

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННУХТ ім.акад. Г.С.Тимоша  
Кафедра Електроенергетики і електротехніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)  
Височенко С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

зі спеціальності ЕНЕ «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код та назва спеціальності)  
освітньо-професійної програми «Електротехніка та електротехнології»

на тему: Проєкт трифазного синхронного трансформатора потужністю 1000 ВА з трифазним навантаженням  
доки з обмеженою кількістю фазових з'єднань лінійних обмоток 1/2-1/2 з'єднанням лінійних обмоток 35/0,4кВ та  
імітаційне моделювання режимів роботи трансформатора.

Виконав: здобувач 4 курсу, групи ЕН-4-3

Швець Богдан Валентинович  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Швець Валерій Петрович  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти Сиренко А.О.  
(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Григоренко А.Б.  
(прізвище та ініціали)

(підпис)  
(підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній  
роботі немає запозичень із праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Здобувач (підпис)  
(підпис)

Київ - 2021 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ІНІСТІТУТ ім.акад. І.С. Гурого

Кафедра електротехніки і електрифікації

Освітній ступінь докладор

Спеціальність ІНІ „Електричне ретрансмісія та електротехніка“  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма „Електротехніка та електротехнології“  
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри \_\_\_\_\_

“ ” \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Швець Ігорем Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Технічне завдання на розробку трансформатора потужністю 400кВА з натуральним маселом охолодженням (для зокладування трансформатора) зі складом з'єднання міжних обмоток У/Δ-11 з однією обмоткою лінійного напруги 35/0,4кВ та шістьма режимів роботи трансформатора

керівник роботи Швець Ігорем Петрович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ ” 20 року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання здобувачем роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Потужність трансформатора 400кВА

У/Δ-11; ном. напруга  $U_n = 35/0,4$ кВ;  $U_{лн} = 0,4$ кВ;  $U_{лн} = 0,5\%$ ;  $P_{г2} = 2,65$ кВт;

$P_2 = 0,66$ кВт;  $\sigma_p = 2,4\%$ ; ПБЗ  $\pm 2,5\% \pm 5,0\%$ ; У/Δ-11; матеріал обмоток -

- міжні провод; серед - холодаконтрастний сталеві марки зчот; ввіановлене -

зв'язане; режим роботи - довготривалий

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Визначення основних електричних величин визначення

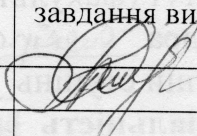
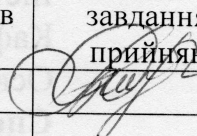
амплітудних розмірів трансформатора; виділення та розрахунок обмоток трансформатора

визначення параметрів короткого замикання; розрахунок магнітної системи;

температурні розрахунок; розрахунок роботи короткозамкнутих; охолодження; індукційне нагрівання.

5. Перелік графічного матеріалу 1. Магнітопробіг; 2. Загальний вигляд; 3. Обмотки

### 6. Консультанти розділів роботи

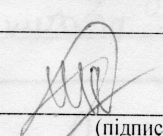
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	доц. Сірма Д.О		

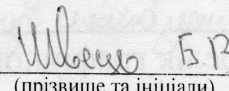
7. Дата видачі завдання 15.04.2021р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

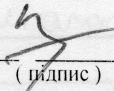
№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на виконання проекту	11.04.2021р.	
2	Визначення основних технічних параметрів	16.04.2021р.	
3	Вибір типу та розрахунок діаметра трансформатора	23.04.2021р.	
4	Визначення параметрів короткого замикання	25.04.2021р.	
5	Розрахунок номінальної ваги	01.05.2021р.	
6	Технічний розрахунок трансформатора	08.05.2021р.	
7	Розрахунок робочих характеристик	11.05.2021р.	
8	Складання проекту	17.05.2021р.	
9	Надання виконавцю завдання представлення проекту на членську перевірку	24.05.2021р.	
		31.05.2021р.	

Здобувач

  
(підпис)

  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Кусьба В.П.  
(прізвище та ініціали)

## Анотація

Швець Б.В. Дипломний проект на тему: «проект трифазного силового трансформатора потужністю 400 кВА з природним масляним охолодженням зі схемою з'єднання обмоток Y/Δ-11, за співвідношенням лінійних напруг 35/0,4 кВ та імітаційне моделювання режимів роботи трансформаторів».

Національний Університет Харчових Технологій, Київ 2021.

141. «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Пояснювальна записка складається зі вступу, дев'яти розділів та списку використаної літератури. Загальний обсяг пояснювальної записки становить 61 стор. Також було виконано графічну частину, яка складається із трьох креслень: загальний вигляд трансформатора, магнітопровід та обмотки. У дипломному проекті наведено визначення основних електричних величин трансформатора, його основних розмірів, вибір та розрахунок обмоток, визначення параметрів короткого замикання, розрахунок магнітної системи, тепловий розрахунок, розрахунок робочих характеристик. Також було продемонстровано можливість імітації режимів роботи трансформатора.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** трансформатор, ККД трансформатора, втрати енергії, коефіцієнт завантаження, напруга короткого замикання, втрати холостого ходу, струм холостого ходу, тепловий розрахунок, вторинна напруга, робочі характеристики, фазний коефіцієнт, параметри магнітної системи.

## Summary

Shwets B.W Thesis project on the topic of the project of a three-phase power transformer with a capacity of 400 kVA with natural oil cooling with the connection scheme of the windings Y /  $\Delta$ -11, with a ratio of linear voltages of 35 / 0.4 kV and simulation of transformers.

National University of Food Technology, Kyiv 2021.

141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics"

The explanatory note consists of an introduction, nine chapters and a list of references. The total volume of the explanatory note is 61 pages. A graphic part was also made, which consists of three drawings: a general view of the transformer, a magnetic circuit and a winding. The diploma project presents the definition of the main electrical quantities of the transformer, its main dimensions, selection and calculation of windings, determination of short circuit parameters, calculation of the magnetic system, thermal calculation, calculation of operating characteristics.

The possibility of simulating the operation modes of the transformer was also demonstrated.

**Keywords: transformer, efficiency transformer, energy loss, load factor, short-circuit voltage, idling loss, idle current, thermal calculation, secondary voltage, performance characteristics, phase coefficient, parameters of the magnetic system**

### Завдання на дипломний проект

Спроекувати трансформатор ТМ – 400/35 за такими даними:

трансформатор трифазний, тристрижневий, з природним масляним охолодженням; бак прямокутний, гофрований;

повна номінальна потужність трансформатора  $S_N = 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;

число фаз  $m = 3$ ;

номінальна частота  $f_N = 50 \text{ Гц}$  ;

номінальна (лінійна) напруга обмотки вищої напруги (ВН)  $U_2 = 35 \text{ кВ}$ ;

номінальна (лінійна) напруга обмотки нижчої напруги (НН)  $U_1 = 0,4 \text{ кВ}$ ;

напруга короткого замикання  $u_k = 6.5 \%$ ;

втрати короткого замикання  $P_k = 5,5 \text{ кВт}$ ;

втрати холостого ходу  $P_0 = 1.35 \text{ кВт}$ ;

струм холостого ходу  $i_0 = 2.1 \%$ ;

регулювання напруги – ПБЗ  $\pm 2,5 \%$ ,  $\pm 5,0 \%$ ;

схема та група з'єднання обмоток –  $Y/\Delta-11$ .

матеріал обмоток – мідний провід;

осердя – холоднокатана сталь марки 3404 або 3405.

Встановлення – зовнішнє.

Режим роботи – довготривалий.

Виконати розділ «Охорона праці».

Теоретичне питання на тему «Імітаційне моделювання режимів роботи трансформатора».

## Зміст

Завдання на дипломний проект.....	
Вступ.....	
1. Визначення основних електричних величин трансформатора.....	
2. Визначення основних розмірів трансформатора.....	
3. Вибір типу та розрахунок обмоток трансформатора.....	
3.1. Розрахунок циліндричної двошарової обмотки НН з прямокутного проводу.....	
3.2. Розрахунок обмотки ВН.....	
4. Визначення параметрів короткого замикання.....	
4.1. Розрахунок втрат короткого замикання.....	
4.2. Розрахунок напруги короткого замикання.....	
5. Розрахунок магнітної системи.....	
5.1. Визначення параметрів магнітної системи.....	
5.2. Розрахунок втрат холостого ходу.....	
5.3. Розрахунок струмів холостого ходу.....	
6. Тепловий розрахунок трансформатора.....	
6.1. Перевірочний тепловий розрахунок.....	
6.2. Тепловий розрахунок бака.....	
6.3. Визначення перевищення температури обмоток та масла над температурою оточуючого середовища.....	
6.4. Наближене визначення маси конструктивних матеріалів і масла трансформатора.....	
7. Розрахунок робочих характеристик.....	

7.1.	Розрахунок залежності ККД від навантаження.....
7.2.	Розрахунок залежності вторинної напруги трансформатора від навантаження.....
8.	Охорона праці.....
9.	Індивідуальне завдання.....
	Висновок.....
	Список використаної літератури.....

## Вступ

**Трансформатор** - пристрій для перетворення параметрів (амплітуд і фаз) напруг і струмів.

Трансформатор — статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму.

Трансформатори широко застосовуються в лініях електропередач, в розподільних та побутових пристроях. При високій напрузі й малій силі струму передача електроенергії відбувається з меншими втратами. Тому, зазвичай лінії електропередач є високовольтними. Водночас побутові й промислові машини вимагають великої сили струму й малої напруги, тому перед споживанням електроенергії перетворюється в низьковольтну. Трансформатори знайшли застосування також у різних випрямних, підсилювальних, сигналізаційних та інших пристроях.

**Силовий трансформатор** — стаціонарний прилад з двома або більше обмотками, який за допомогою електромагнітної індукції перетворює систему змінної напруги та струму в іншу систему змінної напруги та струму, як правило, різних значень при тій же частоті з метою передачі електроенергії без зміни її потужності при передаванні.

Силовий трансформатор використовується для перетворення параметрів електричної енергії в електричних мережах і устаткуванні, що застосовуються для приймання та споживання електричної енергії. Силовий трансформатор застосовується у складі комплектних трансформаторних підстанцій для пониження напруги при подачі електроенергії населеним пунктам.

Термін «силовий» вказує на роботу даного виду трансформаторів з великими потужностями. Необхідність застосування силових трансформаторів зумовлена різною величиною робочих напруг ліній електропередач (35...750 кВ), міських електромереж (як правило 6...10 кВ), напруги що подається кінцевим споживачам (0,4 кВ, вони ж 380/220 В) та напруги, необхідної для роботи електромашин і електроприладів (у досить широкому діапазоні від одиниць вольт до сотень кіловольт).

Силові трансформатори поділяються на сухі, найчастіше використовуються в електромережах і в джерелах живлення різних приладів, і масляні, що працюють при напругах від 6кВ і вище. Масляні трансформатори відрізняються від сухих тим, що як ізоляційне та охолоджувальне середовище застосовується спеціальна трансформаторна олива. Силові масляні трансформатори переважно призначаються для пониження напруги електромереж.

Так, як силовий трансформатор є одним з найважливіших елементів сучасної електричної мережі, то подальший розвиток трансформаторобудування визначається розвитком електричних мереж. Важливими задачами є підвищення якості трансформаторів, використання прогресивних технологій їх виробництва, економія матеріалів при їх виготовленні та низькі втрати при їх роботі в електричній мережі.

Для масляних трансформаторів загального призначення номінальними умовами місця установки і оточуючого середовища згідно стандарту є: висота над рівнем моря не більше 1000 м; температура оточуючого повітря не більше + 40 °С при середньодобовій температурі не більше +30 °С; середньорічна температура повинна бути не більше +20 °С, температура охолоджуючого повітря не нижче – 45 °С.

В даному проекті необхідно спроектувати силовий масляний трансформатор потужністю 400 кВ·А з напругою первинної обмотки 35 кВ і вторинної 0,4 кВ. Визначити основні характеристики трансформатора, габаритні розміри, розрахувати охолоджуючу систему, провести тепловий розрахунок спроектованого трансформатора.

# 1.Визначення основних електричних величин трансформатора

Потужність трансформатора на одну фазу:

$$S_{\phi} = \frac{S_N}{m} = \frac{400}{3} = 133,3333 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

де  $S_N$  – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;  $m$  – кількість фаз трансформатора.

Номінальний (лінійний) струм обмотки НН:

$$I_1 = \frac{S_N \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 577,3503 \text{ А},$$

де  $S_N$  – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;  $U_1$  – номінальна (лінійна) напруга обмотки НН, В.

Номінальний (лінійний) струм обмотки ВН:

$$I_2 = \frac{S_N \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 6,5983 \text{ А},$$

де  $S_N$  – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;  $U_2$  – номінальна (лінійна) напруга обмотки ВН, В.

Фазний струм обмотки НН (при з'єднанні обмотки в трикутник):

$$I_{1\phi} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \frac{577,3503}{\sqrt{3}} = 333,3334 \text{ А}.$$

Фазна напруга обмотки НН (при з'єднанні обмотки в трикутник):

$$U_{1\phi} = U_1 = 400 \text{ В}.$$

Фазний струм обмотки ВН (при з'єднанні обмотки в зірку):

$$I_{2\phi} = I_2 = 6,5983 \text{ А}.$$

Фазна напруга обмотки ВН (при з'єднанні обмотки в зірку):

$$U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{35000}{\sqrt{3}} = 20207,2595 \text{ В.}$$

За втратами потужності короткого замикання визначаємо активну складову напруги короткого замикання:

$$u_a = \frac{P_k \cdot 10^3}{10 \cdot S_N} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 400} = 1,375 \%,$$

де  $P_k$  – потужність короткого замикання, кВт;  $S_N$  – номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

Реактивна складова напруги короткого замикання:

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{6,5^2 - 1,375^2} = 6,3529 \%,$$

де  $u_k$  – напруга короткого замикання, %.

З табл. 4.1 [1] визначаємо випробувальні напруги обмоток для силових масляних трансформаторів:

- обмотка НН –  $U_{1 \hat{a} \hat{i}} = 5 \text{ кВ}$ ;
- обмотка ВН –  $U_{2 \hat{a} \hat{i}} = 85 \text{ кВ}$ .

## 2.Визначення основних розмірів трансформатора

Розрахунок основних розмірів трансформатора розпочинаємо з визначення діаметра стержня за формулою:

$$d = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot \beta \cdot k_p}{f \cdot u_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}}$$

Потужність трансформатора на один стержень:

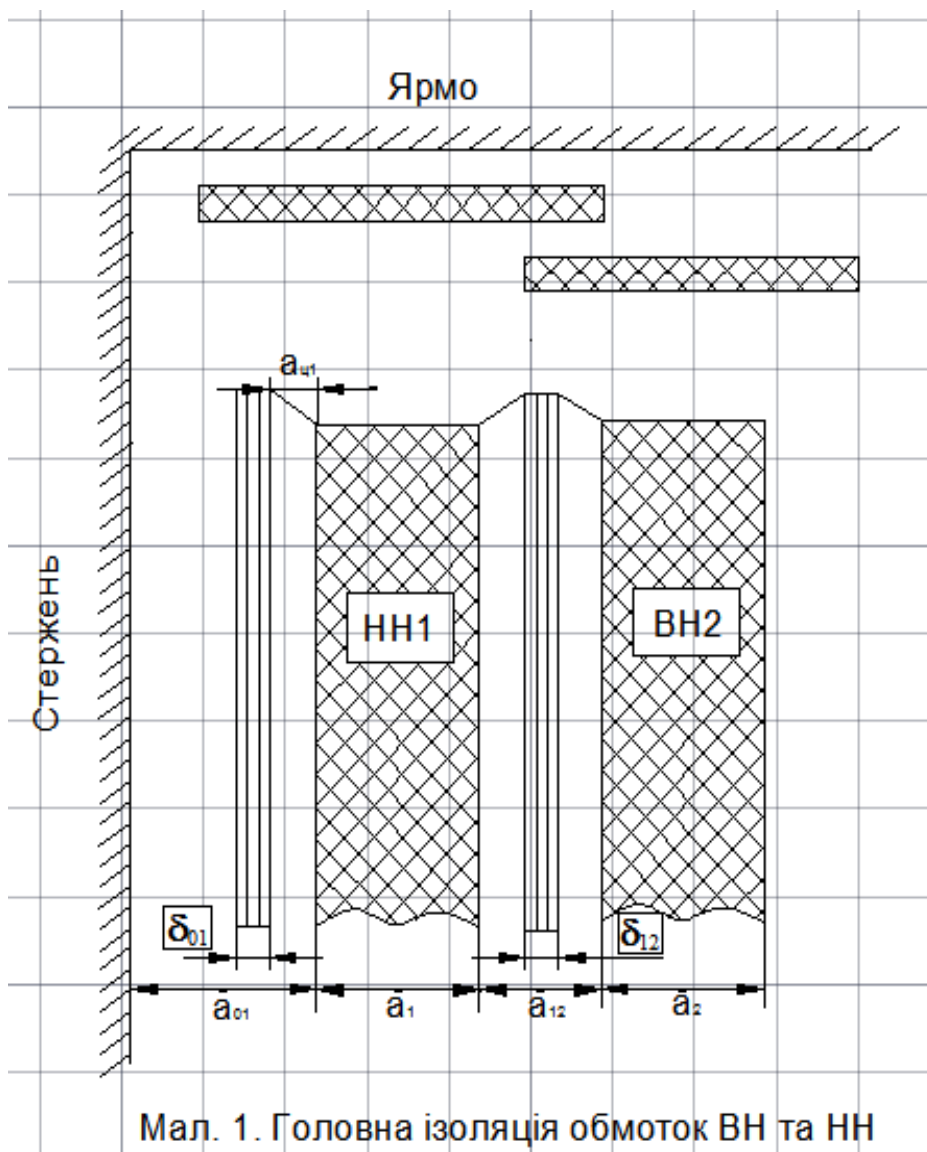
$$S' = \frac{S_N}{c} = \frac{400}{3} = 133,3333 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

де  $S_N$  – номінальна потужність трансформатора за завданням, кВ·А;  $c$  – число активних (несучих обмотки) стержнів трансформатора.

