

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Фізико-технічний інститут, Електротехнічний факультет

(повне найменування інституту, назва факультету)

Електричні та електронні апарати

(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

бакалавр

(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему «Трансформатор напруги 420 кВ»

Виконав: студент 4 курсу, групи Ез-419  
спеціальності (напряму підготовки)  
141- "Електроенергетика, електротехніка,  
та електромеханіка"

(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Шкарупа В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Ст.викл. Скрупська Л.С.

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя  
2023 рік

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

Інститут, факультет ФТІ, ЕТФ  
 Кафедра "Електричні та електронні апарати"  
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) бакалавр  
 Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка"  
 (код і назва)  
 Напрямок підготовки \_\_\_\_\_  
 (код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Завідувач кафедри П. Д. Андрієнко

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

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

Шкарупи Вікторії Олегівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Трансформатор напруги 420 кВ

керівник проєкту (роботи) Скрупська Людмила Степанівна, ст. викладач

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 05 ” 05 2023 р. № 163

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 16.06.2023  
 3. Вихідні дані до проєкту (роботи) номінальна напруга 420 кВ, клас точності 0,5.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Техніко-економічне обґрунтування проєкту. 2. Електромагнітний розрахунок. 3 Розрахунок похибок. 4 Економічна частина. 5. Охорона праці.

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

1. ГКІЮ.671246.030 01СК – 1 арк. А1;

2. ГКІЮ.684411.030 02С К – 1 арк. А1;

3. ГКІЮ.671241.030 03СК.– 1 арк. А1 ;

4. ГКІЮ.743415.030 – 1 арк. А3; ГКІЮ.725112.030 – 1 арк. А3;

ГКІЮ.741124.030 – 1 арк. А3; ГКІЮ.723356.030 – 1 арк. А3.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання

7. Дата видачі завдання 01.05.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування проєкту	05.05.2023	
2	Попередній розрахунок головних елементів апарата	12.05.2023	
3	Повірний розрахунок з висновками про роботоспроможність елементів апарата	19.05.2023	
4	Виконання загального виду виробу, робочих креслень головних вузлів та деталей апарата	26.05.2023	
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки проєкту	30.05.2023	
6	Узгодження проєкту з керівником	01.06.2023	
7	Нормоконтроль та затвердження завідувачем кафедри	06.06.2023	
8	Перевірка керівником пояснювальної записки на антиплагіат	09.06.2023	
9	РЕЦЕНЗУВАННЯ ПРОЄКТУ	13.06.2023	
10	ЗАХИСТ ПРОЄКТУ	15.06.2023	
11	Здача бакалаврської роботи до депозитарію	23.06.2023	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Шкарупа В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Л.С. Скрупська

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 73 с., 7 рис., 10 табл., 16 джерел.

НОМІНАЛЬНА НАПРУГА, НОМІНАЛЬНИЙ СТРУМ, ІЗОЛЯЦІЯ, КЛАС ТОЧНОСТІ, ПОТУЖНІСТЬ, ГУСТИНА СТРУМУ, НАПРУЖЕНІСТЬ.

Об'єктом проектування в бакалаврській роботі є каскадний трансформатор напруги зовнішнього установлення з номінальною напругою 400 кВ.

Мета дипломного проекту – проектування однофазного вимірювального каскадного трансформатора напруги 420 кВ з класом точності 0,5 з покращеними техніко-економічними показниками, а також зменшеними габаритними розмірами і масами.

Зниження ваги проектуемого трансформатора напруги отримується за рахунок зменшення маси дроту в обмотці ВН і ізоляційних проміжків головної ізоляції шляхом підсилення твердої ізоляції і використання елементів герметизації для захисту трансформаторного масла, переваги якого дадуть можливість електричному апарату стати затребуваним для використання його на вітчизняних і закордонних електростанціях.

Задачею розрахунку є отримання необхідних розрахункових даних для проектування вимірювальних трансформаторів напруги зі зменшенням матеріалоемності, покращеними техніко-економічними показниками. При розрахунку конструкції використовувались нормативні, конструкторські і технологічні документи ВАТ «Запорізький завод високовольної апаратури». Використовується стандартний метод розрахунку.

В результаті розрахунку спроектована конструкція трансформатора напруги з покращеними техніко-економічними показниками.

## ЗМІСТ

Завдання на бакалаврську роботу.....	2
Реферат.....	4
Вступ.....	6
1 Техніко-економічне обґрунтування проєкту.....	7
1.1 Огляд існуючих конструкцій трансформаторів напруги.....	13
1.2 Призначення та конструктивні особливості трансформатора.....	14
1.3 Конструктивно-технологічні особливості активної частини.....	18
1.4 Розширене технічне завдання для проєктування.....	21
2 Електромагнітний розрахунок.....	22
2.1 Вибір конструкції і розрахунок магнітної системи.....	22
2.2 Розрахунок внутрішньої і зовнішньої ізоляції.....	31
2.3 Розрахунок і розкладення обмоток.....	37
3 Розрахунок похибок.....	52
4 Економічна частина.....	59
4.1 Розрахунок параметрів потокової лінії.....	59
4.2 Розрахунок кількості робочих місць за операціями.....	60
4.3 Розрахунок виробничої площі дільниці.....	62
4.4 Розрахунок техніко-економічних показників дільниці.....	63
4.5 Розрахунок беззбитковості виробництва.....	64
5 Охорона праці.....	67
Висновки.....	71
Перелік посилань.....	72

## ВСТУП

Вимірювання напруги електричного струму відбувається за допомогою вимірювальних приладів – вольтметрів. Але безпосереднє вмикання їх в електричну мережу допускається при номінальній напрузі, яка не перевищує 220 В, і лише в деяких випадках, зокрема на випробувальних станціях, до 660 В. При більш високій напрузі мережі безпосереднє під'єднання вимірювальних приладів не допустиме, як за умовами ізоляції, так і за умовою безпеки обслуговуючого персоналу. Прилади для безпосереднього підключення у мережу високої напруги були б дуже великими за ізоляційними відстанями, а при напрузі 35 кВ і вище їх виготовлення практично неможливе. У зв'язку з цим при високих напругах вимірювальні прилади та апарати вмикаються за допомогою проміжкових апаратів, які мають назву – трансформатори напруги.

Трансформатори напруги крім вимірювання напруги також застосовуються для живлення ланцюгів автоматики, сигналізації та релейного захисту ліній електропередач від замикання на землю. В ланцюгах високої напруги вони виконують наступні функції:

- перетворення високої змінної напруги в напругу, прийнятну для безпосереднього вимірювання його стандартними вимірювальними приладами, а також роботи систем захисту і автоматики;

- ізоляцію вимірювальних приладів і інших систем від ланцюгів високої напруги.

Отже існує реальна необхідність у випуску таких апаратів на різні класи напруги.

Тому тема бакалаврської роботи «Активна частина трансформатора напруги 420 кВ» є актуальною.

Впровадження стандарту ДСТУ ІЕС 60044-2-1:2008 змінило назву трансформатору із 400 кВ на 420 кВ.

## 1 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

Трансформатори напруги серії НКФ однофазні маслонаповнені каскадні призначені для живлення електричних приладів, ланцюгів захисту і сигналізації при напрузі 66 кВ і вище в мережах змінного струму частотою 50 і 60 Гц із заземленою і ізольованою нейтраллю [1].

В даний час електротехнічною промисловістю випускаються трансформатори напруги серії НКФ, що не перевершують по масі і габаритам кращі зарубіжні зразки. Загальна номенклатура трансформаторів, що випускаються, складає понад 20 типоміналів і не дозволяє застосовувати високовиробниче устаткування. Номенклатура трансформаторів, що випускаються, наступна: вимірювальні трансформатори струму на клас напруги: 35, 66, 110, 132, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ; вбудовані трансформатори струму на клас напруги: 10, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ; комплекси трансформаторів постійного струму; вимірювальні трансформатори серії НКФ на клас напруги: 66, 110, 132, 150, 220 кВ; вимірювальні трансформатори модернізованої серії НКФ-М на клас напруги 330, 400, 500кВ і елегазозаповнені трансформатори напруги внутрішнього установа серії ЗНОГ, вбудовані в елегазові осередки КРУЕ на клас напруги: 110, 220, 330, 500 кВ. Елегазозаповненні трансформатори в перспективі повинні замінити вибухо- і пожежонебезпечні маслонаповнені трансформатори напруги.

Однофазні трансформатори напруги серії НКФ, у яких один кінець первинної обмотки (ВН) під час роботи заземляється, виготовляються на відповідну фазну напругу:  $66\sqrt{3}$ ,  $110\sqrt{3}$ ,  $132\sqrt{3}$ ,  $150\sqrt{3}$ ,  $220\sqrt{3}$ ,  $330\sqrt{3}$ ,  $400\sqrt{3}$ ,  $500\sqrt{3}$ . На вторинній обмотці (НН) трансформаторів напруги застосовується напруга  $100$ ;  $100/\sqrt{3}$ .

Для трансформаторів застосовується каскадна схема, яка є по суті декількома трансформаторами з послідовно сполученими первинними обмотками. Застосування конструкції, аналогічної силовим трансформаторам є

не доцільним, оскільки при малій потужності вимірювальних трансформаторів їх розміри надзвичайно зросли б із-за збільшення унаслідок високої первинної напруги ізоляційних проміжків. При цьому вага таких трансформаторів зростає пропорційно більш ніж квадрату збільшення напруги. Тому всі конструкції трансформаторів напруги серії НКФ виконані з одним кінцем «Х» первинної обмотки, що заземляється. Каскадна схема забезпечує зменшення розрядних проміжків між обмоткою і магнітопроводом. При цьому ізоляція первинної обмотки від магнітопровода повинна відповідати тільки частини загальної первинної напруги, яка обернено пропорційна до числа ступенів каскадної схеми.

Всі трансформатори напруги від 66 до 550 кВ включно мають по дві вторинні обмотки – основну і додаткову. Основна обмотка призначена для вимірювальних приладів, додаткова – для релейного захисту. Послідовно з високовольтною обмоткою верхнього стрижня сполучена високовольтна обмотка нижнього стрижня магнітної системи. Кожна розрахована на половину фазної напруги. Таким чином, фазна напруга ділиться навпіл між двома обмотками. Тому кожна обмотка ізолюється одна по відношенню до іншої високовольтною обмоткою на повну фазну напругу. Однак сам магнітопровід повинен бути також ізолюваний від заземлених частин. В каскадних трансформаторах використовують двох-стрижньові магнітопроводи з котушками на кожному стрижні. Кількість каскадів залежить від класу напруги.

Оскільки трансформатори напруги серії НКФ є вимірювальними приладами, то вони повинні задовольняти певним класам точності, приведеним в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця похибок на різні класи точності

Клас точності	Похибка напруги, %	Кутова похибка, хв
0,2	± 0,2	± 10
0,5	± 0,5	± 20
1,0	± 1,0	± 40
3,0	± 3,0	Не нормується

Класу точності на 0,2 повинні задовольняти лабораторні трансформатори напруги, а решті класів точності – трансформатори напруги промислового призначення. У трансформаторах на напругу 66, 110, 132, 150, 220, 330 кВ основна обмотка призначена для ланцюгів вимірювання і має клас точності 0,5, а в трансформаторах на клас напруги 400 і 500 кВ основна обмотка має клас точності 1,0. Додаткові обмотки трансформаторів напруги серії НКФ мають клас точності 3,0 і призначені для ланцюгів захисту.

Проектуємий трансформатор напруги 420 кВ розраховуємо на клас точності 0,5.

У разі отримання похибок вище за норму, виконується корекція напруги. При корекції напруги навмисно змінюють коефіцієнт трансформації у бік підвищення вторинної напруги. Корекція, в межах заданого класу точності, виконується таким чином: оскільки похибка завжди негативна, зменшуються абсолютні значення похибок за рахунок використання позитивних значень, тобто декілька збільшується вторинна напруга. На практиці зазвичай замість збільшення числа витків у вторинній обмотці зменшується їх число на первинній, оскільки в цьому випадку корекція може бути підібрана точніше (ціна витка на первинній обмотці значно менше ніж на вторинній). Застосування корекції напруги дозволяє отримати певну економію матеріалів. Корекція кутової похибки у однофазних трансформаторів не може бути виконана, виконується у трифазних трансформаторів напруги.

Умови експлуатації трансформаторів напруги:

а) трансформатор призначений для праці в ланцюгах з ефективно заземленою нейтраллю;

б) схема і група з'єднання обмоток трансформатора повинна відповідати умовному позначенню 1/1/1-0-0;

в) ізоляція трансформатора виготовляється категорії А – нормальне виконання, відношення довжини шляху витоку зовнішньої ізоляції до найбільшої лінійної напруги, що дорівнює не менше 3 см/кВ;

г) навколишнє середовище вибухобезпечне, таке, що не містить струмопровідного пилу, агресивних газів і пари в концентраціях, що руйнують метали;

д) режим роботи – тривалий;

е) висота над рівнем моря не більше 1000 м.

В наслідок того, що виробництво каскадних конструкцій трансформаторів напруги закордонних фірм майже не відрізняється від вітчизняного виробництва (шихтований стрижньовий магнітопровід П – образної форми, високовольтні обмотки на обох стрижнях, активна частина розташована в порцеляновій покривці), а ряд напруг, відповідно яким проектується апаратура закордонного виробництва, відрізняється від значень вітчизняного виробництва, нормованих у ГОСТ 1516.1-76\*, зробимо порівняльний аналіз трансформаторів.

Напрямок розвитку каскадної конструкції – зменшення розмірів та маси трансформатора. Проектування конструкцій з малим об'ємом масла за рахунок використання елементів герметизації трансформатора і підсилення ізоляції високовольтних обмоток, їх отводів.

Трансформатори вітчизняного виробництва в залежності від величини первинної напруги мають вагові показники в декілька раз більше, ніж найкращі зразки закордонного виробництва на відповідні напруги.

Гранична потужність окремих трансформаторів закордонного виробництва в 2,5 раза більша, ніж у трансформаторів вітчизняного виробництва, однак по величині номінальної потужності трансформатори закордонного виробництва поступаються трансформаторам вітчизняного виробництва.

Типові випробування трансформаторів серії НКФ показали, що гранична потужність трансформаторів вітчизняного виробництва може бути збільшена без зміни конструкції.

Зниження ваги кращих зразків трансформаторів закордонного виробництва отримане за рахунок зменшення ізоляційних проміжків головної

ізоляції шляхом підсилення твердої ізоляції і використання елементів герметизації для захисту трансформаторного масла.

Однак в виконанні ряду каскадних трансформаторів закордонного виробництва мають відміну в частині покришок, ізоляції і захисту трансформаторного масла. Масляне заповнення трансформаторів напруги призначене головним чином для ізоляції обмоток від заземлених частин і запобігає попаданню вологи в обмотки. Внаслідок відносно малих втрат в трансформаторах напруги масляне охолодження має другорядне значення.

В меті зменшення маси електромагнітних масляних трансформаторів вітчизняного виробництва майбутній розвиток їх конструкції повинен йти шляхом покращення герметизованої каскадної конструкції, яка дає змогу знизити матеріалоемність міді, порцеляни і чорного металу.

Другим напрямком по зниженню габаритів і матеріалоемності проектуємого трансформатора є зниження каскадності конструкції за рахунок підвищення електричної міцності ізоляційної конструкції і вибору оптимальної кількості і розмірів екранів для вирівнювання напруженості кола в ізоляційній конструкції.

