

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний факультет
(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка
до дипломного проекту (роботи)
бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему Трансформатор струму 220 кВ, 1200/1 А з паперово-масляною ізоляцією
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи E-412

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

Освітня програма (спеціалізація)
Електричні та електронні апарати

ХУДОЛІЙ Р.П.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВАСИЛЕВСЬКИЙ В.В.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ДОНОВСЬКА І.С.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Електротехнічний

Кафедра Електричні та електронні апарати

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Електричні та електронні апарати
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Андрієнко П.Д.



«24» квітня 2026 року

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

ХУДОЛІЙ Роман Петрович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Трансформатор струму 220 кВ, 1200/1 А з паперово-масляною ізоляцією

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. ВАСИЛЕВСЬКИЙ Володимир Валентинович,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «22» квітня 2026 року №189

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 03.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) ТС 220 кВ; $I_{\text{ном}} = 1200 \text{ А}$; $I_{2\text{ном}} = 1 \text{ А}$; $S_2 \text{ вим} = 30 \text{ ВА}$; $S_2 \text{ зах} = 50 \text{ ВА}$; клас точності: $0,2 / 10\text{Р}$; $I_{\text{кз}} = 63 \text{ кА}$ (3 с); $f = 50 \text{ Гц}$; $U_{\text{найб}} = 252 \text{ кВ}$; $l_{\text{вит}} = 2,25 \text{ см/кВ}$; $\cos \varphi = 0,8$

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Техніко-економічне обґрунтування проєкту; 2. Попередній розрахунок; 3. Опис спроектованої конструкції; 4. Технологія складання трансформатора та перемикача

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

НУЗП 687-243.018 Трансформатор струму – 1 арк. А1; НУЗП 68788.018 Первинна та вторинна обмотки – 1 арк. А1; НУЗП 303128.018 Основа – 1 арк.; НУЗП 671215.018 Обмотка – 1 арк. А1.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

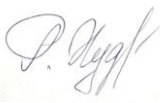
Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	ВАСИЛЕВСЬКИЙ Володимир Валентинович	24.04.2026	03.06.2026
			

7. Дата видачі завдання «24» квітня 2026 року.

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(ка)


 (підпис)
Роман ХУДОЛІЙ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)


 (підпис)
Володимир ВАСИЛЕВСЬКИЙ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

.....	С.
Реферат	6
Вступ.....	7
1 Техніко-економічне обґрунтування проекту.....	9
1.1 Огляд існуючих конструкцій трансформаторів струму	9
1.2 Обґрунтування вибору конструкції трансформатора струму	17
1.3 Конструктивно – технологічні особливості вторинної обмотки.....	20
1.4 Випробування стійкості магнітопроводів до механічних і кліматичних впливів	22
1.5 Технічне завдання	25
2 Попередній розрахунок	28
2.1 Розрахунок параметрів первинної обмотки трансформатора струму.....	28
2.2 Розрахунок ізоляції між обмотками	29
2.3 Розрахунок електротермічної стійкості	31
2.4 Розрахунок електродинамічної стійкості.....	33
2.5 Розрахунок магнітопроводу і параметрів вторинної обмотки.....	36
2.6 Розрахунок похибок трансформатора струму	42
2.7 Розрахунок граничної кратності	49
2.8 Розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки	50
2.9 Електричний розрахунок зовнішньої ізоляції	51
3 Опис спроектованої конструкції.....	61
4 Технологія складання трансформатора та перемикача	62
4.1 Вибір організаційної форми складання.....	62
4.2 Загальні вимоги до складання.....	62
4.3 Опис складання трансформатора.....	63
4.4 Опис складання перемикача.....	64
4.5 Якісний аналіз технологічності конструкції	65
Висновки	70
Перелік джерел посилання	72

РЕФЕРАТ

ПЗ: 72 с., 7 рис., 7 табл., 4 джерела.

ТРАНСФОРМАТОР СТРУМУ, ПАПЕРОВО-МАСЛЯНА ІЗОЛЯЦІЯ, МАГНІТОПРОВІД, ПЕРВИННА ОБМОТКА, ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ, КЛАС ТОЧНОСТІ.

Об'єкт проєктування – трансформатор струму 220 кВ, 1200/1 А з паперово-масляною ізоляцією для зовнішнього встановлення.

Мета проєктування – розробка трансформатора струму з покращеними техніко-економічними показниками, що забезпечує вимірювання та релейний захист в енергосистемах напругою 220 кВ.

Методи дослідження – порівняльний аналіз існуючих конструкцій трансформаторів струму вітчизняного та зарубіжного виробництва; аналітичний розрахунок параметрів первинної обмотки, ізоляції та магнітопроводу з використанням емпіричних формул; розрахунок електродинамічної і електротермічної стійкості до струмів короткого замикання; розрахунок похибок і граничної кратності вторинних обмоток; електричний розрахунок зовнішньої ізоляції.

Спроєктований трансформатор струму забезпечує точне відтворення первинного струму у вторинних колах вимірювання та захисту і може застосовуватися у розподільчих пристроях 220 кВ для комерційного обліку електроенергії та релейного захисту. Використання аморфного магнітопроводу дозволяє покращити метрологічні характеристики та підвищити надійність виробу в експлуатації.

ВСТУП

Електроенергетика є найважливішою галуззю будь-якої країни, оскільки її продукція (електроенергія) відноситься до універсального виду енергії. Її легко можна передавати на значні відстані, ділити на велику кількість споживачів. Без електроенергії неможливо здійснити більшість технологічних процесів, як неможливо представити наше життя без опалення, освітлення, охолодження, транспорту, телевізора, холодильника та ін., які теж споживають енергію.

Високовольтні електричні мережі, які з'єднують електростанції з споживачами - це складна система взаємного зв'язку елементів, що входять до неї: силових трансформаторів, вимикачів, роз'єднувачів, реакторів, трансформатори струму та напруги та ін.

Для правильної організації системи захисту, одержання достовірної інформації про стан мереж у всіх її режимах роботи, сигналізації, а також для достовірного комерційного обліку електроенергії, переданої або споживаної учасниками енергоринку, служать вимірювальні трансформатори струму і напруги.

Останні роки характеризуються швидким розвитком енергетики. Підвищуються номінальні напруга і струми енергоустаткування, яке встановлене в енергосистемах. У зв'язку з об'єднанням енергосистем значно збільшуються струми короткого замикання, усе це приводить до необхідності створення нового високовольтного обладнання, одним з видів якого є трансформатори струму.

Створення потужної енергетичної бази на Україні необхідно для розвитку всіх структур народного господарства. Підвищуються номінальні напруга і струми енергоустаткування, яке встановлене в енергосистемах. У зв'язку з об'єднанням енергосистем значно збільшуються струми короткого замикання, усе це приводить до необхідності створення нового високовольтного обладнання, одним з видів якого є трансформатори струму.

Трансформатори струму застосовують при вимірі великих класів, тоді коли безпосереднє включення приладів на повний струм електричного ланцюга стає неможливим. Таким чином, трансформатор струму дозволяє вимірювати і враховувати струм високої напруги приладами низької напруги, доступними для безпосереднього спостереження обслуговуючим персоналом. При цьому в його вторинний ланцюг включаються амперметри, струмові обмотки ватметрів, лічильників і т.д.

Одним з найважливіших параметрів електричного кола є струм, що протікає в ньому. Вимірювання струму здійснюється вимірювальними приладами – амперметрами. Їх безпосереднє вмикання в електричну мережу можливе лише при номінальній напрузі. Якщо напруга мережі перевищує 220В, безпосереднє під'єднання вимірювальних приладів недопустиме. Прилади для безпосереднього підключення в мережу високої напруги були б занадто великими за ізоляційними відстанями, а при напрузі 35кВ і вище їх виготовлення взагалі неможливе. У розподільчих пристроях трансформатори струму призначені не тільки для забезпечення вимірювання струму, але також для живлення схем релейного захисту та ізолювання первинних кіл захисту від високої напруги. Трансформатори струму дають можливість виконувати надійну передачу, прийом та розподіл електричної енергії.

У розподільчих пристроях трансформатори струму призначені не тільки для забезпечення вимірювання струму, але також для живлення схем релейного захисту та ізолювання первинних кіл захисту від високої напруги. Трансформатори струму дають можливість виконувати надійну передачу, прийом та розподіл електричної енергії.

Все це вказує на те, що існує реальна необхідність випуску таких апаратів на різні класи напруги.

Мета дипломного проекту – спроектувати ТС 220 кВ, 1200/1А з покращеними техніко-економічними показниками.

1 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

1.1 Огляд існуючих конструкцій трансформаторів струму

За минулий час в області конструювання і розрахунку трансформаторів струму відбулися значні зміни. Істотне збільшення номінальних напруг і струмів в енергосистемах веде до підвищення вимог до ТС, особливо при їх роботі в перехідних режимах. У зв'язку з цим були проведені обширні дослідження роботи ТС в перехідних режимах.

Трансформатором струму називається такий трансформатор, в якому при нормальних умовах роботи вихідний сигнал являється струмом, практично пропорційним первинному струму і при правильному включенні зсунутим відносно нього по фазі на кут, близький до нуля.

Первинна обмотка трансформатора струму вмикається в коло послідовно, а вторинна замикається на деяке навантаження (вимірювальні прилади або реле), забезпечуючи в ній струм, пропорційний струму в первинній обмотці.

В ТС високої напруги первинна обмотка ізольована від вторинної (земля) на повну робочу напругу. Один кінець вторинної обмотки звичайно заземлюється, тому він має потенціал, близький до потенціалу землі.

ТС за призначенням поділяються на трансформатори струму для вимірювання і трансформатори струму для захисту. В деяких випадках ці функції суміщаються в одному трансформаторі.

Технічний прогрес у електропромисловості ставить завдання розробки нових конструкцій трансформаторів струму, які відповідають світовому технічному рівню і що характеризується прогресивністю конструкторських і технологічних рішень.

До сучасних конструкцій трансформаторів пред'являються високі вимоги в частині надійності ресурсу, локалізаційної здібності, питомої витрати конструкційних матеріалів, габаритних розмірів, вагових характеристик, трудомісткості.

Аналіз конструктивних особливостей зарубіжних ТС показує, що визначилися деякі прогресивні тенденції у вирішенні цих завдань та їх розгляд представляє певний інтерес для розробників.

Аналіз конструктивних особливостей і технічного рівня ТС проводився за матеріалами (технічної інформації, проспектах, описів) провідних фірм Англії, США і Японії.

Конструкції трансформаторів струму (ТС) дуже різноманітні. Їх можна класифікувати за такими основними ознаками :

- за призначенням: вимірювальні, захисні, комбіновані, лабораторні проміжні та інші ;
- за виконанням первинної обмотки : стрижневі, або одновиткові та багатовиткові ;
- за видом ізоляції між первинною та вторинною обмотками : з фарфоровою ізоляцією, з бакелітовою ізоляцією, з заливкою компаундом ;
- за конструктивним виконанням : котушечні, бакові, вісімко-подібні, петлеві ;
- за кількістю ступенів трансформування : з одним коефіцієнтом трансформації, з декількома коефіцієнтами трансформації, які отримують за рахунок зміни числа витків первинної або вторинної обмотки, або обох обмоток, чи застосуванням декількох вторинних обмоток з різним числом витків, які відповідають різному номінальному вторинному струму;
- за робочою частотою : промислової частоти 50 Гц, підвищеної частоти від 400 до 8000 Гц ;
- за кліматичними умовами : для районів з помірним кліматом , з тропічним кліматом , з холодним кліматом ;
- за автономністю : вбудовані , самостійного виконання ;

- за умовами встановлення : внутрішні, зовнішні, для встановлення в особливих умовах експлуатації.

Основними параметрами і характеристиками трансформаторів струму є такі параметри та характеристики.

Номінальна напруга – діюче значення лінійної напруги, при якій призначено працювати ТС, що вказано в паспортній таблиці трансформатора струму.

Номінальний первинний струм $I_{1ном}$ – вказаний у паспортній таблиці ТС струм, що проходить по первинній обмотці, при якому передбачена довга робота ТС.

Номінальний вторинний струм $I_{2ном}$ – вказаний у паспортній таблиці ТС струм, що проходить по вторинній обмотці. Номінальний вторинний струм приймається рівним 1 або 5 А, при цьому струм 1 А допускається тільки для ТС з номінальним первинним струмом до 4000 А.

Вторинне навантаження ТС $Z_{2н}$ відповідає повному опору його зовнішньої вторинної ланки, вираженому в омах, із вказанням коефіцієнту потужності. Вторинне навантаження може також характеризуватися повною потужністю в вольт – амперах, що споживається нею при даному коефіцієнті потужності і номінальному вторинному струмі.

Вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_2 = 0.8$, при якій гарантується встановлений клас точності ТС чи гранична кратність первинного струму відповідно до його номінального значення, називається номінальним вторинним навантаженням ТС $Z_{2н.ном}$.

Коефіцієнт трансформації ТС дорівнює відношенню первинного струму до вторинного струму.

В розрахунках трансформаторів струму використовують дві величини: дійсний коефіцієнт трансформації n і номінальний коефіцієнт трансформації n_n . Під дійсним коефіцієнтом трансформації n розуміють відношення дійсного первинного струму до дійсного вторинного струму. Під номінальним коефіцієнтом трансформації n_n розуміють відношення номінального первинного струму до номінального вторинного струму.

Стійкість ТС до механічних і теплових дій характеризується струмом електродинамічної стійкості і струмом термічної стійкості.

Струм електродинамічної стійкості I_d дорівнює найбільшій амплітуді струму короткого замикання за весь час його протікання, яку ТС витримує без пошкоджень, які перешкоджають його подальшій справній роботі. Струм I_d характеризує спроможність ТС протистояти механічним (електродинамічним) впливам струму короткого замикання. Електродинамічна стійкість може характеризуватися також кратністю K_d що являє собою відношення струму електродинамічної стійкості до амплітуди номінального первинного струму. Вимоги електродинамічної стійкості не розповсюджуються на шинні, вбудовані та роз'ємні ТС.

Струм термічної стійкості I_{tc} дорівнює найбільшому діючому значенню струму короткого замикання за час його дії t_{tc} , яке ТС витримує впродовж всього проміжку часу без нагріву струмоведучих частин до температур, що перевищують допустимі при струмах короткого замикання, і без пошкоджень, які перешкоджають його подальшу справну роботу. Термічна стійкість характеризує здатність ТС протистояти тепловим впливам струму короткого замикання.