Ширину зведеного каналу розсіювання визначаємо за формулою:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3},$$

де  $a_{12}$  – розмір каналу між обмотками НН та ВН, який визначається як ізоляційний проміжок з табл. 4.5 [1] за випробувальною напругою обмотки ВН (рис. 1),  $a_{12} = 27$  мм, або  $a_{12} = 0,0027$  м.



Мал. 1. Головна ізоляція обмоток ВН та НН

Сумарний зведений радіальний розмір обмоток ВН та НН:

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = k \cdot \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2},$$

де  $k$  – коефіцієнт, який залежить від потужності трансформатора, металу обмоток, напруги обмотки ВН та втрат короткого замикання і визначається з табл. 3.3 [1].

$$k = 0,65.$$

$$\text{Отже, } \frac{a_1 + a_2}{3} = k \cdot \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2} = 0,65 \cdot \sqrt[4]{133,3333} \cdot 10^{-2} = 0,0221 \text{ м.}$$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,027 + 0,0221 = 0,0491 \text{ м.}$$

Значення  $\beta$ , яке приблизно дорівнює відношенню середньої довжини витка обмоток трансформатора  $l_{\hat{a}_{\text{вн}}}$  до їх висоти  $l$  визначається з табл. 3.12 [1]:

$$\beta = 2.$$

Коефіцієнт зведення ідеального поля розсіювання до реального поля (коєф. Роговського) при визначенні основних розмірів можна приблизно прийняти:

$$k_p \approx 0,95.$$

Індукцію в стержні  $B_c$  згідно з заданою маркою сталі вибираємо з табл. 2.4 [1]:

$$B_c = 1,6 \text{ Оє.}$$

Коефіцієнт заповнення активним перерізом сталі площі круга, описаного навколо перерізу стержня,  $k_c$ , залежить від вибору числа ступенів в перерізі стержня, способу пресовки стержня і розмірів охолоджуючих каналів, товщини листів сталі та виду міжлистової ізоляції. Загальний коефіцієнт заповнення  $k_c$  визначається за формулою:

$$k_c = k_{\text{єδ}} \cdot k_{\text{ç}},$$

де  $k_{\text{єδ}}$  – коефіцієнт заповнення площі кола, визначаємо з табл. 2.5 [1],

$$k_{\text{кр}} = 0,918;$$

$k_{\text{ç}}$  – коефіцієнт заповнення, що враховує наявність електричної ізоляції між окремими листами сталі, визначаємо з табл. 2.2 [1],

$$k_3 = 0,96.$$

$$k_c = k_{\text{кр}} \cdot k_3 = 0,918 \cdot 0,96 = 0,8813.$$

Тоді, діаметр стержня трансформатора:

$$d = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot \beta \cdot k_p}{f \cdot u_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}} = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{133,3333 \cdot 0,0491 \cdot 2 \cdot 0,95}{50 \cdot 6,3529 \cdot 1,6^2 \cdot 0,8813^2}} = 0,1899 \text{ м.}$$

Так як отриманий діаметр  $d$  не відповідає нормалізованій шкалі діаметрів (стор. 87 [1]), то приймаємо найближчий діаметр за нормалізованою шкалою:

$$d_H = 0,19 \text{ м.}$$

Визначаємо  $\beta_1$ , що відповідає нормалізованому діаметру:

$$\beta_H = \beta \cdot \left(\frac{d_H}{d}\right)^4 = 2 \cdot \left(\frac{0,19}{0,1899}\right)^4 = 2,0042.$$

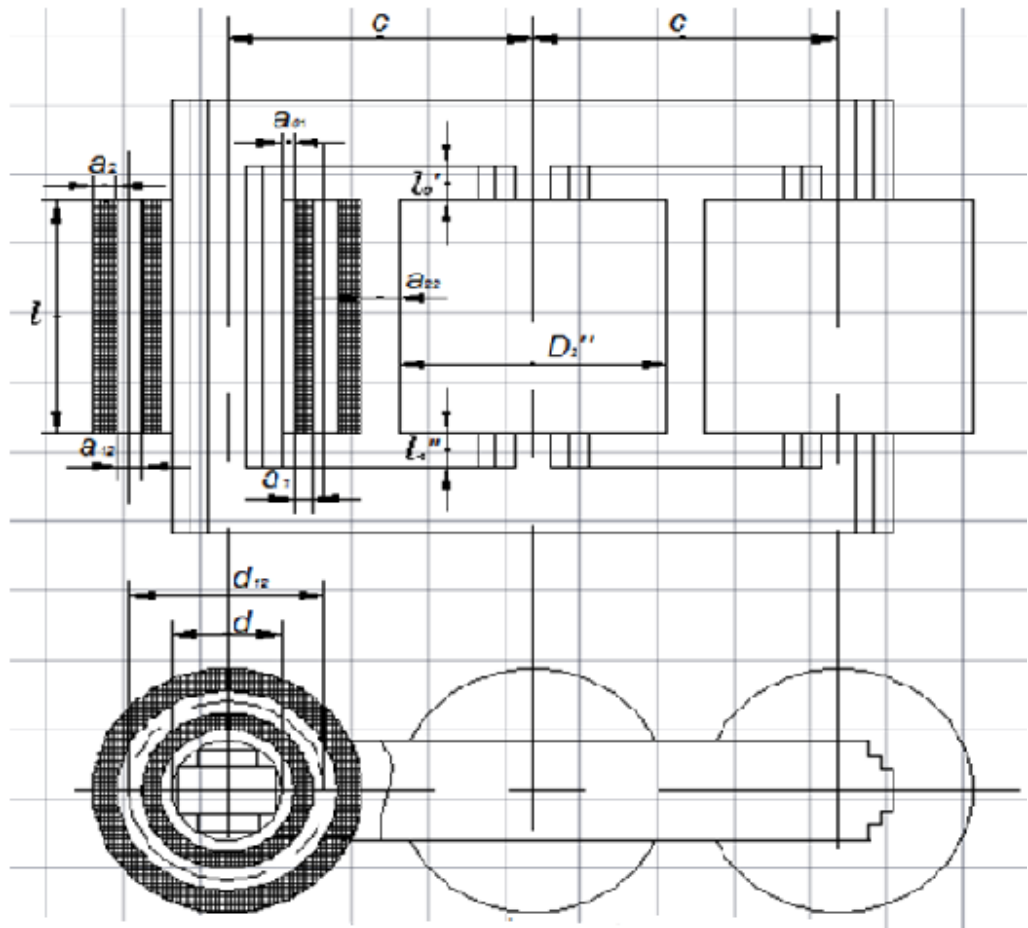
Другий основний розмір трансформатора – середній діаметр каналу між обмотками  $d_{12}$  (рис. 2) визначаємо за формулою:

$$d_{12} = d + 2 \cdot a_{01} + 2 \cdot a_1 + a_{12},$$

де  $a_{01}'$  – радіальний розмір осьового каналу між стержнем та обмоткою НН визначаємо з табл. 4.4 [1]. Так як у подальшому передбачається виконання обмотки НН циліндричною, то згідно примітки до табл. 4.4 [1] приймаємо:

$$a_{01}' = 5 \text{ мм},$$

$$a_{01} = a_{01}' \cdot 10^{-3} = 0,005 \text{ м}.$$



**Рис.2 Основні розміри трансформатора**

Радіальний розмір обмотки НН  $a_1$  знаходимо за формулою:

$$a_1 = k_1 \cdot \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad \text{де } \frac{a_1 + a_2}{3} - \text{сумарний зведений радіальний розмір}$$

обмоток НН та ВН, м; коефіцієнт  $k_1$  приймається рівним 1,1 для трансформаторів з потужністю 25-630 кВ·А з пласкою магнітною системою.

$$\text{Отже, } a_1 = k_1 \cdot \frac{a_1 + a_2}{3} = 1,1 \cdot 0,0221 = 0,0243 \text{ м.}$$

$$d_{12} = d + 2 \cdot a_{01} + 2 \cdot a_1 + a_{12} = 0,19 + 2 \cdot 0,005 + 2 \cdot 0,0243 + 0,027 = 0,2756 \text{ м,}$$

де за  $d$  приймаємо вже нормалізований діаметр стержня  $d_1$ .

Третій основний розмір трансформаторів - висота обмоток (рис. 2):

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta_H} = \frac{\pi \cdot 0,2756}{2,0042} = 0,432 \text{ м.}$$

Активний переріз стержня, тобто чистий переріз сталі:

$$\Pi_c = k_3 \cdot k_{кр} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,96 \cdot 0,918 \cdot \frac{\pi \cdot 0,19^2}{4} = 0,025 \text{ м}^2.$$

Електрорушійна сила одного витка:

$$u_B = 4,44 \cdot f \cdot V_c \cdot \Pi_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,025 = 8,88 \text{ В.}$$

### 3. Вибір типу та розрахунок обмоток трансформатора

Розрахунок обмоток трансформатора розпочинаємо з обмотки НН, яка знаходиться між стержнем та обмоткою ВН.

Число витків на одну фазу обмотки НН:

$$w_1 = \frac{U_{1\phi}}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,025} = 45,045.$$

Отримане значення  $w_1$  заокруглюємо до цілого числа:

$$w_1 = 45.$$

Напруга одного витка:

$$u_B = \frac{U_{1\phi}}{w_1} = \frac{400}{45} = 8,8889 \text{ В.}$$

Дійсна індукція в стержні:

$$B_c = \frac{u_B}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_c} = \frac{8,8889}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,025} = 1,6016 \text{ Тл.}$$

Середня густина струму в обмотках з алюмінієвого проводу:

$$J_{cp} = 0,746 \cdot k_d \cdot \frac{P_k \cdot u_B}{S_N \cdot d_{12}} \cdot 10^4 = 0,746 \cdot 0,94 \cdot \frac{5500 \cdot 8,8889}{400 \cdot 0,2756} \cdot 10^4 = 3,1098 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2},$$

де  $S_N$  – повна потужність трансформатора, кВ·А;  $P_k$  – втрати короткого замикання, Вт;  $u_B$  – напруга одного витка, В;  $d_{12}$  – середній діаметр каналу між обмотками, м;  $k_d$  – коефіцієнт, який враховує присутність додаткових втрат в обмотках, втрати в відводах та стінках бака (табл. 3.6. [1]).

Орієнтовний переріз витка обмотки НН:

$$\Pi_1' = \frac{I_{1\phi}}{J_{cp} \cdot 10^{-6}} = \frac{333,3334}{3,1098} = 107,1881 \text{ мм}^2,$$

де  $I_{1\phi}$  – фазний струм обмотки НН, А;  $J_{cp}$  – середня густина струму в обмотці НН,  $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ .

Згідно з рекомендаціями табл. 5.8 [1] вибираємо конструкцію обмотки НН, як циліндричну двошарову з прямокутного проводу.

### 3.1. Розрахунок циліндричної двошарової обмотки НН з прямокутного проводу.

Визначаємо число витків в одному шарі:

$$w_{\text{шл}} = \frac{w_1}{2} = \frac{45}{2} = 22.5;$$

Орієнтовний осьовий розмір витка:

$$h_{\text{в1}} = \frac{l_1}{w_{\text{шл}} + 1} = \frac{0,432}{22.5 + 1} = 0,0184 \text{ м.}$$

До отриманих значень  $\Pi'_1$  та  $h_{\text{в1}}$  згідно з сортаментом обмоткового проводу для трансформаторів (табл. 5.2 [1]) підбираємо провід для обмотки НН дотримуючись деяких правил, викладених на стор. 266-267 [1].

Приймаємо кількість паралельних проводів в одному витку  $n_{\text{в1}} = 4$ .

Площа перерізу одного проводу (розрахункове значення):

$$\Pi''_1 = \frac{\Pi'_1}{n_{\text{в1}}} = \frac{107.1881}{4} = 26.797 \text{ мм}^2.$$

Осьовий розмір проводу в осьовому напрямку обмотки:

$$b = \frac{h_{\text{в1}}}{n_{\text{в1}}} - 0.5 = \frac{18.4}{4} - 0,5 = 4,1 \text{ мм}^2.$$

Підібрані з табл. 5.2 [1] провода записуємо наступним чином:

$$\text{Марка проводу } \text{ПБ} \times n_{\text{в1}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'},$$

де  $a$  та  $b$  – відповідно радіальний та осьовий розмір проводу, мм;  $a'$  та  $b'$  – ці ж розміри з урахуванням товщини ізоляції на два боки,  $2\delta = 0,5 \text{ мм}$ .

Повний переріз витка з  $n_{a1}$  паралельних проводів:

$$\Pi_1 = n_{b1} \cdot \Pi_1'' \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 29.3 \cdot 10^{-6} = 1.172 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

де  $\Pi_1'' = 29.3 \text{ мм}^2$  – переріз одного проводу (табличне значення).

Реальна густина струму обмотки НН:

$$J_1 = \frac{I_{1\phi}}{\Pi_1} = \frac{333.3334}{1.172 \cdot 10^{-4}} = 2.8441 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Осьовий розмір витка (рис. 3, а):

$$h_{b1} = n_{b1} \cdot b' \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 4.75 \cdot 10^{-3} = 0.019 \text{ м}.$$

Осьовий розмір (висота) обмотки НН:

$$l_1 = h_{b1} \cdot (w_{cл1} + 1) + (0,005 \div 0,015) = 0.019 \cdot (22.5 + 1) + 0.01 = 0,4565 \text{ м}.$$

Радіальний розмір обмотки НН (рис. 3):

$$a_1 = (2 \cdot a' + a_{11}) \cdot 10^{-3} = (2 \cdot 7.6 + 6) \cdot 10^{-3} = 0.0212 \text{ м},$$

де  $a_{11}$  – радіальний розмір каналу між шарами обмотки, мм, при  $U \leq 1 \text{ кВ}$  вибирається за умовою електричної ізоляції не менше 4 мм та перевіряється за умовою відводу тепла згідно з табл. 9.2 [1].

Внутрішній діаметр обмотки НН:

$$D_1' = d + 2 \cdot a_{01} = 0,19 + 2 \cdot 0,005 = 0,2 \text{ м},$$

де  $a_{01}$  – ширина каналу між обмоткою НН та стержнем, визначається з табл. 4.4 [1].

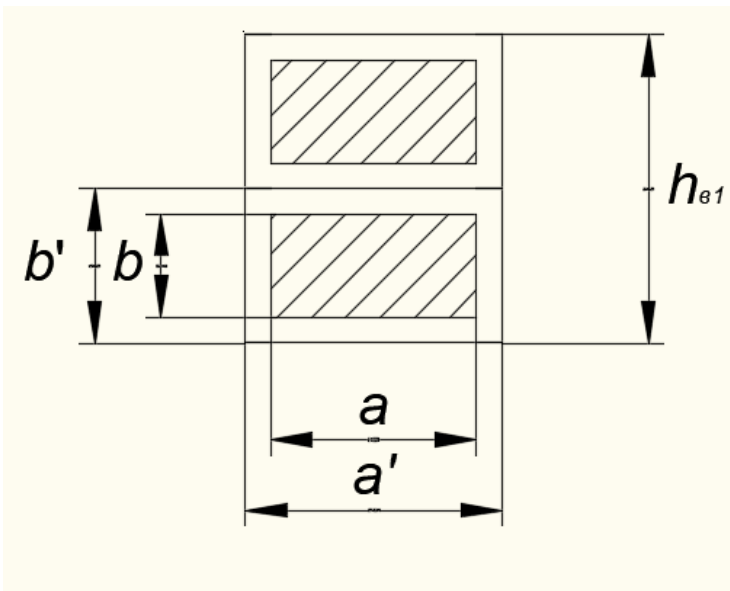
Зовнішній діаметр обмотки НН:

$$D_1'' = D_1' + 2 \cdot a_1 = 0,2 + 2 \cdot 0,0212 = 0,2424 \text{ м}.$$

Повна поверхня охолодження обмотки НН при двохшаровій обмотці:

$$\Pi_{01} = 2 \cdot c \cdot k_3 \cdot \pi \cdot (D_1' + D_1'') \cdot l_1 = 2 \cdot 3 \cdot 0,75 \cdot \pi \cdot (0,2 + 0,2424) \cdot 0,4565 = 2.8551 \text{ м}^2,$$

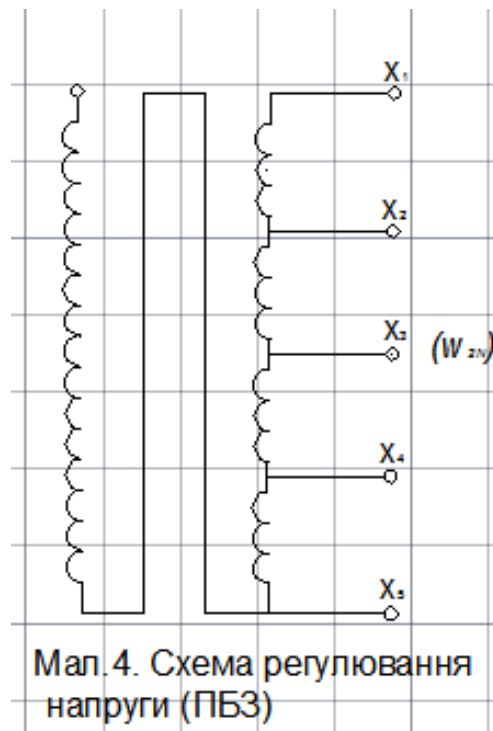
де  $k = 0,75$  – коефіцієнт, який враховує закриття частини поверхні обмотки ізоляційними деталями;  $n = 2$  – враховує число внутрішніх та зовнішніх поверхонь охолодження.