Особливістю вимірювальних трансформаторів напруги є їх мала потужність при високій напрузі первинної обмотки, а також мале падіння напруги в первинній і вторинній обмотках, щоб отримати менші похибки коефіцієнта трансформації та куту зсуву між векторами первинної та вторинної напруги, що накладає на їх конструкцію свій відбиток. Розміри і вага трансформаторів напруги залежать в основному не від їх потужності, як у силових трансформаторів, а від первинної напруги. Потужність трансформаторів напруги практично мало впливає на їх розміри. Оскільки по суті він працює в режимі близькому до режиму холостого ходу.

Особливістю трансформаторів напруги є те, що вони малопотужні знижувальні трансформатори, що мають майже завжди великий коефіцієнт трансформації. Щоб мати можливість зменшення похибок коефіцієнта трансформації (похибка напруги) і кута зсуву між векторами первинної і вторинної напруги (кутова похибка), трансформатори напруги повинні володіти

малим падінням напруги в первинній і вторинній обмотках [1].

В конструкції трансформатора напруги застосовуються дроти великого перетину, чим цього вимагає розрахунок, для того, щоб забезпечити механічну міцність первинних обмоток. Зважаючи на дуже малі струми первинної обмотки перетин обмотувального дроту повинен бути теж дуже малим, але, виходячи з технологічних міркувань, щоб уникнути обриву дроту при намотуванні і з метою збільшення натягнення дроту для отримання щільнішої обмотки, перетин необхідно вибирати більшим, ніж цього вимагає величина струму.

Як вказувалося раніше, основним напрямком вдосконалення каскадної конструкції є зменшення розмірів і маси трансформатора. Це можливо в наступних випадках:

а) герметизація трансформатора. При цьому можна знизити ізоляційні проміжки, внаслідок чого зменшуються габарити трансформатора, знизиться маса трансформаторного масла і як результат знизиться маса всього трансформатора, проте при цьому зростають витрати при експлуатації, оскільки необхідна наявність компресорного господарства.

б) застосування для блоків трансформатора покришок іншого типу з покращеними характеристиками (довжина шляху виток, кількість фарфору). Це дозволить знизити об'єм масла і зменшити блокову конструкцію.

Використовуючи покришку з конфігурацією ребра іншого типу, що має збільшений виліт ребра в порівнянні з використаною раніше конструкцією, а також збільшивши товщину міжшарової ізоляції в обмотках вищої напруги можна збільшити пробивну напругу обмотки.

У бакалаврській роботі пропонується замість чотирьох блоків, що раніше застосовувалися, застосувати конструкцію, що складається з трьох блоків. При цьому пропонується зниження маси міді, трансформаторного масла.

У даній конструкції передбачається використання шести ступенів (замість раніше використаних восьми) внаслідок чого збільшується частина первинної напруги, що доводиться на одну обмотку ВН, і коефіцієнт корисного використання перетину дроту первинної обмотки збільшується. І як

наслідок зниження витрат на комплектуючі вироби (покришки) і матеріали (трансформаторна олія), що приведуть до зниження вартості всього виробу.

### 1.1 Огляд існуючих конструкцій трансформаторів напруги

Трансформатори напруги мають наступні відмінності:

- за числом фаз – однофазні та трифазні;
- за числом обмоток – двохобмоткові та трьохобмоткові;
- за класом точності;
- за способом охолодження: з масляним охолодженням, з повітряним охолодженням, з литою ізоляцією та елегазові;
- за родом установлення – для внутрішнього або зовнішнього установлення і для комплектних розподільчих пристроїв.

Однофазні трансформатори напруги можуть мати один чи два уводи первинної обмотки вищої напруги (у подальшому ВН), ізоляція яких відповідає робочій напрузі. В залежності від цього такі трансформатори називають однополюсними чи двохполюсними. Трифазні двохобмоткові трансформатори напруги мають звичайно трьохстрижньові магнітопроводи, а трьохобмоткові однофазні – броньові.

Сухі трансформатори напруги це трансформатори, в яких основним ізоляційним середовищем є повітря чи твердий діелектрик. Вони виготовляються наступних типів: однофазні – НОС (напруги, однофазні, з сухою ізоляцією), НОСК; трифазні – НТС. Магнітопроводи сухих трансформаторів з повітряним охолодженням виготовляються з електротехнічної сталі. Пластини магнітопровода ізолюються одна від одної папером чи лаком. Котушки трансформаторів виготовляють багат шаровими циліндричними, вони звичайно мають обмотки вищої та низької напруги. За конструкцією трансформатори з повітряною ізоляцією нагадують силові, потужні, тобто мають ярмові балки, верхню та нижню. Стягують магнітопровід за допомогою шпильок. Ці трансформатори випускають на класи напруг до

10 кВ. Трансформатори НОСК виготовляється за спеціальними технічними умовами і застосовуються для комплектних розподільчих пристроїв. Трансформатор заливається бакелітовою смолою, і є перехідним між трансформатором з повітряною та литою ізоляцією.

Трансформатори з литою ізоляцією складаються з двох основних елементів: магнітопровода та обмоток з уводами. Активна частина цих трансформаторів повністю чи частково залита ізоляційною масою (епоксидним або іншим компаундом). Такі трансформатори призначені для внутрішнього установлення, відрізняються від масляних тим, що мають меншу вагу і габаритні розміри і не потребують догляду в експлуатації.

Баківі трансформатори напруги серії ЗНОМП з масляним охолодженням виконуються стрижньовими з катушками на кожному стрижні або броньового типу, їх активна частина знаходиться у баці з маслом. Баківі масляні трансформатори випускаються на клас напруги до 35 кВ.

Елегазові трансформатори напруги мають менші габаритні розміри, по відношенню до інших трансформаторів напруги на однаковий клас напруги. Ці трансформатори звичайно мають концентричну обмотку, виконану на броньовому стрижньовому магнітопроводі, а їх активна частина встановлюється в металевий бак, заповнений елєгазом під тиском 0,28-0,4 МПа.

## 1.2 Призначення та конструктивні особливості трансформатора

Проектуємий трансформатор 420 кВ є однофазним, каскадним, з масляним охолодженням, і придатний для зовнішнього установлення. Трансформатор складається з трьох блоків. Кожний із блоків крім активної частини (магнітопровода і обмоток), яка встановлена на основі (цоколі), має порцелянову покрішку, заповнену трансформаторним маслом і маслорозширювач. Для трансформатора використовується каскадна схема, яка являє собою декілька трансформаторів з послідовно з'єднаними первинними обмотками. На рисунку 1.1 представлений трансформатор напруги 420 кВ, а на

рисунку 1.2 – пристрій електромонтажний (блок), на якому наглядно показані всі складові, з яких складається проєктуємий трансформатор.

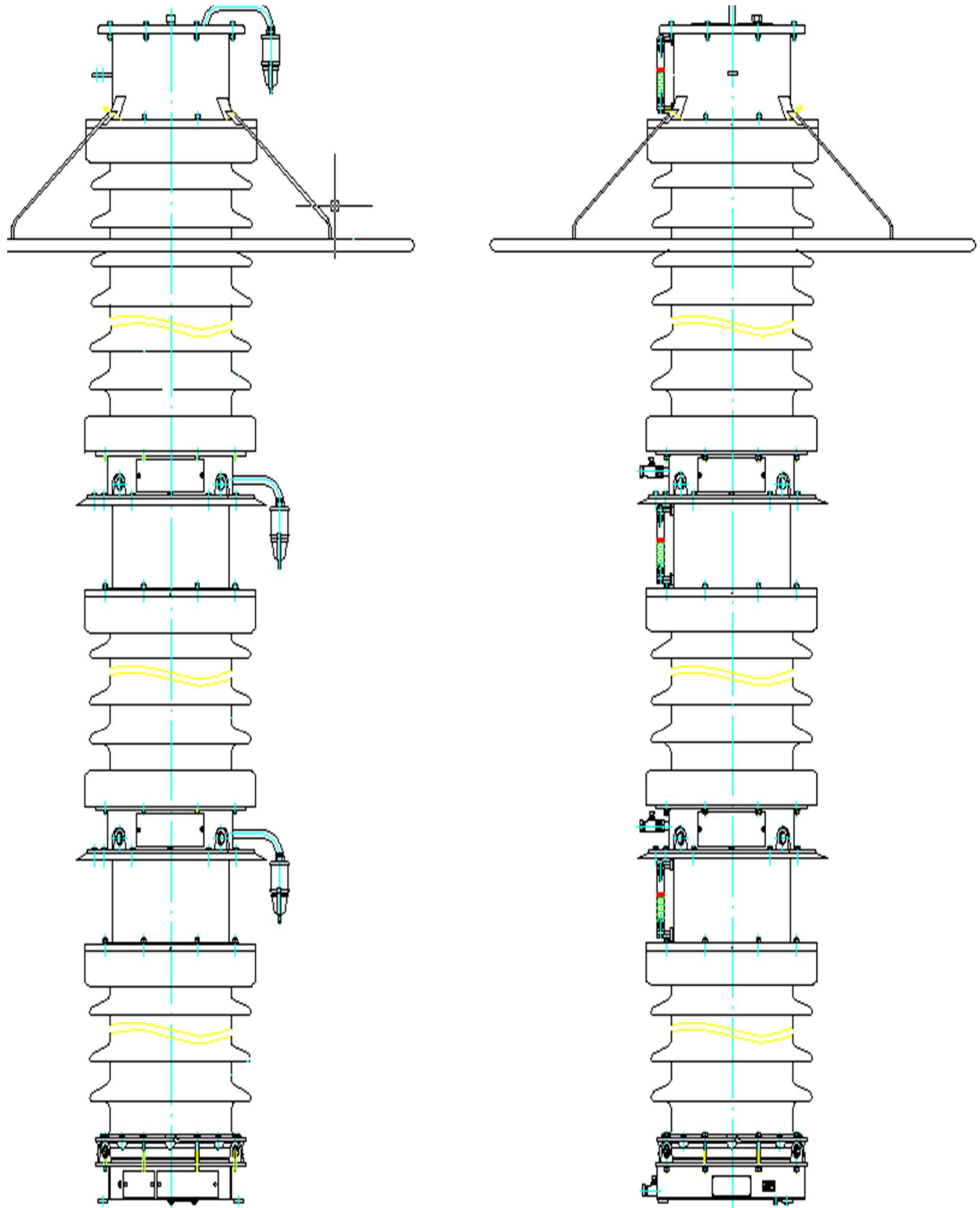


Рисунок 1.1 – Трансформатор напруги 420 кВ

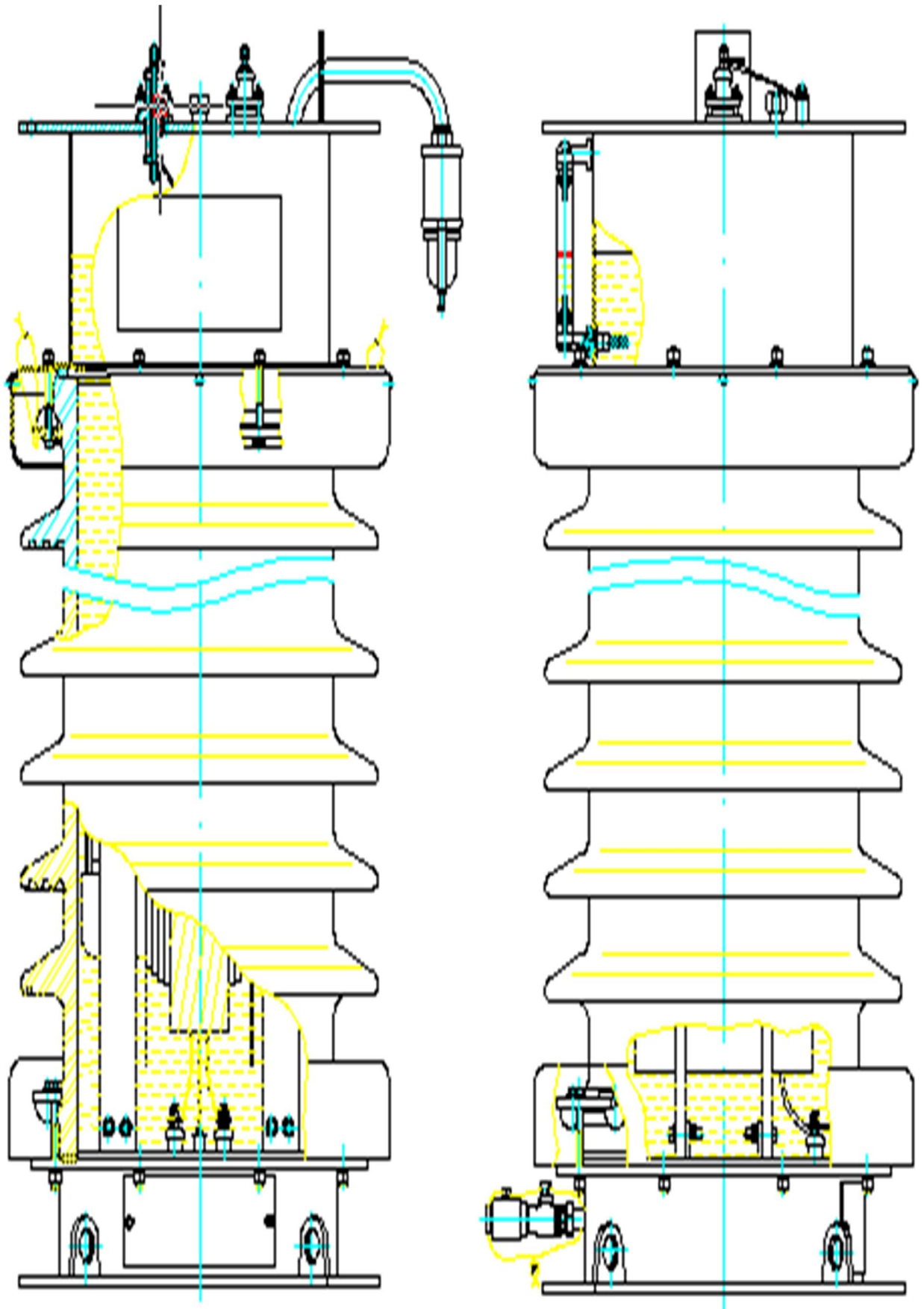


Рисунок 1.2 – Пристрій електромонтажний (блок)

Головними вузлами трансформатора є: обмотка, магнітопровід, цоколь, фарфорова покривка, яка служить ємністю для встановлення активної частини і заповнення її трансформаторним маслом і маслорозширювач, який служить для забезпечення компенсації змін об'єма трансформаторного масла в трансформаторі.

Трансформатор заповнюється трансформаторним маслом, яке служить для ізоляції обмоток від заземлених частин і для зберігання обмоток від зволоження.

Магнітопровід двохстрижньовий з двома стрижнями, на якому встановлені обмотки: первинна, вторинна основна, вторинна додаткова, узгоджувальна і зв'язуюча. Конструкція обмоток трансформатора – циліндрична, шарова.

Вивід первинної обмотки проходить крізь покривку і з'єднується з ізолятором, який встановлений на маслорозширювачі верхнього блоку. Виводи вторинних обмоток під'єднуються до коробки виводів, яка знаходиться на цоколі нижнього блоку.

Цоколь є штамповано-зварною конструкцією, яка має пластини для кріплення активної частини, прохідні ізолятори та коробку виводів для кріплення вторинних обмоток. Для того, щоб підняти трансформатор, на цоколі є чотири під'ємних кільця. Знизу на цоколі закріплений кран для заливання та зливу масла.

Кожний блок має фільтр – повітряосушувач, призначений для очищення пилу і вологи повітря, яке потрапляє в трансформатор. Він під'єднується до кришки трансформатора. Скляний циліндр заповнений селікогелем, а в верхній його частині – селікогелем-індикатором, який при насиченні вологою, змінює свій колір (з синього на рожевий).