Температура струмопровідних частин ТС при струмі термічної стійкості не повинна перевищувати:

- 200 °C для струмопровідних частин із алюмінію;
- 250°C для струмопровідних частин із міді та її сплавів, що контактують з органічною ізоляцією чи маслом.

Значення струмів електродинамічної та термічної стійкості ТС державним стандартом не нормуються. Однак, вони повинні відповідати електродинамічній та термічній стійкості інших апаратів високої напруги, що встановлені в одній ланці із трансформатором струму.

Механічне навантаження визначається тиском вітру швидкість якого 40 м/с на поверхню трансформатора струму і тяжінням підводячи проводів (у горизонтальному напрямку у площині виводів первинної обмотки), яке повинно бути не менше:

- для ТС до 35 кВ включно - 500 Н;
- для ТС на 110-220 кВ - 1000 Н;
- для ТС на 330 кВ і вище - 1500 Н.

Такі основні технічні параметри і характеристики трансформаторів струму.

Принципова схема одноступеневого електромагнітного ТС і його схема заміщення приведені на рисунку 1.1. Як видно із схеми, основними елементами ТС, що приймають участь у перетворенні струму, являються первинна 1 і вторинна 2 обмотки, намотані на один і той же магнітопровід. Первинна обмотка включається послідовно (в розсічку струмопроводу високої напруги 4).

Обтікається струмом лінії ІІ. До вторинної обмотки підключаються вимірювальні прилади (амперметр, струмова обмотка лічильника) або реле. При роботі трансформатора струму вторинна обмотка завжди замкнута на навантаження.

Первинну обмотку разом із ланкою високої напруги називають первинною ланкою, а зовнішню ланку, що отримує вимірювальну інформацію від вторинної обмотки трансформатора струму (тобто навантаження і з'єднувальні проводи), називають вторинною ланкою. Ланку, що створюється вторинною обмоткою і вторинною ланкою, що приєднана до неї, називають гілкою вторинного струму.

На рисунку 1 зображені лише ті елементи трансформатора струму, які приймають участь у перетворенні струму. Кінцево, ТС має багато інших елементів, що забезпечують потрібний рівень ізоляції, захист від атмосферних впливів, належні монтажні та експлуатаційні характеристики.

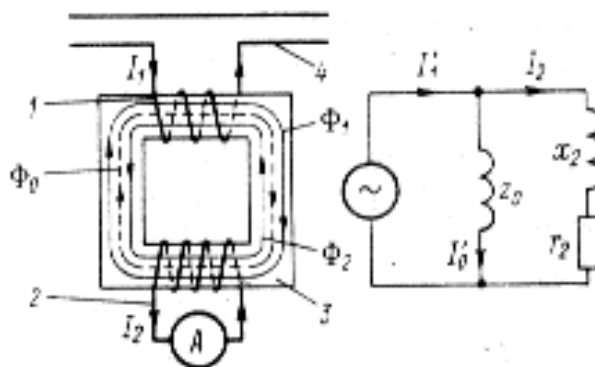


Рисунок 1.1 – Принципова схема ТС та його схема заміщення

Умови роботи трансформатора струму. Трансформаторам струму приходится робити в різних режимах, що мають місце в електричній ланці, а саме в сталому і перехідному режимах.

Сталим називають режим роботи ТС, при якому струми в первинній і вторинній обмотках ТС не мають загасаючих вільних а-періодичних та періодичних складових. Одним із видів сталого режиму являється нормальний режим роботи ТС, при якому первинний і вторинний струми, погрішності різних видів і напруги між обмотками ТС не перевищують тривало припустимих при заданих умовах експлуатації. До сталого режиму відносять також трансформацію струму короткого замикання (далі кз) або іншого струму, що відрізняється від нормального робочого струму установки, після затухання робочих складових.

Перехідним режимом роботи ТС називають електромагнітний процес, що виникає при переході від одного режиму до іншого внаслідок різкої зміни параметрів первинного струму або навантаження ТС (наприклад, при кз або комутаціях в первинній ланці, чи при раптовому замиканні накоротко гілки вторинного струму). При перехідному режимі по первинній і вторинній обмотках ТС проходять вільні загасаючі складові струмів.

При правильному виборі ТС струми в його обмотках не при сталих, не при перехідних режимах, не повинні перевищувати допустимі по термічній та динамічній стійкості. При цьому похибки різних видів також не повинні бути більше припустимих в цих режимах погрішностей.

Трансформатори струму напругою до 35 кВ застосовуються для внутрішнього встановлення. Звичайно в них використовується повітряна, масляна або лита ізоляція (ізоляція з епоксидних компаундів).

Трансформатори струму напругою вище 35 кВ використовуються для зовнішнього встановлення. Такі трансформатори найчастіше мають комбіновану паперово-масляну, масляно-бар'єрну або елегазову ізоляцію. В ТС з елегазовою ізоляцією елегаз знаходиться під тиском 0,28-0,4 МПа. Ці трансформатори потребують особливої технології виготовлення, тому мають широке розповсюдження.

Представником трансформаторів з чисто паперово-масляною ізоляцією є трансформатори типу ТФЗМ, що виготовляються на класи напруг від 33 кВ до 750 кВ. Трансформатори мають ланкову конструкцію, тобто складаються з двох ланок : магнітопроводу із вторинною обмоткою і первинної обмотки, яка протягується у вікно вторинної. Внутрішня ізоляція виконується з паперу і накладається порівну на обидві обмотки. Зовнішньою ізоляцією є фарфорові покривки циліндричної або конічної форми.

Прикладами трансформаторів з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу є трансформатори серії ТФУМ, ТФРМ, ТОМ.

Трансформатори серії ТФУМ мають U-подібну конфігурацію первинної обмотки. Особливістю цієї конструкції є те, що для оптимального розподілення напруги по товщі паперу (тобто головної ізоляції) закладені конденсаторні обкладки перфорованої фольги. Вторинна обмотка практично не має своєї ізоляції і разом з магніто проводом накладається на первинну. Трансформатори серії ТФУМ виготовляються на класи напруги від 220 кВ до 500 кВ.

Трансформатори серії ТФРМ випускаються на класи напруги від 330 кВ до 1150 кВ. Вони мають римовидний комплект вторинних обмоток. Головна ізоляція розміщена на магніто проводі з вторинною обмоткою. Первинна обмотка протягується крізь вікно вторинної і має від 1 до 3 витків.

Трансформатори серії ТОМ виконуються на класи напруги від 35 кВ до 500 кВ. Вони мають вторинні обмотки, що складаються з чотирьох обмоток, на

які накладається головна ізоляція. Між обмотками встановлена термопара для контролю температури обмоток в процесі сушіння. Обмотка має римовидну форму. Первинна обмотка має один або декілька витків. Порівняльна характеристика трансформаторів струму знаходиться в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика трансформаторів струму

Назва фірми	ВАТ ЗЗВА	ЗАО АББ УЭТМ	RITZ, Німеччина
Тип/Параметри	ТФЗМ	TG-170	SKF 145
Номінальний первинний струм, А	1200	1200	1200
Номінальний вторинний струм, А	1	1	1
Кількість вторинних обмоток: Для захисту Для вимірювання	3 1	3 1	3 1
Струм термічної стійкості, кА, тривалістю 3с.	30	20	16 - 60
Номінальний клас точності вторинної обмотки	0.2	0.2; 0,5	0,2; 0.5
Кліматичне виконання	У1	У1, ХЛ1	У1; УХЛ1
Габаритні розміри	2865x986x1007	2220x760x430	2580x1015
Маса, кг	2260	2320	2285

1.2 Обґрунтування вибору конструкції трансформатора струму

Попередній вибір конструкції і техніко-економічного обґрунтування розроблюваного трансформатора струму напругою 220 кВ, струмом 1200/1 А проводиться на підставі аналізу існуючих сучасних трансформаторів, близьких і подібних проектуваному виробу.

Трансформатор струму з масляною ізоляцією на напругу 220 кВ призначений для передачі сигналу вимірювальної інформації вимірювальним приладам і пристроям захисту й керування в установках змінного струму частотою 50 Гц.

На підставі проведеного огляду конструкцій трансформаторів струму на 220 кВ та зроблених висновків про їхні переваги була вибрана конструкція ТС з масляною ізоляцією. Контакт масла з зовнішнім середовищем обмежений, а значить трансформатор герметичний. Масляні трансформатори експлуатуються без ніяких ремонтних робіт, вони не потребують профілактики та капітального ремонту. Потрібно тільки слідкувати за добрим натягом болтів шинних з'єднань на зовнішніх контактах з боку низької напруги. Також в масляних трансформаторах відсутній зв'язок масла із зовнішнім середовищем, що виключає зволоження.

В масляних трансформаторах струму часткові розряди теоретично можуть виникнути при наявності мікропухирців повітря десь в паперово-масляній ізоляції, але за допомогою технології вакуумування при підготовці та заливці масла, дані трансформатори мають переваги з поміж інших. Також масляні трансформатори вирізняються високою надійністю та малою ймовірністю відказів.

Було обрано для проектування трансформатор струму на напругу 220 кВ, який має дві обмотки первинну і вторинну, що мають ланкову конструкцію, тобто первинна обмотка протягується крізь вікно вторинної. Зазвичай струмоведучі елементи виготовляються у вигляді шин прямокутного, квадратного, круглого перерізу, у вигляді труби, фасонного профілю. Також

обмотки можуть виготовлятися з багатожильних проводів. Для первинної обмотки трансформатора струму на 220 кВ використовуються три шини з алюмінію 12х40 мм виготовлені за допомогою прокату. Найчастіше для первинної обмотки використовуються шини з міді, однак алюмінієві шини дозволяють зменшити масу обмотки порівняно з мідними, а також скоротити матеріальні витрати у зв'язку з тим, що алюміній дешевший за мідь. Кінці шини пролуджуються припоєм П250 АМ ТУ ОВБ. 501. 002-76, вони мають по чотири отвори для з'єднання шин між собою.

У якості ізоляції використовується електроізоляційний картон, бавовняна стрічка ПЭ-30-46 х/б, папір трансформаторний ТВ-120-750. Головна ізоляція – чисто паперово-масляна, виконується намотуванням великої кількості шарів саме трансформаторного паперу ТВ-120 з наступним сушінням та просочуванням трансформаторним маслом.

Для вирівнювання електромагнітного поля в трансформаторі накладається екран з фольги ДПРХМ 0,02х90-НД-АБ між шарами ізоляції трансформаторного паперу накладання ізоляції трансформаторним папером виконується з перекриттям 1/2 ширини стрічки для того, щоб повністю виключити її пробій.

Ізольована первинна обмотка стягується дерев'яною колодкою. Бандаж виконується лакострічкою.

Трансформатор призначений для експлуатації в районах з помірним кліматом.

ТС на 220 кВ належить до трансформаторів струму ланкового типу з'єднання обмоток з паперово-масляною ізоляцією. На відміну від інших цей трансформатор має чотири вторинні обмотки, три з яких призначені для захисту, одна – для вимірювань. Для того, щоб збільшити відстань у маслі від первинної обмотки до заземленого цоколя, стійка, на якій закріплено комплект вторинних обмоток, має більшу довжину, а вторинні обмотки розташовані ближче до середини покришки. У зв'язку з цим покришку виконують циліндричною, що спрощує її конструкцію і дозволяє уніфікувати її кріплення до цоколя та маслорозширника. Маслорозширник виконаний у вигляді металевої конструкції,

яка представляє собою силумінову відливку. На стінках маслорозширника закріплені маслопоказчик та затискачі первинної обмотки. Зовнішня частина затискача служить для під'єднання струмоведучих шин, а внутрішня за допомогою хомутів – для під'єднання початку і кінця первинної обмотки. Затискачі первинної обмотки потовщені у місці проходу крізь стінку маслорозширника, причому один з них ізольований від маслорозширника, а інших електрично поєднаний з ним. На кришці трансформатора поміщено повітроосушувач з силікогелевим наповненням для очищення від пилу повітря, що поступає у трансформатор.

Для підвищення напруги корони і більш рівномірного розподілення напруги по висоті покришки в нижній маслорозширника встановлене екранне кільце, а також захисна арматура, що є на цоколі.

Опорою трансформатора є цоколь. Кріплення покришки, що є зовнішньою ізоляцією трансформатора, до цоколя – механічне. З'єднання ущільнюються гумовими прокладками.

Трансформатор має фарфорову покришку, яка має такі переваги як, стійкість до кліматичних умов (перепад температур, велика кількість забрудненості), які є актуальними в наш час.

1.3 Конструктивно – технологічні особливості вторинної обмотки

Вторинна обмотка виготовляється з одножильного мідного провoda марки ПЭБД діаметром 1,25 мм при вторинному струмі 1А. У тих випадках, коли трансформатор струму працює при підвищеній температурі навколишнього повітря, діаметр провoda вторинної обмотки трохи збільшують.

Вторинна обмотка намотується на попередньо ізолюваний магнітопровід. Число витків вторинної обмотки не розміщується по окружності в один шар, тобто вона укладається в чотири шари, причому один шар обмотки відокремлюється від іншого ізоляційною стрічкою, що намотується з перекриттям $\frac{1}{2}$ ширини. Верхній ряд обмотки розподіляється рівномірно по окружності магнітопровoda й обмотується одним-двома шарами ізоляційної стрічки.

Вивідні кінці вторинної обмотки виконуються із гнучкого мідного провoda марки ПЭБД з діаметром 2,12 мм. Вивідні кінці припаюються до вторинної обмотки мідно-фосфористим припоєм марки ПМФ-7.

В якості магнітопровoda застосовується аморфний матеріал, а саме аморфна сталь 5БДСР 513. В аналогах магнітопровід трансформаторів струму з масляною ізоляцією виготовляють з тонколистової електротехнічної сталі марки 3405 (анізотропна холоднокатана електротехнічна сталь). Ця сталь виготовляється у вигляді рулонів, листів або різаної стрічки.

Слід лише зазначити, що удари, струси й механічні напруги (наклеп), яким неминуче піддається аморфна сталь при транспортуванні й обробці (штампуванню, різанню й навивці), приводять до часткового порушення структури сталі, а отже до погіршення її магнітних властивостей. Порушена структура сталі може бути відновлена спеціальним відпалом магнітопровoda. Тому всі магнітопроводи трансформатора струму піддаються відпалу.