Осьовий розмір витка(реальний). Рисунок (3а)

### 3.2. Розрахунок обмотки ВН

Розрахунок обмотки ВН розпочинаємо з визначення числа витків, необхідних для отримання номінальної напруги та для напруг всіх інших відгалужень (рис. 4).



Мал.4. Схема регулювання напруги (ПБЗ)

Число витків при номінальній напрузі:

$$w_{2N} = w_1 \cdot \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}} = 45 \cdot \frac{2.0207 \cdot 10^4}{400} = 2273.2875.$$

Приймаємо  $w_{2N} = 2273$ .

Число витків на одній ступені регулювання напруги обмотки ВН:

$$w_p = \frac{\Delta U}{u_B} = \frac{505.175}{8.8889} = 56.8321;$$

$$\Delta U = \frac{2,5 \cdot U_{2\phi}}{100} = \frac{2,5 \cdot (2.0207 \cdot 10^4)}{100} = 505.175 \text{ В};$$

де  $\Delta U = \frac{2,5 \cdot U_{2\phi}}{100}$  – напруга на одній ступені регулювання обмотки або різниця напруг двох сусідніх відгалужень, В;  $u_B$  – напруга одного витка обмотки, В.

Приймаємо  $w_p = 57$ .

Визначаємо кількість витків та напругу на відгалуження:

Ступінь	Витків на відгалуженнях	Напруга $U_1, \text{В}$
+5%	$w_{2N} + 2 \cdot w_p = 2273 + 2 \cdot 57 = 2387$	380
+2,5%	$w_{2N} + w_p = 2273 + 57 = 2330$	390
0	$w_{2N} = 2273$	400
-2,5 %	$w_{2N} - w_p = 2273 - 57 = 2216$	410
-5%	$w_{2N} - 2 \cdot w_p = 2273 - 2 \cdot 57 = 2159$	420

Осьовий розмір обмотки ВН  $l_2$  приймається рівним раніше визначеному осьовому розміру обмотки НН  $l_1$ :

$$l_2 = l_1 = 0,4565 \text{ м.}$$

Попередньо визначаємо густину струму в обмотці ВН:

$$J_2 = 2 \cdot J_{\text{сп}} - J_1 = 2 \cdot 3,1098 \cdot 10^6 - 2,8441 \cdot 10^6 = 3,3755 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Попередня площа перерізу витка обмотки:

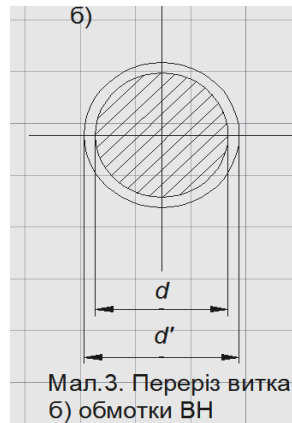
$$\Pi_2' = \frac{I_{2\phi}}{J_2 \cdot 10^{-6}} = \frac{6,5983}{3,3755 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,9548 \text{ мм}^2.$$

З табл. 5.1 [1] за площиною перерізу обмоточного проводу підбираємо провід з діаметром проводу без ізоляції  $d_2$  та діаметром проводу в ізоляції  $d_2'$ , мм. Підібрані розміри проводу записуємо наступним чином:

$$\text{Марка проводу } \text{ПБ} \times n_{\text{в}2} \times \frac{d_2}{d_2'}$$

де  $n_{\text{в}2}$  – число паралельних проводів (рис.3, б).

$$\text{ПБ} \times 1 \times \frac{1,9}{2,3}$$



Площина перерізу підбраного проводу  $\Pi_2'' = 2,805 \text{ мм}^2$  (табл. 5.1 [1]).

Повний переріз витка:

$$\Pi_2 = n_{\text{в}2} \cdot \Pi_2'' \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 2,805 \cdot 10^{-6} = 2,805 \text{ мм}^2.$$

Реальна густина струму обмотки ВН:

$$J_2 = \frac{I_{2\phi}}{\Pi_2} = \frac{6,5983}{2,805 \cdot 10^{-6}} = 2,3523 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Число витків в шарі:

$$w_{\text{сл}2} = \frac{l_2}{n_{\text{в}2} \cdot d_2'} - 1 = \frac{0,4565}{1 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3}} - 1 = 197,4783.$$

Приймаємо  $w_{\text{сл}2} = 199$ .

Число шарів в обмотці ВН:

$$n_{\text{сл}2} = \frac{w_{2N} + 2 \cdot w_p}{w_{\text{сл}2}} = \frac{2387}{199} = 11,995.$$

Приймаємо  $n_{\text{сл}2} = 12$ , (найближче більше ціле число).

Робоча напруга двох шарів обмотки ВН:

$$U_{\text{мсл}} = 2 \cdot w_{\text{сл}2} \cdot u_{\text{в}} = 2 \cdot 199 \cdot 8,8889 = 3537,7822 \text{ В}.$$

За робочою напругою двох шарів обмотки з табл. 4.7 [1] вибираємо кількість шарів і загальну товщину  $\delta_{i \text{ іє}}$  кабельного паперу в ізоляції між двома шарами обмотки:

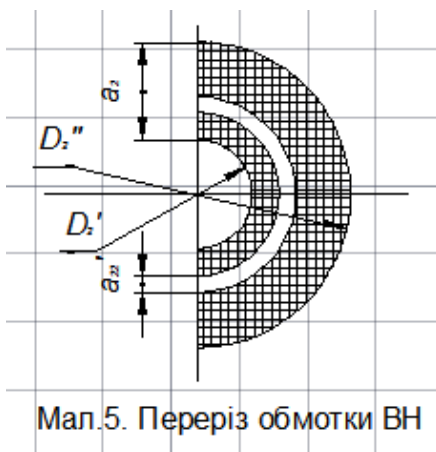
$$\delta_{\text{мсл}} = 6 \cdot 0,12 = 0,72 \text{ мм.}$$

За умовами охолодження обмотка ВН кожного стержня виконується у вигляді двох концентричних котушок з осьовим масляним каналом між ними  $a'_{22}$ .

Радіальний розмір обмотки:

$$a_2 = (d'_2 \cdot n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}} \cdot (n_{\text{сл}2} - 1) + a'_{22}) \cdot 10^{-3} = (2,3 \cdot 12 + 0,72 \cdot (12 - 1) + 6) \cdot 10^{-3} = 0,0415 \text{ м,}$$

де  $a'_{22} = 6 \text{ мм}$  – мінімальна ширина масляного каналу між котушками, вибирається з табл. 9.2 [1].



Внутрішній діаметр обмотки ВН:

$$D_2' = D_1'' + 2 \cdot a_{12} = 0,2424 + 2 \cdot 0,032 = 0,3064 \text{ м.}$$

Зовнішній діаметр обмотки ВН:

$$D_2'' = D_2' + 2 \cdot a_2 = 0,3064 + 2 \cdot 0,0415 = 0,3894 \text{ м.}$$

Поверхня охолодження обмотки ВН (згідно рис. 5.22, д [1]):

$$P_{02} = c \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D_2' + D_2'') \cdot l_2 = 3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot \pi \cdot (0,3064 + 0,3894) \cdot 0,4565 = 4,7898 \text{ м}^2,$$

де  $k = 0,8$  – коефіцієнт, який враховує закриття частини поверхні обмотки ізоляційними деталями;  $n = 2$  – враховує число внутрішніх і зовнішніх поверхонь охолодження.

## 4. Визначення параметрів короткого замикання

### 4.1. Розрахунок втрат короткого замикання.

Основні втрати у мідних обмотках визначаються за формулою:

$$P_{\text{осн}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_{\text{м}},$$

тут  $J$  – густина струму відповідної обмотки,  $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ ;  $G_{\text{м}}$  – маса металу, кг, що визначається за формулою:

$$G_{\text{м}} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{\text{ср}} \cdot w \cdot \Pi,$$

де  $c$  – число активних (несучих обмотки) стержнів трансформатора;

$D_{\text{ср}} = \frac{D' + D''}{2}$  – середній діаметр обмотки, м;  $w$  – число витків обмотки;  $\Pi$  – переріз витка,  $\text{мм}^2$ .

Маса металу обмотки НН:

$$G_{\text{м1}} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{\text{ср1}} \cdot w_1 \cdot \Pi_1 = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0,2 + 0,2424}{2} \cdot 45 \cdot 1,172 \cdot 10^{-4} = 97,9951 \text{ кг.}$$

Маса металу обмотки ВН:

$$G_{\text{м2}} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{\text{ср2}} \cdot w_2 \cdot \Pi_2 = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0,3064 + 0,3894}{2} \cdot 2273 \cdot 2,805 \cdot 10^{-6} = 186,3228 \text{ кг.}$$

Основні втрати обмоток НН та ВН:

$$P_{\text{осн1}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J_1^2 \cdot G_{\text{м1}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot (2,8441 \cdot 10^6)^2 \cdot 97,9951 = 1902,4153 \text{ Вт;}$$

$$P_{\text{осн2}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J_2^2 \cdot G_{\text{м2}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot (2,3523 \cdot 10^6)^2 \cdot 186,3228 = 2474,3587 \text{ Вт.}$$

При розрахунку втрат короткого замикання визначають середній коефіцієнт збільшення втрат для кожної обмотки, який враховує наявність додаткових втрат на вихрові струми в провідниках обмоток, наведених

полями розсіювання.

Середній коефіцієнт додаткових втрат для обмотки НН (прямокутний провід):

$$k_{д1} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot a^4 \cdot n^2,$$

де  $a$  – діаметр круглого провідника без ізоляції, м;  $n$  – число провідників обмотки;

$$\beta_1 = \frac{b \cdot m}{l} \cdot k_p = \frac{4,25 \cdot 10^3 \cdot 22,5 \cdot 4}{0,4565} \cdot 0,934 = 0,7826,$$

де  $b$  – розмір провідників вздовж висоти обмотки, тобто в напрямку, паралельному лініям магнітної індукції поля розсіювання, м;  $m$  – число провідників обмотки в тому ж напрямку;  $l$  – загальний розмір обмотки в напрямку, паралельному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання (висота обмотки), м;  $k_p$  – коефіцієнт, який враховує відхилення реального поля розсіювання від ідеального поля розсіювання:

$$k_p = 1 - \sigma \cdot (1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,066 \cdot (1 - e^{-1/0,066}) = 0,934;$$

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l} = \frac{0,032 + 0,0212 + 0,0415}{\pi \cdot 0,4565} = 0,066,$$

де  $a_{12}$  – канал між обмоткою ВН та НН, м;  $a_1$  – радіальний розмір обмотки НН, м;  $a_2$  – радіальний розмір обмотки ВН, м.

$$k_{д1} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot d^4 \cdot n^2 = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot 0,7826^2 \cdot (7,1 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 2^2 = 1,0591.$$

Середній коефіцієнт додаткових втрат для обмотки ВН (круглий провід):

$$k_{д2} = 1 + 0,044 \cdot 10^8 \cdot \beta_2^2 \cdot d^4 \cdot n^2 = 1 + 0,044 \cdot 10^8 \cdot 0,7736^2 \cdot (1,9 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 12^2 = 1,0048.$$

$$\beta_2 = \frac{d \cdot m}{l} \cdot k_p = \frac{1,9 \cdot 10^3 \cdot 199}{0,4565} \cdot 0,934 = 0,7736,$$

де  $n$  та  $m$  означають те саме, що і при визначенні  $k_{д1}$  (див. вище);  $d$  – діаметр круглого провідника без ізоляції, м.

Втрати у баку та деталях конструкції:

$$P_6 = 10 \cdot k \cdot S_N = 10 \cdot 0,0165 \cdot 400 = 66 \text{ Вт},$$

де  $S_N$  – повна потужність трансформатора, кВ·А;  $k$  – коефіцієнт, визначається з табл. 7.1 [1].

У трансформаторів з природнім масляним охолодженням в цілях недопущення надмірного нагрівання обмоток значення  $q_1$  та  $q_2$  обмежуються  $q \leq 1200 \div 1400 \text{ Вт/м}^2$ . Зниження припустимих значень  $q$  для алюмінієвих обмоток приблизно до  $1000 \text{ Вт/м}^2$  дозволяє суттєво уповільнити старіння масла та збільшити строки його заміни.

Густина теплового потоку на поверхні обмотки НН:

$$q_1 = \frac{P_{\text{осн1}} \cdot k_{\text{д1}}}{\Pi_{01}} = \frac{1902,4153 \cdot 1,0591}{2,8551} = 705,7014 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} < 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Густина теплового потоку на поверхні обмотки ВН:

$$q_2 = \frac{P_{\text{осн2}} \cdot k_{\text{д2}}}{\Pi_{02}} = \frac{2474,3587 \cdot 1,0048}{4,7898} = 519,0688 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} < 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Розрахунок основних втрат у відводах потребує визначення довжини провідників та маси металу у відводах.

Приймаємо переріз відводу рівним перерізу витка відповідної обмотки:

$$\Pi_{\text{отв1}} = \Pi_1 = 1,172 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\Pi_{\text{отв2}} = \Pi_2 = 2,2805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Загальна довжина провідів для з'єднання в зірку:

$$l_{\text{отв1}} = l_{\text{отв2}} = 7,5 \cdot l = 7,5 \cdot 0,4565 = 3,4238 \text{ м},$$

де  $l$  – осьовий розмір обмотки (висота), м.

Загальна довжина провідів для з'єднання в трикутник:

$$l_{\text{отв1}} = l_{\text{отв2}} = 14 \cdot l = 14 \cdot 0,4565 = 6,391 \text{ м}.$$

Масу провідів відводу визначаємо за формулою:

$$G_{\text{іоа}} = l_{\text{іоа}} \cdot \dot{I}_{\text{іоа}} \cdot \gamma,$$

де  $\gamma$  – густина металу відводів (для міді  $\gamma_a = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ).

$$G_{\text{отв1}} = l_{\text{отв1}} \cdot \Pi_{\text{отв1}} \cdot \gamma = 6.391 \cdot 1.172 \cdot 10^{-4} \cdot 8900 = 6.6663 \text{ кг};$$

$$G_{\text{отв2}} = l_{\text{отв2}} \cdot \Pi_{\text{отв2}} \cdot \gamma = 3.4238 \cdot 2.805 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 0,0855 \text{ кг}.$$

Основні втрати у відводах визначаємо за формулою:

$$P_{\text{отв}} = k \cdot J^2 \cdot G_{\text{отв}},$$

де  $k$  – в залежності від металу відводів приймається таким, як і в 7.3 чи 7.4 [1].

Втрати у відводах обмоток НН та ВН:

$$P_{\text{отв1}} = k \cdot J_1^2 \cdot G_{\text{отв1}} = 2.4 \cdot 10^{-12} \cdot (2.8441 \cdot 10^6)^2 \cdot 6.6663 = 129.4154 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{отв2}} = k \cdot J_2^2 \cdot G_{\text{отв2}} = 2.4 \cdot 10^{-12} \cdot (2.3523 \cdot 10^6)^2 \cdot 0.0855 = 1.1354 \text{ Вт}.$$

Повні втрати короткого замикання:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{осн1}} \cdot k_{\text{д1}} + P_{\text{осн2}} \cdot k_{\text{д2}} + P_{\text{отв1}} + P_{\text{отв2}} + P_{\text{г}} =$$

$$= 1902.4153 \cdot 1,0591 + 2474.3587 \cdot 1.0048 + 129.4154 + 1.1354 + 66 = 4697.634 \text{ Вт}.$$

Розбіжність розрахункових та заданих величин  $P_{\text{к}}$ :

$$\frac{P_{\text{к}} - P_{\text{к.зад}}}{P_{\text{к.зад}}} \cdot 100\% = \frac{4697.634 - 5500}{5500} \cdot 100 = -14.5885 \% < +5 \%,$$

що допускається.