Для того, щоб контролювати рівень масла в трансформаторі встановлюється маслопоказчик, який має три риски. Середня – рівень масла в непрацюючому трансформаторі при  $t = +20^{\circ}\text{C}$ , верхній – рівень масла в працюючому трансформаторі при верхньому граничному значенні температури

повітря, а нижня риска вказує на рівень масла в працюючому трансформаторі при нижньому граничному значенні температури повітря.

Для кріплення фарфорової покривки до цоколя і маслорозширювача застосовують напівхомути, які опираються напівсферичними виступами (сухарями) на кільцевий конусний виступ в нижній та верхній частинах фарфорової покривки.

Стрижні магнітопровода пресуються дерев'яними клинами, які розклинюють одночасно і обмотку. Ярма магнітопровода стягуються товстими планками із дерев'яно-шарувастого пластика за допомогою стягувальних шпильок. Шпильки ізолюються від магнітопровода папіро-бакелітовими трубками.

Електричне з'єднання блоків між собою здійснюється перемичками з багатожильного мідного проводу МТ-10.

Трансформатор має екрануюче ємкісне кільце, закріплене на розширювач верхнього блоку. На кришках нижнього і середнього блоків встановлений козирок для стоку води.

### 1.3 Конструктивно-технологічні особливості активної частини

Активна частина трансформатора напруги 420 кВ складається з магнітопровода та обмоток, які електрично з'єднані між собою за допомогою зв'язуючих котушок.

Магнітопровід є ланцюгом, по якому протікає магнітний потік, що пронизує обмотки трансформатора. Магнітопровід використовується двохстрижнєвої конструкції, яка складається зі стрижнів та ярм, які виконують основне призначення – проведення магнітного потоку, а також з конструкційних елементів: стягувальних шпильок, ізоляційних деталей та матеріалів.

У якості матеріалу для магнітопровода використовують електротехнічну сталь 3413 (холоднокатана, анізотропна) товщиною 0,35 мм, яка виготовляється з показниками відповідно до ГОСТ 2.1427-83.

Стрижень має ступінчасту форму, для кращого заповнення площі круга геометричною фігурою перетину, на що вказує відповідний коефіцієнт. Магнітопровід має два бічних ярма.

В активній частині трансформатора напруги 420 кВ є такі обмотки:

- узгоджувальна обмотка, яка намотана круглим мідним проводом марки ПБ-3,0/0,55 ТУ У 31.3-31806384-003-2004, одношарова;

- первинна, яка намотана мідним проводом ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28 ТУ 16.К71-279-99, є багатошаровою;

- вторинна основна, що намотана прямокутним мідним проводом марки ПБ-2,65x5,60/0,55 ТУ У 31.3-31806384-003-2004, є двошаровою;

- вторинна додаткова, що намотана круглим мідним проводом марки ПБ-3,0/0,55 ТУ У 31.3-31806384-003-2004, виконаної у декілька шарів.

Для узгодження напруги і навантаження між обмотками блоків використовують зв'язуючі обмотки, які розташовують на всіх стрижнях магнітопроводів крім верхнього стрижня магнітопровода верхнього блока і нижнього стрижня магнітопровода нижнього блока.

Намотування обмоток трансформатора проводиться на паперо-бакелітовий циліндр ГОСТ 8726-93. При намотці шарових обмоток провід не доходить до кінця краю, а в перерізі обмотка вищої напруги має форму трапеції і складається з шести котушок. Така конструкція обмотки обумовлена створенням однакової ємності між котушками. З ростом діаметра шару вісьовий розмір котушок зменшується, а товщина збільшується і таким чином кожна котушка має однакову ємність.

Між кожним шаром витків прокладається кабельний папір ТВ-120 ГОСТ 24874-91, який виконує роль міжпрошаркової ізоляції. Роль бортиків виконує картон Г-0,5-1000 ГОСТ 4194-88.

Для простоти виконання в каскадних трансформаторах застосовується

шарова обмотка. Первинна обмотка мотається з круглого дроту, вторинна з проводів прямокутного перетину.

Міжшарова ізоляція виконується їх трансформаторного паперу, товщина шару вибирається виходячи з напруги шару.

Для трансформаторів напруги характерною є та обставина, що у зв'язку з необхідністю мати малі похибки доводиться допускати пониження значення індукції в магнітній системі, а також щільності струму в обмотці [2].

Захист обмоток трансформаторів напруги від перенапруження (найсильніше на ізоляцію впливає імпульсне перенапруження, що є наслідком атмосферних явищ) здійснюється створенням рівномірного розподілу імпульсу напруги по первинній обмотці.

Небезпечні для трансформатора є комутаційні перенапруження, що виникають в результаті нестационарних режимів ліній електропередач. Трансформатори напруги в більшості випадків з первинного боку приєднані до повітряних ліній електропередач, внаслідок чого вони можуть піддатися атмосферним перенапруженням.

У трансформаторах ця проблема полегшується застосуванням в них шарових обмоток, між шарами яких імпульсна напруга розподілена практично рівномірно. Проте щоб уникнути неравномірного розподілу напруги по витках вхідних шарів, вони повинні бути захищені електростатичними ємкісними екранами, сполученими з лінійними вводами. Тому обмотка ВН трансформатора напруги має електростатичний екран, який є металевою смугою, ширина якої рівна висоті обмотки, із зазором по периметру обмотки щоб уникнути утворення короткозамкнутого витка.

Екран з'єднується з вивідним кінцем первинної обмотки. Краї екрану, виготовленого зазвичай з листової латуні, алюмінієвої фольги або міді, як правило гострі, і створюють електричні поля великої напруженості. Щоб уникнути цього їх обгортають картоном.

## 1.4 Розширене технічне завдання для проектування

Номінальна напруга первинної обмотки трансформатора, В.....	<u>400000/√3</u>
Клас точності.....	<u>0,5</u>
Номінальна напруга основної вторинної обмотки, В.....	<u>100/√3</u>
Номінальна напруга додаткової вторинної обмотки, В.....	<u>100</u>
Номінальна потужність основної вторинної обмотки в класі точності 0,5, В·А.....	<u>200</u>
Номінальна потужність додаткової вторинної обмотки в класі точності 3Р, В·А.....	<u>1200</u>
Гранична потужність, В·А.....	<u>2500</u>
Номінальна частота струму мережі, Гц.....	<u>60</u>
Довжина шляху витoku зовнішньої ізоляції, см.....	<u>840</u>
Найбільша робоча напруга, кВ.....	<u>420</u>
Випробувальна напруга грозового імпульсу внутрішньої і зовнішньої ізоляції:	
- повний імпульс, кВ.....	<u>1500</u>
- зрізаний імпульс, кВ.....	<u>1800</u>
Випробувальна напруга комутаційного імпульсу в сухому стані і під дощем, кВ.....	<u>1050</u>
Випробувальна напруга зовнішньої ізоляції на відсутність бачимої корони, кВ.....	<u>290</u>
Однохвилинна напруга промислової частоти, кВ.....	<u>680</u>
Номінальна фазна напруга трансформатора, кВ.....	<u>231</u>
Коефіцієнт трансформації трансформатора.....	<u>4000±90</u>
Висота трансформатора, мм.....	<u>6080</u>
Габаритні розміри, мм.....	<u>708x844</u>
Маса трансформатора, кг.....	<u>2150</u>
Висота над рівнем моря, м.....	<u>1000</u>
Річна програма випуску, шт.....	<u>4000</u>
Кількість змін праці на добу.....	<u>2</u>

## 2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

## 2.1 Вибір конструкції і розрахунок магнітної системи

У якості магнітної системи в трансформаторах напруги застосовується замкнутий магнітопровід шихтований з пластин або навитий зі стрічок. Матеріалом для магнітопровода служить електротехнічна сталь товщиною 0,35 мм, яка виготовляється з показниками згідно до ГОСТ 21427.3–83. Найчастіше застосовується електротехнічна рулонна сталь 3413. Конструктивно приймається магнітопровід стрижньового типу (дивись рисунок 2.1).

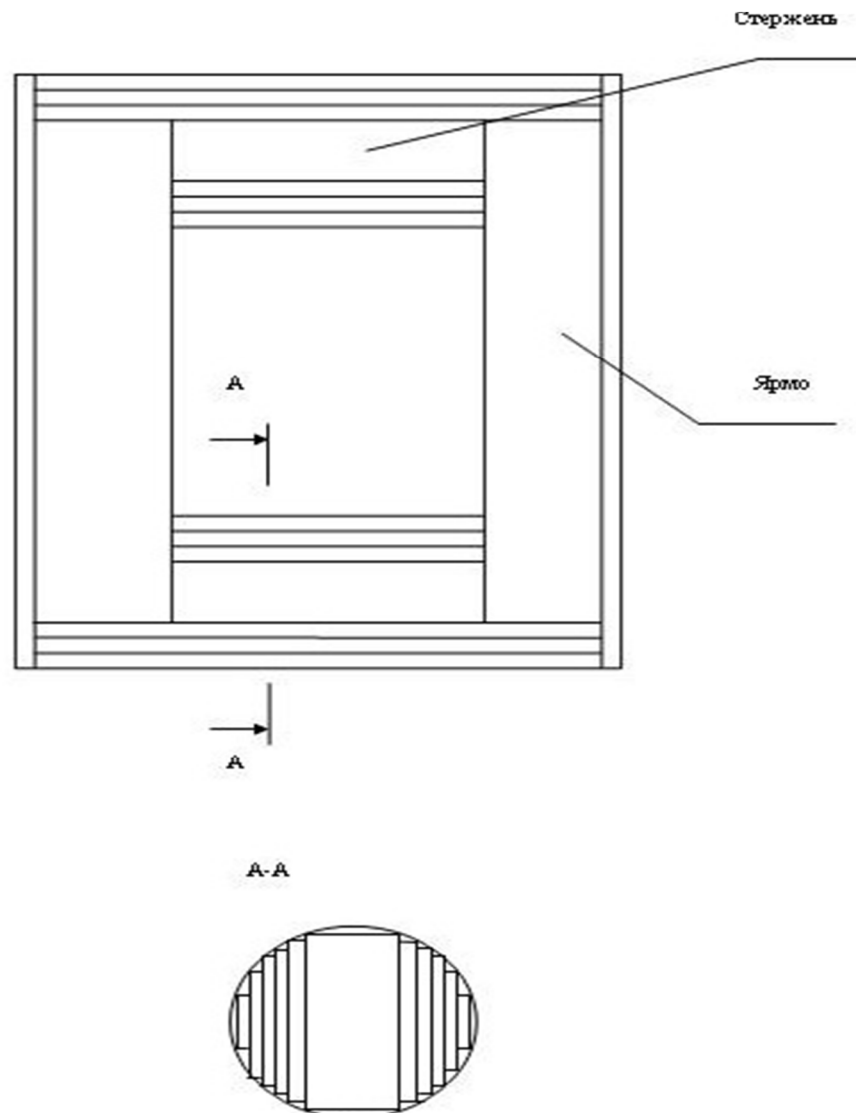


Рисунок 2.1 – Форма магнітопровода

Число сходинок для трансформаторів малої потужності повинно бути не менше 4, щоб розрахунок наближався до оптимального. Конструктивно число сходинок приймається шість. На рисунку 2.2 приведена форма стрижня з шістьма сходинками і з коефіцієнтом кожної ступені.

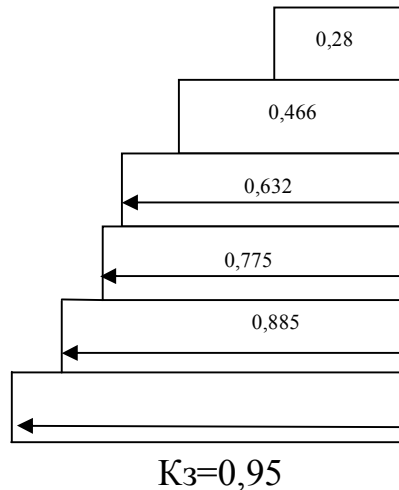


Рисунок 2.2 – Шестиступінчаста форма стрижня

Для магнітної системи трансформаторів напруги застосовується рулонна електрична сталь товщиною 0,35 мм для якої ширину пластин бажано вибрати з такого ряду значень: 25; 30; 40; 55; 65; 75; 85; 95; 105; 120; 135; 155; і т.і. мм.

Відповідно до рисунку 2.2 ширина пластин, з яких шихтується стрижень магнітопровода, знаходиться за формулою

$$C_n = D_c \cdot K_c, \quad (2.1)$$

де  $C_n$  – ширина n-ної пластини, мм;

$D_c$  – діаметр стрижня магнітопровода, м, приймається 110 мм;

$K_c$  – коефіцієнт кожної сходинок пластини відповідно до рисунку 2.2.

Тоді ширина найбільшої першої сходинок складає

$$C_1 = 110 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96 = 105,6 \text{ м}$$

Аналогічно визначається і ширина інших сходинок, з урахуванням коефіцієнтів. Відповідно з розрахунками вони складають:  $C_2=97,35 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_3=85,25 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_4=69,52 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_5=51,26 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_6=30,8 \cdot 10^{-3}$  м.

Корегуємо розрахунки відповідно до попередньо рекомендованих значень:  $C_1=105 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_2=95 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_3=85 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_4=65 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_5=55 \cdot 10^{-3}$  м;  $C_6=30 \cdot 10^{-3}$  м.

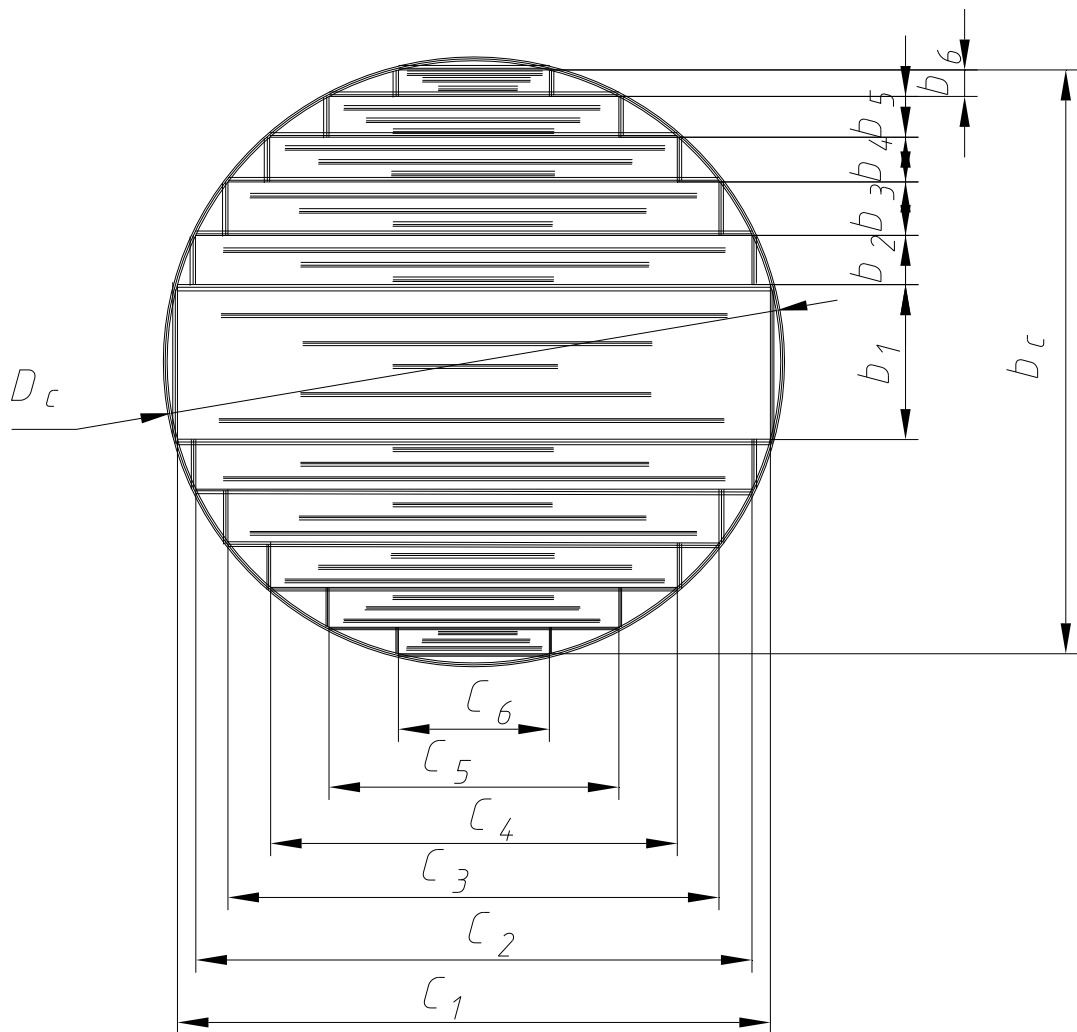


Рисунок 2.3 – Перетин стрижня

Крім того, можна визначити товщину пакета пластин стрижня, скориставшись геометричним співвідношенням в прямокутниках відповідно до рисунку 2.3. Для визначення відповідної товщини пакетів застосується формула (2.2) і її різновиди.

$$b_1 = \sqrt{D_c^2 - C_1^2}, \quad (2.2)$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_2^2} - b_1}{2},$$

$$b_3 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_3^2} - (b_1 + 2b_2)}{2},$$

$$b_4 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_4^2} - (b_1 + 2b_2 + 2b_3)}{2},$$

$$b_5 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_5^2} - (b_1 + 2b_2 + 2b_3 + 2b_4)}{2},$$

$$b_6 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_6^2} - (b_1 + 2b_2 + 2b_3 + 2b_4 + 2b_5)}{2},$$

де  $b_{1,2,3,4,5,6}$  – товщина відповідного пакета стрижня, м.