Порівняльна характеристика аморфних сплавів відображена в таблиці 1.3, а магнітні характеристики магнітопроводів із сплавів 82К3ХСР та 5БДСР в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Типові характеристики намагнічування аморфних сплавів типу “В” – 5БДСР, 825БДСР та 84КХСР

Марка H,(А/м)	B,(Тл)			μ		
	5БДСР	82К3ХСР	84КХСР	5БДСР	82К3ХС	84КХСР
0,02	0,001	0,0005	0,0005	42000	75000	28000
0,04	0,002	0,001	0,001	42032	80000	28782
0,1	0,006	0,004	0,004	48636	90000	29371
0,15	0,01	0,006	0,006	54741	120000	31275
0,2	0,015	0,008	0,008	61779	200000	33740
0,3	0,031	0,015	0,015	82423	300000	39195
0,5	0,086	0,034	0,034	137506	450000	54408
0,7	0,17	0,072	0,072	204345	350000	81851
1	0,368	0,168	0,168	294028	260000	134084
1,5	0,684	0,333	0,338	364002	180000	177521
2	0,892	0,465	0,465	356865	140000	185772
3	1,059	0,562	0,562	282007	95000	149508
5	1,154	0,631	0,631	184286	60000	100596
10	1,239	0,688	0,688	98833	30000	54888

Таблиця 1.3 – Магнітні характеристики магнітопроводів із сплавів 82К3ХСР та 5БДСР

Марка магніто- проводу	магнітна проникність при напрузі магніт- ного поля 0,08А/м		магнітна проникність при напрузі магніт- ного поля 0,1 А/м		магнітна індукція при напрузі магнітного поля 800 А/м, Тл	магнітна проникність при частоті 1000 Гц, не менш	
	Гс/Е	мГн/м	Гс/Е	мГн/м		Гс/Е	мГн/м
82В	100000	125,6	—	—	0,42	80000	100,5
5В	—	—	60000	75,4	1,2	50000	62,8

По конструкції магнітопровід трансформатора струму з масляною ізоляцією на напругу 220 кВ спіральний.

При роботі трансформаторів струму магнітопровід трохи нагрівається. Охолодження магнітопроводів здійснюється за рахунок природної віддачі теплоти в навколишній простір через ізоляцію магнітопроводу й вторинну обмотку.

Магнітопровід заземлюється за допомогою приварювання до нього спеціального заземлюючого провідника або яким-небудь іншим способом.

1.4 Випробування стійкості магнітопроводів до механічних і кліматичних впливів

Випробування магнітопроводів на міцність при падінні здійснюють наступним чином: магнітопровід розміщується над твердою поверхнею (наприклад бетонною підлогою) на висоті 0.3 м, після чого його скидають, потім проводиться зовнішній огляд магнітопроводу і визначається магнітних параметрів.

Випробування вібраційної міцності магнітопроводів проводять на вібраційному стенді. Магнітопроводи зміцнюються на столі вібростенда по черзі в горизонтальному і вертикальному положення щодо осі магнітопроводу і піддаються впливу вібрацій методом фіксованих частот. Зміна частоти вібрацій виробляти в одному напрямів від 10 Гц до 50 Гц із кратністю 10 Гц, прискорення 39 м/с². На кожній з фіксованих частот проводити вібрацію протягом 1 хвилини. Загальний час вібрації в горизонтальному і вертикальному положення - по 1 годині. Після випробування на віброміцність проводиться зовнішній огляд магнітопроводів і визначення магнітних параметрів.

Випробування теплотривкості проводять в камері тепла таким чином: магнітопроводи поміщають в камеру тепла і підвищують температуру до 80 °С. При цій температурі магнітопроводи витримуються не менш 2 годин. Після витримки магнітопроводи витягують з камери тепла і протягом часу не більше 5 хвилин проводять визначення магнітних параметрів.

Випробування холодовитривалості магнітопроводів проводять в камері холоду. Магнітопроводи поміщають в камеру. Після цього в камері встановлюють температуру - 50 °С. При цій температурі магнітопроводи витримуються не менш

двох годин. Після витримки магнітопроводи витягують з камери і протягом часу

не більше п'яти хвилин проводять визначення магнітних параметрів.

Потім магнітопроводи поміщають в камеру холоду з температурою - 60 °С і витримуються протягом двох годин. Після закінчення часу витримки, температуру в камері підвищують до нормальної, магнітопроводи витягують з камери і після витримки в нормальних кліматичних умовах не менш чотирьох годин проводять визначення магнітних параметрів.

Випробування магнітопроводів на вплив підвищеної відносної вологості повітря проводять в камері вологи, в якій встановлений режим:

- відносна вологість 98 %;
- температура 25 °С.

Магнітопроводи поміщають в камеру і витримують протягом 48 годин. По закінченні витримки магнітопроводи витягують з камери, витримують в нормальних кліматичних умовах 30 хвилин і проводять визначення магнітних параметрів.

Після кожного виду випробування, магнітні властивості повинні відповідати вимогам технічних умов.

На рисунках 1.4 – 1.6 зображена залежність магнітної індукції від напруженості.

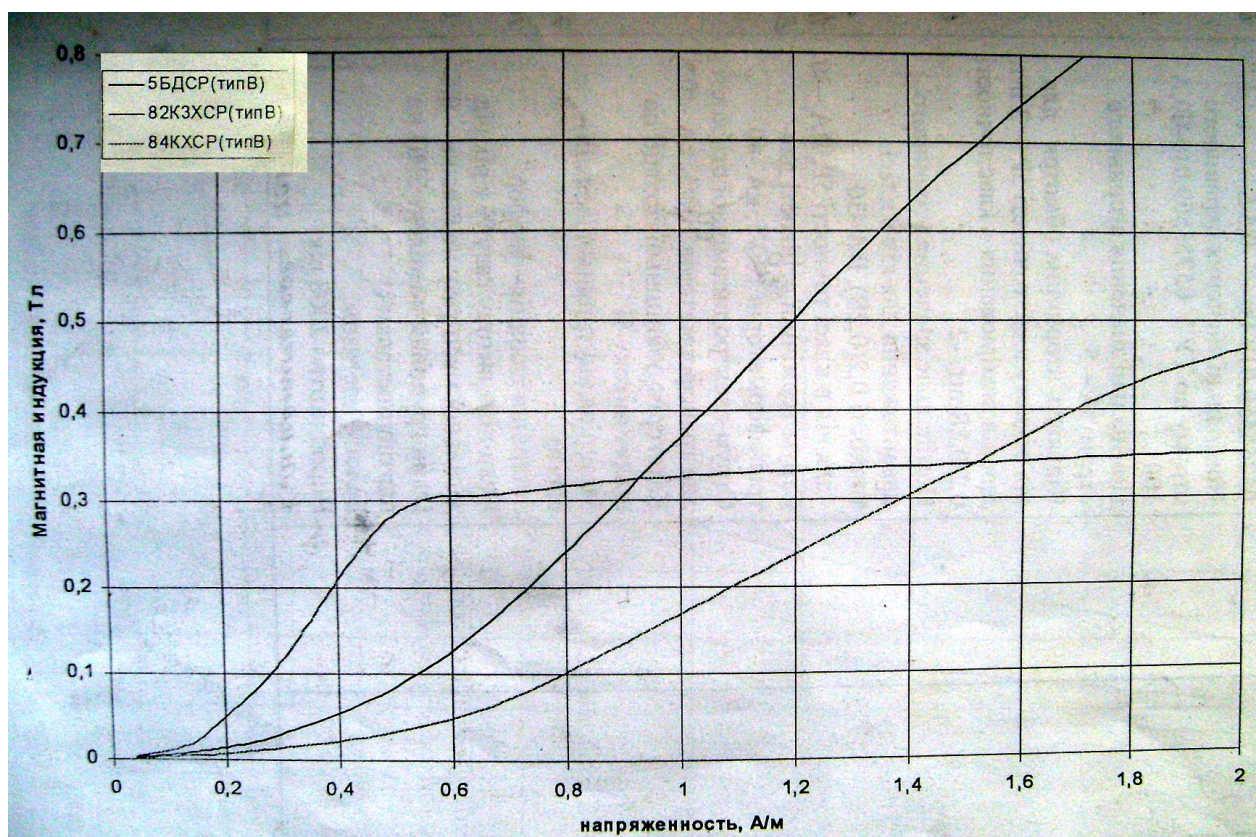


Рисунок 1.4 – залежність магнітної індукції від напруженості для аморфних сплавів типу “В” – 5БДСР, 825БДСР та 84КХСР

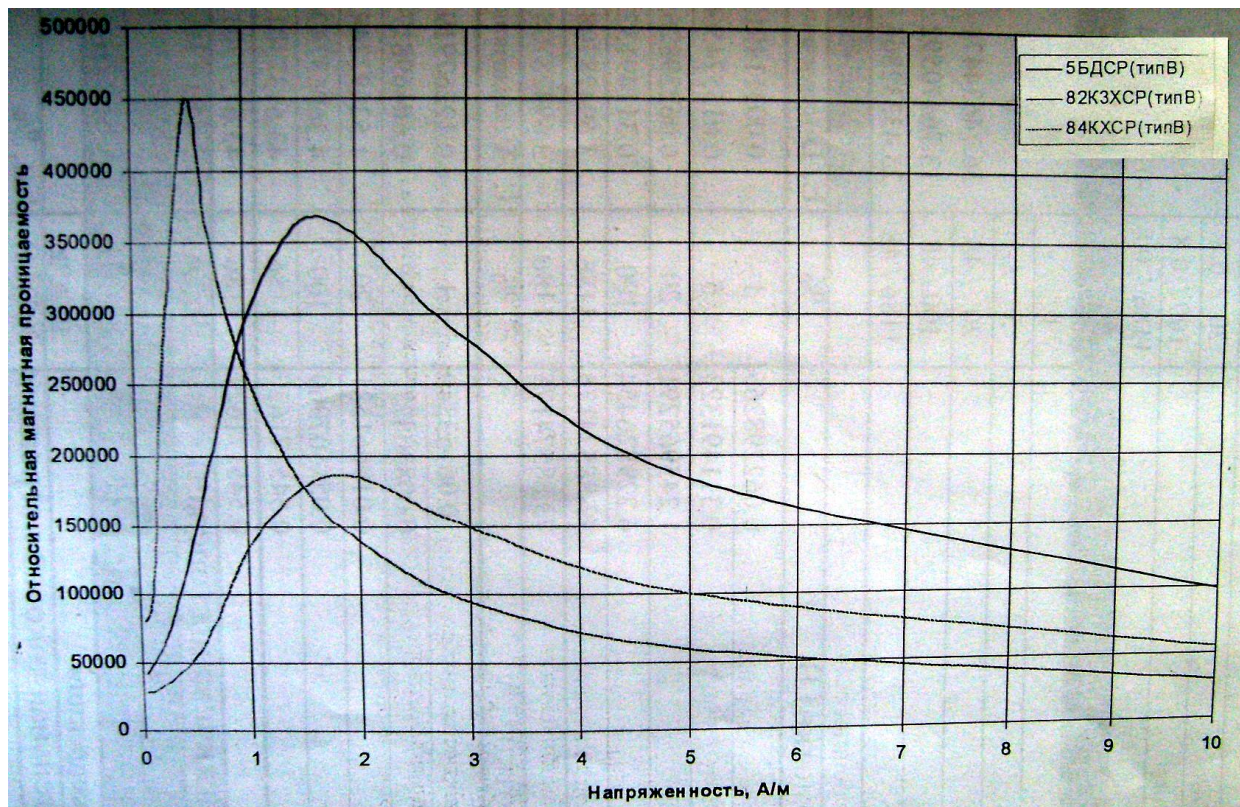


Рисунок 1.5 – залежність магнітної індукції від напруженості для аморфних сплавів типу “В” – 5БДСР, 825БДСР та 84КХСР

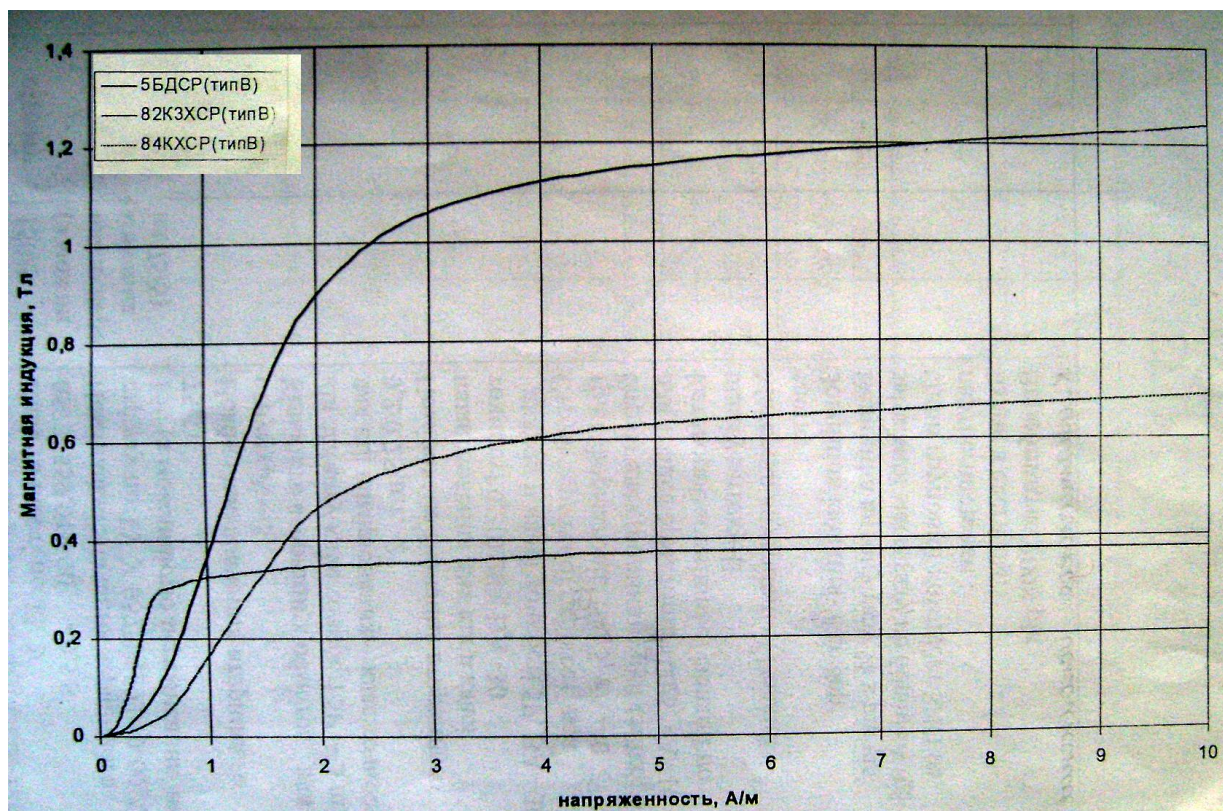


Рисунок 1.6 – Залежність магнітної індукції від напруженості аморфних сплавів типу “В” – 5БДСР, 825БДСР та 84КХСР

1.5 Технічне завдання

1.5.1 Найменування розробки

Трансформатор струму на напругу 220 кВ, 1200/1А з паперово-масляною ізоляцією.