#### 4.2. Розрахунок напруги короткого замикання.

Активна складова напруги короткого замикання:

$$u_{\text{а}} = \frac{P_{\text{к}}}{10 \cdot S_{\text{N}}} = \frac{4697,634}{10 \cdot 400} = 1,1744 \text{ \%}.$$

При визначенні реактивної складової напруги короткого замикання, а також при всіх подальших розрахунках користуємось реальними розмірами розрахованих обмоток трансформатора ( $a_1, a_2, a_{12}, d_{12}, l$ ), а не наближеними значеннями  $\beta$  та  $a_{\text{р}}$ , знайденими при попередньому визначенні основних розмірів трансформатора.

Реактивна складова напруги короткого замикання:

$$u_{\text{р}} = \frac{7,9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_{\text{р}} \cdot k_{\text{р}}}{u_{\text{â}}^2} \cdot 10^{-1},$$

де  $u_b$  – напруга одного витка, В;  $a_p$  – ширина зведеного каналу розсіювання:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,032 + \frac{0,0212 + 0,0415}{3} = 0,0529 \text{ м};$$

$d_{12}$  – середній діаметр між обмотками:

$$d_{12} = d + 2 \cdot a_{01} + 2 \cdot a_1 + a_{12} = 0,19 + 2 \cdot 0,005 + 2 \cdot 0,0212 + 0,032 = 0,2744 \text{ м},$$

де  $d = 0,15 \text{ м}$  – діаметр стержня;

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 0,2744}{0,4565} = 1,8884.$$

$$\begin{aligned} u_p &= \frac{7,9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p}{u_b^2} \cdot 10^{-1} = \\ &= \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 133,3333 \cdot 1,8884 \cdot 0,0529 \cdot 0,934}{8,8889^2} \cdot 10^{-1} = 6,2192 \%. \end{aligned}$$

Напруга короткого замикання:

$$u_k = \sqrt{u_p^2 + u_a^2} = \sqrt{6,2192^2 + 1,1744^2} = 6,3291 \%.$$

Розбіжність розрахункової та заданої величин напруги короткого замикання:

$$\frac{u_k - u_{k.зад}}{u_{k.зад}} \cdot 100\% = \frac{6,3291 - 6,5}{6,5} \cdot 100 = -2,6292 \% < \pm 5 \%,$$

що допускається.

## 5. Розрахунок магнітної системи трансформатора

### 5.1. Визначення параметрів магнітної системи.

Прийнята конструкція трифазної плоскої шихтованої магнітної системи, збирається з пластин холоднокатаної текстурованої сталі марки 3404 (табл. 1, рис. 6). Стержні магнітної системи пресуються шляхом забивання дерев'яних планок поміж стержнем та обмоткою НН чи її жорстким ізоляційним паперово – бакелітовим циліндром, ярма пресуються балками. Розміри пакетів вибираємо з табл. 8.2 та 8.3 [1] (в залежності від діаметра стержня).



Число ступенів в перерізі стержня  $n_c = 7$ ; в перерізі ярма  $n_y = 5$ .

Розміри пакетів в перерізі стержня та ярма:

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо (в половині поперечного перерізу), мм
1.	180×30	180×30
2.	165×17	165×17
3.	145×14	145×14
4.	130×8	130×8
5.	115×7	115×19
6.	100×5	–
7.	75×7	–

Площа ступінчатої фігури перерізу стержня та ярма знаходяться з табл. 8.6 та 8.7 [1]:

$$\Pi_{\text{ф.с.}} = 0,02628 \text{ м}^2;$$

$$\Pi_{\text{ф.я.}} = 0,02673 \text{ м}^2.$$

Об'єм кута магнітної системи з табл. 8.6 та 8.7 [1]:

$$V_y = 0,004118 \text{ м}^3.$$

Активний переріз стержня:

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\text{ф.с.}} = 0,97 \cdot 0,02628 = 0,0255 \text{ м}^2,$$

де  $k_3$  – коефіцієнт заповнення перерізу стержня (або ярма) сталлю, табл. 2.2[1].

Активний переріз ярма:

$$\Pi_y = k_3 \cdot \Pi_{\text{ф.я.}} = 0,97 \cdot 0,02673 = 0,0259 \text{ м}^2.$$

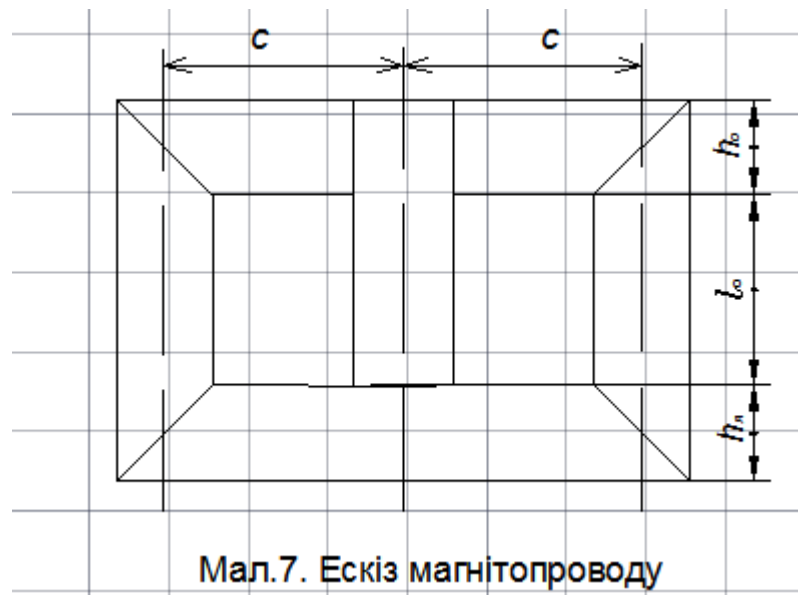
Об'єм сталі кута магнітної системи:

$$V_{\text{y.ст.}} = k_3 \cdot V_y = 0,97 \cdot 0,004118 = 0,004 \text{ м}^3.$$

Довжина стержня:

$$l_c = l + (l'_0 + l''_0) = 0,4565 + (0,05 + 0,05) = 0,5565 \text{ м},$$

де  $l$  – осьовий розмір (висота) обмотки, м;  $l'_0, l''_0$  – відстані від обмотки відповідно до верхнього та нижнього ярма (рис. 7), табл. 4.5 [1], м.



Мал.7. Ескіз магнітопроводу

Відстань між осями сусідніх стержнів:

$$C = D_2'' + a_{22} \cdot 10^{-3} = 0,3894 + 20 \cdot 10^{-3} = 0,4094 \text{ м,}$$

де  $D_2''$  – зовнішній діаметр обмотки ВН, м;  $a_{22}$  – відстань між обмотками сусідніх стержнів, визначається з табл. 4.5 [1], мм.

Маса сталі кута магнітної системи:

$$G_y = k_3 \cdot V_y \cdot \gamma_{ст} \cdot 10^{-6} = 0,97 \cdot 0,004118 \cdot 7650 = 30,5576 \text{ кг,}$$

де  $\gamma_{ст} = 7650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – густина холоднокатаної трансформаторної сталі.

Повна маса двох ярм:

$$G_{\bar{y}} = 2 \cdot (c - 1) \cdot C \cdot \bar{I}_{\bar{y}} \cdot \gamma_{ст} + 2 \cdot G_y = \\ = 2 \cdot (3 - 1) \cdot 0,4094 \cdot 0,0259 \cdot 7650 + 2 \cdot 30,5576 = 385,5811 \text{ кг,}$$

де  $c$  – число активних (несучих обмотки) стержнів;  $\bar{I}_{\bar{y}}$  – активний переріз ярма,  $\text{м}^2$ .

Маса сталі стержнів в межах вікна магнітної системи:

$$G_c' = c \cdot \Pi_c \cdot l_c \cdot \gamma_{ст} = 3 \cdot 0,0255 \cdot 0,5565 \cdot 7650 = 325,6777 \text{ кг,}$$

де  $l_c$  – довжина стержня, м;  $\Pi_c$  – активний переріз стержня,  $\text{м}^2$ .

Маса сталі стержнів в місцях стику пакетів стержня та ярма (рис. 8.4 [1]):

$$G_c'' = c \cdot (\Pi_c \cdot a_{1я} \cdot \gamma_{ст} \cdot 10^{-3} - G_y) = 3 \cdot (0,0255 \cdot 0,16 \cdot 7650 - 30,5576) = 1,9632 \text{ кг,}$$

де  $a_{1я}$  – ширина пакетів стержня, що стикуються, м.

Маса сталі стержнів:

$$G_c = G'_c + G''_c = 325,6777 + 1,9632 = 327,6409 \text{ кг.}$$

Загальна маса сталі пласкої магнітної системи:

$$G_{ст} = G_c + G_я = 327,6409 + 385,5811 = 713,222 \text{ кг.}$$

## 5.2. Розрахунок втрат холостого ходу.

Індукція в стержні магнітопроводу:

$$B_c = \frac{u_B}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_c} = \frac{8,8889}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0255} = 1,5702 \text{ Тл,}$$

де  $u_B$  – напруга одного витка, В.

Індукція в ярмі:

$$B_я = \frac{u_B}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_я} = \frac{8,8889}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0259} = 1,5459 \text{ Тл.}$$

Індукція в косому стику:

$$B_{кос} = \frac{B_c}{\sqrt{2}} = \frac{1,5702}{\sqrt{2}} = 1,1103 \text{ Тл.}$$

Площа перерізу немагнітних зазорів на прямому стику середнього стержня дорівнює активному перерізу стержня  $\Pi_c$ .

Площа перерізу стержня на косому стику:

$$\Pi_{кос} = \sqrt{2} \cdot \Pi_c = \sqrt{2} \cdot 0,0255 = 0,0361 \text{ м}^2.$$

Питомі втрати для сталі стержнів, ярм та стиків з табл. 8.10 [1] для сталі марки 3404 при шихтовці в дві пластини:

$$\text{при } B_c = 1,5702 \text{ Тл;} \quad p_c = 1,2294 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; \quad p_з = 948,28 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\text{при } B_я = 1,5459 \text{ Тл;} \quad p_я = 1,18 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; \quad p_з = 914,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\text{при } B_{кос} = 1,1103 \text{ Тл;} \quad p_{кос} = 438,755 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Втрати холостого ходу:

$$P_x = (k_{п.р} \cdot k_{п.з} \cdot (p_c \cdot G_c + p_y \cdot G_y - 4 \cdot p_y \cdot G_y + \frac{P_c + P_y}{2} \cdot k_{п.у} \cdot G_y) + \sum p_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3) \cdot k_{п.я} \cdot k_{п.п} \cdot k_{п.ш},$$

де на основі §8.2 та табл. 8.12 [1] приймаємо:

$$k_{п.р} = 1,05; k_{п.з} = 1,00; k_{п.я} = 1,00; k_{п.п} = 1,03; k_{п.ш} = 1,02;$$

$k_{п.у}$  – знаходимо з табл. 8.13 [1],  $k_{і.о} = 10,18$ .

Вираз  $\sum p_\zeta \cdot n_\zeta \cdot \dot{I}_\zeta$  визначає втрати в зоні стиків пластин магнітної системи з урахуванням числа стиків різної форми, площі зазору  $\dot{I}_\zeta$  для прямих та косих стиків, індукції в зазорі  $\hat{A}_\zeta$  та питомих втрат  $p_\zeta$  при цій індукції з табл. 8.10 [1], або 8.9 [1]. При 4 косих стиках на бокових стержнях та 2 прямих стиках на середньому стержні маємо:

$$\begin{aligned} \sum p_\zeta \cdot n_\zeta \cdot \dot{I}_\zeta &= 4 \cdot \dot{I}_{\text{єіп}} \cdot \delta_{\text{єіп}} + 2 \cdot \dot{I}_{\text{п}} \cdot \delta_\zeta = \\ &= 4 \cdot 0,0361 \cdot 438,755 + 2 \cdot 0,0255 \cdot 948,28 = 111,7185 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Прийmemo:

$$\begin{aligned} P_{я.с} &= (p_c \cdot G_c + p_y \cdot G_y - 4 \cdot p_y \cdot G_y + \frac{P_c + P_y}{2} \cdot k_{п.у} \cdot G_y) = 1,2294 \cdot 327,6409 + \\ &+ 1,18 \cdot 385,5811 - 4 \cdot 1,18 \cdot 30,5576 + \frac{1,2294 + 1,18}{2} \cdot 10,18 \cdot 30,5576 = 1088,3092 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Тоді, потужність холостого ходу дорівнює:

$$\begin{aligned} D_0 &= (k_{і.о} \cdot k_{і.с} \cdot P_{\dot{y}.п} + \sum p_\zeta \cdot n_\zeta \cdot \dot{I}_\zeta) \cdot k_{і.у} \cdot k_{і.і} \cdot k_{і.о} = \\ &= (1,05 \cdot 1 \cdot 1088,3092 + 111,7185) \cdot 1 \cdot 1,03 \cdot 1,02 = 1317,918 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Розбіжність розрахункової та заданої величин втрат холостого ходу:

$$\frac{P_x - P_{x.зад}}{P_{x.зад}} \cdot 100\% = \frac{1317,918 - 1350}{1350} \cdot 100 = -2,3764 \% < +7,5 \%,$$

що допускається.

### 5.3. Розрахунок струмів холостого ходу.

Питомі намагнічуючі потужності знаходимо з табл. 8.17 [1]:

$$\begin{aligned} \text{при } B_c = 1,5702 \text{ Тл;} & \quad q_c = 1,626 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{кГ}}; & \quad q_{c.3} = 21414 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{М}^2}; \\ \text{при } B_y = 1,5459 \text{ Тл;} & \quad q_y = 1,512 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{кГ}}; & \quad q_{y.3} = 19727,1 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{М}^2}; \\ \text{при } B_{\text{кoc}} = 1,1103 \text{ Тл;} & & \quad q_{\text{кoc}} = 2654,5 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{М}^2}; \end{aligned}$$

Намагнічуюча потужність холостого ходу:

$$\begin{aligned} Q_{\delta} = & (k_{\delta\delta} \cdot k_{\delta\zeta} \cdot (q_{\bar{n}} \cdot G_c + q_{\bar{y}} \cdot G_{\bar{y}} - 4 \cdot q_{\bar{y}} \cdot G_y + \frac{q_c + q_{\bar{y}}}{2} \cdot k_{\delta\delta} \cdot k_{\delta\bar{i}\bar{e}} \cdot G_y) + \\ & + \sum q_{\zeta} \cdot n_{\zeta} \cdot \bar{I}_{\zeta}) \cdot k_{\delta\bar{y}} \cdot k_{\delta\bar{i}} \cdot k_{\delta\delta}, \end{aligned}$$

де на основі §8.3 та табл. 8.3 і 8.21 [1] приймаємо:

$$k_{\text{т.р}} = 1,18; \quad k_{\delta\zeta} = 1,0; \quad k_{\delta\bar{y}} = 1,0; \quad k_{\text{т.п}} = 1,045; \quad k_{\text{т.ш}} = 1,01; \quad k_{\delta\bar{i}\bar{e}} = 1,32;$$

$k_{\text{т.у}}$  – знаходимо з табл. 8.20 [1],  $k_{\delta\delta} = 42,45$ .

$$\begin{aligned} \sum q_{\zeta} \cdot n_{\zeta} \cdot \Pi_{\zeta} = & 4 \cdot \Pi_{\zeta, \text{кoc}} \cdot q_{\text{кoc}} + 2 \cdot \Pi_c \cdot q_{c.3} = 4 \cdot 0,0361 \cdot 2654,5 + \\ & + 2 \cdot 0,0255 \cdot 21414 = 1475,4238 \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{я.с}} = & (q_c \cdot G_c + q_y \cdot G_y - 4 \cdot q_y \cdot G_y + \frac{q_c + q_y}{2} \cdot k_{\text{т.у}} \cdot k_{\text{т.ш}} \cdot G_y) = 1,626 \cdot 327,6409 + \\ & + 1,512 \cdot 385,5811 - 4 \cdot 1,512 \cdot 30,5576 + \frac{1,626 + 1,512}{2} \cdot 42,45 \cdot 1,32 \cdot 30,5576 = \\ & = 3617,473 \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Тоді, намагнічуюча потужність холостого ходу дорівнює:

$$\begin{aligned} Q_{\delta} = & (k_{\delta\delta} \cdot k_{\delta\zeta} \cdot Q_{\bar{n}} + \sum q_{\zeta} \cdot n_{\zeta} \cdot \bar{I}_{\zeta}) \cdot k_{\delta\bar{y}} \cdot k_{\delta\bar{i}} \cdot k_{\delta\delta} = \\ & = (1,18 \cdot 1 \cdot 3617,473 + 1475,4238) \cdot 1 \cdot 1,045 \cdot 1,02 = 6122,574 \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Активна складова струму холостого ходу:

$$i_a = \frac{P_x}{10 \cdot S_N} = \frac{1317,918}{10 \cdot 400} = 0,3295 \text{ \%}.$$

Реактивна складова струму холостого ходу:

$$i_p = \frac{Q_x}{10 \cdot S_N} = \frac{6122,574}{10 \cdot 400} = 1,5306 \text{ \%}.$$

Струм холостого ходу:

$$i_0 = \sqrt{i_a^2 + i_p^2} = \sqrt{0,3295^2 + 1,5306^2} = 1,5657 \text{ \%}.$$

Розбіжність розрахункової та заданої величин струму холостого ходу:

$$\frac{i_0 - i_{0.\text{зад}}}{i_{0.\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{1,5657 - 2,1}{2,1} \cdot 100 = -25,4429 \% < +15 \%,$$

що допускається.