Тобто

$$b_1 = \sqrt{0,11^2 - 0,105^2} = 32,79 \cdot 10^{-3},$$

Конструктивно приймається  $b_1 = 33 \cdot 10^{-3}$  м і аналогічно обчислюється і приймаються:  $b_2 = 11 \cdot 10^{-3}$  м;  $b_3 = 7 \cdot 10^{-3}$  м;  $b_4 = 10 \cdot 10^{-3}$  м;  $b_5 = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $b_6 = 5 \cdot 10^{-3}$  м. Тоді сумарна товщина пакетів стрижня, яка буде дорівнювати сумарній товщині пакетів ярма, визначається як:

$$b_{я} = b_c = b_1 + \sum_2^n 2b_n, \quad (2.3)$$

де  $b_c$  – сумарна товщина пакетів стрижня, м;

$b_2$  – сумарна товщина пакетів ярма, м;

$n$  – число пакетів пластин.

Тоді

$$b_c = b_{я} = (33 + 2(11 + 7 + 10 + 3 + 5)) \cdot 10^{-3} = 105 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Визначивши ширину пластин і товщину пакетів, можна знайти площу поперечного перетину стрижня магнітопровода:

$$S'_c = S_1 + \sum_2^n 2S_n = C_1 b_1 + \sum_2^n 2C_n b_n, \quad (2.4)$$

де  $S'_c$  – повна площа поперечного перетину стрижня,  $\text{м}^2$ ;

$S_1, S_n$  – повна площа поперечного перетину кожного пакету пластин,  $\text{м}^2$ .

$$S'_c = 3465 \times 2 \times 1045 + 2 \times 595 + 2 \times 650 + 2 \times 165 + 2 \times 150 = 8690 \text{ мм}^2 = 8,69 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Активна площа поперечного перетину стрижня визначається з урахуванням коефіцієнта заповнення сталлю за формулою

$$S_c = S'_c \cdot K_3, \quad (2.5)$$

де  $S_c$  – активна площа поперечного перетину стрижня магнітопровода,  $\text{м}^2$ ;

$K_3$  – коефіцієнт заповнення сталлю. Згідно [2] для рулонної сталі товщиною 0,35 мм коефіцієнт заповнення знаходиться в межах  $0,94 \div 0,98$ .

Приймаємо 0,95.

$$S_c = 8,69 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 8,3 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2.$$

В даному розрахунку приймаємо ярмо двоступінчастої форми. На рисунку 2.4 показан ескіз даного ярма. Розраховуємо двоступінчасте ярмо за допомогою коефіцієнта заповнення сталлю  $k_3 = 0,95$  по формулі

$$S_{\text{я}} = S_c \times k_{y1} \text{ м}^2, \quad (2.6)$$

де  $k_{y1}$  – коефіцієнт підсилення ярма, приймаємо 5%.

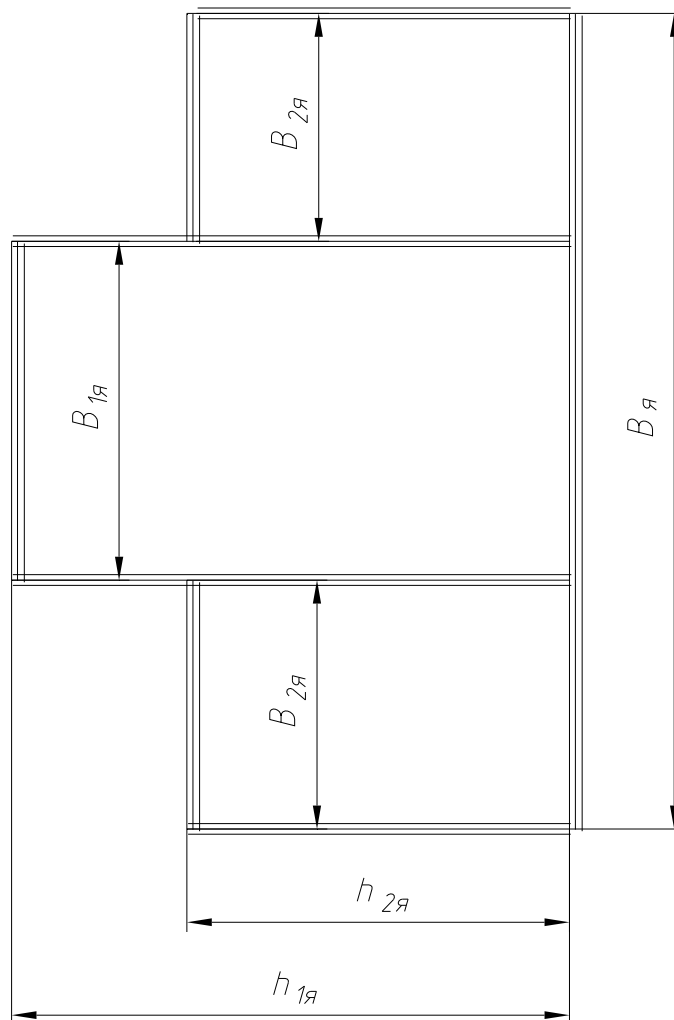


Рисунок 2.4 – Ескіз ярма

Тоді користуючись формулою (2.6) визначається повна площа поперечного перетину

$$S_{\text{я}} = 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,05 = 8,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Згідно рисунка 2.4 товщина пакетів ярма визначається за формулами

$$b_{1\text{я}} = b_1 + 2 \times b_2, \quad (2.7)$$

$$b_{2\text{я}} = b_3 + b_4 + b_5 + b_6, \quad (2.8)$$

Підставив в формули (2.7) і (2.8) числові значення, отримаємо

$$B_{1\text{я}} = 33 \times 10^{-3} + 2 \times 11 \times 10^{-3} = 55 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

$$B_{2\text{я}} = (7 + 10 + 3 + 5) \times 10^{-3} = 25 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

Сумарна товщина пакетів ярма повинна дорівнювати товщині пакетів стрижня

$$b_{\text{я}} = b_{\text{с}} = 105 \times 10^{-3},$$

де  $b_{\text{я}}$  – сумарна товщина пакетів ярма, м.

Висота пакетів ярма приймається з обліком ширини пластин, згідно попередньо рекомендованих значень ширини пластин нормалізованого ряду. Для магнітопроводу з стрижнем, діаметр якого 110 мм, висота першої ступені ярма:  $h_{1\text{я}} = h = 105$  мм. Висоту другої ступені можна визначити, знаючи перетин ярма і визначивши перетин першої ступені ярма.

Тоді

$$h_{2\text{я}} = \frac{S_{\text{я}} - S_{1\text{я}}}{2 \cdot b_{2\text{я}}} = \frac{S_{\text{я}} - b_{\text{я}} \cdot h_1}{2 \cdot b_{2\text{я}}}, \quad (2.9)$$

де  $h_2$  – висота пакета ярма, м;

$S_{я}$  – площа поперечного перетину ярма, м<sup>2</sup>;

$S_{1я}$  – перетин однієї ступені ярма, м.

$$h_{2я} = \frac{1,05 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} - 0,055 \cdot 105}{2 \cdot 0,025} = 0,0669 \text{ м}$$

Отримана таким чином висота визначається згідно нормалізованого ряду, приймаємо  $h_{1я} = 75$  мм.

Тоді повний і активний поперечний перетин ярма можна визначити

$$S'_{я} = b_{1я} \times h_{1я} + 2 \times b_{2я} \times h_{2я}, \quad (2.10)$$

$$S_{я} = S'_{я} \times k_3,$$

де  $S'_{я}$  – повний поперечний перетин ярма, м<sup>2</sup>;

$S_{я}$  – активний поперечний перетин ярма, м<sup>2</sup>.

Підставив числові значення отримаємо

$$S'_{я} = 0,055 \times 0,105 + 2 \times 0,025 \times 0,075 = 9,525 \times 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Визначив активний поперечний перетин стрижня і ярма, а також знайшовши геометричні розміри по рисунку 2.1 можна знайти масу стрижня, ярма, кута стику і всього магнітопровода.

- для стрижня  $l_{ср.с} = 195$  мм;

- для ярма  $l_{ср.я} = 225$  мм;

- для кута стику

$$l_{ср.к} = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

$$l_{\text{ср.к}} = \frac{105 + 75}{2} = 90 \text{ мм}$$

Масу стрижня, ярма, кутів стику магнітопровода можна визначити за формулою:

$$G = \gamma \cdot S \cdot l, \quad (2.11)$$

де  $G$  – маса стрижня, або ярма, або кута стику, кг;

$\gamma$  – щільність матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ , для сталі має середнє значення  $7,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

$S$  – активна площа поперечного перетину стрижня ( $S_c$ ), ярма ( $S_y$ ), кута стику, що відповідає для даної форми магнітопровода площі активного перетину стрижня ( $S_k = S_c$ );

$l$  – середня довжина стрижня ( $l_c$ ), ярма ( $l_y$ ) або кута стику ( $l_k$ ).

$$G_c = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 8,34 \cdot 10^{-3} \cdot 0,195 = 12,44;$$

$$G_y = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 8,34 \cdot 10^{-3} \cdot 0,255 = 15,78;$$

$$G_k = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 8,34 \cdot 10^{-3} \cdot 0,09 = 5,74.$$

Повна маса магнітопровода для даної обраної форми визначається за формулою

$$G = 2G_c + 2G_y + 4G_k, \quad (2.12)$$

де  $G$  – повна маса магнітопровода, кг.

Для даного розрахунку:

$$G = 2 \cdot 12,44 + 2 \cdot 15,73 + 4 \cdot 5,74 = 79,34 \text{ кг}$$

Габаритні розміри магнітопровода розраховуються наступним чином

- висота магнітопровода

$$H = H_0 + 2 \times H_2, \quad (2.13)$$

$$H = 195 + 105 + 105 = 405 \text{ мм.}$$

- ширина магнітопровода

$$B = B_1 + B_2 + B_2, \quad (2.14)$$

$$B = 225 + 105 + 105 = 435 \text{ мм.}$$

## 2.2 Розрахунок внутрішньої і зовнішньої ізоляції

У трансформаторів напруги є декілька найбільш важливих з погляду електричної стійкості ізоляційних проміжків як для внутрішньої, так і для зовнішньої ізоляції.

Для внутрішньої ізоляції це: визначення ізоляційних проміжків між обмоткою вищої напруги (ВН) і ярмом магнітопровода; розрахунок ізоляційних проміжків між котушками обмотки; визначення необхідної товщини міжшарової та міжкотушкової ізоляції.

Для зовнішньої ізоляції: ізоляційний проміжок по висоті і струмоведучого вводу, тобто активна висота; довжина шляху витoku по поверхні ізолятора (покришки) і його вибір.

У якості внутрішньої ізоляції у проектуємому трансформаторі застосовуються: кабельний папір ТВ - 120 ГОСТ 24874 - 91 і трансформаторне масло ГОСТ 10121 - 93, електрокартон Г-0,5-1000 ГОСТ 4194 - 88, паперово-бакелітовий циліндр ГОСТ 8726 - 93 та інші матеріали.

Так як діаметр стрижня складає 110 мм, то внутрішній діаметр паперово-бакелітового циліндра приймається 115 мм, товщина стінки 4 мм, отже зовнішній діаметр циліндра буде 123 мм. Довжина повинна бути менше розміру

вікна магнітопроводу щодо стрижня (див. рисунок 2.1), тому конструктивно приймаємо  $\ell_{\text{ц}} = 200$  мм. Тобто циліндр має розміри  $\varnothing 115/123 \times 200$  мм.

Для визначення ізоляційного проміжку між обмоткою ВН і ярмом магніто-проводу в розрахунках необхідно користуватися математичним методом інтерполяції.

Методика розрахунку такого проміжку така: визначається фазна напруга однієї обмотки трансформатора

$$U_{\text{об}} = \frac{U_{\text{вн}}}{\sqrt{3} \cdot m \cdot n}, \quad (2.15)$$

де  $U_{\text{об}}$  – фазна напруга обмотки трансформатора, кВ;

$U_{\text{вн}}$  – номінальна напруга трансформатора, кВ;

$\sqrt{3}$  – сприяє перекладу лінійної напруги у фазну;

$m$  – число обмоток у каскаді трансформатора, у трансформаторах НКФ складає 2;

$n$  – кількість каскадів трансформатора.

$$U_{\text{об}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 3} = 38,5$$

Товщина паперово-масляної ізоляції вибирається за чинним значенням випробувальної напруги частотою 60 Гц, тобто однохвилинній випробувальній напрузі внутрішньої ізоляції, згідно ГОСТ 1516.1-76. Можна прийняти найближче більше значення номінальної напруги над напругою обмотки (наприклад, у даному розрахунку найближче більше значення 110 кВ) і визначити відповідну йому однохвилинну випробувальну напругу внутрішньої ізоляції (тобто 200 кВ).

У той же час, щоб одержати точніше значення і, відповідно, ощадливо вибрати ізоляцію, користуються методом інтерполяції, алгебраїчне відображення якого у даному випадку має вигляд

$$\frac{U_{об} - U_{ном\ min}}{U_{ном\ max} - U_{ном\ min}} = \frac{U_{роз} - U_{пр\ min}}{U_{пр\ max} - U_{пр\ min}}, \quad (2.16)$$

де  $U_{ном\ min}$ ,  $U_{ном\ max}$  – найближчі значення номінальної напруги менше і біль-ше, ніж значення напруги обмотки, які знаходяться відповідно до ГОСТ 1516.1-76, кВ;

$U_{роз}$  – розрахункове чинне значення випробувальної однохвилинної напруги промислової частоти, кВ;

$U_{пр\ min}$ ,  $U_{пр\ max}$  – найближчі значення однохвилинної випробувальної напруги внутрішньої ізоляції відповідні значенням  $U_{ном\ max}$  і  $U_{ном\ min}$  згідно ГОСТ 1516.1-76\*, кВ.

$$\frac{38,5-35}{110-35} = \frac{U_{роз}-95}{200-95}$$

$$U_{роз} = 95 + \frac{(38,5-35) \cdot (200-95)}{110-35} = 99,9$$

Згідно [1] розрахованій розрядній напрузі для кабельного папіру в маслі відстані між електродами (обмоткою ВН і ярмом магнітопровода) буде більше ніж 1 см, але менше 2 см, тому що знайдене значення знаходиться між 53 і 76 кВ.