1.5.2 Мета розробки та призначення виробу

Метою розробки являється створення трансформатору струму на напругу 220 кВ з паперово-масляною ізоляцією, який володіє підвищеною надійністю в експлуатації, який являється пожеже та вибухобезпечним для потреб народного господарства.

Трансформатори струму застосовують при вимірі великих класів, тоді коли безпосереднє включення приладів на повний струм електричного ланцюга стає неможливим.

1.5.3 Технічні вимоги

Трансформатор струму повинен відповідати ДСТУ EN 61869-1:2017 та ДСТУ EN 61869-2:2017. Висота над рівнем моря не більше 1000 метрів. Температура повітря повинна відповідати ДСТУ EN 60721.

Конструктивні умови повинні відповідати по габаритам не більше 2830 x 880 та масі 1900 кг.

Механічні фактори повинні бути в межах ДСТУ EN 60068

Умови зберігання ТС по ДСТУ EN 61869-1:2017.

Фарфорові ребра виготовляються з капельницями, які виключають зволоження внутрішньої частини ливневого доща. Вважалося, що такий дощ знижує електричну міцність ізоляторів, але дослідження показали що це не так, навіть такі дощі сприяють самоочищенню поверхні ізоляторів від забрудників. Отже, для збільшення електричної міцності ізоляторів при надзвичайних зволоженнях (росою, туманом моросящим дощем) вся поверхня ізолятора повинна бути доступна дощу.

Таким чином, вся зовнішня високовольтна ізоляція комутаційних апаратів в перспективі повинна бути замінена на полімерну, що забезпечить значне збільшення надійності їхньої роботи, а також на зменшення маси та вартості апаратів. Що стосується внутрішньої ізоляції, то тут безперечно перевага за трансформаторним маслом.

Основні параметри та характеристики ТС зображені в таблиці 1.4

Таблиця 1.4 – Основні параметри та характеристики трансформатора струму

Параметр	Значення
Номинальна напруга, кВ	220
Первинний номінальний струм, А	1200
Вторинний номінальний струм, А	1
Вторинне номінальне навантаження, ВА для вимір.обмотки	30
Вторинне номінальне навантаження, ВА для захисн. обмотки	50
Струм короткого замикання, кА	63
Час дії струму короткого замикання, с	3
Частота струму мережі, Гц	50
Питома довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції, см/кВ	2,25
Коефіцієнт потужності,	0,8
Найбільша робоча напруга, Кв	252
Клас точності вторинних обмоток :	
- для вимірювання	0,2
- для захисту	10Р

2 ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК

2.1 Розрахунок параметрів первинної обмотки трансформатора струму

Обмотка прораховується на один первинний струм 1200 А. У якості матеріалу обмотки використовується алюміній.

Спочатку визначається поперечний переріз струмопровідної частини первинної обмотки за формулою:

$$q_1 = I_{1\text{ном.}}/j, \quad (2.1)$$

де q_1 – значення площі поперечного перерізу обмотки, мм^2 ;

$I_{1\text{ном.}}$ – первинний струм, А;

j – допустима густина струму, А/мм^2 , (для обмоток з алюмінію $j = 0,9 \text{ А/мм}^2$).

$$q_1 = 1200/0,9 = 1333.$$

За отриманим значенням поперечного перерізу і керуючись стандартами та довідковою літературою, вибирається шинний матеріал, тобто три алюмінієві шини розмірами 12х40 мм загальною площею $q=14,16 \text{ см}^2$.

По значенню рекомендованої МРС первинної обмотки і струму, з розрахунку раціональної конструкції знаходиться кількість витків цієї обмотки:

$$w_1 = F_1/I_{1\text{ном.}}, \quad (2.2)$$

де w_1 – число витків первинної обмотки;

F_1 – магніторухійна сила, А;

$I_{1\text{ном.}}$ – номінальне значення струму первинної обмотки, А.

$$w_1 = 1200/1200 = 1.$$

2.2 Розрахунок ізоляції між обмотками

Трансформатор струму має просту паперово-масляну ізоляцію, відповідно до цього умовний робочий максимальний градієнт напруги приймається $E_{\max} = 4$ кВ/мм.

По значенню номінальної напруги ТС $U_{\text{ном}} = 220$ кВ визначається найбільша робоча напруга $U_p = 252$ кВ. Приймається два ступені ізоляції.

Знаходиться напруга, на яку має бути прорахована одна ступінь ізоляції ТС:

$$U = U_{\text{пр.}} \cdot k / \sqrt{3} \cdot n, \quad (2.3)$$

де U – напруга, на яку розрахована ступінь ізоляції, кВ;

$U_{\text{пр.}}$ – найбільша робоча напруга, кВ;

k – коефіцієнт запасу, який враховує виробничі відхилення в якості ізоляції, приймається рівним 1,1;

n – кількість ступенів ізоляції.

$$U = 252 \cdot 1,15 / \sqrt{3} \cdot 2 = 83,66.$$

Надалі прораховується внутрішній радіус ізоляції :

$$r = \sqrt{(a/2)^2 + (b/2)^2}, \quad (2.4)$$

де r – радіус внутрішнього циліндру;

a, b – розміри шини, мм.

$$r = \sqrt{(36/2)^2 + (40/2)^2} = 27.$$

Користуючись виразом для знаходження максимального градієнта, знаходиться радіус зовнішнього циліндра ізоляції

$$E_r = U/r \cdot \ln (R/r) , \quad (2.5)$$

де E_r – прийняте значення максимального градієнта напруги, кВ/мм;

U – напруга, що припадає на одну ступінь ізоляції, кВ;

R – радіус зовнішнього циліндру, мм (рисунок 2.1).

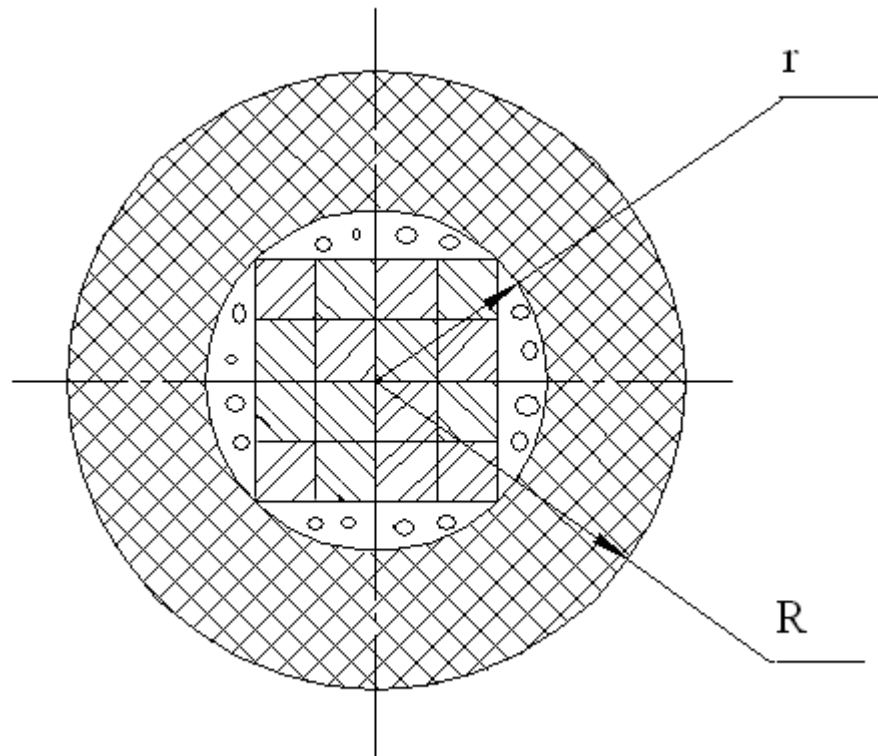


Рисунок 2.1 – Переріз первинної обмотки

З наведеного вище виразу виходить, що:

$$R = r \cdot e^A , \quad (2.6)$$

де A – показник ступені.

$$A = 83,66/4 \cdot 27 = 0,775$$

$$R = 27 \cdot e^{0,775} = 58,58.$$

R приймається 59 мм.

Знаючи внутрішній радіус r і зовнішній R , знаходять товщину ізоляції первинної обмотки:

$$\Delta_1 = R - r, \quad (2.7)$$

де Δ_1 – товщина ізоляції первинної обмотки, мм.

$$\Delta_1 = 59 - 27 = 32.$$

2.3 Розрахунок електротермічної стійкості

Термічна стійкість апарату – це його властивість видержувати короткочасні теплові дії струму короткого замикання. Ця властивість характеризується номінальним струмом термічної стійкості при заданих значеннях часу термічної стійкості. При цьому температура струмопровідних частин апарату в кінці короткого замикання при цих значеннях струму і часу може бути вище допустимої температури номінального режиму роботи.

Густина струму знаходиться за формулою:

$$j_{т.с.} = I_{т.с.}/q_1, \quad (2.8)$$

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

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

q_1 – площа поперечного перерізу первинної обмотки, мм².

$$j_{т.с.} = 63000/1416 = 44,49.$$

Знаючи густину струму знаходять значення інтегралу правої частини при верхньому та нижньому ліміту інтегрування $A_{Q\ k.} - A_{Q\ ном.}$:

$$A_{Q\ k.} - A_{Q\ ном.} = j^2 \cdot t. \quad (2.9)$$

$$A_{Q\ k.} - A_{Q\ ном.} = 44,49^2 \cdot 3 = 5938.$$

Після чого знаходимо значення теплового імпульсу:

$$A_{\text{к.з.}} = j^2 \cdot t + A_{Q \text{ ном.}} \quad (2.10)$$

$$A_{\text{к.з.}} = 44,49^2 \cdot 3 + = 7654.$$

Температура ТС в довготривалому сталому режимі роботи не повинна перевищувати 90 °С. Відповідне значення цієї температури $j^2 \cdot t$ знаходиться по графічній залежності $\theta = f(j^2 \cdot t)$ для алюмінію і становить 0,65

Для знаходження температури первинної обмотки ТС в режимі короткого замикання потрібно знайти суму:

$$\Sigma A = A_{Q \text{ к.}} - A_{Q \text{ ном.}} + A_{\text{к.з.}}, \quad (2.11)$$

$$\Sigma A = 0,76 + 0,59 = 1,35$$

За допомогою графіка визначається відповідна температура, що становить 230°С. Вона не перевищує допустимої 250°С для алюмінію зі шаром ізоляції, тобто обмотка електротермічно стійка.

Для надійної роботи трансформатора необхідно розрахувати температуру нагріву виводу та за допомогою графіку визначити її:

$$\delta = 53000/2460 = 21,5 \text{ A/мм}^2;$$

$$(\delta^2 t)_{\text{кз}} = 21,5^2 \cdot 3 = 0,1395 \cdot 10^4 \text{ (A/мм}^2\text{) с};$$

$$(\delta^2 t)_0 = 0,33 \cdot 10^4 \text{ (A/мм}^2\text{) с};$$

$$(\delta^2 t)_t = 0,1395 \cdot 10^4 + 0,33 \cdot 10^4 \text{ (A/мм}^2\text{) с}$$

$$\theta = 140^\circ$$

Значення входить в межу допустимого, так як максимально припустима температура для виводу $\theta = 160^\circ$.

2.4 Розрахунок електродинамічної стійкості

Динамічною стійкістю ТС називається його властивість протидіяти механічним діям струмам короткого замикання, який проходить в його первинній обмотці. Електродинамічні сили, що з'являються в контурі первинної обмотки ТС при проходженні струму короткого замикання, визначаються в залежності від форми первинної обмотки. Обмотка має U- подібну форму (рисунок 2), вона поділяється на ряд ділянок (тобто дві), для яких і знаходяться електродинамічні сили. Шина має такі розміри : $L = 1825$ мм, $l = 1520$ мм, $a = 220$ мм, $R = 240$ мм.

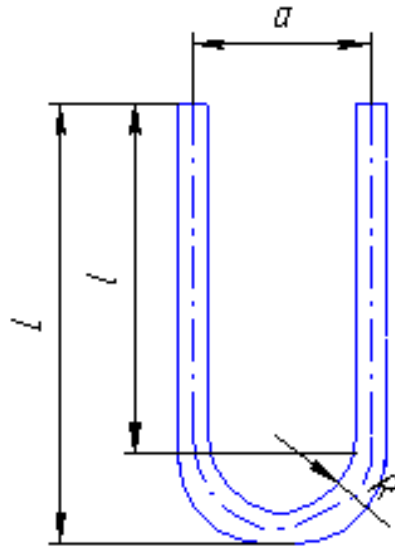


Рисунок 2.2 – Ескіз шини

Обмотка поділяється на прямолінійну та кільцеву ділянки.

Електродинамічна сила на прямолінійній ділянці визначається за формулою:

$$P_1 = 10^{-7} \cdot i_{уд}^2 l / a, \quad (2.12)$$

де P_1 - електромеханічна сила, що діє на прямолінійній ділянці, Н ;

$i_{уд}^2$ – значення струму короткого замикання в момент його появи, А ;

l – довжина обмотки на прямолінійній ділянці, м ;

a – відстань між осями прямолінійних частин обмотки, м

$$i_{уд} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 63000 = 160372.$$

$$P_1 = 10^{-7} \cdot 160372^2 \cdot 1,52 / 0,22 = 17769,6.$$

Далі прораховується згинаючий момент на прямолінійній ділянці за формулою:

$$M_3 = P_1 \cdot l / 4, \quad (2.13)$$

де M_3 – згинаючий момент, що діє на обмотку, Н · м

$$M_3 = 17769,6 \cdot 1,52 / 4 = 6752.$$

Щоб перевірити міцність розглянутої частини обмотки визначається момент опору перерізу провідника (шини) обмотки

$$W = b \cdot h^2 / 6, \quad (2.14)$$

де W – момент опору перерізу трьох шин при закріпленні плазом, м³ ;

b, h – розміри шин, м .

$$W = (0,04 \cdot 0,0036^2) / 6 = 8,64 \cdot 10^{-6}.$$

Рівняння міцності має вигляд :

$$M_3 \leq \sigma_3 \cdot W, \quad (2.15)$$

де σ_3 – допустима напруга на згинання для матеріалу провідника при короткочасних навантаженнях , Па (для алюмінію 70 МПа)

$$\sigma_3 = 6752 / 8,64 \cdot 10^{-6} = 718,5 \cdot 10^{-6}.$$

Умова міцності не виконується тому, що $70 < 781,5$.