## 6. Тепловий розрахунок трансформатора

### 6.1. Перевірочний тепловий розрахунок обмоток

Внутрішній перепад температури обмотки НН:

$$\Theta_{0.1} = \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda_{із}} = \frac{705,7014 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{0,17} = 1,0378 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $q_1$  – густина теплового потоку на поверхні обмотки, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta$  – товщина ізоляції провода на одну сторону, м;  $\lambda_{із}$  – теплопровідність ізоляції провода, визначаємо з табл. 9.1, [1] Вт/(м·°C).

Внутрішній перепад температури в обмотці ВН:

$$\Theta_{0.2} = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot \lambda_{ср}},$$

де  $a$  – радіальний розмір зовнішньої котушки, м;  $p$  – втрати, які виділяються в 1 м<sup>3</sup> загального об'єму обмотки, Вт/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{ср}$  – середня теплопровідність обмотки, Вт/(м·°C).

$$\begin{aligned} p &= 1,68 \cdot \frac{J^2 \cdot d^2}{(d' + \delta_{мс}) \cdot d'} \cdot 10^{-8} = \\ &= 1,68 \cdot \frac{(2,3523 \cdot 10^6)^2 \cdot (1,9 \cdot 10^{-3})^2}{(2,3 \cdot 10^{-3} + 0,72 \cdot 10^{-3}) \cdot 2,3 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-8} = 48313,3466 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}, \end{aligned}$$

де  $d$  – діаметр проводу без ізоляції, м;  $d'$  – діаметр проводу в ізоляції, м;  $\delta_{ін}$  – загальна товщина кабельного паперу, між шарової ізоляції, м;  $J$  – густина струму, А/м<sup>2</sup>.

$$\lambda_{ср} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{мс} \cdot (d' + \delta_{мс})}{\lambda \cdot \delta_{мс} + \lambda_{мс} \cdot d'} = \frac{0,5293 \cdot 0,17 \cdot (2,3 + 0,72) \cdot 10^{-3}}{0,5293 \cdot 0,72 \cdot 10^{-3} + 0,17 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3}} = 0,352 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}},$$

де  $\lambda_{ср}$  – середня теплопровідність обмотки, Вт/(м·°C), зведена до умовного випадку рівномірного розподілення виткової та міжшарової ізоляції по усьому об'єму обмотки;  $\lambda_{мс}$  – теплопровідність міжшарової ізоляції, визначаємо з табл. 9.1 [1], Вт/(м·°C).

Середня умовна теплопровідність обмотки  $\lambda$  без врахування міжшарової ізоляції:

$$\lambda = \frac{\lambda_{из}}{0,7 \cdot \sqrt{\alpha}} = \frac{0,17}{0,7 \cdot \sqrt{0,2105}} = 0,5293 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}},$$

де  $\alpha = \frac{d' - d}{d} = \frac{2,3 - 1,9}{1,9} = 0,2105$ ,  $\lambda_{из}$  – теплопровідність матеріалу ізоляції витків, що визначається з табл. 9.1, [1], Вт/(м · °С).

Радіальний розмір зовнішньої котушки обмотки ВН, яка складається з 8 шарів проводу та 7 ізоляційних прошарків (2/3 шарів обмотки):

$$a = 8 \cdot d' + 7 \cdot \delta_{мс} = 8 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 0,72 \cdot 10^{-3} = 0,0234 \text{ м.}$$

$$\Theta_{0,2} = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot \lambda_{cp}} = \frac{48313,3466 \cdot 0,0234^2}{8 \cdot 0,352} = 9,3943 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Середній перепад температури складає 2/3 повного перепаду в циліндричній багатошаровій обмотці:

$$\Theta_{0,2,cp} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_{0,2} = \frac{2}{3} \cdot 9,3943 = 6,2629 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Перепад температур на поверхні обмотки визначаємо за формулою

$$\Theta_{0,i} = k \cdot q^{0,6},$$

де  $k = 0,285$  для циліндричних обмоток з прямокутного або круглого проводу.

Обмотка НН:

$$\Theta_{0,м1} = k \cdot q_1^{0,6} = 0,285 \cdot 705,7014^{0,6} = 14,5887 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Обмотка ВН:

$$\Theta_{0,м2} = k \cdot q_2^{0,6} = 0,285 \cdot 519,0688^{0,6} = 12,1333 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Середнє перевищення температури обмотки над середньою температурою масла:

- обмотка НН:

$$\Theta_{0,м1,cp} = \Theta_{0,1} + \Theta_{0,м1} = 1,0378 + 14,5887 = 15,6265 \text{ } ^\circ\text{С};$$

- обмотка ВН:

$$\Theta_{0,м2,cp} = \Theta_{0,2,cp} + \Theta_{0,м2} = 6,2629 + 12,1333 = 18,3962 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

## 6.2. Тепловий розрахунок бака.

З табл. 9.4 [1] вибираємо бак прямокутного перетину зі стінками у вигляді хвиль (рис. 8).

Глибина бака від дна до кришки визначається за формулою:

$$H = H_{\text{я.к}} + H_{\text{я.ч}},$$

де  $H_{\text{я.к}}$  – відстань від верхнього ярма трансформатора до кришки бака, визначаємо з табл. 9.5 [1],  $H_{\text{я.к}} = 0,4$  м;  $H_{\text{я.ч}}$  – висота активної частини:

$$H_{\text{я.ч}} = l_c + 2 \cdot h_{\text{я}} + n \cdot 10^{-3} = 0,5565 + 2 \cdot 0,16 + 40 \cdot 10^{-3} = 0,9165 \text{ м},$$

де  $l_c$  – висота стержня, м;  $h_{\text{я}}$  – висота ярма, м;  $n$  – товщина прокладки під нижнє ярмо ( $n = 30 - 50$  мм).

$$H = H_{\text{я.ч}} + H_{\text{я.к}} = 0,9165 + 0,4 = 1,3165 \text{ м}.$$

Мінімальну ширину бака визначаємо за формулою (рис. 9):

$$B = D_2'' + (s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2) \cdot 10^{-3},$$

де  $d_1$  – діаметр неізолюваного відводу НН:  $d_1 = 7,1$  мм;  $d_2$  – розмір неізолюваного відводу ВН:  $d_2 = 1,9$  мм;  $s_1$  – ізоляційна відстань від неізолюваного відводу обмотки НН до обмотки ВН визначаємо з табл. 4.12 [1],  $s_1 = 90$  мм;  $s_2$  – ізоляційна відстань від відводу обмотки НН до стінки бака визначаємо з табл. 4.11 [1],  $s_2 = 22$  мм;  $s_3$  – ізоляційна відстань від неізолюваного відводу обмотки НН до власної обмотки визначаємо з табл. 4.11 [1],  $s_3 = 50$  мм;  $s_4$  – ізоляційна відстань від відводу обмотки ВН до стінки бака визначаємо з табл. 4.11 [1],  $s_4 = 50$  мм;  $D_2''$  – зовнішній діаметр обмотки ВН, м.

Отже,

$$\begin{aligned} B &= D_2'' + (s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,3894 + (90 + 22 + 7,1 + 50 + 50 + 1,9) \cdot 10^{-3} = 0,6104 \text{ м}. \end{aligned}$$

Мінімальна довжина бака:

$$A = 2 \cdot C + D_2'' + 2 \cdot s_5 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 0,4094 + 0,3894 + 2 \cdot 107,9 \cdot 10^{-3} = 1,424 \text{ м},$$

де  $C$  – відстань між осями сусідніх стержнів, м;

$$s_5 = s_3 + d_2 + s_4 = 50 + 7,9 + 50 = 107,9 \text{ мм.}$$

Допустиме перевищення середньої температури масла над температурою охолоджуючого повітря для найбільш нагрітої обмотки:

$$\Theta_{\text{м.в}} = 65 - \Theta_{0, \text{м}2, \text{ср}} = 65 - 18,3962 = 46,6038^\circ\text{C}.$$

Перевищення температури масла в верхніх шарах в цьому випадку буде:

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = 1,2 \cdot \Theta_{\text{м.в}} = 1,2 \cdot 46,6038 = 55,9246^\circ\text{C} \leq 60^\circ\text{C}.$$

Приймаємо попередньо перепад температур на внутрішній поверхні стінки баку  $\Theta_{\text{м.б}} = 5^\circ\text{C}$  та запас  $2^\circ\text{C}$ , знаходимо середнє перевищення температури зовнішньої стінки баку над температурою повітря:

$$\Theta_{\text{б.в}} = \Theta_{\text{м.в}} - \Theta_{\text{м.б}} = 46,6038 - 5 - 2 = 39,6038^\circ\text{C}.$$

Для вибраного розміру бака розраховуємо орієнтовну поверхню конвекції гладкої стінки бака  $\dot{I}'_{\text{е.ає}}$ , якій дорівнює і орієнтовна поверхня випромінювання  $\dot{I}'_{\text{у}}$  цієї стінки,  $\text{м}^2$ :

$$\Pi'_{\text{у}} = \Pi'_{\text{к.гл}} = 2 \cdot (A + B) \cdot H + \Pi_{\text{кр}} \cdot 0,5,$$

де  $A, B, H$  – розміри бака, м;  $\dot{I}'_{\text{е.д}}$  – поверхня кришки бака,  $\text{м}^2$ ; 0,5 – коефіцієнт, який враховує закриття частини поверхні кришки ізоляторами вводів НН та ВН та різною арматурою.

$$\Pi_{\text{кр}} = (A + 0,16) \cdot (B + 0,16) = (1,424 + 0,16) \cdot (0,6104 + 0,16) = 1,2203 \text{ м}^2;$$

$$\begin{aligned} \Pi'_{\text{у}} = \Pi'_{\text{к.гл}} &= 2 \cdot (A + B) \cdot H + \Pi_{\text{кр}} \cdot 0,5 = 2 \cdot (1,424 + 0,6104) \cdot 1,3165 + 1,2203 \cdot 0,5 = \\ &= 5,9667 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Визначаємо орієнтовну поверхню конвекції бака з трубами, необхідну для забезпечення отриманого значення  $\Theta_{\text{б.в}}$ :

$$\Pi'_{\text{к}} = \frac{1,05 \cdot \sum P}{2,5 \cdot \Theta_{\text{б.в}}^{1,25}} - 1,12 \cdot \Pi'_{\text{у}} = \frac{1,05 \cdot (4697,634 + 1317,918)}{2,5 \cdot 39,6038^{1,25}} - 1,12 \cdot 5,9667 = 18,7477 \text{ м}^2,$$

де  $\sum P = P_{\text{к}} + P_{\text{х}}$  – сумарні розрахункові втрати трансформатора, Вт.

За розд. 9.6 [1] (стор. 436) вибираємо розміри однієї хвилі (рис. 8):

- ширина повітряного каналу  $a = 25$  мм;
- ширина масляного каналу  $c = 10$  мм;
- глибина хвилі  $b = 200$  мм;
- товщина стінки хвилі  $\delta = 1,0$  мм;
- висота хвилястої стінки  $H_{\text{XB}} = H - 0,1 = 1,3165 - 0,1 = 1,2165$  м.

Тоді, крок хвилі:

$$t = (a + c + 2 \cdot \delta) = (25 + 10 + 2 \cdot 1,0) = 37 \text{ мм.}$$

Розгорнута довжина хвилі:

$$\begin{aligned} l_{\text{XB}} &= [2 \cdot (b - c) + (t - 2 \cdot c) + \pi \cdot c] \cdot 10^{-3} = (2 \cdot b + t - 0,86 \cdot c) \cdot 10^{-3} = \\ &= (2 \cdot 200 + 37 - 0,86 \cdot 10) \cdot 10^{-3} = 0,428 \text{ м.} \end{aligned}$$

Коефіцієнт, що враховує утруднення конвекції повітря у каналах між сусідніми хвилями:

$$k_{\text{XB}} = 1 - \frac{b^2}{190 \cdot a^2} = 1 - \frac{200^2}{190 \cdot 25^2} = 0,663.$$

Кількість хвиль, необхідна для забезпечення орієнтовної поверхні конвекції всього бака з хвилями  $\Pi'_{\text{к}}$

$$m_{\text{XB}} = \frac{\Pi'_{\text{к}} + \Pi'_{\text{к,ГЛ}}}{H_{\text{XB}} \cdot (t_{\text{XB}} \cdot k_{\text{XB}} - t)} = \frac{18,7477 - 5,9667}{1,2165 \cdot (0,428 \cdot 0,663 - 0,037)} = 41,5766.$$

Приймаємо кількість хвиль  $m_{\text{XB}} = 42$ .

Повна поверхня конвекції хвиль:

$$\Pi_{\text{к,XB}} = m \cdot l_{\text{XB}} \cdot H_{\text{XB}} \cdot k_{\text{XB}} = 42 \cdot 0,428 \cdot 1,2165 \cdot 0,663 = 14,4984 \text{ м}^2.$$

Поверхня конвекції гладкої частини бака:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{к,ГЛ}} &= 2 \cdot (A + B) \cdot H - m \cdot t \cdot H_{\text{XB}} + 0,5 \cdot \Pi_{\text{кр}} = \\ &= 2 \cdot (1,424 + 0,6104) \cdot 1,3165 - 42 \cdot 0,037 \cdot 1,2165 + 0,5 \cdot 1,2203 = 4,0763 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Повна поверхня конвекції бака з хвилями:

$$\Pi_{\text{к}} = \Pi_{\text{к,XB}} + \Pi_{\text{к,ГЛ}} = 14,4984 + 4,0763 = 18,5747 \text{ м}^2.$$

При розташуванні всіх хвиль на прямолінійних частинах бокових поверхонь бака можна визначити реальну поверхню випромінювання, як

$$\Pi_{\text{и}} = \Pi'_{\text{к,ГЛ}} = 5,9667 \text{ м}^2.$$

### 6.3. Визначення перевищення температури обмоток та масла над температурою оточуючого середовища

Середнє перевищення температури стінки бака над температурою оточуючого середовища:

$$\Theta_{\text{б.в}} = \left( \frac{k \cdot (P_x + P_k)}{2,8 \cdot \Pi_{\text{и}} + 2,5 \cdot \Pi_{\text{к}}} \right)^{0,8} = \left( \frac{1,05 \cdot (1317,918 + 4697,634)}{2,8 \cdot 5,9667 + 2,5 \cdot 18,5747} \right)^{0,8} = 39,8207^\circ\text{C},$$

де  $k = 1,05$  при індивідуальному розрахунку;  $P_x, P_k$  – втрати холостого ходу та короткого замикання, Вт.

Середнє перевищення температури масла поблизу стінки над температурою стінки бака:

$$\Theta_{\text{м.б}} = k_1 \cdot 0,165 \cdot \left( \frac{k \cdot (P_x + P_k)}{\sum \Pi_{\text{к}}} \right)^{0,6} = 1 \cdot 0,165 \cdot \left( \frac{1,05 \cdot (1317,918 + 4697,634)}{5,9667 + 18,5747} \right)^{0,6} = 4,6113^\circ\text{C},$$

де  $\sum \dot{I}_{\text{е}}$  – сума поверхонь конвекції гладкої частини труб, кришки без врахування коефіцієнтів покращення чи погіршення конвекції;  $k_1$  – коефіцієнт, рівний 1,0 при природному масляному охолодженні.

Перевищення температури масла в верхніх шарах над температурою оточуючого середовища:

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = \sigma \cdot (\Theta_{\text{б.в}} + \Theta_{\text{м.б}}) = 1,2 \cdot (39,8207 + 4,6113) = 53,3184^\circ\text{C},$$

де коефіцієнт  $\sigma$  для трубчастого баку та баку з радіаторами приймається рівним 1,2.

Перевищення температури обмоток над температурою оточуючого повітря для обмотки ВН та НН:

$$\Theta_{\text{о,в1}} = \Theta_{\text{о,сп1}} + \Theta_{\text{о,м1}} + \Theta_{\text{б,в}} + \Theta_{\text{м,б}} = 1,0378 + 14,5887 + 39,8207 + 4,6113 = 60,0585^\circ\text{C};$$

$$\Theta_{\text{о,в2}} = \Theta_{\text{о,сп2}} + \Theta_{\text{о,м2}} + \Theta_{\text{б,в}} + \Theta_{\text{м,б}} = 6,2629 + 12,1333 + 39,8207 + 4,6113 = 62,8282^\circ\text{C},$$

що менше допустимого перевищення температури 65°C.