Скориставшись методом інтерполяції за аналогією складається пропорція для ізоляційного проміжку  $X_i$

$$\frac{99,9-96}{110-96} = \frac{x_{i3}-3}{4-3}$$

$$X_{i3}=3,28.$$

Конструктивно приймається значення цього ізоляційного проміжку 35 мм, а бортик з кабельного папіру буде виконуватися довжиною 10 мм.

До електричного розрахунку проміжків входить: визначення активної висоти ізолятора, довжини шляху витоку, а також числа і розмірів ребер.

У якості зовнішньої ізоляції в трансформаторах напруги серії НКФ застосовують покришку з електротехнічної парцеляни ГОСТ 9920-93.

Для визначення випробувальної напруги зовнішньої ізоляції за ГОСТ 1516.1-76\* в сухому стані, при грозових імпульсах і під дощем треба користуватися методом інтерполяції, так як трансформатор напруги на 400 кВ нестандартний.

Розрахунок випробувальної напруги в сухому стані має вигляд:

$$(U_{\text{сух}} - U_{\text{пр. min}}) \cdot (U_{\text{пр. max}} - U_{\text{пр. min}}) = (U_{\text{ном}} - U_{\text{ном. min}}) \cdot (U_{\text{ном. max}} - U_{\text{ном. min}}), \quad (2.17)$$

де  $U_{\text{сух}}$  – випробувальна напруга зовнішньої ізоляції за ГОСТ 1516.1-76\* в сухому стані, кВ;

$U_{\text{пр. min}}$ ,  $U_{\text{пр. max}}$  – найближчі значення випробувальної напруги зовнішньої ізоляції за ГОСТ 1516.1-76\* в сухому стані, кВ;

$U_{\text{ном}}$  – номінальне значення напруги, яке дорівнює 400 кВ;

$U_{\text{ном. min}}$ ,  $U_{\text{ном. max}}$  – найближчі значення номінальної напруги зовнішньої ізоляції за ГОСТ 1516.1-76\* в сухому стані, кВ.

Тобто найближчі номінальні значення напруги це 330 та 500 кВ, які відпові-дають випробувальній напрузі 700 та 900 кВ.

Тоді

$$(U_{\text{сух}} - 700) \cdot (900 - 700) = (400 - 330) \cdot (500 - 330)$$

$$U_{\text{сух}} = 700 + ((400 - 330) \cdot (900 - 700)) \cdot (500 - 330) = 782,35 \text{ кВ}$$

Випробувальні напруги при грозових імпульсах і під дощем будуть дорівнювати:  $U_{\text{імп}}=1364,7$  кВ;  $U_{\text{мокр}}=628,2$  кВ.

Активну висоту прохідного ізолятора на 400 кВ можна визначити додатково розраховавши відповідні значення розрахункових випробувальних напруг за ГОСТ 1516.1-76\*

$$U_{\text{роз.сух.}} = K_1 \cdot K_2 \cdot U_{\text{сух.}}, \quad (2.18)$$

$$U_{\text{роз.імп.}} = K_1 \cdot K_2 \cdot U_{\text{імп.}}, \quad (2.19)$$

$$U_{\text{роз.мокр.}} = K_1 \cdot K_2 \cdot U_{\text{мокр.}}, \quad (2.20)$$

де  $U_{\text{роз.сух.}}$ ,  $U_{\text{роз. імп.}}$ ,  $U_{\text{роз.мокр.}}$  – значення випробувальних напруг, кВ;

$U_{\text{сух.}}$ ,  $U_{\text{імп.}}$ ,  $U_{\text{мокр.}}$  – значення випробувальних напруг за ГОСТ 1516.1-76\*, кВ;

$K_1$  – коефіцієнт запасу, що визначає збільшення пробивної або розрядної напруги по відношенню до випробувальної, складає 1,05;

$K_2$  – конструктивний коефіцієнт запасу який визначається в залежності від умов роботи. Для зовнішніх проміжків і зовнішніх поверхонь фарфорових ізоляторів в повітрі згідно [1] приймається 1.

$$U_{\text{роз.сух.}} = 1,05 \cdot 1 \cdot 782,35 = 821,46$$

$$U_{\text{роз.імп.}} = 1,05 \cdot 1 \cdot 1364,7 = 1432,94$$

$$U_{\text{роз.мокр.}} = 1,05 \cdot 1 \cdot 628,2 = 659,61$$

Активна висота ізолятора зовнішнього устанавлення визначається відповідно

$$h_{\text{акт.сух}} = 1716,4 - \sqrt{312 \cdot 10 - 1226 \cdot U_{\text{роз.сух}} \cdot K_3},$$

$$h_{\text{акт.імп}} = 0,167 \cdot U_{\text{роз.імп}} \cdot K_3,$$

$$h_{\text{акт.мокр}} \geq 0,444 \cdot U_{\text{роз.мокр}} \cdot K_3,$$

де  $h_{\text{акт.сух}}$ ,  $h_{\text{акт.імп}}$ ,  $h_{\text{акт.мокр}}$  – активна висота ізолятора, в сухому стані, при грозових імпульсах та під дощем, см.

$$h_{\text{акт.сух}} = 1716,4 - \sqrt{312 \cdot 10 - 1226 \cdot 821,46 \cdot 1} = 262,82$$

$$h_{\text{акт.імп}} = 0,167 \cdot 1432,94 \cdot 1 = 239,3$$

$$h_{\text{акт.мокр}} \geq 0,444 \cdot 659,61 \cdot 1 \geq 278,92$$

За активну висоту покришки приймається більше із розрахованих значень, отриманих з вищенаведених формул. Прийняте значення активної висоти покришки для трансформатора напруги на 400 кВ буде дорівнювати 280 см, а покришка одного блоку – 93,33 см.

Знаходимо довжину шляху витoku ізолятора

$$L_{\text{вит}} = \ell_{\text{пит}} \cdot U_{\text{роб}}, \quad (2.21)$$

де  $L_{\text{вит}}$  – повна довжина шляху витoku ізоляторної конструкції, см;

$\ell_{\text{пит}}$  – питома довжина шляху витoku, при категорії А не менш 1,5 см/кВ;

$U_{\text{роб}}$  – робоча напруга, обумовлена по ГОСТ 1516.1-76, становить 420 кВ.

$$L_{\text{вит}} = 1,5 \cdot 420 = 630$$

Число ребер на ізоляторі, що забезпечує заданий шлях витоку знаходиться

$$n = \frac{L_{\text{вит}} - Ha}{l_{\text{ум}} - h}, \quad (2.22)$$

де  $n$  – кількість ребер на ізоляторі, шт;

$l_{\text{ум}}$  – шлях витоку по ребру, см, знаходиться відповідно до [5];

$h$  – висота ребра, см, вибирається відповідно [5];

$$n = \frac{630 - 280}{22 - 5} = 20,58$$

Приймаємо 21 ребро для всього трансформатора, а для одного блока 7 ребер.

### 2.3 Розрахунок і розкладення обмоток

Поняття розрахунку обмоток складає визначення числа витків; струму, площі поперечного перетину провідників; вибір за знайденими значеннями провідникових матеріалів, їх марок і позначень; розрахунок та вибір ізоляції і т.ін.

Крім того виконується розкладення обмоток, тобто визначається: кількість обмоток, кількість котушок в обмотці, число прошарків і число витків у прошарку котушок, розміри обмотки, кількість витків у котушці, а також її параметри.

У проєктуємому трансформаторі є обмотки: вищої напруги (ВН); основна низької напруги (має позначення “С”) на стандартне значення напруги  $100/\sqrt{3}$  В; додаткова низької напруги (має позначення “Т”) на стандартне значення напруги 100 В; узгоджувальна (вирівнювальна) обмотка (має позначення “П”) для зменшення потоку розсіювання в каскаді; зв’язуюча обмотка (має

позначення “Р”) для електричного з’єднання блоків і котушок між собою.

Спочатку необхідно задатися індукцією в стрижні магнітопровода, в залежності від вибраного раніше магнітного матеріалу. Так, для сталі марки 3413 індукція знаходиться в межах від 1,2 до 1,5 Тл відповідно до ГОСТ 21427.3-83. Конструктивно приймається індукція 1,45 Тл.

Значення струму в обмотках можна визначити за формулою

$$I = \frac{P}{U}, \quad (2.23)$$

де  $I$  – значення струму в обмотці А;

$P$  - потужність навантаження в обмотці (надається в завданні), ВА;

$U$  – значення напруги в обмотці, В

Для основної обмотки низької напруги “С” розмір струму при заданій потужності 400 ВА складає

$$I_C = \frac{400 \cdot \sqrt{3}}{100} = 6,92$$

Аналогічно можна визначити значення струму в обмотках “Т” і ВН. Для трансформатора напруги на 400 кВ з зазначеною вище потужністю, ці значення будуть відповідно 4 А та 0,00173 А.

Число витків обмоток низької напруги можна визначити за формулою:

$$W = \frac{U}{4,44 \cdot B_C \cdot S_C \cdot f}, \quad (2.24)$$

де  $W$  – число витків обмотки;

$B_C$  – індукція в стержні магнітопровода, Тл, приймається 1,45;

$f$  – частота струму мережі, Гц.

Прийнявши  $B_C=1,45$  Тл і скориставшись розрахунком магнітної системи,

визначимо число витків основної обмотки низької напруги для трансформатора

$$W_C = \frac{100}{4,44 \cdot 1,45 \cdot 9,64 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot \sqrt{3}} = 18,6$$

Приймається 19 витків в обмотці “С”, аналогічно визначається, число витків в обмотці “Т”, яке буде складати 33 витки, в узгоджувальній обмотці 39 витків, а в зв’язуючій обмотці 36 витків.

Число витків вищої напруги можна визначити за коефіцієнтом трансформації, тобто

$$W_{BH} = W_C \cdot \frac{U_{BH}}{U_C}, \quad (2.25)$$

де  $W_{BH}$  – число витків обмотки вищої напруги.

$$W_{BH} = 19 \cdot \frac{400000 \cdot \sqrt{3}}{100 \cdot \sqrt{3}} = 76000$$

Так, як трансформатор двохстрижньовий і каскадний, то число витків в обмотці буде 38000.

Обмотка ВН звичайно складається з котушок, основний розмір кожної котушки вибирається таким чином, щоб обмотка за формою наближалася до кулі. Приймається 8 котушок в обмотці ВН з кроком зменшення 10 мм.

Вводяться позначення котушок А, Б, В...,З, а відповідно вісьові розміри позначаються  $l_a \div l_3$ , а радіальні (висота котушок) —  $h_a \div h_3$ .

Визначається вісьовий розмір обмотки С

$$l_a = l_c - 2X_{i3}, \quad (2.26)$$

$$l_a = 0,21 - 2 \cdot 0,035 = 0,14 \text{ м.}$$

Інші вісьові розміри вибираються конструктивно з визначеним кроком 10 мм, тобто ці розміри будуть

$$l_B = 0,13 \div l_3 = 0,07$$

Визначається площа поперечного перетину обмотувальних проводів за формулою:

$$S = \frac{I}{j}, \quad (2.27)$$

де  $S$  – площа поперечного перетину обмотувального проводу,  
 $j$  – щільність струму відповідної обмотки;  $НН = 1,1 \text{ А/мм}^2$ ,  $ВН = 0,2 \text{ А/мм}^2$ .

В основній обмотці низької напруги “С” площа дорівнює:

$$S_c = \frac{6,92}{1,1} = 6,29$$

Аналогічно визначається  $S_T = 3,64 \text{ мм}^2$ , а в обмотці ВН  $S_{BH} = 0,0087 \text{ мм}^2$ .

Вибирається за ГОСТ 16512–80 круглий мідний провід марки ПБ-3,0/0,55, яким будуть намотуватися обмотки “П”, “Т” і “Р”, діаметр проводу з ізоляцією  $d_{BH \text{ із}} = 0,33 \text{ мм}$  і площа поперечного перетину проводу  $S_{BH} = 0,037 \text{ мм}^2$ .

Обмотка “С” буде намотана прямокутним проводом ПБ-2,65x5,60/0,55.

За ГОСТ 16507–80 вибирається круглий мідний провід марки ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28, яким буде намотуватися обмотка вищої напруги.

Основний провід обмотки ВН відповідно до розрахунків ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28, діаметр проводу з ізоляцією  $d_{BH \text{ із}} = 0,28 \text{ мм}$  і площа поперечного перетину проводу  $S_{BH} = 0,031 \text{ мм}^2$ . Початковий і кінцевий прошарок обмотки вищої напруги, а також вводи виконуємо проводом більшого діаметру ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28/0,75, діаметр проводу з посиленою ізоляцією  $d_{\text{пос із}} =$

0,75 мм і площа поперечного перетину  $S_{\text{пос}} = 0,3 \text{ мм}^2$ .

В каскадних трансформаторах напруги спочатку на паперово-бакелітовий циліндр намотується узгоджувальна обмотка “П”, потім обмотка ВН, накладається екран і на нижньому стрижні намотують обмотки низької напруги “С” і “Т”, а потім зв’язуюча обмотка “Р” (крім нижньої котушки нижнього блоку і верхньої котушки верхнього блоку).

Знаходиться вісьовий розмір обмотки “П”, якщо вона буде намотана в один прошарок

$$L_n = d_{\text{із}}(W_n + 1) \cdot K_y, \quad (2.28)$$

де  $l_n$  – вісьовий розмір обмотки “П”, мм;

$K_y$  – коефіцієнт укладення, що враховує щільність укладення витків, звичайно  $K_y = 1,03$ ;

1 – додаткове місце в прошарку для одного витка, що враховує намотування витків за гвинтовою лінією.

Тоді

$$L_n = 3,3 \cdot (39 + 1) \cdot 1,03 = 145,96$$

Бакелітовий циліндр має довжину 200 мм, тому можна намотувати обмотку “П” в один прошарок.

Для обмоток “С”, “Т” і “Р” приймаємо вісьовий розмір 75 мм, які намотуються в два прошарки.

За відомим зовнішнім діаметром бакелітового циліндру, можна визначити внутрішній радіальний розмір обмотки “П”

$$d_n = D_u + 2 \cdot (d_{\text{с із}} + 1) \cdot n_{\text{пр}}, \quad (2.29)$$

де  $d_n$  – внутрішній радіальний розмір обмотки “П”, мм;

$D_u$  – зовнішній діаметр бакелітового циліндра, мм;

$n_{np}$  – число прошарків обмотки “П”.

Тоді

$$d_n = 123 + 2 \cdot (3,3 + 1) \cdot 1 = 131,6$$

Приймається 132 мм.

Вибирається конструктивно ізоляція між обмоткою “П” і котушкою А обмотки вищої напруги з восьми прошарків кабельного паперу ТВ–120.

Внутрішній діаметр обмотки ВН

$$d_{BH} = d_n + 2 \cdot \Delta izn, \quad (2.30)$$

де  $d_{BH}$  – внутрішній діаметр обмотки ВН, мм;

$\Delta izn$  – товщина ізоляції, що намотується поверх обмотки “Т”, з урахуванням зазначеного вище  $8 \times 0,12$  мм.

$$d_{BH} = 142 + 2 \cdot 8 \cdot 0,12 = 144$$

Число витків у прошарках котушок обмотки ВН можна визначити використовуючи формулу (2.28) і перетворивши її щодо витків. Тоді число витків в першому ( $W_{A1}$ ) і другому ( $W_{A2}$ ) прошарках котушки А обмотки ВН з урахуванням того, що вісьовий розмір котушки 145 мм, знаходиться

$$W_{A1} = \frac{145}{1,03 \cdot 0,75} - 1 = 186,7$$

Приймається 185 витків.

$$W_{A2} = \frac{145}{1,03 \cdot 0,28} - 1 = 501,77$$

Приймається 500 витків.