Для усунення цього явища в конструкції первинної обмотки застосовуються бандажі.

Зусилля в кільцевій частині обмотки визначаються за допомогою рівняння:

$$P_p = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot W (\ln 8R / a + b) + 0,5, \quad (2.16)$$

де P_p —зусилля, що розвиває кільце обмотки, Н ;

W – кількість витків первинної обмотки ;

R – середній радіус витка обмотки, м ;

a, b – розміри сторін прямокутного провідника обмотки, м

$$P_p = 10^{-7} \cdot 160372^2 \cdot (\ln 8 \cdot 0,24 / 0,04 + 0,036) + 0,5 = 3070.$$

Знаходиться напруга розриву в матеріалі витка первинної обмотки :

$$\sigma_p = P_p / q, \quad (2.17)$$

де σ_p – напруга розриву матеріалу обмотки, Па ;

q – поперечний переріз шини обмотки, м²

$$\sigma_p = 3070 / 0,001416 = 2,17 \cdot 10^6$$

Допустима напруга розриву для алюмінію становить 68,6 МПа. Прорахована напруга на розрив не перевищує цього значення, тобто обмотка в кільцевій частині є електродинамічно стійкою.

2.5 Розрахунок магнітопроводу і параметрів вторинної обмотки

Для розрахунку похибок ТС необхідно знати цілий ряд допоміжних, визначення яких буде розглянуто далі.

На підставі заданого коефіцієнта трансформації знаходиться номінальне значення витків вторинної обмотки:

$$w_{2\text{ном.}} = I_{1\text{ ном.}} \cdot w_1 / I_{2\text{ном.}}, \quad (2.18)$$

де $w_{2\text{ном.}}$ – номінальне значення витків вторинної обмотки;

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

$$w_{2\text{ном.}} = 1200 \cdot 1 / 1 = 1200.$$

Поперечний переріз проводу вторинної обмотки знаходиться, керуючись формулою густини струму:

$$q_2 = I_{2\text{ном.}} / j_2, \quad (2.19)$$

де q_2 – площа поперечного перерізу проводу вторинної обмотки, мм²;

j_2 – густина струму для вторинних обмоток, А/мм², приймається 1,95 А/мм².

$$q_2 = 1200 / 1,95 = 615,38.$$

Відповідно до поперечного перерізу, обирається провід ПЕЛО площею поперечного перерізу $q=0,567$ мм², що дає діаметр без ізоляції 0,85 і з ізоляцією 1 мм.

Внутрішній діаметр магніто проводу визначається по формулі:

$$d_b = d_{\text{ш}} + 2 \cdot h + 16 \cdot d_{\text{пр}} + 2 \cdot h_{\text{із.м.}} + 2 \cdot \Delta, \quad (2.20)$$

де d_b – внутрішній діаметр магнітопроводу, м;

$d_{ш}$ – діаметр шини первинної обмотки (струмопровідна частина), м;

h – товщина ізоляції між первинною і вторинною обмотками, м;

$d_{пр}$ – діаметр проводу вторинної обмотки з ізоляцією, м;

$h_{із.м.}$ – товщина ізоляції магнітопроводу, м;

Δ – технологічний зазор між первинною і вторинною обмотками, м;

приймається $15 \cdot 10^{-3}$ м.

$$d_b = 0,054 + 2 \cdot 2 \cdot 0,032 + 16 \cdot 0,001 + 2 \cdot 0,001 + 2 \cdot 0,015 = 0,230.$$

Далі прораховується поперечний переріз магнітопроводу :

$$Q = 0,225 \cdot I_{2ном.} \cdot Z_{2ном.} / f \cdot w_{2ном.} \cdot B_{max} \cdot \eta , \quad (2.21)$$

де Q – поперечний переріз магнітопроводу, m^2 ;

$I_{2ном.}$ – номінальний вторинний струм, А;

$Z_{2ном.}$ – номінальне вторинне навантаження, Ом;

f – частота струму, Гц;

$w_{2ном.}$ – номінальне число витків вторинної обмотки;

B_{max} – амплітудне значення індукції, Тл; приймається 0,05 Тл;

η – коефіцієнт заповнення перерізу сталлю, приймається рівним 0,95.

Для вимірювальної обмотки :

$$Q = 0,225 \cdot 1 \cdot 30 / 50 \cdot 1200 \cdot 0,08 \cdot 0,95 = 0,0015.$$

Надалі розрахунки ведуться для вимірювальної обмотки:

Після визначення поперечного перерізу магнітопроводу прораховується його зовнішній діаметр:

$$d_3 = (2 \cdot Q / h_M) + d_B + \Delta_B, \quad (2.22)$$

де d_3 – зовнішній діаметр магнітопроводу, м;

h_M – висота магнітопроводу, м;

d_B – внутрішній діаметр магнітопроводу, м;

Δ_B – допуск на внутрішній діаметр магнітопроводу, приймається 0,0035 м.

$$d_3 = (2 \cdot 0,0015 / 0,05) + 0,23 + 0,0035 = 0,293$$

Середня довжина магнітного шляху магнітопроводу кільцевої форми знаходиться по формулі:

$$l_M = \pi \cdot (d_3 + d_B) / 2, \quad (2.23)$$

де l_M – довжина магнітного шляху, м.

$$l_M = 3,14 \cdot (0,293 + 0,23) / 2 = 0,82.$$

Маса сталі, яка необхідна для виготовлення магнітопроводу:

$$M = Q \cdot l_M \cdot \gamma \cdot \eta, \quad (2.24)$$

де M – маса сталі, кг;

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

$$M = 0,0015 \cdot 0,82 \cdot 7650 \cdot 0,95 = 8,95.$$

При рівномірному розміщенні витків по периметру магнітопроводу довжину намотки по магнітопроводу знаходять так:

$$l = \pi \cdot (d_v - 2 \cdot h_{iz.m.}) , \quad (2.25)$$

де l – довжина намотки, м;

d_v – внутрішній діаметр магнітопроводу, м;

$h_{iz.m.}$ – товщина ізоляції магнітопроводу, м.

$$l = 3,14 \cdot (0,23 - 2 \cdot 0,001) = 0,716.$$

Далі прораховується кількість витків, які можливо розмістити на цій довжині:

$$w_2^1 = l \cdot k_y / d_{пр} , \quad (2.26)$$

де w_2^1 – можлива кількість витків;

k_y – коефіцієнт якості укладки проводу вторинної обмотки, приймається рівним 0,95

$d_{пр}$ – діаметр проводу з ізоляцією, м.

$$w_2^1 = 0,716 \cdot 0,95 / 0,001 = 680$$

Так як $w_{21} < w_2$ ($680 < 1200$), тобто провід вторинної обмотки розміщується на магнітопроводі в декілька шарів, число яких знаходиться за формулою:

$$m = w_{2ном.} / w_2^1 , \quad (2.27)$$

$$m = 1200 / 680 = 1,76.$$

Приймається 2 шари, провід другого шару розміщується рівномірно по магнітопроводу.

Середня довжина проводу витка вторинної обмотки може бути знайдена у відповідності з розмірами перерізу магнітопровода, або за формулою:

$$l_2 = d_3 - d_b + 2 \cdot h_m + 4 \cdot k \cdot d_{пр.} + 0,012 , \quad (2.28)$$

де l_2 – середня довжина витка проводу, м;

h_m – висота магнітопровода, м;

k – коефіцієнт, який для двохслойної обмотки дорівнює 2,25.

$$l_2 = 0,293 - 0,23 + 2 \cdot 0,05 + 4 \cdot 2,25 \cdot 0,001 + 0,012 = 0,184.$$

Після цього можливо знайти активний та індуктивний опір вторинної обмотки.

Активний опір вторинної обмотки з урахуванням нагріву:

$$r_2 = \rho_\theta \cdot l_2 \cdot w_{2ном.} / q_2 , \quad (2.29)$$

де r_2 – значення активного опору, Ом;

ρ_θ – питомий опір проводу вторинної обмотки з урахуванням нагріву, Ом·м;
становить $1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом ·м

q_2 – площа перерізу проводу вторинної обмотки, м².

$$r_2 = 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,184 \cdot 1200 / 0,567 \cdot 10^{-6} = 10,2.$$

Індуктивний опір вторинної обмотки при її рівномірному розміщенні по магнітопроводу рівняється нулю.

Активний опір навантаження вторинної обмотки знаходиться:

$$r_{2н} = Z_{2ном.} \cdot \cos \varphi_2 , \quad (2.30)$$

де $r_{2н}$ – активний опір навантаження, Ом;

$z_{2\text{ном.}}$ – номінальне навантаження вторинної обмотки, Ом.

$$r_{2\text{н}} = 30 \cdot 0,8 = 24.$$

Індуктивний опір навантаження:

$$x_{2\text{н}} = z_{2\text{ном.}} \cdot \sin \varphi_2, \quad (2.31)$$

де $x_{2\text{н}}$ - індуктивний опір навантаження, Ом

$$x_{2\text{н}} = 30 \cdot 0,6 = 18.$$

Повний опір вторинної обмотки і навантаження:

$$z_{2\text{п}} = \sqrt{(r_2 + r_{2\text{н}})^2 + (x_2 + x_{2\text{н}})^2}, \quad (2.32)$$

де $z_{2\text{п}}$ – повний опір вторинної обмотки, Ом.

$$z_{2\text{п}} = \sqrt{(10,2 + 24)^2 + (0 + 18)^2} = 38,65.$$

Кут зсуву фаз між вторинним струмом I_2 і вторинною ЕРС E_2 знаходиться по формулі:

$$\alpha = \arctg [(x_2 + x_{2\text{н}})/(r_2 + r_{2\text{н}})], \quad (2.33)$$

$$\alpha = \arctg [(18/(10,2 + 24))] = 27,75^\circ.$$

2.6 Розрахунок похибок трансформатора струму

Дійсне значення вторинного струму завжди має відхилення від номінального значення, так як мають місце втрати енергії в самому трансформаторі.

Розрізняють похибку по струму і по куту.

Розрахунок похибок ТС на практиці проводять для двох найбільш важких режимів роботи:

- для 5% первинного струму і 100% вторинного навантаження для гірших сортів сталі.

- для 120% первинного струму і 25% вторинного навантаження при кращих сортах сталі.

В першому будемо мати найбільшу мінусову, а в другому – найбільшу плюсову похибки.

Похибки також прораховуються для вимірювальної та захисної обмоток. Їх розрахунок ведеться у наступній послідовності.

В якості магнітопроводу застосовується аморфний матеріал, а саме аморфна сталь 5БДСР 513. Ця сталь має такі переваги :

- поряд з високою міцністю вони характеризуються гарною пластичністю при стискуванні (до 50%) та вигині;

- сплав має міцність при розтягуванні $\sigma_B=2000$ МПа, модуль Юнга $E=15104$ МПа, щільність 8 г/см^3 , електроопір $0,9 \text{ Ом-мм}^2/\text{м}$, межа витривалості при вигині близько 800 МПа на базі 10^7 циклів;

- аморфні високовуглецеві сплави, Ст, що містять, Мо, W, володіють високим опором руйнування і термічною стабільністю: наприклад, сплав $\text{Fe}_{54}\text{Cr}_{16}\text{Mo}_{12}\text{C}_{18}$ має межу міцності при розтягуванні 3800 МПа і температуру кристалізації 880K ;

- високовуглецеві сплави мають високі корозійні характеристики і не чутливі до руйнування при старінні;

- втрати в сердечниках з розробленого в Японії аморфного сплаву $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$ приблизно в 20 разів нижче, ніж в текстурованих листах трансформаторної сталі. Економія за рахунок зниження гістерезисних втрат енергії при використанні сплаву $\text{Fe}_{83}\text{b}_{15}\text{si}_2$ замість трансформаторних сталей складе лише в США 300 млн дол/рік. Ця сфера застосування металевих стекол має хорошу перспективу.

- їх можна розрізати і згинати для здобуття необхідної форми, не знижуючи при цьому їхніх магнітних характеристик;

- Висока магнітна проникність низька коерцетивна сила, висока магнітна індукція насичення, низькі втрати;

- щільність аморфних сплавів лише на 1-2% менше щільності відповідних кристалічних тіл. Металеві стекла мають щільноупаковану структуру, що сильно відрізняється від більш рихлої структури неметалічних стекол з направленими зв'язками;

- чіткий лінійний зв'язок між твердістю і міцністю.

Розрахункові дані:

- провід первинної обмотки - ПЕЛО 8,0x10,8 ТУ ОВЛ 539.005;

- активне січення одного провідника - 69 мм²;

- матеріал провідника первинної обмотки – алюміній;

- січення струмоведучої шпильки виводу – 2460 мм²;

- матеріал виводу – латунь

Знаходиться значення струму в первинній обмотці для першого режиму роботи:

$$I_1 = 0,05 \cdot I_{1\text{ном.}}, \quad (2.34)$$

де I_1 – значення струму первинної обмотки, А.

$$I_1 = 0,05 \cdot 1200 = 60.$$

Знаходиться значення МРС первинної обмотки:

$$F_1 = 0,05 \cdot F_{1\text{ном.}} , \quad (2.35)$$

$$F_1 = 0,05 \cdot 1200 = 60.$$

Струм для вторинної обмотки знаходиться по формулі:

$$I_2 = 0,05 \cdot I_{2\text{ном.}} , \quad (2.36)$$

де I_2 – струм вторинної обмотки в першому режимі, А.

$$I_2 = 0,05 \cdot 1 = 0,05.$$

Знаходиться значення ЕРС вторинної обмотки:

$$E_2 = z_{2\text{п}} \cdot I_2 , \quad (2.37)$$

де E_2 – ЕРС вторинної обмотки, В

$$E_2 = 38,65 \cdot 0,05 = 1,93.$$

Максимальна індукція для цього режиму:

$$B_{\text{max}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot E_2 / w_{2\text{ном.}} \cdot Q , \quad (2.38)$$

де Q – площа поперечного перерізу магнітопроводу, м².

$$B_{\text{max}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,93 / 1200 \cdot 0,0015 = 0,0048.$$

По таблиці для знайденого значення магнітної індукції знаходиться питома МРС намагнічування із сплавів 825БДСР та 84КХСР.

$$F_{o\text{пт}} = f(B_{\max})$$

Для вимірювальної обмотки $F_{o\text{пт}} = 0,5$

Знаючи питому МРС намагнічування знаходиться повне значення МРС:

$$F_o = F_{o\text{пт}} \cdot l_m, \quad (2.39)$$

де $F_{o\text{пт}}$ – питома МРС намагнічування, А/м.

$$F_o = 0,5 \cdot 0,82 = 0,41.$$

По таблиці кута втрат для значення індукції знаходиться значення кута втрат ψ для гірших сортів сталі.

