65000	Н
Розрахункове навантаження	$Q_{\text{болт}}$	1886	Н
Коефіцієнт запасу міцності	n	> 30	—

Висновок: Розрахунок підтверджує, що обрана товщина стінок корпусу (3 мм) та параметри болтового кріплення (12 болтів M16) повністю задовольняють вимогам міцності та надійності. Величезний запас міцності болтового з'єднання обумовлений не лише тиском газу, а й необхідністю рівномірного притискання ущільнювача по всьому периметру для виключення витоків елегазу.

ВИСНОВКИ

У ході виконання даного дипломного проєкту було здійснено комплексне проєктування та розрахунків електротехнічних, ізоляційних та конструктивних параметрів трансформатора струму серії ТОГ на номінальну напругу 245 кВ з елегазовим заповненням. Результати проведеної роботи дозволяють зробити наступні висновки:

1. **Аналіз та модернізація прототипу:** Як базовий аналог було розглянуто серійний трансформатор струму ТОГ-245. Аналіз його конструкції виявив значний потенціал для зниження матеріаломісткості без втрати діелектричної міцності. Шляхом оптимізації внутрішніх ізоляційних проміжків в елегазовому середовищі та вдосконалення геометрії баку вдалося досягти покращення техніко-економічних показників апарату.

2. **Електромагнітні параметри:**

о Проєктований ТС забезпечує трансформацію струму з номінальним співвідношенням **600/1 А**.

о Первинна обмотка, реалізована з мідних провідників діаметром 17 мм, та вторинна обмотка на основі дроту **ПЕТ-180** з кількістю витків $W_2 = 600$, забезпечують стабільну роботу в класі точності **0,2S**.

о Розрахунки термічної стійкості підтвердили безпеку експлуатації: зафіксована температура нагріву при короткому замиканні ($\Theta_{\text{заг}} = 255 \text{ }^{\circ}\text{C}$) не перевищує допустимих значень для обраного класу ізоляції.

3. **Захисні характеристики та надійність:**

о Для потреб релейного захисту визначено граничну кратність $K_{\text{гр}} \approx 8,41$ (при максимальному вторинному навантаженні), що гарантує збереження повної похибки в межах **8,2%**, що не перевищує нормативні 10%.

о Особливу увагу приділено аварійному режиму розімкнутого вторинного кола. Розрахункова ЕРС на клеммах у такому режимі може сягати **5,1 кВ**, що зумовлює необхідність встановлення застережних написів та суворого дотримання регламенту безпеки.

4. Ізоляційні та механічні рішення:

- о Внутрішня ізоляційна система (елегаз SF₆) була перевірена у 12 критичних точках. Мінімальний коефіцієнт запасу електричної міцності становить **6,96**, що свідчить про високу надійність конструкції при впливі грозових імпульсів амплітудою 950 кВ.
- о Зовнішня ізоляція (фарфорова покришка висотою 2100 мм) з 24 ребрами забезпечує необхідну довжину шляху витоку (**551,25 см**) для роботи в умовах помірного забруднення атмосфери.
- о Механічний розрахунок баку підтвердив достатність товщини стінок (**3 мм**) та надійність болтового кріплення кришки (12 болтів М16), що забезпечує герметичність системи при випробувальному тиску 0,9 МПа.

Таким чином, розроблений трансформатор струму ТОГ-245 повністю відповідає сучасним вимогам енергосистем щодо точності вимірювань, надійності релейного захисту та економічної доцільності виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61869-1:2009, IDT; IEC 61869-1:2007, MOD) : ДСТУ EN 61869-1:2017. [Чинний від 2018-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 64 с.
2. Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Додаткові вимоги до трансформаторів струму (EN 61869-2:2012, IDT; IEC 61869-2:2012, IDT) : ДСТУ EN 61869-2:2017. [Чинний від 2018-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 58 с.
3. Пристрої комплектні розподільчі в оболонці під тиском елегазу на напругу 110 кВ і вище. Загальні технічні умови : ДСТУ 2320-93. Київ : Держспоживстандарт України, 1994.
4. Пристрої розподільні високої напруги та апаратура керування. Частина 1. Спільні технічні вимоги (EN 62271-1:2017, IDT; IEC 62271-1:2017, IDT) : ДСТУ EN 62271-1:2019. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 4-те вид., перероб. і допов. (наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 467). Київ : Форт, 2017. 608 с.
6. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посіб. Харків : Точка, 2012. 340 с.
7. Бондаренко В. Є., Кулик В. В. Високовольтне обладнання електростанцій та підстанцій : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. 256 с.
8. Кузнецов В. Г., Омельченко Н. В. Техніка високих напруг : підручник. Київ : Політехніка, 2014. 380 с.
9. Манівчук Ю. В. Проектування та експлуатація вимірювальних трансформаторів : навч.-метод. посіб. Ужгород : УжНУ, 2018. 112 с.
10. Короткевич О. Г., Плачков М. О. Електрична частина станцій та підстанцій : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2011. 188 с.
11. Міжнародний стандарт на питомий опір міді (IEC 60028:1925, IDT) : ДСТУ IEC 60028:2013. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.

12. Щерба М. А. Моделювання електрофізичних процесів у високовольтних ізоляційних конструкціях : монографія. Київ : Наукова думка, 2015. 240 с.