Користуючись формулою (2.25) і перетворивши її щодо напруги, визначається напруга витків прошарку. Підставляються замість числа витків основної обмотки знайдені вище значення в прошарках котушки А

$$U_{A1} = \frac{185 \cdot 400000}{\sqrt{3} \cdot 76000} = 5622$$

$$U_{A2} = \frac{500 \cdot 400000}{\sqrt{3} \cdot 76000} = 1519,4$$

Визначається товщина ізоляції за більшим зі знайдених значень за формулою

$$\Delta_{ш} = \frac{U_{пр} \cdot K_{пер} \cdot K_3}{E}, \quad (2.31)$$

де  $\Delta_{ш}$  – товщина ізоляції між прошарками витків обмотки, мм;

$U_{пр}$  – напруга витків прошарку, кВ;

$K_{пер}$  – коефіцієнт перенапруги в ланцюгах для визначення випробувальної напруги промислової частоти, приймається максимально можливий, тобто вісім;

$K_3$  – коефіцієнт запасу, приймається максимально можливий, тобто 1,5;

$E$  – максимальна напруженість ізоляції, для паперово-масляної ізоляції приймається 25 кВ/мм

$$\Delta_{ш} = \frac{1,5194 \cdot 8 \cdot 1,5}{25} = 0,729$$

Визначається кількість прошарків кабельного папіру

$$n = \frac{\Delta_{np}}{\Delta_{\delta}}, \quad (2.32)$$

де  $n$  – кількість прошарків, шт;

$\Delta_{\delta}$  – товщина паперової ізоляції, мм, в даному випадку 0,12 мм.

$$n = \frac{0,729}{0,12} = 6,075$$

Приймається шість прошарків.

Тоді товщина міжпрошаркової ізоляції, що виконується шістьма шарами кабельного паперу і складає  $6 \times 0,12 = 0,72$  мм.

Раніше було прийнято вісім котушок, тому число витків у кожній котушці обмотки вищої напруги знаходиться за формулою:

$$W_k = \frac{W_{BH}}{n_k}, \quad (2.33)$$

де  $W_k$  – число витків у кожній котушці, шт;

$n_k$  – число котушок в обмотці вищої напруги, шт.

$$W_k = \frac{12000}{8} = 1500$$

Аналогічно (2.25) визначається напруга, що відповідає виткам котушки

$$U_k = \frac{1500 \cdot 400000}{\sqrt{3} \cdot 76000} = 4558,03$$

Початковий і кінцевий прошарок у крайніх котушках обмотки

виконуються посиленими і тому число прошарків, що виконуються основним проводом обмотки ВН, у котушках А і З знаходиться

$$n = \frac{W_{a1} - W_{a1}(W_{z1})}{W_{a2}(W_{z2})}, \quad (2.34)$$

де  $n_{ш}$  – число прошарків у котушках, які виконуються основним проводом ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,75.

$$n = \frac{1500 - 185}{500} = 2,63$$

Приймаємо 3.

Товщину котушок А і З можна визначити за формулою

$$\delta_{A(3)} = [d_{noc.iz} + n_{ш} \cdot d_{CHiz} + (n_{ш} + 1) \Delta_{A(3)}] \cdot K_y \quad (2.35)$$

де  $\Delta_{A(3)}$  – товщина міжшарової ізоляції в котушці, мм.

$$\delta_{A(3)} = [0,75 + 3 \cdot 0,3 + (3 + 1) \cdot 6 \cdot 0,12] \cdot 1,03 = 4,47$$

Приймається 4,5 мм.

Міжкотушечну ізоляцію прокладати в обмотці ВН немає потреби.

Зовнішній діаметр котушки А визначається

$$d_{зов. A} = d_{ВН} + 2\delta_k, \quad (2.36)$$

де  $d_{зов. A}$  – зовнішній діаметр котушки А, мм.

$$d_{зов. А} = 144 + 2 \cdot 4,5 = 153$$

Аналогічно виконується розрахунок і розкладення інших котушок обмотки, які наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Розкладення обмотки вищої напруги

Позначення котушки	Число прошарків, $n_{ш}$	Число витків у прошарку $W_M$	Усього витків у котушці $W_K$	Марка обмотувального проводу	Розмір ізоляції		Діаметр ізоляції		Кількість шарів та товщина ізоляції			
					вісьовий $\Delta_k, \text{мм}$	радіальний $\Delta_k, \text{мм}$	внутрішній $d_{вн}$	зовнішній $d_{зов}$				
П	1	39	39	ПБ-3,0/0,55	145	4,5	132	144	8×0,12			
А	1	185	1685	ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28/0,75	145	5,0	144	153	6×0,12			
	3	500										
Б	4	415	1660	ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28	135	4,0	153	162				
В	4	385	1540		125	4,0	162	170				
Г	5	350	1750		115	5,0	170	180				
Д	5	320	1600		105	4,0	180	188				
Е	5	290	1450		95	4,0	188	196				
Ж	6	255	1530		85	5,0	196	206				
З	7	225	1660	ПЕЕІДХ2-200-МЕК 0,28/0,75	75	6,0	206	218	3×0,12			
	1	85										
С	2	19	19	ПБ-2,65x5,6/0,55	75	4,5	218	230				
Т	2	33	33	ПБ-3,0/0,55						7,5	230	244
Р		36	36							8,5	244	256

Для розрахунку активних опорів обмоток знаходиться середній діаметр котушки або обмотки за формулою:

$$d_{\text{сер}} = \frac{d_{\text{вн}} + d_{\text{нар}}}{2}, \quad (2.37)$$

де  $d_{\text{сер}}$  – середній діаметр котушки, м.

Для котушки А

$$d_{\text{серА}} = \frac{144 + 153}{2} \cdot 10^{-3} = 0,149 \text{ м.}$$

Аналогічно знаходиться середній діаметр і інших котушок обмотки.

Тоді активні опори можна визначити як

$$r = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d_{\text{сер}} \cdot W}{S}, \quad (2.38)$$

де  $r$  – активний опір котушки або обмотки, Ом;

$\rho$  – питомий електричний опір матеріалу проводу, Ом/м, для міді при  $20^{\circ}\text{C}$   $\rho = 0,0176 \cdot 10^{-6}$  Ом/м;

$W$  – число витків у котушці або обмотці, шт;

$S$  – площа поперечного перетину обмотувального проводу,  $\text{м}^2$ .

Для котушки А активний опір

$$r_A = \frac{0,0176 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 0,1444 \cdot 175}{0,441 \cdot 10^{-6}} + \frac{0,0176 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 0,149 \cdot 450 \cdot 3}{0,031 \cdot 10^{-6}} = 363,1$$

Аналогічно визначаються активні опори інших котушок обмотки ВН і обмотки “С” і дані розрахунку зводяться в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Активні опори котушок і обмоток

Позначення котушок і обмоток	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	ВН	С
Активний опір котушки або обмотки, Ом	3631	467,6	455,7	545,9	524,8	496,3	48,2	97,4	3999	0,034

При розрахунку похибок враховується приведений активний опір обмотки ВН, тобто приведені значення до опору обмотки “С”

$$r'_{вн} = m \cdot n \cdot r_{вн} \cdot \left[ \frac{W_c}{W_{ВН}} \right]^2, \quad (2.39)$$

де  $r'_{вн}$  – приведений активний опір обмотки ВН, Ом.

$$r'_{вн} = 2 \cdot 3 \cdot 3999 \cdot \left[ \frac{19}{76000} \right]^2 = 0,0015$$

Для визначення індуктивних опорів знаходиться коефіцієнт Роговського (безпосереднє значення)

$$K_p = 1 - \frac{a_{кр} + \delta_{ВН} + \delta_c}{\pi \cdot l_{ц}}, \quad (2.40)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт Роговського;

$a_{кр}$  – ширина каналу розсіювання (відстань від зовнішнього прошарку

обмотки ВН до внутрішнього прошарку обмотки “С”), у який входять: товщина екрану ізоляції, см, у даному випадку ак.р.=0,4;

$\delta_c$  – радіальна товщина обмотки ВН, см, знаходиться як сума радіальних розмірів котушок за таблицею, відповідно до даного розрахунку 3,7 см;

$l_{\text{ц}}$  – довжина бакелітового циліндра, см.

У даному розрахунку

$$K_p = 1 - \frac{0,4 + 3,7 + 0,43}{3,14 \cdot 20} = 0,928$$

Крім того, знаходиться геометричний розмір С за формулою

$$C = a_{\text{кр}} + \frac{\delta_{\text{ВН}} + \delta_c}{3}, \quad (2.41)$$

де  $C$  – геометричний розмір, см.

У даному випадку

$$C = 0,4 + \frac{3,7 + 0,43}{3} = 1,776$$

Необхідно також визначити середній діаметр кільцевого проміжку між обмотками ВН і С.

Сума індуктивних опорів приведеної обмотки ВН і основної обмотки С знаходиться за формулою

$$X'_{\text{ВН}} + X_C = \frac{W_c^2 \cdot D_{\text{сер}} \cdot C \cdot K_p}{80500 l_{\text{ц}}}, \quad (2.42)$$

де  $(X'_{BH} + X_C)$  – сума індуктивних опорів приведеної обмотки ВН і основної обмотки С, Ом;

$D_{сер}$  – середній діаметр кільцевого проміжку між обмотками ВН і С, см, знаходиться відповідно до рисунку 4.1 і даних таблиці 2.1, тобто 22,4 см.

Тоді

$$X'_{BH} + X_C = \frac{19^2 \cdot 22,4 \cdot 1,776 \cdot 0,928}{80500 \cdot 20} = 0,0082$$

А індуктивний опір обмотки ВН приведений до обмотки С, знаходиться як

$$X'_{BH} = 0,75 \cdot (X_{BH} + X_2), \quad (2.43)$$

де  $X'_{BH}$  – індуктивний опір обмотки ВН, приведений до обмотки С, Ом.

У даному випадку

$$X'_{BH} = 0,75 \cdot 0,0082 = 0,006$$

Маса міді, необхідна для виготовлення обмоток або котушок, визначається за формулою

$$G = j \cdot W \cdot \pi \cdot d_{сер} \cdot S, \quad (2.44)$$

де  $G$  – маса міді обмоток або котушок, кг;

$J$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>, для міді  $j = 8900$  кг/м<sup>3</sup>.

Для котушки А обмотки ВН

$$G_A = 8900 \cdot 3,14 \cdot (175 \cdot 0,1444 \cdot 10^{-6} \cdot 0,441 + 450 \cdot 3 \cdot 0,149 \cdot 0,031 \cdot 10^{-6}) = 0,39$$

Аналогічно визначається маса міді інших котушок (маса міді обмотки ВН є сумою знайдених значень), а також обмоток “П”; “С”, “Т” і “Р”.

Дані розрахунку приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Маса міді котушок і обмоток

Позначення котушок і обмоток	П	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	ВН	С	Т	Р
Маса міді котушок або обмоток, кг	1,06	0,39	0,23	0,22	0,27	0,26	0,24	0,27	0,5	2,6	0,87	0,9	1,2

Повна маса міді усіх обмоток для каскадного трансформатору знаходиться за формулою

$$G_M = m \cdot n \cdot G_n + m \cdot n \cdot G_{\text{вв}} + n \cdot G_c + n \cdot G_m,$$

(2.45)

Для даного розрахунку

$$G_M = 2 \cdot 3 \cdot 1,06 + 2 \cdot 3 \cdot 2,6 + 3 \cdot 0,87 + 3 \cdot 0,9 + 3 \cdot 1,2 = 3087 \text{ кг}$$

## 3 РОЗРАХУНОК ПОХИБОК

Відповідно до ГОСТ 1983-89 клас точності трансформаторів напруги визначається похибками в напрузі і кутовій. Граничні значення похибок віднесені до таких умов: первинна напруга від 0,8 до 1,2 номінальної, навантаження від 0,25 номінальної до номінальної при коефіцієнті потужності  $\cos \varphi = 0,8$ . Ці умови є головними при розрахунку похибок, тобто похибки обчислюються:

– у режимі 0,8  $U_{\text{ном}}$ , коли навантаження  $P_2 = P_{\text{ном}}$  і  $P_2 = 0,25 P_{\text{ном}}$ ;

– у режимі 1,2  $U_{\text{ном}}$ , коли навантаження  $P_2 = P_{\text{ном}}$  і  $P_2 = 0,25 P_{\text{ном}}$ .

Значення індукції в конструктивних елементах магнітопровода знаходяться за формулами

$$B_{\text{с}\lambda} = B_{\text{y}\lambda} = \lambda \cdot B_{\text{с}}, \quad (3.1)$$

$$B_{\text{я}\lambda} = B_{\text{y}\lambda} = \frac{\lambda \cdot B_{\text{с}} \cdot S_{\text{с}}}{S_{\text{я}}}, \quad (3.2)$$

де  $B_{\text{с}\lambda}, B_{\text{y}\lambda}, B_{\text{я}\lambda}$  – значення індукції в стрижні, куті стику і ярмі при визначеному режимі  $\lambda$ , Тл;

$\lambda$  – режим роботи трансформатора, відповідно до вказаного вище може приймати граничні значення 0,8 або 1,2;

$S_{\text{с}}$  та  $S'_{\text{я}}$  – дивись п.2.1.

$$B_{\text{с}0,8} = B_{\text{y}0,8} = 0,8 \cdot 1,45 = 1,16$$

$$B_{\text{я}0,8} = \frac{0,8 \cdot 1,45 \cdot 9,64 \cdot 10^{-3}}{9,85 \cdot 10^{-3}} = 1,135$$

Відповідно в режимі 1,2  $U_{\text{ном}}$  ці значення:  $B_{\text{с}1,2} = B_{\text{y}1,2} = 1,74$  Тл;  $B_{\text{я}} = 1,7$  Тл.

Відповідно до [3] знайденим значенням індукції питомі втрати  $p_{\text{с}}, p_{\text{я}}, p_{\text{к}}$

і питомі намагнічувальні потужності  $g_c, g_{я}, g_k$  складуть:

– у режимі  $0,8 U_{ном}$ :

$$p_{c 0,8} = 0,782 \text{ Вт/кг}, g_{c 0,8} = 0,908 \text{ ВА/кг};$$

$$p_{я 0,8} = 0,762 \text{ Вт/кг}, g_{я 0,8} = 0,87 \text{ ВА/кг};$$

$$p'_{к 0,8} = 150 \text{ Вт/м}^2, g'_{к 0,8} = 1660 \text{ ВА/ м}^2;$$

– у режимі  $1,2 U_{ном}$ :

$$p_{c 1,2} = 2,09 \text{ Вт/кг}, g_{c 1,2} = 9,92 \text{ ВА/кг};$$

$$p_{я 1,2} = 1,9 \text{ Вт/кг}, g_{я 1,2} = 5,6 \text{ ВА/кг};$$

$$p'_{к 1,2} = 820 \text{ Вт/м}^2, g'_{к 1,2} = 47000 \text{ ВА/ м}^2;$$

Для магнітопровода стрижньової форми втрати холостого хода визначаються за формулою

$$P_x = K_{д.в.} \cdot (P_c \cdot 2G_c + P_y \cdot 4S_k + K_{к.о.} \cdot P_{я} \cdot 2G_{я} + ((P_c + P_{я})/2) \cdot (2G_{к1} + 4G_{к})), \quad (3.3)$$

де  $P_x$  – втрати холостого хода, Вт;

$K_{д.в.}$  – коефіцієнт додаткових витрат, залежить від форми ярма і наявності відпала пластин, для відпалених пластин і багатоступінчастої форми ярма складає 1,08;

$K_{к.о.}$  – коефіцієнт, що враховує наявність отворів, залежить від марки сталі і товщини, для холоднокатаної сталі при товщині рулону 0,35 мм приймається значення від 1,01 до 1,25, приймається 1,09.