Для даного значення індукції $\psi = 48,02^\circ$.

Проводиться розрахунок номінальної струмової похибки:

$$f_i = \frac{F_o}{F_1} \cdot [\sin(\psi + \alpha)] \cdot 100, \quad (2.40)$$

$$f_i = \frac{0,41}{60} \cdot [\sin(17,5 + 29,75)] \cdot 100 = 5,38.$$

Знаходиться похибка по куту:

$$\sigma = \frac{F_o}{F_1} \cdot [\cos(\psi + \alpha)] \cdot 3440, \quad (2.41)$$

$$\sigma = \frac{0,41}{60} \cdot [\cos(17,5 + 27,75)] \cdot 3440 = 16,46.$$

Розрахунок похибок ТС для другого режиму роботи проводиться у наступній послідовності.

Спочатку прораховується активний опір навантаження для другого режиму роботи ТС, Ом:

$$r_{2H} = 0,25 \cdot z_{2\text{НОМ.}} \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.42)$$

$$r_{2H} = 0,25 \cdot 30 \cdot 0,8 = 6$$

Індуктивний опір навантаження для цього режиму роботи:

$$x_{2H} = 0,25 \cdot z_{2\text{НОМ.}} \cdot \sin \varphi_2 , \quad (2.43)$$

$$x_{2H} = 0,25 \cdot 30 \cdot 0,6 = 4,5.$$

Знаходиться повний опір вторинної обмотки і навантаження з урахуванням умов другого режиму роботи:

$$z_{2\Pi} = \sqrt{(r_2 + r_{2H})^2 + (x_2 + x_{2H})^2} , \quad (2.45)$$

$$z_{2\Pi} = \sqrt{(10,2 + 6)^2 + 4,5^2} = 16,8$$

Кут зсуву фаз між вторинним струмом і вторинною ЕРС знаходиться по формулі:

$$\alpha = \arctg ((x_2 + x_{2H})/(r_2 + r_{2H})) , \quad (2.46)$$

$$\alpha = \arctg ((4,5)/(10,2+6)) = 15,52.$$

Значення струму в первинній обмотці для другого режиму роботи знаходиться з виразу:

$$I_1 = 1,2 \cdot I_{1\text{НОМ.}} , \quad (2.47)$$

де I_1 – значення струму первинної обмотки, А.

$$I_1 = 1,2 \cdot 1200 = 1440.$$

Знаходиться значення МРС первинної обмотки:

$$F_1 = 1,2 \cdot F_{1\text{ном.}}, \quad (2.48)$$

$$F_1 = 1,2 \cdot 1200 = 1440.$$

Струм вторинної обмотки в другому режимі роботи знаходиться так:

$$I_2 = 1,2 \cdot I_{2\text{ном.}}, \quad (2.49)$$

де I_2 – струм вторинної обмотки в першому режимі, А.

$$I_2 = 1,2 \cdot 1 = 1,2.$$

Визначається значення ЕРС вторинної обмотки за формулою (2.33):

$$E_2 = 16,8 \cdot 1,2 = 20,16.$$

За (2.15) прораховується значення магнітної індукції:

$$B_{\text{max}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 20,16 / 1200 \cdot 0,0015 = 0,05.$$

По таблиці для знайденого значення магнітної індукції знаходиться питома МРС намагнічування для сплаву 5БДСР.

Для даного значення індукції $F_{\text{о.пт.}} = 1,825$ А/м.

За питомою МРС намагнічування знаходиться повне значення МРС по (2.22):

$$F_{\text{о.}} = 1,83 \cdot 0,82 = 1,5.$$

За (2.23) і (2.24) проводиться розрахунок номінальної струмової похибки за кутом

$$f_i = \frac{1,5}{1440} \cdot [\sin (44+15,52)] \cdot 100 = 0,086.$$

$$\sigma = \frac{1,5}{1440} \cdot [\cos (44+15,52)] \cdot 3440 = 1,74.$$

$$\sigma = \frac{7,64}{1440} \cdot [\cos (68,5+23,62)] \cdot 3440 = -0,67.$$

Значення струмової похибки та похибки за кутом, що отримані в результаті розрахунку двох найтяжчих режимів роботи трансформатора струму порівняні з граничними табличними значеннями.

Струмова похибка захисної обмотки ТС для першого режиму роботи дещо перевищує допустимі значення, але є можливість скористатися методом компенсування похибок за допомогою відмотки витків вторинної обмотки.

Для цього визначається “ціна” одного витка (значення похибки, яку може внести відмотаний виток обмотки)

$$\Delta f_i = 100 / w_{2\text{ном}} , \quad (2.50)$$

де Δf_i – похибки по струму від одного витка ;

$w_{2\text{ном}}$ – номінальне значення витків вторинної обмотки.

$$\Delta f_i = 100 / 1200 = 0,083$$

з урахуванням відмотаних витків знаходиться дійсне значення струмової похибки.

$$f_{\text{ід}} = F_o / F_1 \cdot [\sin (\psi + \alpha)] \cdot 100 - (\Delta w_2 \cdot 100 / w_{2\text{ном}}) , \quad (2.51.1)$$

де $f_{\text{ід}}$ – дійсне значення струмової похибки після відмотки витків ;

Δw_2 – кількість відмотаних витків вторинної обмотки

$$f_{id} = 3,89 / 60 \cdot [\sin (30,8+32,46)] \cdot 100 - (30 \cdot 0.083) = 0,03.$$

Результати проведених розрахунків виявили, що вимірювальна та захисна обмотка трансформатора струму на $U_{ном} = 220$ кВ відповідає класу точності, заявленими в ДСТУ ГОСТ 7746-2003.

2.7 Розрахунок граничної кратності

Дуже важким для трансформатора струму є режим роботи, коли в первинній обмотці різко підвищується струм. Це відбувається, як правило, при короткому замиканні в електричній мережі. Трансформатор струму повинен забезпечити в цьому випадку надійну роботу релейного захисту, тобто давати вторинний струм, похибка якого не перевищує 5%.

Зважаючи, що кратність первинного і вторинного струмів одна і та ж, із формули для визначення магнітної індукції знаходиться гранична кратність:

$$K_{гр.} = B_{гр.} \cdot f \cdot w_2 \cdot Q / 0,225 \cdot I_{2ном.} \cdot Z_{2п}, \quad (2.51)$$

де $K_{гр.}$ – гранична кратність ;

$B_{гр.}$ –гранична магнітна індукція, Тл (для магнітопроводу кільцевої форми, виготовленого з сплаву типу “В” – 5БДСР методом спіральної навивки складає 2,3 Тл.

$$K_{гр.} = 2,3 \cdot 50 \cdot 1200 \cdot 0,0015 / 0,225 \cdot 1 \cdot 38,65 = 18,62.$$

За прийнятим значенням магнітної індукції $B_{гр.} = 1,8$ Тл, використовуючи залежність $F_{о.пт.} = f(B_{гр.})$ визначається питома МРС, що становить 670 А/м. після цього за (2.36) знаходиться повне значення МРС :

$$F_{o.} = 670 \cdot 0,82 = 549,4.$$

Значення МРС намагнічування первинної обмотки визначається за формулою:

$$F_1 = K_{гр.} \cdot F_{l_{ном.}}, \quad (2.52)$$

$$F_1 = 18,62 \cdot 1200 = 22354,5.$$

Знаючи значення МРС намагнічування первинної обмотки, проводиться розрахунок повної похибки:

$$\varepsilon = 100 \cdot F_0 / F_1, \quad (2.53)$$

$$\varepsilon = 100 \cdot 549,4 / 22354,46 = 2,45.$$

Так як розрахована повна струмова похибка не перевищує 10%, тобто це значення граничної кратності можна прийняти.

2.8 Розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки

Для знаходження напруги на розімкнутих вторинної обмотки необхідно прорахувати значення питомої МРС намагнічування цього режиму роботи трансформатора струму:

$$F_{o.пт.} = F_1 / l_m, \quad (2.54)$$

де l_m – середня довжина магнітного шляху, м.

$$F_{o.пт.} = 1600 / 0,73 = 2192.$$

Використовуючи залежність питомої напруги від питомої МРС намагнічування $E_{пт} = f (F_{о.пт.})$ для сплаву типу “В” – 5БДСР, знаходиться значення питомої напруги.

$$F_{о.пт.} = 1200 / 0,82 = 1463,4.$$

$$E_{пт} = f (F_{о.пт.}) = 2,2 \text{ кВ.}$$

Напруга E_2 на розімкнутих кінцях вторинної обмотки розраховується так:

$$E_2 = E_{пт} \cdot w_2 \cdot Q , \quad (2.55)$$

де $E_{пт}$ – питома напруга, що припадає на один виток вторинної обмотки по відношенню до 1 м^2 поперечного перерізу магнітопроводу, яка індукується в розімкненій вторинній обмотці, кВ/м².

$$E_2 = 2,2 \cdot 1200 \cdot 0,0015 = 3,6.$$

Так як у працюючого ТС напруга вторинної обмотки при розімкнутих її кінцях, як правило перевищує 350 В, то на трансформаторі розміщується попереджувальна табличка: Увага ! Небезпечно ! На розімкнутій обмотці висока напруга !

2.9 Електричний розрахунок зовнішньої ізоляції

Дуже важливо, щоб ізоляція могла довго працювати при найбільших робочих напругах, а також була здатна витримувати без пошкоджень можливі в реальних умовах перенапруги.

Основні електричні вимоги до ізоляції апаратів установлює ДСТУ EN ІЕС 60071-1:2022.

При виконанні розрахунків покритишки ТС визначаються три основні елемента: її висота, число ребер і товщина стінки.

Для проведення розрахунку визначаються розрахункові сухорозрядна, мокророзрядна та імпульсна напруги на основі випробувальних напруг для класу напруги 220 кВ

$$U_p = U_{\text{вип}} \cdot k_1 \cdot k_2 , \quad (2.56)$$

де U_p – розрахункова напруга, кВ ;

$U_{\text{вип}}$ – випробувальна напруга (сухорозрядна, мокророзрядна, імпульсна), що становить відповідно 550, 425, і 950 кВ ;

k_1 – коефіцієнт запасу, що визначає збільшення пробивної напруги по відношенню до випробувальної (становить 1,15) ;

k_2 – конструктивний коефіцієнт запасу, що визначається в залежності від умов роботи, для зовнішніх поверхонь фарфорових ізоляторів у повітрі становить один

$$U_{p.\text{сух.}} = 550 \cdot 1,15 = 632,5.$$

$$U_{p.\text{мокр.}} = 425 \cdot 1,15 = 488,75.$$

$$U_{p.\text{імп.}} = 950 \cdot 1,15 = 1092,5.$$

Далі визначається активна висота покриття:

$$h_{\text{акт.}} = 338,2 - \sqrt{111663 - 143 \cdot U_{p.\text{сух.}}} , \quad (2.57)$$

$$h_{\text{акт}} = 0,167 \cdot U_{p.\text{імп}} , \quad (2.58)$$

де $h_{\text{акт}}$ – активна висота покриття, см

$$h_{\text{акт.}} = 338,2 - \sqrt{111663 - 143 \cdot 632,5} = 201,5.$$

$$h_{\text{акт.}} = 0,167 \cdot 1092,5 = 182,45.$$

$$h_{\text{акт.}} = 0,444 \cdot 488,75 = 217.$$

Активна висота покоришки $h_{\text{акт.}}$ приймається 217 см. Далі визначається загальна довжина шляху втрат напруги по поверхні покоришки:

$$L_{\text{вт.}} = U_{\text{н.р.}} \cdot l_{\text{пт.в.}}, \quad (2.59)$$

де $L_{\text{вт.}}$ – довжина шляху втрат, см ;

$U_{\text{н.р.}}$ – найбільша робоча напруга, кВ (для класу напруги 220 кВ становить 252 кВ) ;

$l_{\text{пт.в.}}$ – питома довжина шляху втрат, кВ/см (при заземленій нейтралі складає 2,25 кВ/см)

$$L_{\text{вт.}} = 252 \cdot 2,25 = 567.$$

Кількість ребер покоришки прораховується за формулою :

$$n = \frac{L_{\text{вт.}} - H_{\text{акт.}}}{l_{\text{вт.}} - h}, \quad (2.60)$$

де n – кількість ребер покоришки ;

$l_{\text{вт.}}$ – довжина шляху виток по ребру, см ;

h – висота ребра, см

$$n = \frac{567 - 217}{23 - 8} = 23,3.$$

Кількість ребер покоришки приймається 24

Товщина фарфорової стінки покоришки обирається 45 мм., а її внутрішній діаметр 700 мм.

Зовнішня форма покоришки має вигляд прямого циліндра, що є простим у виготовленні.

2.10 Розрахунок вітростійкості трансформатора струму

Трансформатори струму великих розмірів приходить розраховувати на вітрове навантаження (рис 2.3).