#### 6.4. Наближене визначення маси конструктивних матеріалів і масла трансформатора.

Маса конструктивної сталі:

$$G_{\text{ост}} = 0,1 \cdot (G_{\text{м1}} + G_{\text{м2}} + G_{\text{отв1}} + G_{\text{отв2}} + G_{\text{ст}}) = \\ = 0,1 \cdot (97,9951 + 186,3228 + 6,6663 + 0,0855 + 713,222) = 100,4292 \text{ кг.}$$

Маса картону в ізоляції:

$$G_{\text{карт1}} = 0,135 \cdot G_{\text{м1}} = 0,135 \cdot 97,9951 = 13,2293 \text{ кг,}$$

$$G_{\text{карт2}} = 0,135 \cdot G_{\text{м2}} = 0,135 \cdot 186,3228 = 25,1536 \text{ кг.}$$

Маса бака:

$$G_{\text{а}} = \gamma_{\text{нб}} \cdot (\overset{\sim}{I}_{\text{е}} \cdot b_{\text{с}} + 2 \cdot \overset{\sim}{I}_{\text{ед}} \cdot b_{\text{ед}}) = \\ = 7800 \cdot (18,5747 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1,2203 \cdot 4 \cdot 10^{-3}) = 655,6774 \text{ кг,}$$

де  $\gamma_{\text{нб}} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $b_{\text{с}}$  та  $b_{\text{кр}}$  – товщина стінок та кришки (і дна) бака

відповідно.

Маса активної частини, тобто остова з обмотками (але без кришки):

$$G_{\text{а.ч}} = 1,2 \cdot (G_{\text{м1}} + G_{\text{м2}} + G_{\text{отв1}} + G_{\text{отв2}} + G_{\text{ст}}) = \\ = 1,2 \cdot (97,9951 + 186,3228 + 6,6663 + 0,0855 + 713,222) = 1205,15 \text{ кг.}$$

Об'єм активної частини:

$$V_{\text{а.ч}} = \frac{G_{\text{а.ч}}}{\gamma_{\text{а.ч}}} = \frac{1205,15}{5500} = 0,2191 \text{ м}^3,$$

$$\text{де } \gamma_{\text{а.ч}} = 5500 \div 6000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Внутрішній об'єм бака:

$$V_{\text{б}} = \Pi_{\text{кр}} \cdot H_{\text{а.ч}} = A \cdot B \cdot H = 1,424 \cdot 0,6104 \cdot 1,3165 = 1,1443 \text{ м}^3.$$

Об'єм масла в хвилях:

$$V_{\text{хв}} = c \cdot v \cdot H_{\text{хв}} \cdot m_{\text{хв}} = 0,01 \cdot 0,2 \cdot 1,2165 \cdot 42 = 0,1022 \text{ м}^3.$$

Маса масла трансформатора:

$$G_M = 1,05 \cdot 900 \cdot (V_G - V_{a.ч} + V_{XB}) = 1,05 \cdot 900 \cdot (1,1443 - 0,2191 + 0,1022) = 970,893 \text{ кг.}$$

Об'єм масла:

$$V_M = \frac{G_M}{\rho_M} = \frac{970,893}{900} = 1,0788 \text{ м}^3,$$

де  $\rho_i$  – густина масла,  $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Об'єм розширювача:

$$V_{\text{розш}} = 0,1 \cdot V_M = 0,1 \cdot 1,0788 = 0,1079 \text{ м}^3.$$

З табл. 4 (дод.2) вибираємо розширювач з такими основними розмірами: внутрішній діаметр  $d_p = 470$  мм; товщина стінки  $t_c = 1,4$  мм; довжина розширювача  $l_p = 720$  мм.

## 7. Розрахунок робочих характеристик

### 7.1. Розрахунок залежності ККД від навантаження

Розрахунок залежності ККД від навантаження при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  та  $\cos \varphi_2 = 1$  (рис.11).

ККД визначаємо за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 \cdot P_{\hat{\epsilon}} + D_0}{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot P_{\hat{\epsilon}} + D_0},$$

де  $\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$  – коефіцієнт завантаження;  $P_{\hat{\epsilon}}, D_0$  – втрати короткого замикання та

холостого ходу, кВт;  $S_N$  – номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

$$\beta := 0,0.1..1.2;$$

$$P_x := 1,3179 \text{ кВт};$$

$$P_k := 4,698 \text{ кВт};$$

$$\cos \varphi_2 = 1;$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8;$$

$$S_N := 400 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\eta_{0.8}(\beta) := 1 - \frac{\beta^2 \cdot P_{\hat{\epsilon}} + D_0}{\beta \cdot S_N \cdot 0,8 + \beta^2 \cdot P_{\hat{\epsilon}} + D_0};$$

$$\eta_1(\beta) := 1 - \frac{\beta^2 \cdot P_{\hat{\epsilon}} + D_0}{\beta \cdot S_N \cdot 1 + \beta^2 \cdot P_{\hat{\epsilon}} + D_0};$$

$\beta =$

0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2

$\eta_{0.8}(\beta) =$

0
0.9591
0.977
0.9822
0.9841
0.9847
0.9846
0.9841
0.9834
0.9825
0.9815
0.9805
0.9794

$\eta_1(\beta) =$

0
0.967
0.9815
0.9857
0.9872
0.9877
0.9876
0.9872
0.9867
0.986
0.9852
0.9843
0.9834

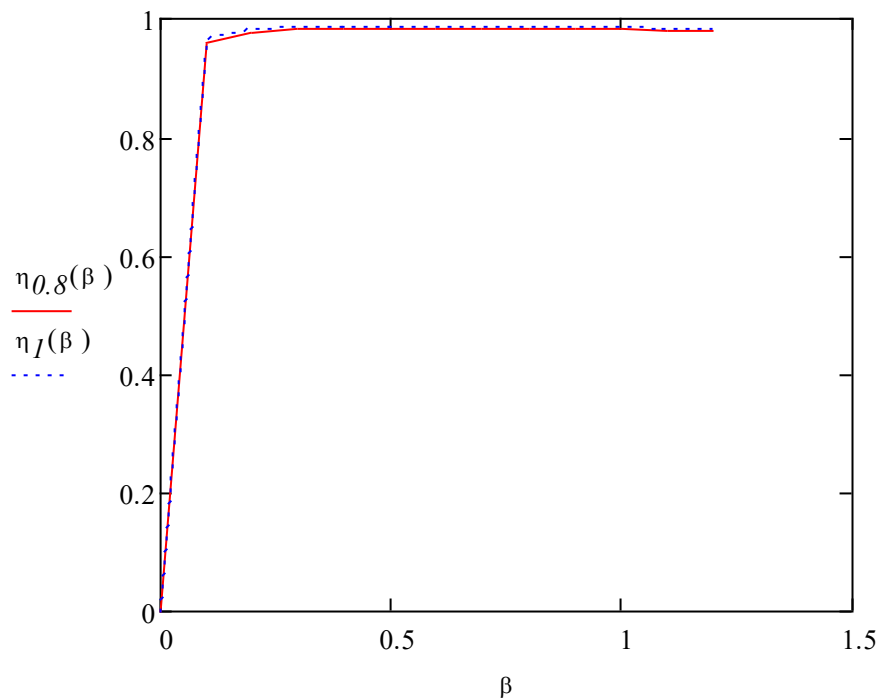


Рис.11. Залежність  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  та  $\cos \varphi_2 = 1$ .

## 7.2. Залежність вторинної напруги трансформатора від навантаження

Розрахунок залежності вторинної напруги трансформатора від навантаження при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (рис.12).

Значення вторинної напруги визначаємо за формулою:

$$U_2' = U_{2N}' - \Delta U_1,$$

де  $\Delta U_1 = (u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_p \cdot \sin \varphi_2) \cdot \beta$ ;  $u_a, u_p$  – активна та реактивна складові напруги короткого замикання, %;  $U_{2N}'$  – номінальна напруга, % (100%).

$$u_a := 1,1744 \% ; \quad u_p := 6,2192 \% ; \quad U_{2N}' := 100 \% ; \quad \cos \varphi_2 = 0,8 ; \quad \sin \varphi_2 = 0,6.$$

$$U_2(\beta) := U_{2N}' - (u_a \cdot 0,8 + u_p \cdot 0,6) \cdot \beta;$$

$\beta =$	$U_2(\beta) =$
0	100
0.1	99.5329
0.2	99.0658
0.3	98.5987
0.4	98.1316
0.5	97.6645
0.6	97.1974
0.7	96.7303
0.8	96.2632
0.9	95.7961
1	95.329
1.1	94.8619
1.2	94.3948

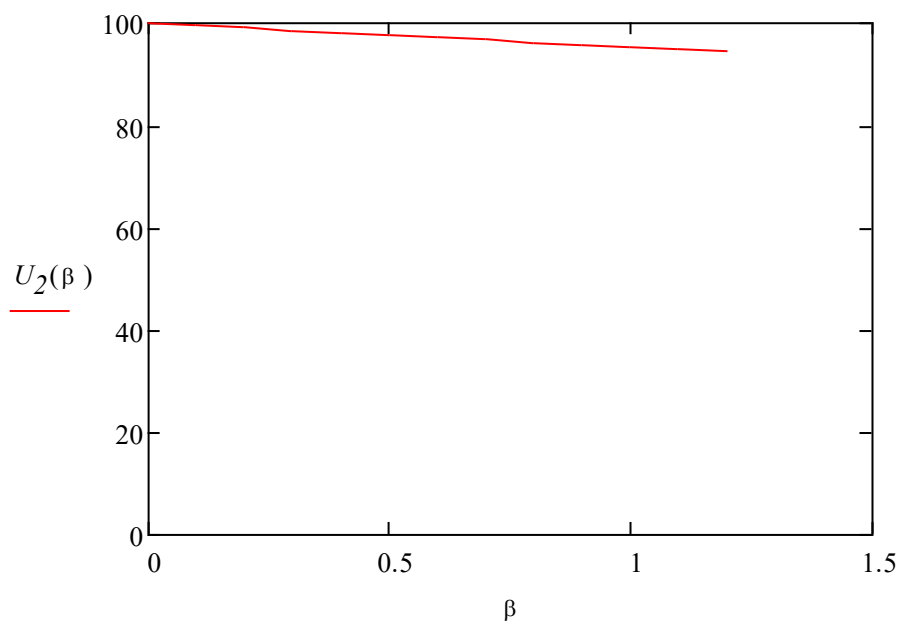


Рис. 12. Залежність  $U_2 = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

## **Охорона праці**

### **Обґрунтування рішення щодо розміщення електротехнічного обладнання**

Силовий трансформатор це статичний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму.

В залежності від типу та конструкції силових трансформаторів, їх потрібно розміщувати або в спеціально відведеному приміщенні з вентиляцією або на території підприємства, населеного пункту, тощо. В даному дипломному проекті конструкція трансформатора дозволяє встановлювати його відкрито. До виконання робіт по монтажу силових трансформаторів допускаються робітники з 18 років, що:

- закінчили навчання або навчаються закладах освіти та отримали навички для виконання робіт з підвищеною небезпекою (у професійно-технічних училищах, навчально-курсівих комбінатах, центрах підготовки та перепідготовки робітничих кадрів, в організаціях) за затвердженою програмою;
- мають довідку медичного огляду та є придатними до виконання електромонтажних робіт;
- пройшли перевірку знань з електробезпеки;
- пройшли вступний інструктаж у відділі охорони праці;
- пройшли первинний інструктаж безпосередньо на робочому місці.

Робітники повинні бути проінструктовані щодо розпорядку на робочому місці, порядку переміщення по території об'єкта, про місце відпочинку під час технологічних та обідньої перерв, порядок закінчення роботи.

До початку робіт у комплексній бригаді проводиться первинний інструктаж з безпечного виконання робіт з основної та суміжних професій та ознайомлення з правилами надання першої допомоги.

Допущені мають виконувати тільки ті роботи, про безпечне виконання яких вони проінструктовані безпосередньо керівником.

До робіт на висоті (вище, ніж 1,2 м) допускаються працівники тільки з наявністю відповідного документа що підтверджує готовність робітника до подібної роботи.

Високовольтний вимикач є основним комутаційним апаратом в електричних установках різних номінальних напруг. Він призначений для увімкнення та вимкнення електричних кіл в різних режимах роботи електричних мереж: тривалому навантаженні, перевантаженні, короткому замиканні, холостому ході, несинхронній роботі. Найбільш важкою і відповідальною операцією є вимкнення струмів коротких замикань (КЗ) і увімкнення вимикача на відповідне коротке замикання. Більшість високовольтних вимикачів (включаючи їх приводи) призначені для комутації електричних кіл при нормальних і аварійних режимах в мережах трифазного змінного струму частотою 50 Гц з номінальною напругою від 6 до 750 кВ включно.

### **Кваліфікаційні вимоги до персоналу, котрий обслуговує електротехнічне обладнання**

Кожен працівник, який обслуговує вимикач, повинен знати його конструкцію, враховувати специфічні особливості конструкції, пройти відповідний інструктаж, строго виконувати вимоги цієї інструкції. Персонал, що виконує капітальний ремонт вимикачів, повинен пройти навчання і бути

атестованим підприємством-виробником вимикачів. В обов'язки персоналу також входить монтаж, демонтаж, ремонт та обслуговування електричної частини складного обладнання машин, вузлів і механізмів, устаткування, контрольно-вимірювальних приладів, автоматичних установок. Виконання монтажу і ремонту засобів управління, встановлення та налаштування блоків ВЧ телефонії. Виявлення та усунення дефектів у схемах автоматичного керування і регулювання стаціонарних установок. Перевірка терміну служби пристроїв захисту від витоку на землю і значення установки максимального струмового захисту.

Персонал, що обслуговує високовольтні вимикачі, повинен володіти відповідним розрядом, не нижче 4, зобов'язаний мати професійно-технічну освіту, підвищену кваліфікацію. Також персонал повинен мати стаж роботи з ремонту устаткування 4 розряду — не менше року.

### **Вимоги безпеки перед початком роботи**

Підготувати до безпечної роботи робоче місце, прибрати сторонні предмети і звільнити від них проходи.

Спецодяг електромонтера має бути застебнутим на усі гудзики і заправленим так, щоб не розвіювалися його кінці.

Засоби індивідуального захисту перед кожним застосуванням перевірити на відсутність зовнішніх пошкоджень:

- діелектричні рукавиці додатково на відсутність проколів;
- ізолюючі або електровимірювальні штанги та кліщі повинні мати непошкоджену лакову поверхню та обмежувальні кільця або упори.

Підготувати огорожувальні пристрої, знаки безпеки, покажчики напруги та інші необхідні засоби захисту.

Перевірити по штампі величину напруги, при якій допускається застосування даного засобу та термін наступного випробування.

Забороняється користуватися захисними засобами у яких прострочено термін випробувань.

Гумові засоби індивідуального захисту необхідно берегти від дії мастил, бензину та інших руйнуючих гуму речовин, від дії сонячного та теплового випромінювань, які погіршують властивості цих засобів.

Інструмент, яким користується електрик, повинен мати непошкоджену ізоляцію та упори на рукоятках, а відкрити мати ізольований стержень.

Для обслуговування чи огляду електрообладнання на висоті треба користуватися справними спеціально встановленими або пересувними підставками чи драбинами.

Кінці стояків драбин повинні мати упори (гумові або металеві наконечники), що запобігають ковзанню по підлозі або землі.

Місце встановлення приставних драбин на ділянках руху транспортних засобів чи людей, під час роботи належить огорожувати чи охороняти.

Забороняється працювати на випадкових підставках (ящиках, бочках і т.ін.).

Переносний електроінструмент повинен швидко вмикатися або вимикатися, не допускаючи самовільного ввімкнення або вимкнення, а також бути безпечним у роботі, мати недоступні для випадкового дотику струмоведучі частини.

Перед початком роботи перевірити:

- комплектність, надійність кріплення деталей;
- зовнішнім оглядом справність кабелю. Штепсельної вилки, цілісність ізоляції, наявність захисних кожухів, заземлення;
- роботу на холостому ходу.

Електрику не дозволяється:

- передавати електроінструмент стороннім особам;
- ремонтувати без дозволу;
- залишати електроінструмент у робочому стані без догляду.

Засоби захисту, інструменти та пристосування, які використовуються під час роботи, повинні бути перевірені та випробувані згідно з нормами, затвердженими у встановленому порядку.

Слідкувати за достатнім освітленням робочого місця. Напруга місцевого освітлення не повинна перевищувати 42 В, напруга для визначення електричного кола котушок має бути не вищою 12 В.

Слідкувати, щоб руки, одяг та взуття завжди були сухими та чистими, пам'ятати, що робота пов'язана з електричним струмом.

До обслуговування та ремонту електрообладнання та електромереж приступати після виконання всіх технічних заходів, котрі забезпечують безпеку роботи.

### **Вимоги безпеки під час виконання робіт**

Електромонтер повинен виконувати тільки ту роботу, яка оформлена нарядом, розпорядженням або переліком робіт, які виконуються в порядку поточної експлуатації з виконанням всіх необхідних технічних заходів.

При роботах з частковим або повним зняттям напруги необхідно у вказані послідовності виконувати такі технічні заходи:

- виконати необхідні вимкнення і вжити заходів, які перешкоджають подачі напруги до місця роботи в результаті помилкового або самовільного вмикання комутаційної апаратури;
- повішати плакати: «Не вмикати – працюють люди», «Не вмикати – робота на лінії», а при потребі встановити огорожі;
- приєднати до заземлюючого пристрою переносні заземлення, перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які має бути накладене заземлення;
- накласти заземлення, тобто ввімкнути ножі або накласти переносні заземлення.