Отже

$$P_{x0,8} = 1,08(0,782 \cdot 2 \cdot 15,49 + 150 \cdot 4 \cdot 9,64 \cdot 10^3 + 1,09 \cdot 0,762 \cdot 2 \cdot 20,72 + ((0,782 + 0,762)/2) \cdot 4 \cdot 66,27 + ((0,782 + 0,762)/2) \cdot 4 \cdot 6,27) = 90,5$$

Аналогічно

$$P_{x 1,2} = 250,8$$

Активна складова струму холостого хода визначається за формулою

$$I_{xa} = \frac{P_x}{\lambda \cdot U_c} \quad (3.4)$$

де  $I_x$  – активна складова струму холостого ходу, А.

Для даного розрахунку

$$I_{xa0,8} = \frac{90,5 \cdot \sqrt{3}}{0,8 \cdot 100} = 1,96$$

В режимі  $1,2U_{ном}$   $I_{xa1,2} = 3,62$  А.

Повна намагнічувальна потужність для даної форми магнітопровода знаходиться як

$$Q_x = K_{д.в.} \cdot (2g_c \cdot G_c + K_{п.о.} \cdot 2 \cdot g_{я} \cdot G_{я} + (g_c + g_{я})/2) \cdot 4G_k + K'_{д.в.} \cdot 4g_k \cdot S_k, \quad (3.5)$$

де  $Q_x$  – повна намагнічувальна потужність трансформатора, ВА;

$K_{д.в.}$  – коефіцієнт додаткових витрат, що залежить від форми ярма і наявності відпалу пластин, для відпалених пластин з числом сходинок до трьох включно складає 1,31;

$K_{п.о.}$  – коефіцієнт, що враховує штампування отворів, залежить від марки сталі, приймається 1,4;

$K'_{д.в.з}$  – коефіцієнт втрат у магнітних зазорах, приймається 1,06.

Для даного розрахунку

$$Q_{x0,8} = 1,31 \cdot (2 \cdot 0,908 \cdot 15,49 + 1,4 \cdot 2 \cdot 0,87 \cdot 20,72 + ((0,908 + 0,87)/2) \cdot 4 \cdot 6,27) + 1,06 \cdot 4 \cdot 1660 \cdot 9,64 \cdot 10^{-3} = 200$$

У режимі  $1,2U_{ном}$  відповідно 3004,2 ВА.

Реактивна складова струму намагнічування визначається за формулою

$$I_{x.p} = \frac{Q_x}{\lambda \cdot U_c}, \quad (3.6)$$

де  $I_{x.p}$  – реактивна складова струму намагнічування, А.

У даному розрахунку в режимі  $0,8U_{\text{ном}}$

$$I_{x.p0,8} = \frac{200 \cdot \sqrt{3}}{0,8 \cdot 100} = 4,33$$

Для режиму  $1,2U_{\text{ном}}$   $I_{x.p 1,2} = 43,36$  А.

Похибка за напругою для трансформатора знаходиться як

$$\Delta U_{\%} = \frac{(I_x \cdot a \cdot r'_{BH} + I_{xp} \cdot X'_{BH}) + \lambda \cdot I_C \cdot [(r'_{BH} + r_C) \cdot \cos \varphi + (X'_{BH} + X_C) \sin \varphi]}{\lambda \cdot U_c} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

де  $U_{\%}$  – похибка за напругою, %;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності, приймається = 0,8.

Тоді для даного розрахунку при повному навантаженні в режимі  $0,8 U_{\text{ном}}$

$$\Delta U_{\%0,8} = \left( 3 \cdot (1,96 \cdot 0,00142 + 4,33 \cdot 0,00705) + 0,8 \cdot 6,92 \cdot ((0,00142 + 0,035) \cdot 0,8 + 0,0094 \cdot 0,6) \right) / (0,8 \cdot 100) \cdot 100\% = 0,5$$

Відповідно в режимі  $1,2U_{\text{ном}}$   $\Delta U_{\% 1,2} = -0,875$ .

Потрібно знаходити значення не тільки при повній потужності, але і при  $0,25 P_{\text{ном}}$ , тому прораховується в режимі  $0,8 U_{\text{ном}}$

$$\Delta U_{\%0,8} = \left( 3 \cdot (1,96 \cdot 0,0015 + 4,33 \cdot 0,000473) + 0,25 \cdot 0,8 \cdot 6,92 \cdot ((0,0015 + 0,034) \cdot 0,8 + 0,00063 \cdot 0,6) \right) / (0,8 \cdot 100) \cdot 100\% = 0,18$$

У режимі  $1,2U_{\text{ном}}$  і при  $0,25 P_{\text{ном}}$  похибка по напрузі складе – 0,55.

Обчислені похибки за напругою перевищують значення найбільшої похибки по напрузі відповідно до класу точності трансформатора, тому робиться корекція методом виткового відмотування.

Поправка для виткової корекції  $f_u\%$  визначається за формулою

$$f_u\% = -0,5(\Delta U_{\% 1,2} + \Delta U_{\% 0,8}) \quad , \quad (3.8)$$

де  $f_u\%$  - поправка на виткову корекцію, %.

У даному розрахунку

$$f_u\% = -0,5(0,16 + 0,78) = -0,47, \quad \%$$

Число витків обмотки ВН, відмотаних для виткової корекції, визначається за формулою

$$\Delta W_k = \frac{W_{\text{ВН}} \cdot f_u\%}{100} \quad , \quad (3.9)$$

де  $\Delta W_k$  – число корегувальних витків, виток.

$$\Delta W_k = \frac{76000 \cdot 0,47}{100} = 357,2 \quad \text{витків}$$

Приймається 355 витків.

Похибки після виткової корекції мають значення

$$f_{u\%k} = \Delta U_{\%} - f_u\% \quad , \quad (3.10)$$

де  $fu_{\%k}$  – результуюче значення похибки після корекції, %.

Так для даного розрахунку в режимі  $0,8 U_{\text{ном}}$ :

- при повному навантаженні

$$fu_{\%0,8k} = -0,457 + 0,47 = 0,013\%$$

- при навантаженні  $0,25 P_{\text{ном}}$

$$fu_{\%0,8k} = -0,16 + 0,47 = 0,31\%$$

У режимі  $1,2 U_{\text{ном}}$ :

- при повному навантаженні

$$fu_{\%1,2k} = -0,78 + 0,47 = -0,31\%$$

- при навантаженні  $0,25 P_{\text{ном}}$

$$fu_{\%1,2k} = -0,482 + 0,47 = -0,013\%$$

Кутова похибка знаходиться за формулою

$$\delta = 3440 \frac{(I_x \cdot p \cdot r'_{BH} - I_x a \cdot X'_{BH}) + \lambda \cdot I_C \cdot [(r'_{BH} + r_C) \cdot \sin \varphi - (X'_{BH} + X_C) \cdot \cos \varphi]}{\lambda \cdot U_C}, \quad 3.11)$$

де  $\delta$  – кутова похибка, визначається в хвилинах і секундах;

3440 – переклад радіальної міри в хвилини.

У режимі  $0,8 U_{\text{ном}}$  при повній потужності

$$\delta_{0,8} = 3440 \frac{\sqrt{3} \cdot (4,33 \cdot 0,0015 - 1,96 \cdot 0,006) + 0,8 \cdot 6,92 \cdot [(0,0015 + 0,034) \cdot 0,6 - 0,0082 \cdot 0,8] \cdot \sqrt{3}}{0,8 \cdot 100} = 5'41''$$

Аналогічно в режимі  $1,2 U_{\text{НОМ}}$  при повній потужності  $\delta_{1,2}=8' 14''$ .

При навантаженні  $0,25 P_{\text{НОМ}}$  відповідно:  $\delta'_{0,8}=1' 07''$  і  $\delta'_{1,2}=3' 40''$ .

Усі перелічені і відредаговані значення зводяться в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку похибок

Клас точності	Навантаження в відсотках відноминального	Похибки					
		за напругою		кутова		Допустима за ГОСТ 1983-89	
		в режимі $0,8 U_{\text{НОМ}}$	в режимі $1,2 U_{\text{НОМ}}$	в режимі $0,8 U_{\text{НОМ}}$	в режимі $1,2 U_{\text{НОМ}}$	в режимі $0,8 U_{\text{НОМ}}$	в режимі $1,2 U_{\text{НОМ}}$
0,5	0,25	-0,18	-0,55	1' 07"	3' 40"	$\pm 0,5$	$\pm 0,5'$
0,5	1	-0,5	-0,875	5' 41"	8' 14"	$\pm 20$	$\pm 20'$

Раніше була введена поправка у вигляді відмотування корегуючих витків, тому перераховується кількість витків в обмотці ВН

$$W_{\text{вир}} = 76000 - 355 = 75645$$

Тобто необхідно зменшити кількість витків в котушці "3" обмотки високої напруги.

Введення корективів також призведе до незначного зменшення маси міді, що необхідно уточнювати.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

## 4.1 Розрахунок параметрів потокової лінії

Розрахунок параметрів потоку починається з визначення фонду часу лінії. Дійсний фонд часу  $F_d$  потокової лінії визначається на основі встановленого режиму роботи і кількості робочих днів в році. Режим роботи приймаємо двухзмінний ( $K_{зм}=2$ ) при п'ятиденній робочій неділі.

Кількість робочих і святкових днів встановлюється по календарю поточного року:  $D_p=257$ ,  $D_{св}=8$ . Тривалість зміни  $d_{зм}$  приймається 8 годин, тривалість зміни в передсвяткові дні скорочується на одну годину.

Дійсний фонд часу роботи потокової лінії визначається за формулою:

$$F_{dp} = (D_p \cdot K_{зм} \cdot d_{зм} - D_{св} \cdot 1) \cdot K_p, \quad (4.1)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт простою обладнання,  $K_p=1$ .

На потоковій лінії коефіцієнт простою устаткування в плановопереджувальному ремонті можна прийняти рівним 1, оскільки використовується несклад-не устаткування і окремі агрегати зупиняються на ремонт не одночасно, а послідовно «проти потоку» або в неробочу годину. Основним показником потокової лінії є такт ( $r$ ), ритм ( $R$ ), темп  $Tп$ .

Такт одночасної потокової лінії визначається по формулі

$$r = \frac{F_d \cdot 60 - 2 \cdot t_{зм}}{N_{д,зм}}; \text{ хв} \quad (4.2)$$

де  $F_d$  – дійсний фонд часу роботи потокової лінії за зміну або добу;

$t_{зм}$  – тривалість регламентованих перерв на відпочинок, приймається дві перерви в зміну по 10 хвилин;

$N_{д}, N_{зм}$  – середньоденний або середньозмінний випуск виробів, шт.

Знайдемо змінний випуск виробів по формулі

$$N_{зм} = \frac{N_{річн}}{F_{\partial}} \cdot d_{зм}; \quad (4.3)$$

де  $N_{річн}$  – кількість деталей, які випускаються в період поточного року, приймається  $N_{річн}=4000$  штук.

$$N_{\partial} = N_{зм} \cdot k_{зм} \quad (4.4)$$

Ритм – це такт помножений на транспортну партію.

Темп – продуктивність лінії в одиницю часу.

Темп визначається по наступній формулі, за 1хв:

$$T_{м} = \frac{1}{r}; \quad (4.5)$$

За одну годину темп буде наступним

$$T'_{м} = T_{м} \cdot 60$$

#### 4.2 Розрахунок кількості робочих місць по операціям

На ділянці складання потрібна кількість обладнання  $n_p$  визначається по кожному виду (групі) за формулою

$$n_p = \frac{Q_{вир}}{F_{\partial} \cdot K_{зм}} = \frac{N \cdot t_{шт}}{F_{\partial} \cdot K_{вн}}, \quad (4.6)$$

де  $Q_{вир}$  – кількість нормо-годин, необхідне для виконання виробничої програми на даній групі обладнання, нормо-година;

$F_d$  – дійсний фонд часу роботи одиниці обладнання в плановому періоді, год;

$K_{вн}$  – коефіцієнт виконання норм, приймаємо рівним  $K_{вн}=1,1$ ;

$N$  – кількість річного випуску продукції,  $N=4000$  шт;

$t_{шт}$  – штучний час операції.

Дійсний річний фонд часу  $F_{д1}$  роботи одиниці обладнання, приймаємо по даним таблиці П.3 [20],  $F_{д1}=4015$  год.

Коефіцієнт завантаження обладнання визначається по відношенню його розрахункової кількості  $n_p$  до прийнятого  $n_{пр}$

$$K_3 = \frac{n_p}{n_{пр}}; \quad (4.7)$$

На складальних операціях необхідна кількість робочих місць  $C_p$  визначається за формулою

$$C_p = \frac{t_{шт}}{z} \quad (4.8)$$

Дробове число округляється до найближчого цілого, і таким чином встановлюється прийнята кількість робочих місць.

Таблиця 4.1 – Розрахунок потрібної кількості робочих місць

Найменування операції	Штучний час	Потрібна кількість робочих місць		Коефіцієнт завантаження
		Розрахункова	Прийнята	
Складальний конвеєр (кран $Q=5$ т, стелажі механізовані, кранциркуль ВБ)	229,6	7,79	8	0,9

### 4.3 Розрахунок виробничої площі дільниці

Виробнича площа дільниці вміщує в себе площу, яка зайнята робочими місцями, проходами і проїздами між робочими місцями, коморами готової продукції, матеріалів та інш.

Виробнича площа дільниці визначається на основі виконаної технологічної планіровки обладнання механічної обробки і поточної лінії складання. Виробнича площа визначається виходячи з кількості робочих місць і питомих площ, що доводяться на одиницю обладнання або робоче місце і площі, яку займають скла-дальні стенди і конвеєр [21].

Розміри верстатів вибираються в залежності від розмірів складальних виробів і по ширині вибираються в наступних межах 1300-1400 мм для двосторонніх. Відстань між осями лещат повинна бути не менше 1250-1500 мм. Довжина одного верстака дорівнює 1400 мм.

Для визначення виробничої площі до станочної (площа, яку займають робочими місцями, проходами і проїздами до них) додають площу комор і інш. (15% станочної).

Використання виробничої площі, що доводиться в середньому на одне робоче місце, визначається величиною питомої площі. Порівнюючи фактичну площу (питому) з нормативною, встановлюють раціональність спроектованої дільниці. Нормативна питома площа приймається для механо-складальної ділян-ки 6 м<sup>2</sup>.

Норми питомих площ для нормальної роботи на робочому місці приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Норми питомих площ

Найменування цехів і дільниць	Виробнича площа, м <sup>2</sup>	
	На одиницю обладнання	На одне робоче місце
Намотувальний	6-7	4-5
Бабинно-різальний	7-8	5-6
Загального складання	6-7	6-8

#### 4.4 Розрахунок техніко-економічних показників дільниці

Основа розрахунку техніко-економічних показників дільниці – виробнича програма в натуральному виразі і трудомісткість одиниці виробу.

В балансі робочого часу розробляється для визначення чисельності робочих і розрахунок заробітної платні почасовщиків. Дійсний фонд часу  $F_d$  одного працівника визначається кількістю днів, годин, яке він може відпрацювати протягом плануємого року, з розрахунком невиходів на роботу і фактичної тривалості робочого дня.