При цьому перевіряється:

- механічна міцність фарфорової покришки ;
- стійкість трансформатору

Розрахунок проводиться за схемою рисунка 2.3. Необхідні розміри вказані в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Розміри покришки ТС

h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	l	l ₁	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
0,17	0,13	1,39	0,13	0,23	0,66	0,21	0,5	0,61	0,57	0,45	0,37	0,71	0,802

Зусилля від вітрового навантаження визначається за формулою:

$$P = \mathcal{L} \frac{v^2}{1,6} * k * F * \sin Q \quad (2.61)$$

де P – сила вітру на розраховану площу, Н;

$\mathcal{L}$ - коефіцієнт, який враховує нерівність швидкості вітру. Для трансформатору приймається $\mathcal{L} = 1$;

v – швидкість вітру, м/с;

k – аеродинамічний коефіцієнт. Для циліндричних тіл $k = 0,7$;

F – розрахункова площа (площа вітрової поверхні для плоских тіл та площа діаметрального січення для циліндричних тіл), м²;

Q – кут між направленням вітру та площиною або віссю циліндричного тіла, приймається 90°.

Для визначення дії вітрових зусиль необхідно визначити розрахункову площу (рис. 2.3)

$$F_1 = h_1 * l_1; \quad (2.62)$$

$$F_2 = h_2 * D_1; \quad (2.63)$$

$$F_3 = h_3 * D_2; \quad (2.64)$$

$$F_4 = h_1 * l_1; \quad (2.65)$$

$$F_5 = \frac{D_3 + D_4}{2} * h_5 \quad (2.66)$$

$$F_6 = h_6 * D_4; \quad (2.67)$$

$$F_7 = h_7 * D_5; \quad (2.68)$$

де h_1 - h_7 - висоти (рис.4);

D_1 - D_1 ; l_1 – основа тіл.

Загальний момент вітрового навантаження в небезпечному перерізі в нижній частині ізолятора :

$$M = P_2 * L_2 + P_3 * L_3 + P_4 * L_4 + P_5 * L_5 + P_6 * L_6 + T_L * P_1 * L_T \quad (2.69)$$

де L_1 - L_T – плечі прикладення сил, м;

T – тяжіння приєднаного проводу, м.

Визначається міцність за рівнянням міцності:

$$M = \delta * W \quad (2.70)$$

де δ – напруга, яка виникає в фарфоровій покришці при згибі, Н/см;

W – момент опору кільцевого січення фарфорової покришки :

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}, \quad (2.71)$$

де D та d – зовнішній та внутрішній діаметри кільцевого перерізу, м.

Визначається напруга, яка виникає в покришці при згині:

$$\delta = \frac{M}{W} \quad (2.72)$$

Після чого розраховується запас міцності фарфорової покришки:

$$K_3 = \frac{\delta_u}{\delta} \quad (2.73)$$

де δ_u – ліміт міцності фарфорової покришки по кривій залежності від площі січення, Н/см;

$$S = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (2.74)$$

Визначається перекидаючий момент, який діє на трансформатор:

$$M_{\text{опр}} = P_1 \cdot L_1 + P_2(L_2 + h_2) + P_3(L_3 + h_1) + P_4(L_4 + h_1) + P_5(L_3 + h_1) + P_6(L_6 + h_1) + T(L + h_1) + P_1(L_1 + h_1), \quad (2.75)$$

Визначається момент стійкості трансформатору:

$$M_{\text{уст}} = Q \frac{D_1}{2}, \quad (2.76)$$

де Q – вага трансформатору, Н;

$\frac{D_1}{2}$ – плече кріплення, м.

Визначається коефіцієнт стійкості:

$$K_y = \frac{M_{\text{уст}}}{M_{\text{опр}}} \quad (2.77)$$

Продовження таблиці 2.4

V, м/ с	W, м ³	S, м ²	δ_u , Н* м ²	M, Н* м	δ Н/ м ²	K_z	M _{опр} , Н*м	M _{уст} , Н*м	K _y
40	22* 10 ⁻⁴	0,03 6	6,68* 10 ⁻⁴	5117	0,228	3,93	5584	2984	0,54
15				4865	0,217	3,07	5121		0,59

Коефіцієнт запасу повинен бути не менше трьох. Так як K_y менше ніж 3. Робиться додаткове кріплення трансформатору чотирма болтами та момент стійкості розраховується за формулою:

$$M_{уст} = M_{опр} * 3 \quad (2.78)$$

$$M_{уст} = 3 * 5584,4 = 16400 \text{ Н*м}$$

Розраховується додатковий момент стійкості:

$$P_{доп} = \frac{M_{доп}}{l} \quad (2.79)$$

$$P_{доп} = \frac{13420}{0,5} = 26850 \text{ Н}$$

Розраховується сила, яка діє на болт:

$$D = \frac{P_{доп}}{2};$$

$$D = \frac{26850}{2} = 13425 \text{ Н}$$

Приймається кріплення болтами М20.

Болти перевіряються по допустимій напрузі. Розраховується напруга в болтах на розтяг:

$$\delta_p = \frac{P_{\text{доп}}}{F} = \frac{\frac{P_{\text{доп}}}{\pi(d-1,2t)}}{4} \quad (2.80)$$

$$\delta_p = \frac{\frac{13425}{\pi(2-120,25)}}{4} = 5950 \text{ Н/см}$$

де d – внутрішній діаметр різьби болта, см;

t – крок різьби, см.

Допустимий натяг матеріалу болтів $[\delta_p] = 11800 \text{ Н/см}$.

Результати розрахунків заносяться до таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків

Тип обмотки	I_{1H}/I_{1H}	W_2	$Q, \text{см}$	Z_{02}	$K_{\text{найб}}$
кл.05;P ₁	3000/1	2992	11,25	83,7	18,1
P ₂ ;P ₃		2992	18,9	84,6	29
кл.05;P ₁	5000/5	199	13,02	0,98	23,6
P ₂ ;P ₃		198	20,2	1,81	19,6
кл.05;P ₁	1000/5	399	13,02	2,36	19,5
P ₂ ;P ₃	2000/5	399	20,2	2,43	29,4
кл.05;P ₁	750/5	299	13,02	1,07	32,2
P ₂ ;P ₃	1500/5	299	20,2	1,92	28
кл.05;P ₁	1500/5	599	13,02	2,66	26
P ₂ ;P ₃		599	20,2	2,77	38,6
кл.05;P ₁	3000/5	599	13,02	3,65	18,9
P ₂ ;P ₃		599	20,2	3,76	28,4

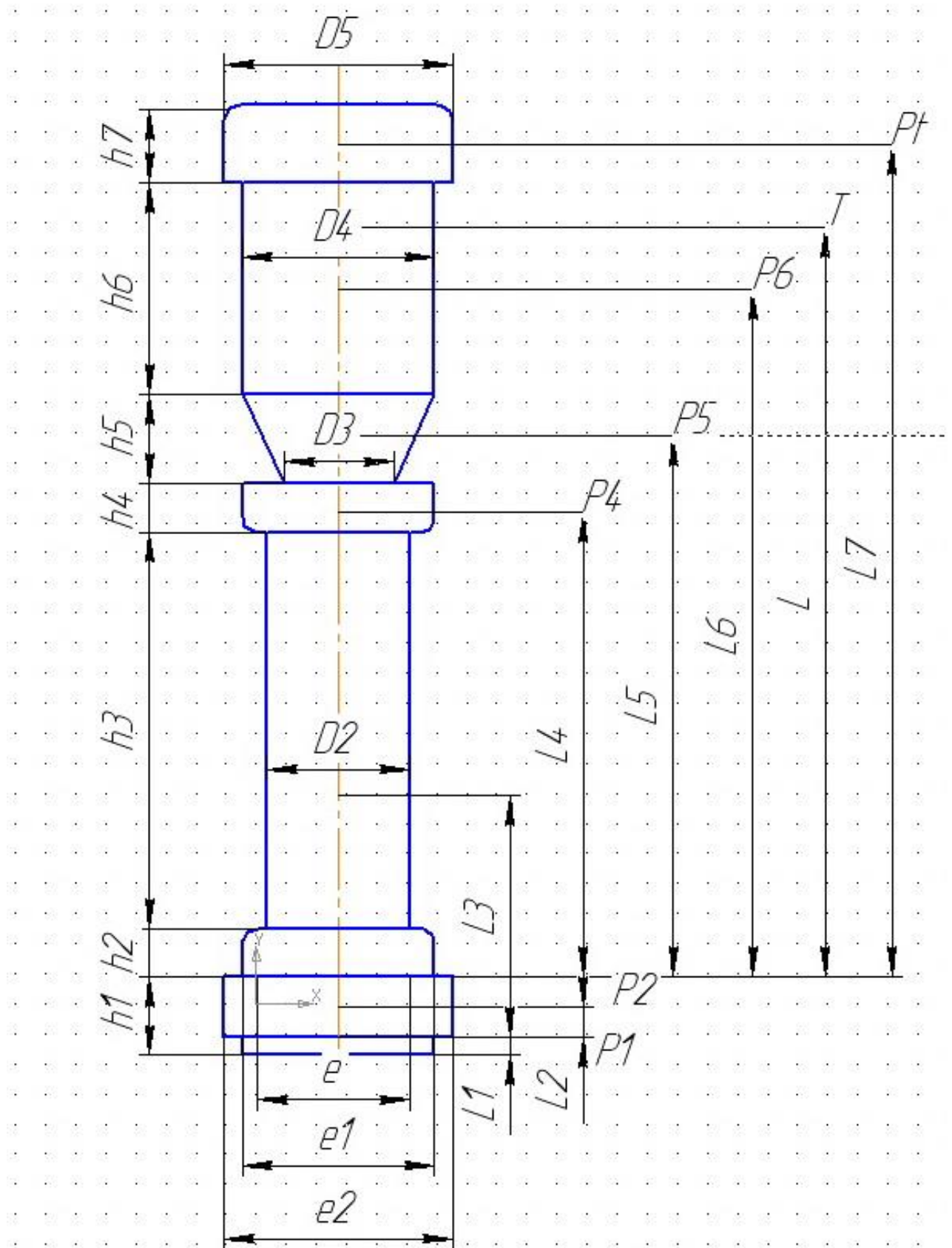


Рисунок 2.3 – Схема для розрахунку вітрового навантаження

3 ОПИС СПРОЄКТОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Спроектований трансформатор струму з масляною ізоляцією представляє собою активну частину, яка складається з первинної обмотки та комплекта вторинних обмоток. Активна частина розташована в металевому корпусі, який опирається на покришку та основу.

Первинна обмотка трансформатора струму на 220 кВ виконується з трьох шин з алюмінію 12х40 мм виготовлені за допомогою прокату, які з'єднуються паралельно за допомогою перемички.

Спроектований трансформатор струму має найкращий клас точності 0,2 вимірювальної обмотки і 10Р захисної обмотки.

Трансформатор герметичний, заповнений маслом ТУ-02-1249-83 до робочого тиску (0,4) МПа всередині трансформатору при температури навколишнього середовища 20° С.

Для підвищення напруги корони і більш рівномірного розподілення напруги по висоті покришки знизу маслорозширника встановлене екранне кільце, а також захища арматура, що є на цоколі.

Опорою трансформатора є цоколь. Кріплення покришки, що є зовнішньою ізоляцією трансформатора, до цоколя – механічне. З'єднання ущільнюються гумовими прокладками.

В коробці вторинних виводів, розташованій цоколі трансформатора, розташовані клеми виводів вторинних обмоток.

Кожен трансформатор має таблички, на яких з чітко виділеним рельєфом нанесені основні маркувальні дані трансформатора.

Лінійні виводи первинної обмотки маркуються Л1 та Л2.

Трансформатор має дві пломби : заводу та Держслужби. При зриві пломби трансформатор потребує повірці відповідно до ДСТУ 2708-94. Трансформатори струму надійні, мають високу вологостійкість, а також не дуже вимогливі до змін температур зовнішнього середовища, простий в експлуатації.

4 ТЕХНОЛОГІЯ СКЛАДАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТА ПЕРЕМИКАЧА

4.1 Вибір організаційної форми складання

Для збірки перемикача застосовується стаціонарна форма складання.

Стаціонарна форма складання передбачає проведення всього процесу зборки на одному складальній ділянці або місці, оснащених необхідним допоміжним устаткуванням, інструментом і пристосуваннями.

Скорочення тривалості циклу складання досягається розгалуженням маршруту технологічного процесу. При цьому паралельно ведеться складання конструктивно-відокремлених частин апарату, а потім здійснюється його загальне складання.

4.2 Загальні вимоги до складання

Складальні роботи виконуються слюсарями-збирачами, що мають третій розряд. Найбільша продуктивність робіт досягається за допомогою різних механізованих інструментів. До таких інструментів відносяться дрилі, шліфувальні машини, гайковерти, викрутки та ін.

При складанні деталей, складальних одиниць з допомогою різьбових з'єднань необхідно забезпечити надійність затягування (загвинчування) кріпильних деталей (болтів, гвинтів, гайок), не допускають самовідгвинчування і розслаблення з'єднань однорідних вузлів в процесі транспортування та експлуатації. Затягування болтів, гвинтів, гайок проводиться за допомогою стандартних і спеціальних інструментів. Критерієм надійності затягування кріпильних деталей є розправлення пружинних шайб і непрокручування болтів, гвинтів, гайок більш $\frac{1}{4}$ обороту при додатку нормального зусилля людини на стандартному ключі без застосування подовжувачів. Затягування кріпильних деталей проводиться гайковертами ПП-3113 і ключами. При складанні використовуються викрутки і плоскогубці. Тертьові поверхні і контактні

з'єднання очищають покривають змащенням ЦИАТИМ-201 за допомогою кисті КФК-10.

Крім перерахованих вище при зборці застосовуються й інші стандартні та спеціальні інструменти.

Перевезення і переміщення вузлів і деталей здійснюється в контейнерах.

4.3 Опис складання трансформатора

Корпус трансформатора за допомогою мостового крана подається на місце складання, до нього прикріплюється оформлений технологічний паспорт та карта вимірювань. Технологічний паспорт виписує майстер і навішує на клемну коробку перед початком збірки.

Контакти заземлення зачищаються до металевого блиску, очищаються за допомогою бензину і покриваються мастилом. При необхідності в них проганяється різблення. Якість зачистки і змащення перевіряється візуально.

Встановлюється на дно корпусу планка, яка закріплюється болтами з стопорними шайбами, якими стопорять болти. При цьому використовується ключ торцевий ВБ. 7813-0611 (S=17), плоскогубці 7814-0083, викрутка 7810-0397 (L=250), молоток 7850-0101 (P=0,2кг).