Перевіряти відсутність напруги в електроустановках до 1000 В необхідно покажчиком напруги або переносним вольтметром.

Перевірку має проводити допускаючий (відповідальний оперативного персоналу), котрий має кваліфікаційну групу не нижчу третьої.

Необхідно постійно стежити за надійністю приєднання і справністю електричного заземлюючого пристрою.

Забороняється використовувати для заземлення будь-які провідники, котрі не призначені для цього, а також приєднувати заземлення скруткою.

Не вимкнуті струмопровідні частини, доступні для випадкового дотику, повинні бути на час роботи огорожені. Допускається застосування спеціальних огорож, кліток, щитів, конструкція яких забезпечує безпеку їх встановлення, стійкість і надійне закріплення.

На тимчасових огорожах мають бути вивішені плакати.

Забороняється знімати плакати, заземлення і огорожі без дозволу керівника робіт.

При виконанні робіт на вимкненій частині електроустановки заземлення накладається на струмопровідні частини фаз з усіх боків, звідки може бути подано напругу, включаючи і зворотну трансформацію.

Накладення заземлення необхідно виконувати безпосередньо після перевірки відсутності напруги.

При користуванні переносними заземленнями їх комплекти перед перевіркою відсутності напруги мають бути біля місць накладання заземлень і приєднуватись до затискача «земля».

Затискачі переносного заземлення слід накладати на струмопровідні частини, що заземлюються за допомогою штанги з ізоляційного матеріалу в діелектричних рукавицях. Закріплення затискачів виконувати тією ж штангою чи безпосередньо руками, але при цьому обов'язково користуватись діелектричними рукавицями.

Накладати переносні заземлення потрібно спочатку приєднуючи до землі, а потім до струмопровідних частин електрообладнання.

Зняття переносного заземлення із застосуванням штанг і діелектричних рукавиць слід виконувати у зворотному порядку, тобто спочатку зняття його зі струмопровідних частин, а потім від'єднання від заземлюючого пристрою.

Накладання і зняття переносних заземлень в електроустановці напругою понад 1000 В має виконуватись двома особами, які пройшли інструктаж і знайомі зі схемою установки.

При неможливості зняття напруги в електроустановках напругою 500 В і нижче допускається виконання роботи під напругою. Робота в цьому випадку повинна виконуватись не менш ніж двома особами. Виконавець роботи повинен мати кваліфікаційну групу не нижчу четвертої.

При виконанні робіт на струмопровідних частинах, які перебувають під напругою, необхідно:

- працювати в діелектричних калошах чи ізолюючій основі (ізолюючій підставці);
- користуватися справним ізолюючими засобами (інструмент, оперативні і вимірювальні штанги, покажчики напруги, ізолюючі і струмовимірювальні кліщі);
- огорожувати сусідні струмопровідні частини, які перебувають під напругою, до яких може бути можливим випадковий дотик;
- розташовувати ізолюючі засоби так, щоб не виникла небезпека перекриття поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз або на землю;
- працювати з опущеними і застебнутими рукавами одягу і в головному уборі.

Роботи з частковим зняттям напруги, коли частина електроустановки перебуває під напругою і доступні до виконуючої роботи, виконується двома особами.

Заміну плавких вставок запобіжників слід виконувати при знятій напрузі. При неможливості зняття напруги заміну плавких вставок запобіжників допускається виконувати за допомогою спеціальних інструментів під напругою, знявши навантаження.

Заміну плавких вставок запобіжників під напругою необхідно виконувати в захисних окулярах, в діелектричних рукавицях, користуючись ізолюючими кліщами.

Заміну плавких вставок запобіжників може виконувати один електрик з кваліфікаційною групою не нижчою третьої, а при заміні на висоті з приставних драбин – два, з яких один повинен мати кваліфікацію не нижчу третьої групи.

В приміщеннях з підвищеною небезпекою необхідно вжити додаткових заходів безпеки, визначених особами, які видають наряд або віддають розпорядження.

В вибухонебезпечних установках та приміщеннях забороняється:

- ремонтувати електрообладнання і мережі, що перебувають під напругою;
- експлуатувати електрообладнання при несправному заземленні;
- відкривати оболонку вибухонебезпечного обладнання, якщо при цьому струмопровідні частини перебувають під напругою;
- вмикати електроустановку, яка вимкнулась автоматично, без з'ясування і ліквідації причин її вимкнення;
- перевантажувати понад номінальні параметри вибухозахищене електрообладнання, дроти і кабелі;
- міняти перегорілі електричні лампи у вибухозахищених світильниках на інші типи ламп або лампи більшої потужності ніж ті, на які розраховані світильники;
- міняти захист (теплові елементи, запобіжники, розчіплювачі) електрообладнання іншими видами захисту, з іншими номінальними параметрами, ніж ті на які це обладнання розраховане.

Роботи, які вимагають підняття на висоту і виконуються з драбин, підмостків лід виконувати при повному знятті напруги і не менш ніж двома особами.

### **Вимоги безпеки після закінчення робіт**

Привести в порядок робоче місце, прибравши інструмент, прилади, пристосування. Вимкнути технологічне електрифіковане обладнання, верстати, вентиляцію. Прибрати спецодяг, захисні та запобіжні засоби і пристосування в спеціально відведені для них місцях.

При передачі зміни повідомити зміннику, майстру або в адміністрацію цеху про всі помічені несправності і зробити відповідні записи в журналі.

## **Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

При виявленні несправностей в електричних пристроях (іскрінні, спалаху, пошкодженні ізоляції електропроводки, кабелів і т.ін.), а також при залишенні негородженими струмопровідні частини або не заізольовані кінці дротів необхідно повідомити майстру.

Необхідно негайно вимкнути струм у разі:

- поломки будь-якої деталі, при виявленні несправності в роботі механізмів електрообладнання;
- травми будь-кого з обслуговуючого персоналу;
- пожежі в зоні роботи.

## **Електричний опір тіла людини**

Тіло людини є провідником електричного струму. Проте провідність живої тканини, на відміну від звичайних провідників, обумовлена не тільки її фізичними властивостями, але й дуже складними біологічними процесами, які властиві тільки живій матерії.

У результаті опір тіла людини є змінною величиною, який має нелінійну залежність від багатьох чинників: стану шкіри, параметрів електричного кола, фізіологічних чинників, стану навколишнього середовища.

Більшість тканин тіла людини містять значну кількість вологи (до 65% маси), тому живу тканину можна розглядати як електроліт, тобто розчин, який розкладається хімічно при проходженні по ньому електричного струму, тобто тканина має іонну провідність, перенесення електричних розрядів у якій здійснюється зарядженими атомами або групами атомів-іонів.

Опір тіла людини при сухій, чистій і непошкодженій шкірі, вимірний при напрузі до 15-20 В, коливається в межах приблизно від 3000 до 100 000 Ом, а іноді і більше. Якщо на ділянках шкіри, де прикладаються електроди, зшкребти роговий шар, опір тіла впаде до 1000-5000 Ом, а при видаленні

всього верхнього шару шкіри (епідермісу) - до 500-700 Ом. Опір внутрішніх тканин тіла складе всього лише 300-500 Ом.

Електричний опір різних тканин тіла людини неоднаковий:

- відносно великий опір мають: шкіра, кістки, жирова тканина, сухожилля і хрящі мають;
- малий опір мають: м'язова тканина, кров, лімфа і особливо спинний і головний мозок.

Електричний опір тіла людини залежить від таких чинників:

- стан шкіри:
- пошкодження рогового шару (порізи, подряпини) можуть зменшити електричний опір людини до значення опору його внутрішніх тканин - 500-700 Ом, що безумовно збільшує небезпеку ураження людини струмом;
- зволоження шкіри знижує її електричний опір навіть в тому випадку, коли волога має великий питомий опір;
- потовиділення також зменшує електричний опір людини;
- забруднення шкіри різними речовинами, а особливо тими, що добре проводять струм (металевий або вугільний пил, окалина) зменшує електричний опір людини

Найменший опір має шкіра об-личчя, шиї, зап'ястків, особливо з внутрішнього боку, під пахвами, з верхнього боку кистей рук;

- збільшення струму, який проходить через тіло людини, супроводжується посиленням місцевого нагріву шкіри, що призводить до розширення судин, а звідси і до посиленого постачання ділянки кров'ю та підвищеного потовиділення і, відповідно, до зменшення електричного опору тіла;
- підвищення напруги, прикладеної до тіла людини, викликає зменшення в десятки разів його повного опору. Зменшення опору тіла людини зі збільшенням прикладеної напруги відбувається внаслідок зменшення електричного опору шкіри і пояснюється впливом кількох чинників, у тому числі збільшенням струму, який проходить через шкіру, і пробоем рогового шару шкіри під впливом прикладеної напруги;

- вид і частота струму: тіло людини має більший електричний опір до постійного струму, ніж до змінного будь-якої частоти. Із збільшенням частоти повний електричний опір тіла зменшується;
- площа електродів: чим більшою є площа прикладених електродів, тим менший електричний опір тіла людини;
- час проходження струму: електричний опір тіла падає із збільшенням часу внаслідок посилення кровопостачання ділянок шкіри під електродами і збільшення потовиділення;
- стать і вік: у жінок електричний опір тіла менший, ніж у чоловіків, у дітей менший, ніж у дорослих, у молодих людей менший, ніж у старших людей;
- фізичні подразники: звукові та світлові подразники зменшують електричний опір людини;
- підвищення температури навколишнього середовища до 30-45 °С або теплове опромінення зменшує електричний опір людини.

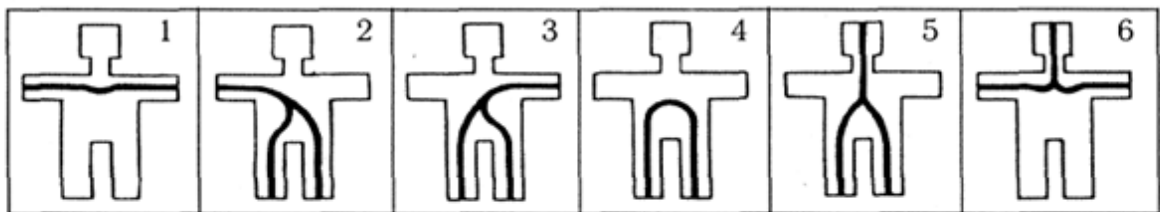


Рис. 8.1 Найбільш поширені шляхи проходження струму через тіло людини:  
 1 — «рука—рука»; 2 — «права рука—ноги»; 3 — «ліва рука—ноги»; 4 — «нога—нога»;  
 5 — «голова—ноги»; 6 — «голова—руки»

### Практичний розрахунок

Людина доторкнулась до проводу трифазної трипровідної мережі з ізольованою нейтраллю (частотою 50Гц) напругою 380 В. Накреслити схеми і визначити напругу дотику ( $U_{\text{дот}}$ ) та силу струму, що проходить через людину ( $I_{\text{л}}$ ) для двох режимів роботи електроустановки:

1) нормальному для двох випадків:

1.1) При  $C_A=C_B=C_C=0$  і  $R_A= R_B= R_C=R$ , кОм.

1.2)  $C_A=C_B=C_C=C$ , мкФ і  $R_A= R_B= R_C= \infty$ .

2) аварійному (людина доторкнулась до фазного провідника в момент, коли інший провідник був замкнений на землю через різні опори замикання на землю  $R_{зам}$ , Ом). Покажіть, в яких випадках доторкання небезпечніше.

В розрахунках прийняти опір тіла людини  $R_{л}$ , Ом; опір заземлення нейтралі  $R_0$ , Ом; опір ізоляції провідників  $R_A = R_B = R_C = R$ , кОм; ємність провідників  $C_A = C_B = C_C = C$ ; мкФ. Вихідні дані для розрахунку:  $R_{л} = 900$  Ом;  $R = 35$  кОм;  $C = 0,07$  мкФ;  $R_{зам} = 120; 50; 2; 0,4$ ; Ом.

1.1) При рівності активних опорів і відсутності ємностей, тобто при  $R_A = R_B = R_C = R$  (5;8;15;30;40;50) та  $C_A = C_B = C_C = 0$ , що може мати місце при коротких повітряних мережах, струм який протікає через людину визначається з виразу :

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R/3} = \frac{220}{900 + 5/3} = 0,2439 \text{ А.}$$

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R/3} = \frac{220}{900 + 8/3} = 0,2437 \text{ А.}$$

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R/3} = \frac{220}{900 + 15/3} = 0,243 \text{ А.}$$

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R/3} = \frac{220}{900 + 30/3} = 0,241 \text{ А.}$$

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R/3} = \frac{220}{900 + 40/3} = 0,2408 \text{ А.}$$

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R/3} = \frac{220}{900 + 50/3} = 0,24 \text{ А. Напряга дотику при цьому}$$

становитиме:

$$U_{дот} = I_{л} * R_{л} = 0,2439 * 900 = 219,51 \text{ В.}$$

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{л}} * R_{\text{л}} = 0,2437 * 900 = 219,33 \text{ В.}$$

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{л}} * R_{\text{л}} = 0,243 * 900 = 218,7 \text{ В.}$$

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{л}} * R_{\text{л}} = 0,241 * 900 = 216,9 \text{ В.}$$

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{л}} * R_{\text{л}} = 0,2408 * 900 = 216,72 \text{ В.}$$

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{л}} * R_{\text{л}} = 0,24 * 900 = 216 \text{ В.}$$

1.2) При рівних ємностях і великих активних опорах у порівнянні з ємнісними, тобто при  $C_A=C_B=C_C=C$  (0,01;0,03;0,15;0,3;0,8;1,5) і  $R_A=R_B=R_C=\infty$ , що може мати місце в кабельних мережах, струм, який протікає через людину визначається з виразу:

$$I_{\text{л1}} = U_{\text{ф}} / \sqrt{(R_{\text{л}}^2 + (\frac{X_c}{3})^2)} = 220 / \sqrt{(900^2 + (\frac{0,318}{3})^2)} = 0,24 \text{ А,}$$

$$\text{де } X_c = 1 / \omega C = 1 / 314 * 0,01 = 0,318 \text{ Ом.}$$

$$I_{\text{л2}} = 0,24 \text{ А. } I_{\text{л3}} = 0,24 \text{ А. } I_{\text{л4}} = 0,24 \text{ А. } I_{\text{л5}} = 0,24 \text{ А. } I_{\text{л6}} = 0,24 \text{ А.}$$

Напряга дотику при цьому становитиме:  $U_{\text{дот1}} = I_{\text{л}} * R_{\text{л}} = 0,24 * 900 = 216 \text{ В.}$

$$U_{\text{дот2}} = 216 \text{ В. } U_{\text{дот3}} = 216 \text{ В. } U_{\text{дот4}} = 216 \text{ В. } U_{\text{дот5}} = 216 \text{ В. } U_{\text{дот6}} = 216 \text{ В.}$$

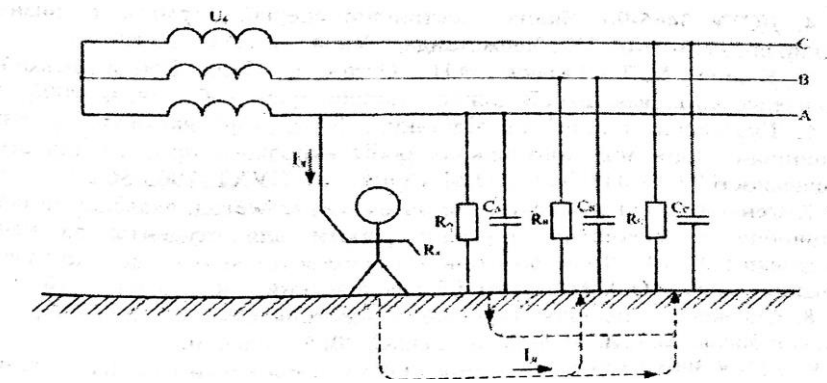


Рис.8.2 Однофазний дотик людини до проводу трифазної трипровідної мережі з ізольованою нейтраллю фази (до фази А).