Кількість виробничих працівників дільниці розраховується за операціями, професіям і розрядам на основі даних про дійсний фонд часу і трудомісткості програми по формулі

$$R_{\text{вир}} = \frac{\sum_1^n Q_i \cdot t_{\text{шт}i}}{F_{\text{д}1} \cdot K_{\text{в.н}}}; \quad (4.9)$$

де  $R_{\text{вир}}$  – кількість виробничих робочих, люд;

$Q_i$  – об'єм виробництва по  $i$ -той позиції номенклатурі, шт;

$t_{\text{шт}i}$  – норма штучного часу на виробництво  $i$ -того виробу, хв.

Чисельність виробничих працівників потокової лінії розраховується з розрахунку робочих місць і прийнятої чисельності  $K_{\text{см}}$  за наступною формулою

$$R_{\text{яв}} = K_{\text{см}} \cdot \sum_1^n C_{\text{пр}i}; \quad (4.10)$$

де  $n$  – число операцій на потоці,  $n=8$ ;

$C_{\text{пр}i}$  – прийнята кількість робочих місць по кожній операції.

Коефіцієнт використання робочого часу, встановлений при розрахунку бюджету робочого часу,  $K_{\text{вик}}=10...15$ .

Для недозавантажених робочих підбирається робота по об'єму обслуговування інших робочих місць з таким розрахунком, щоб забезпечити високий рівень щільності робочого дня, тому вводиться поєднання професій.

Результат зводиться в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Чисельність виробничих працівників

Найменування операцій	Розряд	Чисельність робочих		В тому числі по змінам	
		Розрахункова	Прийнята	I	II
Підготовча	II	1,77	2	1	1
Намотування котушки «П»	II	3,90	4	2	2
Намотування катушек «Р», «С»	III	15,8	16	8	8
Всього			22	11	11

Чисельність допоміжних робочих по професіях розраховується по нормах обслуговування, або укрупнено (18-25% чисельності виробничих робочих). Для зручності розрахунків необхідно заздалегідь розподілити всіх допоміжних робочих на дві групи: зайнятих обслуговуванням обладнання і на загальноцехових роботах (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Чисельність допоміжних робочих

Професія	Кількість працівників	Розряд
1. Слюсар по ремонту обладнання	2	2
2. Транспортний робочий	2	2
3. Підсібний робочий	2	2
Всього	6	

#### 4.5 Розрахунок безбитковості виробництва

Безбитковість виробництва виробу характеризується критичним обсягом виробництва, при якому підприємство не отримує прибутку. При перевищенні

критичного об'єму виробництво починає отримувати прибуток. Критичний обсяг виробництва розраховується по формулі

$$N_{\text{кр}} = \frac{S_{\text{пост}N.}}{C_{\text{опт}} - S_{\text{пер.}i}} \quad (4.11)$$

де  $S_{\text{пост.}}$  – постійні витрати на одиницю виробу;

$C_{\text{опт}}$  – ціна одиниці виробу, грн;

$S_{\text{пер.}}$  – змінні витрати на одиницю виробу.

Постійні витрати на обсяг виробництва розраховується по наступній формулі (4.28)

$$S_{\text{пост}N.} = S_{\text{пост}} \cdot N \quad (4.12)$$

де  $N = 1467$  – кількість виготовлених одиниць.

Об'єм продукції визначається по формулі :

$$Q_{\text{пр.}} = C_{\text{опт}} N, \quad (4.13)$$

На рис. 4.1 приведений графік беззбитковості виробництва.

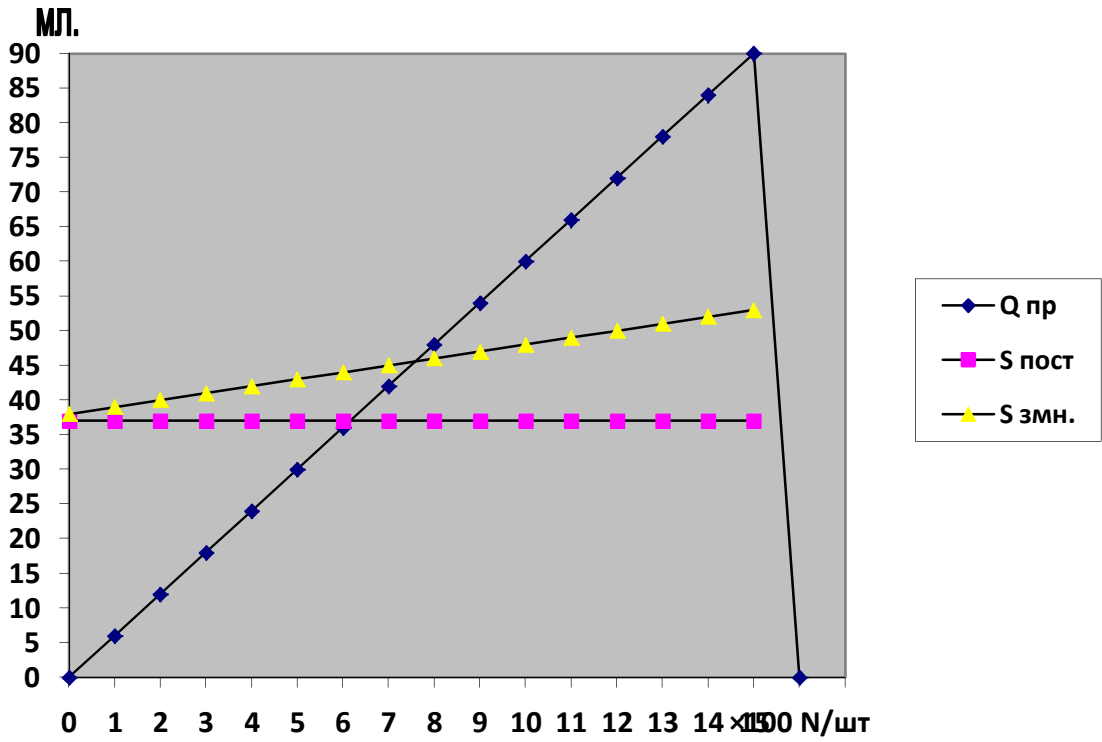


Рисунок 4.1 – Графік беззбитковості виробництва

Отже, якщо підприємство випускатиме більше 8 трансформаторів в рік, то виробництво буде беззбитковим.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Оскільки тема роботи «Активна частина трансформатора напруги 420 кВ», тому нижче розглянемо заходи по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії, гігієні праці і пожежної безпеки при експлуатації трансформатора та виготовленні обмоток для трансформатора напруги що проєктується на дільниці намотки і ізолювання цеху складання трансформаторів.

На виробництві можливими джерелами небезпек є: природні процеси і явища; елементи техногенного середовища й дії людини, що приховують у собі погрозу безпеки.

Залежно від конкретних цілей або потреб існують різні системи класифікації небезпек, але найбільш зручною є класифікація небезпек за походженням. При цьому, усі небезпеки діляться на чотири групи: природні, техногенні, соціально-політичні і комбіновані.

На основі аналізу роботи існуючого обладнання, оснащення, технологічних процесів в цеху зборки трансформаторів небезпечними та шкідливими виробничими факторами, здатними впливати на травматизм, погіршення здоров'я працівників і завдавати шкоди навколишньому середовищу, є:

- підвищена температура повітря в робочій зоні;
- рухомі частини виробничого обладнання і рух машин;
- гострі предмети, заусенці і шорсткість на поверхні заготовок;
- підвищене значення напруги в електричній мережі;
- пари трансформаторного масла;
- запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- виконання робіт у зоні дії вантажопідйомних кранів;
- недостатній рівень освітлення робочих місць.

Особливу небезпеку для людини становить висока напруга первинного ланцюга трансформатора (400 кВ).

На основі загальних вимог техніки безпеки до різного устаткування й пристроїв, специфічних вимог, що встановлювані стандартами й іншими

нормативними документами, розроблено комплекс заходів, що забезпечують безпечну роботу по виготовленню трансформатору.

Трансформатор напруги проєктується згідно ДСТУ ІЕС 60044-2:2008 «Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Трансформатори напруги індуктивні (ІЕС 60044-2:2003, ІДТ)» та буде експлуатуватися згідно вимог «Правил устрою електроустановок» (далі «ПУЕ»), НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі «ПБЕЕС»), ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила», ГОСТ 12.2.007.0-75\* (2001) «ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.2.007.3-75 (2001) «ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000В. Требования безопасности», НАПБ 05.032-2002 (ГКД 343.000.003.004-2002) «Інструкція з протипожежного захисту розподільних пристроїв, підстанцій та трансформаторів» и НАПБ В.01.056-2005/111 «Правила будови електроустановок. Протипожежний захист електроустановок».

Трансформатор може експлуатуватися в теплому вологому, жаркому сухому й дуже жаркому сухому кліматичних районах згідно ГОСТ 16350-80 «Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей», у яких середня із щорічних абсолютних максимумів температура повітря вище 40°C и (або) комбінація температури, рівної або вище 20°C, і відносної вологості, рівної або вище 80%, спостерігається більш 12 годин на добу за безперервний період більш двох місяців у році. Експлуатація трансформатора допускається на висоті, не більше 1000 м. над рівнем моря.

Згідно «Правил устрою електроустановок» (далі «ПУЕ») трансформатор класифікується, як пристрій релейного захисту елементів електричного ланцюга частини енергосистем, промислових та інших електроустановок напругою понад 1 кВ.

Даний пристрій експлуатується на відкритому розподільчому устаткуванні (ВРУ) в сукупності з високовольтними електричними апаратами (вимикачі, роз'єднувачі, відокремлювачі, вентиляльні та трубчасті розрядники).

Робоча зона трансформатора небезпечна підвищеним рівнем електромагнітних полів. Згідно НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» в електроустановках напругою понад 1000 В, у яких вхід у приміщення, осередка обладнаний сітчастими огороженнями або бар'єрами, під час огляду забороняється відкривати двері сітчастих огорожень і проникати за огороження або бар'єри.

З урахуванням вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» з ізолюючих засобів захисту використовуються ізолюючі штанги і електровимірювальні кліщі, покажчики напруги. Ці засоби не мають ізоляцію, здатну витримати робочу напругу трансформатора але підсилюють захисну дію основних ізолюючих засобів, разом з якими вони застосовуються. Для тимчасового огороження струмоведучих частин, до яких можливий випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань, передбачені, огорожуючи електрозахисні засоби – щити, тимчасові переносні заземлення, попереджувальні плакати, згідно ГОСТ 12.4.026-76 (1987) «ССБТ. Цвета сигнальные и знаки безопасности».

Для індивідуального захисту працюючих від шкідливого впливу не електричних факторів - світлових, теплових і механічних, а також від продуктів горіння передбачені окуляри, щитки, спеціальні рукавиці, захисні каски, протигази.

Згідно з розділом 5 НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», ВРП в якому знаходиться трансформатор напруги відповідає класу приміщення П-III, це зона розташована поза приміщенням, у якій обертаються горючі рідини з температурою спалаху вище 61°C або тверді горючі речовини (трансформаторне масло), тому передбачений мінімальний ступінь захисту оболонки (ізоляції) трансформатора – IP44, тобто оболонки ізоляції захищені від твердих предметів розміром більш 1 мм і від бризів води.

Заходи з пожежної безпеки для цеху зборки трансформаторів розроблені відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки України».

З аналізу речовин і матеріалів, що використовуються в виробництві трансформаторів, згідно НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків і зовнішніх установок з взривопожежної і пожежної безпеки» та СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания», приміщення трансформаторного цеху належить до виробництв категорії «Д» з пожежної небезпеки.

Оскільки трансформаторний цех належить до категорії виробництва «Д» з пожежної небезпеки тому згідно ДБН В.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» він має II ступінь вогнестійкості.

Згідно ДБН В.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» з приміщення передбачено три евакуаційних виходи. Згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания», найбільша відстань від найбільш віддаленого робочого місця і до найближчого евакуаційного виходу, виходячи з об'єму приміщення та щільності людського потоку в загальному проході - 60 метрів.

Обладнання, силові та освітлювальні мережі відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

На ділянці згідно НАПБ Б.03.002-2004 «Типові норми належності вогнегасників» застосовуються вуглекислотні вогнегасники ОУ-2 та ОУ-5, які призначені для гасіння невеликих осередків горіння речовин, матеріалів та електроустановок, за виключенням речовин, горіння яких відбувається без доступу кисню. При виникненні пожежі на території цеху для гасіння передбачені повітряно-пінні та водні вогнегасники типу ОВП-10 та ОВП-100.

Відстань від можливого осередку пожежі до місця розташування вогнегасника не перевищує 60 метрів.

## ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі був розроблений, на базі існуючої конструкції трансформатора напруги серії НКФ-М, трансформатор напруги на  $U_{\text{ном}}=400$  кВ.

В результаті проєктування розроблена конструкція трансформатора, в обмотці ВН якого використан дріт марки ПЕЕІДХ2-200-МЕК діаметром 0,28 замість раніше використовуваного діаметру 0,3, що забезпечило великі ізоляційні проміжки у вікні магнітопровода і дозволило збільшити електричну міцність трансформатора. Завдяки цьому були зменшені габарити і маса, а саме зменшення маси міді в обмотках і зменшення маси трансформаторного масла селективного очищення ГОСТ 10121-93, в результаті зменшення блочності трансформатора – 3 блока, замість чотирьох, досягнута економія покупних виробів – в результаті зниження ціни виробу.

Крім цього при номінальній потужності 400 ВА були отриманні значення похибок, які відповідають підвищеному класу точності 0,5 ГОСТ 1983-93 (раніше використовувався клас точності трансформатора напруги на 400 кВ – 1,0).

Метою проєктування було отримання покращених техніко-економічних показників трансформатора напруги, тому були проведені розрахунки економічного ефекту від впровадження проєктуючого трансформатора напруги, який складає 21817,52 грн. Ціна базового варіанта виробу складає 60799,5 грн. Ціна проєктуваного варіанта виробу – 50011,53.

Таким чином, запропонована конструкція має високі техніко-економічні показники, зменшенні габарити і маси, а також підвищений клас точності 0,5 – що впливає на доцільність використання проєктуваного трансформатора на різних електростанціях.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 720с.
- 2 Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1985 – 432 с.
- 3 Дымков А.М. и др. Трансформаторы напряжения. Изд.2-е перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1975 – 200 с.
- 4 Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1986 – 528 с.
- 5 Сахаров В.П. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования) Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 197 –560 с.
- 6 Панченко В.В. Расчет и конструирование электрических аппаратов высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 248с.
- 7 Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. –Л.: Энергия., 1985 – 328 с.
- 8 Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г. Задачник по электрическим аппаратам.–М.: Высш.шк., 1987 – 232 с.
- 9 Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения, под ред. Афанасьева В.В. – Л., 1987.
- 10 Селянин В.Н. Технология и оборудование производства электроаппаратуры. – М.: Энергия., 1980 – 352 с.
- 11 Справочник нормировщика. Под общ. ред. А.В. Ахумова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987 – 458 с.
- 12 Чекалин Н.А., Полухина Г.Н., Чекалина С.А. Охрана труда в электрохозяйствах промышленных предприятий. – М: Энэргoатoмиздaт, 1990 – 256 с.
- 13 Технологія та устаткування виробництва електричних апаратів. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту. Розробила Новікова О.М., ЗСТК, 2000 – 21 с.

14 Нефедов Н.А. Дипломное проектирование в машиностроительных техникумах. – М.: Высшая школа, 1976 – 192 с.

15 Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 448с.

16 Основи охорони праці. /Під ред. М.П. Гандзюк, Е.П. Желіб, М.О. Халімовський. – М: Каравали, 2008 -384 с.