Після чого підтягується первинна обмотка до вторинної, забезпечивши натяг 100 ± 10 Н. Зважити первинну обмотку за допомогою динамометра ДПУ -01-2, потім підтягнути її до дотику з вторинною, що зафіксує стрілка динамометра (почне відхилюватися вправо). Знаючи вагу первинної обмотки, додати до неї величину натягу 100 ± 10 Н та виконати необхідний натяг. Наприклад, якщо вага первинної обмотки по показам динамометру складає 80 кг, значить $80 + 10 = 90$ кг, тоді доводячи показ динамометру до 90 кг, забезпечився необхідний натяг.

Наступною операцією є завинчення болта первинної обмотки до дотику з опорною пластиною за допомоги пристрою П-4507, спец ключа П-10661.02, плити П-4507.18.

Після чого збираються вивідні кінці первинної обмотки (почергово) з шинами, кутом корпусу та контактом. Закріплюються кінці пластинами, болтами, гайками та шайбами, при чому шайби не затягуються. Використовується ключ 7811-0023 С1Ц15 (S=17x19).

Необхідно надійно зажати болт на контакті гайкою з шайбою. Перевіряється відсутність прокручування контакту (від руки), головку болта застопорити стопорною шайбою в присутності контролера ОТК. Потім закріплюються болти з гайками, та проводиться контрольна підтяжка двох-трьох гайок (вибірково). В контактних з'єднаннях зазори недопустимі. Використовується при цьому ключ 7811-0023 С1Ц15.ГСТ 2839-80 (S=17x19), щуп 002 (набір №1) кл.2 ТУ.2-034-0221197-011-91.

Потім встановлюються на вивідні кінці перинної обмотки чотири колодки, закріпив попарно болтами та гайками з шайбами за допомогою ключа 7811-0023 С1Ц15 (S=17x19).

Закінчується складання встановленням на верхній торець корпусу резинові прокладки та технологічної кришки, яка закріплюється болтами, шайбами звичайними та шайбами пружинними. При цьому використовується гайковерт ручний пневматичний, головка 7812-0491 1X9 (S=17).

4.4 Опис складання перемикача

Виконується пробне складання перемикача по схемі послідовного з'єднання (500А), послідовно-паралельного з'єднання (1000А) на одному трансформаторі з партії 10 штук. Виконувати в присутності ОТК з наступним записом в технологічному паспорті та штампом ОТК. Збірка виконується за допомоги ключа 7811-0023 С1Ц15.Хр. (S=17x19).

Між вивідними кінцями первинної обмотки встановити почергово шість перемичок, поєднати отвори під болти, встановити в отвори чотири болти з пластинами, одночасно встановлюючи на болти по мірі їх руху пластини. Після

чого надіти на кожну пару болтів по одній пластині, нагвинтити по одній гайці. Затягнути гайки. В контактних з'єднаннях зазори недопустимі.

Потім провести контрольну підтяжку гайок (вибірково) за присутності контролера ОТК, після чого застопорити гайки та болти пластинами (паралельне з'єднання секцій первинної обмотки на струм 2000А), використовуючи ключ 7811-0023 та плоскогубці 7814-0083, та Хім. окс. прм. ($P=0,2$ кг), та щуп 002 (набір №1) кл.2 ТУ.2-034-0221197-011-91.

За допомогою воронки П-6441 проводиться дозаливка трансформаторним маслом до необхідного рівня по масло вказівнику. Червона лінія, нанесена на склі масло вказівника, відповідає рівню масла при температурі плюс 20°C . Рівень масла збільшується (зменшується) на 25 мм при зміні температури на 10°C .

Потім встановити на верхній торець корпусу прокладку, кришку, закріпити їх болтами з шайбами звичайними та шайбами пружинними. До установки осушувача необхідно заглушити отвір в кришці заглушкою. При цьому використовуючи гайковерт пневматичний з головкою 7812-0491 1 Х9 ($S=17$), заглушку П-8825.

Після чого встановити на кришку прокладку. Технологічний фланець П-10577 для випробування трансформатора надмірним тиском, закріпити гайками з шайбами.

4.5 Якісний аналіз технологічності конструкції

Аналіз технологічності конструкції є обов'язковим етапом підготовки виробництва, що дозволяє оцінити, наскільки конструктивні рішення відповідають вимогам раціональної та економічної технології виготовлення, складання, контролю та випробувань. Відповідно до ДСТУ 2221-93, технологічність конструкції виробу – це сукупність властивостей, що визначають її пристосованість до досягнення оптимальних витрат при виробництві, технічному обслуговуванні та ремонті за заданих показників якості та умов виконання робіт.

Якісний аналіз технологічності конструкції трансформатора струму ТС 220 кВ, 1200/1 А з паперово-масляною ізоляцією проводиться шляхом поелементної оцінки конструктивних рішень окремих вузлів – первинної обмотки, вторинних обмоток, магнітопроводу, ізоляційної системи, корпусу та покритишки.

Технологічність конструкції первинної обмотки.

Первинна обмотка трансформатора виконана у вигляді трьох алюмінієвих шин перерізом 12×40 мм, з'єднаних паралельно за допомогою перемичок. Застосування стандартних прокатних шин прямокутного перерізу є технологічно раціональним рішенням, оскільки такий матеріал доступний, легко піддається механічній обробці та не потребує складного оснащення. Форма U-подібної обмотки забезпечує достатньо просте виготовлення та складання.

Кінці шин пролуджуються припоєм П250 АМ, а отвори для з'єднання виконані за стандартним кроком, що дозволяє застосовувати уніфіковані кріпильні елементи. Використання алюмінієвих шин замість мідних зменшує масу первинної обмотки приблизно на 30 % та знижує собівартість виробу. Разом із тим слід враховувати, що алюміній схильний до утворення оксидної плівки, яка погіршує якість контактних з'єднань, тому поверхні контактних площин потребують додаткового лудіння або нанесення струмопровідного мастила.

Технологічність конструкції вторинних обмоток та магнітопроводу.

Вторинні обмотки виготовляються з одножильного мідного проводу ПЭБД діаметром 1,25 мм (або ПЕЛО – для вимірювального кола). Провід намотується на попередньо ізольований магнітопровід у два шари з міжшаровою ізоляцією зі стрічки з перекриттям $1/2$ ширини. Таке конструктивне рішення є технологічно доцільним: двошарова намотка виконується на стандартному намотувальному обладнанні без спеціального оснащення, а укладання проводу з рівномірним розподілом витків по периметру магнітопроводу забезпечує відтворюваність електричних параметрів від виробу до виробу.

Магнітопровід виконано у вигляді кільця методом спіральної навивки з аморфної сталі 5БДСР 513. Тороїдальна форма магнітопроводу є технологічно

зручною для намотування вторинних обмоток і забезпечує замкнений магнітний ланцюг без зазору, що позитивно впливає на точнісні характеристики трансформатора. Разом із тим необхідно враховувати підвищену чутливість аморфних сплавів до механічних напруг (наклепу): будь-яке різання, штампування або різкі удари при транспортуванні погіршують магнітні властивості матеріалу. Тому після механічної обробки всі магнітопроводи обов'язково піддаються відпалу у вакуумі або захисній атмосфері. Ця операція є додатковою технологічною ланкою, що збільшує тривалість виробничого циклу, проте є технологічно відпрацьованою та виконується в серійному виробництві.

Технологічність ізоляційної системи.

Головна ізоляція трансформатора – паперово-масляна, виконується намотуванням великої кількості шарів трансформаторного паперу ТВ-120 з перекриттям $1/2$ ширини стрічки. Між шарами паперу прокладаються конденсаторні обкладки з перфорованої фольги для вирівнювання електричного поля. Даний вид ізоляції є добре освоєним технологічно: намотування ведеться на стандартних верстатах з програмним управлінням, а параметри намотки – кількість шарів, натяг, перекриття – легко відтворюються. Застосовувані матеріали (папір ТВ-120, трансформаторне масло) є серійними та широко доступними.

До технологічно складних та трудомістких операцій слід віднести процеси сушіння та просочування ізоляції. Після намотування паперова ізоляція піддається тривалому вакуумному сушінню для видалення вологи, після чого заповнюється дегазованим трансформаторним маслом під вакуумом. Ці процеси потребують спеціального обладнання – вакуумних камер та маслопросочувальних установок – і суттєво збільшують тривалість виробничого циклу (від декількох годин до декількох діб). Разом із тим повне видалення вологи та газів є ключовою умовою досягнення заданого рівня електричної міцності ізоляції та довговічності виробу, тому дані операції не можуть бути виключені або суттєво скорочені без погіршення якості.

Зовнішня ізоляція – фарфорова покрішка циліндричної форми. Циліндрична форма спрощує виготовлення покрішки порівняно з конічними або профільними аналогами і дозволяє уніфікувати кріпильні вузли. Фарфорові ребра з краплиноутворювачами виготовляються методом лиття з подальшим глазуруванням і випалюванням. Ця технологія є стандартною для підприємств порцеляно-фаянсової промисловості і не потребує нестандартного оснащення.

Технологічність конструкції корпусу та складальних з'єднань

Корпус трансформатора – маслорозширник – виконаний у вигляді силумінової відливки. Застосування алюмінієвого сплаву (силуміну) дозволяє отримати легкий, корозійностійкий корпус складної конфігурації методом лиття в кокіль або під тиском, без значного обсягу механічної обробки. Цоколь трансформатора є силовою несучою деталлю, з'єднаною з покрішкою за допомогою болтового з'єднання з гумовими ущільнювачами. Таке роз'ємне механічне кріплення забезпечує технологічність складання і, в разі необхідності, демонтаж покрішки без руйнування конструкції.

Різьбові з'єднання в конструкції використовуються уніфіковані – болти і гайки стандартних типорозмірів (M16, M20), що забезпечує можливість складання стандартним механізованим інструментом (гайковертами). Застосування стопорних (пружинних) шайб та контровочних пластин запобігає самовідгвинчуванню кріплення в умовах вібрації при транспортуванні та в ході експлуатації. Ці заходи не ускладнюють технологію складання і водночас підвищують надійність виробу.

Технологічність конструкції з точки зору контролю та випробувань

Конструкція трансформатора передбачає зручний доступ до клемної коробки вторинних виводів, розміщеної на цоколі, що дозволяє проводити вимірювання опорів обмоток, перевірку полярності та метрологічні випробування без демонтажу основних елементів. Клеми вторинних обмоток чітко позначені та маркуються відповідно до вимог ДСТУ EN 61869-1:2017, що унеможливорює помилкове підключення при складанні та повірці.

Наявність технологічного фланця П-10577 для гідравлічного випробування надмірним тиском є конструктивним засобом, що дозволяє перевірити герметичність корпусу безпосередньо на складальній ділянці без залучення додаткового обладнання. Маслопоказчик, встановлений на стінці маслорозширника, дозволяє здійснювати оперативний контроль рівня масла як у процесі складання (при дозаливці), так і в ході експлуатації.

Загальний висновок щодо технологічності конструкції.

За результатами якісного аналізу конструкцію трансформатора струму ТС 220 кВ, 1200/1 А з паперово-масляною ізоляцією можна оцінити як технологічну. Застосовані матеріали (алюмінієві шини, аморфна сталь 5БДСР, трансформаторний папір ТВ-120, трансформаторне масло, силумінова відливка корпусу) є серійними і широко доступними. Конструктивні форми деталей не потребують нестандартного технологічного оснащення. Складальні з'єднання – переважно різьбові, уніфіковані. Принципові технологічні складнощі (вакуумне сушіння та просочування ізоляції, відпал магнітопроводу) є невід'ємними для даного класу виробів і технологічно відпрацьовані у серійному виробництві. Конструкція забезпечує зручність проведення контрольних вимірювань та випробувань на відповідність вимогам ДСТУ EN 61869-1:2017 та ДСТУ EN 61869-2:2017.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті виконано проєктування трансформатора струму 220 кВ, 1200/1 А з паперово-масляною ізоляцією для зовнішнього встановлення.

На підставі порівняльного аналізу конструкцій трансформаторів струму вітчизняного та зарубіжного виробництва (ТФЗМ, ТФУМ, ТОМ, ТГ-170, SKF 145) обґрунтовано вибір ланкової конструкції з чисто паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу та фарфоровою покришкою. Перевагами обраного рішення є герметичність, відсутність контакту масла із зовнішнім середовищем, висока надійність і пожежовибухобезпечність.

Розраховано параметри первинної обмотки: обрано три алюмінієві шини перерізом 12×40 мм (загальна площа $14,16 \text{ см}^2$) при допустимій густині струму $0,9 \text{ А/мм}^2$, що забезпечує тривалу роботу при номінальному первинному струмі 1200 А.

Розрахунок електродинамічної та електротермічної стійкості підтвердив здатність первинної обмотки витримувати струм короткого замикання 63 кА тривалістю 3 с без пошкоджень, що відповідає умовам роботи в енергосистемі 220 кВ.

Для магнітопроводу спірального типу обрано аморфну сталь марки 5БДСР 513 замість традиційної електротехнічної сталі 3405. Застосування аморфного матеріалу забезпечує вищу магнітну проникність і менші втрати на перемагнічування, що позитивно впливає на метрологічні характеристики трансформатора.

Розрахунок похибок і граничної кратності підтвердив відповідність вторинних обмоток заявленим класам точності: вимірювальна обмотка – клас 0,2 (номінальне навантаження 30 ВА), три захисні обмотки – клас 10Р (номінальне навантаження 50 ВА кожна).

Електричний розрахунок зовнішньої ізоляції показав, що фарфорова покришка витримує тривалу роботу при найбільшій робочій напрузі 252 кВ і

здатна протистояти можливим перенапругам в реальних умовах експлуатації при питомій довжині шляху витоку 2,25 см/кВ.

У технологічній частині визначено організаційну форму складання, загальні вимоги до складальних операцій і розроблено технологічний маршрут складання трансформатора та перемикача відгалужень.

Усі отримані результати відповідають вимогам технічного завдання. Спроектований трансформатор струму може застосовуватися у розподільчих пристроях 220 кВ для комерційного обліку електроенергії та релейного захисту енергосистем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лесько В. О., Кравчук С. В., Сікорська О. В. Електричні апарати : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 145 с.
2. Лесько В. О., Комар В. О., Кравчук С. В., Сікорська О. В. Електричні апарати : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2018. 102 с.
3. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. Харків : Вид-во «Точка», 2012. 340 с.
4. Лут М. Т., Мрачковський А. М. Електричні апарати : навч. посібник / за ред. А. М. Мрачковського. Київ : ЦП «Компринт», 2017. 564 с.