2) При аварійному режимі, коли одна із фаз мережі, замкнута на землю через відносно малий активний опір  $R_{зам}$  (120 ; 50 ; 2 ; 0,4) провідності двох інших фаз можна прийняти рівними нулю, тобто  $Y_A = Y_B = 0$ . У цьому випадку рівняння для визначення напруги дотику має вигляд:

$$U_{дот} = U_{\phi} * \sqrt{3} * \frac{R_{л}}{R_{л} + R_{зам}} = 220 * \sqrt{3} * \frac{900}{900 + 120} = 336,2$$

$$U_{дот} = U_{\phi} * \sqrt{3} * \frac{R_{л}}{R_{л} + R_{зам}} = 220 * \sqrt{3} * \frac{900}{900 + 50} = 360,99$$

$$U_{дот} = U_{\phi} * \sqrt{3} * \frac{R_{л}}{R_{л} + R_{зам}} = 220 * \sqrt{3} * \frac{900}{900 + 2} = 380,2$$

$$U_{дот} = U_{\phi} * \sqrt{3} * \frac{R_{л}}{R_{л} + R_{зам}} = 220 * \sqrt{3} * \frac{900}{900 + 0,4} = 380,88$$

Струм що проходитьиме через людину:

$$I_{л} = \frac{U_{\phi} * \sqrt{3}}{R_{л} + R_{зам}} = \frac{220 * \sqrt{3}}{900 + 120} = 0,37 \text{ A};$$

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\phi} * \sqrt{3}}{R_{\text{л}} + R_{\text{зам}}} = \frac{220 * \sqrt{3}}{900 + 50} = 0,4 \text{ A};$$

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\phi} * \sqrt{3}}{R_{\text{л}} + R_{\text{зам}}} = \frac{220 * \sqrt{3}}{900 + 2} = 0,422 \text{ A};$$

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\phi} * \sqrt{3}}{R_{\text{л}} + R_{\text{зам}}} = \frac{220 * \sqrt{3}}{900 + 0,4} = 0,423 \text{ A};$$

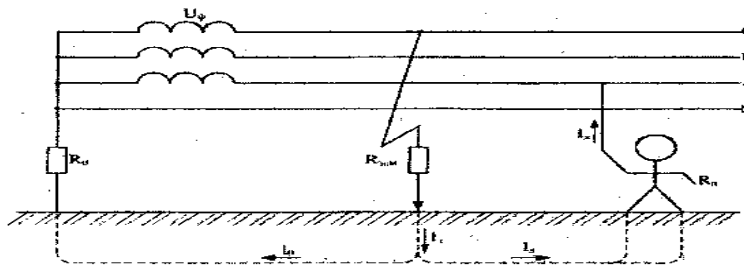


Рис.8.3. Однофазний дотик людини до проводу при аварійному режимі (до фази А).

Отже, аналізуючи отримані дані роблю висновок що напруги дотику й струму, що проходить через людину в нормальному режимі при рівності активних опорів і відсутності ємностей є більш небезпечними ніж при рівних ємностях і великих активних опорах. З розрахунків також видно що найбільшу небезпеку для людини несе її доторкання до фази в аварійному режимі.

## Індивідуальне завдання

### Тема: «Імітаційне моделювання режимів роботи трансформатора»

#### Короткі теоретичні відомості

Станом на сьогоднішній день існує безліч програм для дослідження імітаційного моделювання режимів роботи трансформатора. За допомогою цього дослідження можливо дослідити абсолютно всі режими роботи трансформатора не використовуючи сам трансформатор, що дозволяє зберегти від поломок електричну машину та значно заощадити.

Для розгляду імітаційного моделювання пропонується застосувати програмне забезпечення «Scilab Xcos».

Аналогічно тому, як у MATLAB є додаток для імітаційного моделювання систем Simulink, так у Scilab є додаток Xcos, який містить бібліотеку універсальних блоків для побудови моделі та здійснення імітаційного моделювання систем.

При роботі з Xcos користувач має можливість модернізувати бібліотечні блоки, створювати свої власні, а також складати нові бібліотеки блоків за допомогою підпрограм, написаних на мовах C++, Fortran.

При моделюванні користувач може вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). У ході моделювання є можливість стежити за процесами, які відбуваються в системі. Для цього використовують пристрої спостереження, які входять до складу бібліотеки Xcos. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Scilab дозволяє здійснювати такі інженерні та наукові обчислення:

- розв'язання нелінійних рівнянь і систем;

- розв'язання задач лінійної алгебри;

- розв'язання задач оптимізації;

- диференціювання та інтегрування;

- обробка експериментальних даних (інтерполяція і апроксимація, метод найменших квадратів);

- розв'язання звичайних диференціальних рівнянь і систем.

Крім того, Scilab надає широкі можливості по створенню і редагуванню різних видів графіків і поверхонь.

Цінність Xcos полягає у великій бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела сигналів з практично будь-якими часовими залежностями, масштабуючі, лінійні і нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передавальних характеристик, блоки інтегрування і диференціювання тощо. Як програмний засіб Xcos – типовий представник візуально-орієнтованого засобу програмування. Програма автоматично генерується в процесі введення обраних блоків, їх з'єднань і завдання параметрів. Для опису процесів, що протікають в системах, можуть використовуватися різні типи об'єктів за характером зміни в часі (дискретні, безперервні, циклічні). Практично для всіх блоків існує можливість індивідуального налаштування.

Система Scilab є відкритою. Аналогічно системі Linux, вона розвивається зусиллями ентузіастів-користувачів. Незважаючи на те, що система Scilab містить достатню кількість вбудованих команд, операторів і функцій, відмінна її риса – це гнучкість. Користувач може створити будь-яку нову команду або функцію, а потім використовувати її нарівні з вбудованими. До того ж, система має досить потужну власну мову програмування високого рівня, що говорить про можливість вирішення нових завдань.

На відміну від бібліотеки SimPowerSystems Matlab Simulink, бібліотека Scilab Xcos Electrical не містить готових трифазних блоків. Тому, щоб моделювати трифазні електричні мережі, треба використовувати однофазні блоки, створюючи з них трифазні моделі. За допомогою функції створення підсистем в Scilab Xcos можна створити користувацьку бібліотеку трифазних блоків для багатократного використання. Створення трифазних блоків розглянемо на прикладі трифазного трансформатора.

Розглянемо приклад простої трифазної системи, що складається з джерела, трансформатора і навантаження, та порівняємо особливості її реалізації в Matlab Simulink та Scilab Xcos. Спочатку розглянемо конфігурацію системи в Matlab Simulink (Рис. 1).

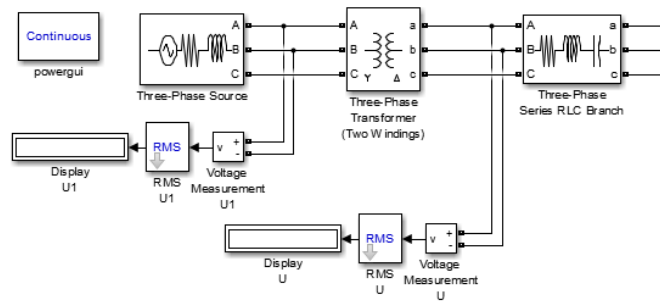


Рис.1

Для моделі було використано три трифазних блоки бібліотеки SimPowerSystems: Three-Phase Source, Three-Phase Transformer (Two Windings) та Three-Phase Series RLC Branch.

Розглянемо, як створити трифазну модель трансформатора з цієї системи з блоків, які доступні нам в бібліотеці Scilab Xcos Electrical. Одну фазу трансформатора можна представити так як на рис. 2. На схемі рис. 1 представлений трансформатор зі з'єднанням обмоток Y- $\Delta$ , тому в моделі так і будемо з'єднувати обмотки (Рис. 3). Схема трансформатора в Scilab Xcos показана на рис. 4.

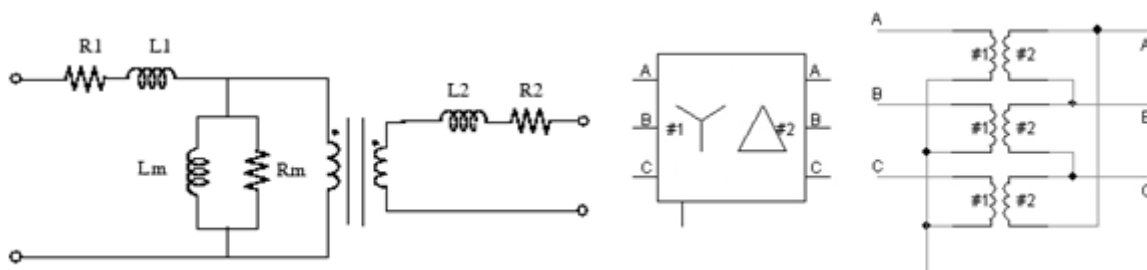


Рис. 2

Рис. 3

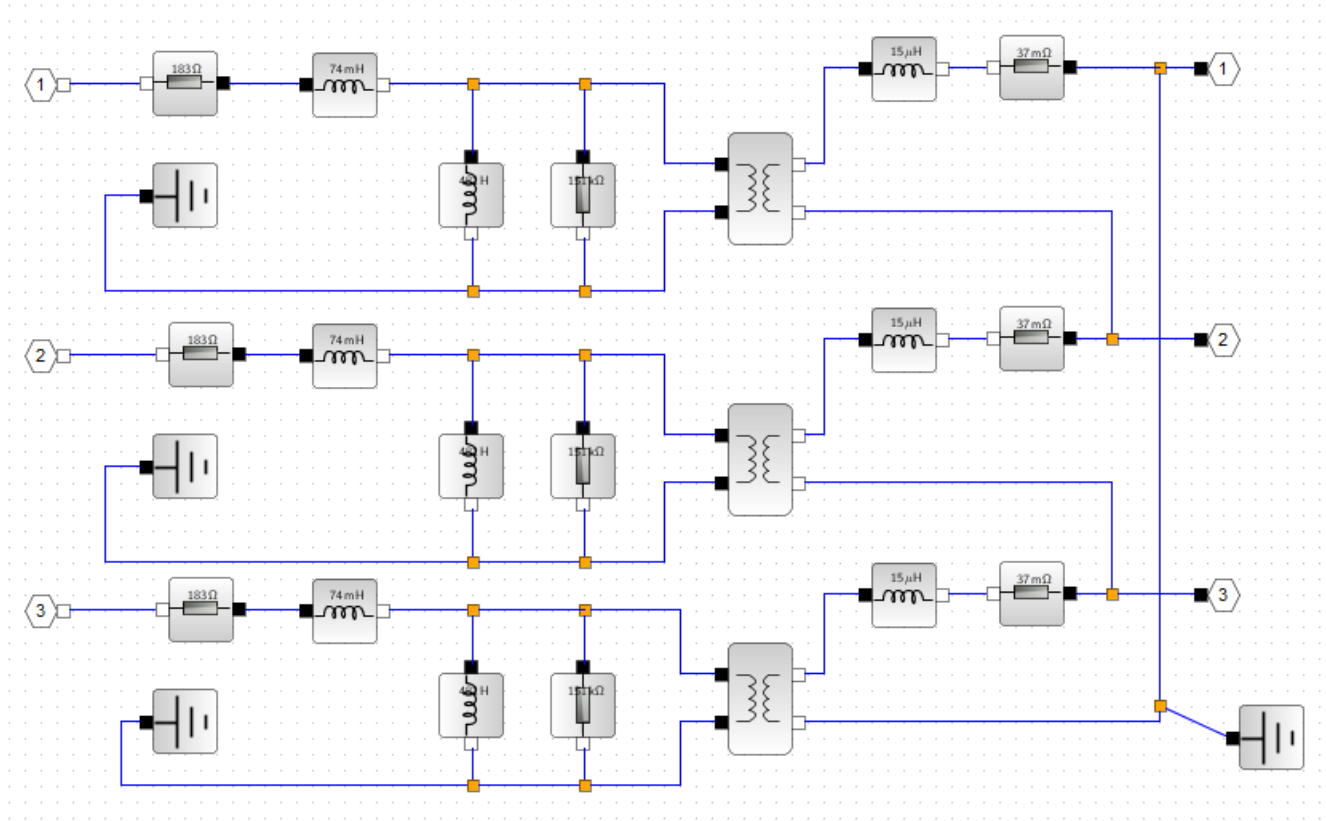


Рис. 4

Після складання схеми, показаної на рис. 4, створюємо на основі її підсистему, яку називаємо 3-Phase Transformer Y-D (Рис. 5).

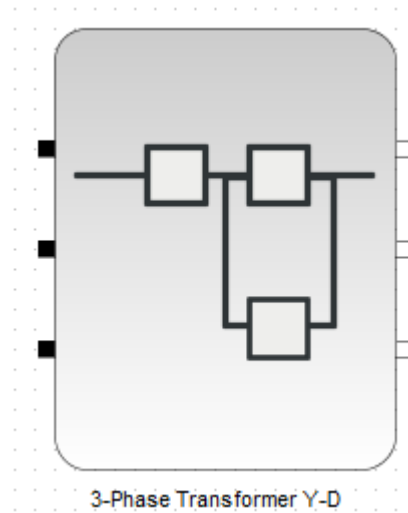


Рис. 5

Далі складаємо схему, аналогічну рис. 1 з готовим макроблоком трифазного трансформатора (Рис. 6).

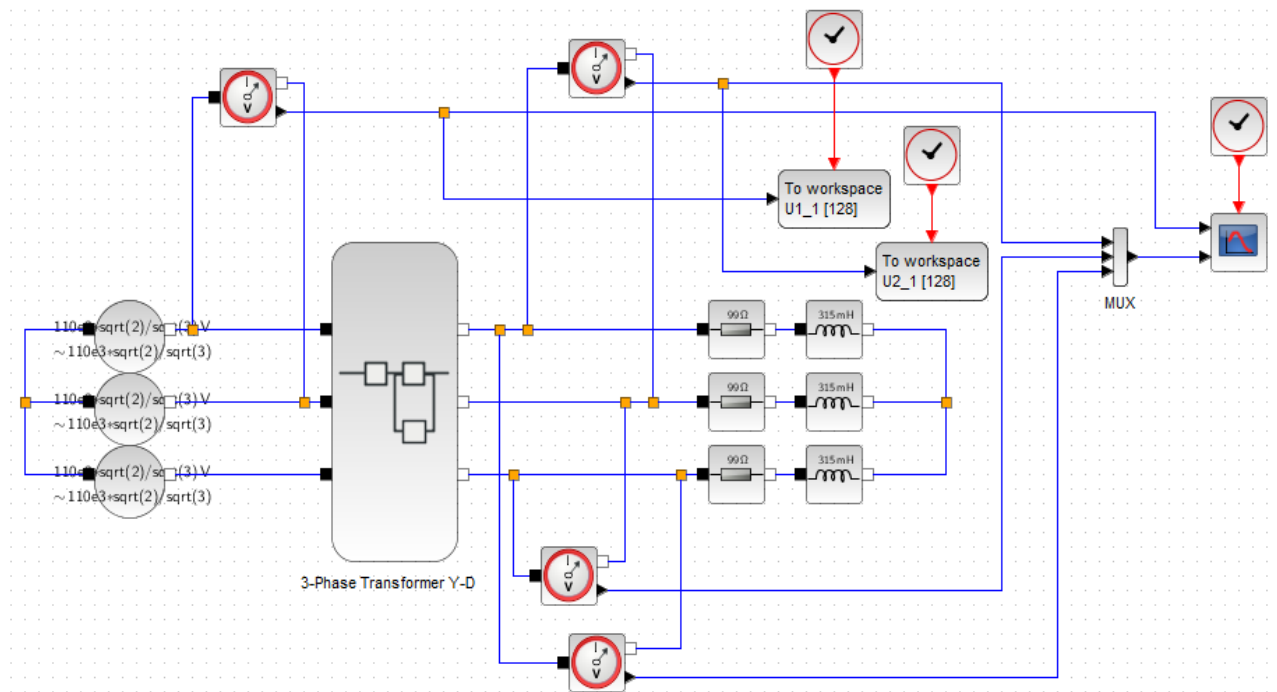


Рис. 6

За цією моделлю, наприклад, можна оцінити значення фазного коефіцієнту трансформації. Це значення буде тільки оцінкою, приблизним, а не точним значенням, але при достатньо великому опорі на низькій стороні трансформатора, ця оцінка буде достатньо точною. Фазний коефіцієнт трансформації за визначенням

$K_f = U_{1\phi} / U_{2\phi}$ , де  $U_{1\phi}$  та  $U_{2\phi}$  – фазні напруги обмоток ВН та НН відповідно.

В моделі після запуску в змінній  $U1\_1$  зберігаються миттєві значення  $U_{1\phi}$ , а в  $U2\_1$  –  $U_{2\phi}$ . Для визначення  $K_f$  нам потрібні діючі значення цих напруг, які ми можемо знайти, виконавши після запуску моделі наступні команди в командному рядку:

$$\text{--> } U_{1f} = \max(U1\_1.values) / \sqrt{2}$$

$$\text{--> } U_{2f} = \max(U2\_1.values) / \sqrt{2}$$

Як видно з формул, на корінь з 2 можна було б і не ділити, а визначити  $K_f$  з амплітудних значень напруг. Після цього можна визначити  $K_f$  за формулою за допомогою команди:

$$\text{--> } K_f = U_{1f} / U_{2f}$$

**Висновок:** дослідивши моделювання режимів можна зазначити, що дане програмне забезпечення є досить практичним та простим в користування.

«Scilab» можна застосовувати, як на підприємствах які здійснюють виготовлення трансформаторів так і в навчальних закладах для набування практичних та теоретичних навичок студентами.

## Висновки

В даному дипломному проєкті був спроектований силовий масляний трансформатор потужністю 400 кВ·А з напругою первинної обмотки 35 кВ і вторинної 0,4 кВ.

На основі виданого завдання було здійснено розрахунки габаритних розмірів трансформатора, параметрів короткого замикання, розрахунок магнітної системи, проведено тепловий розрахунок трансформатора. Також були порашовані і побудовані робочі характеристики. Для заповнення бака трансформатора маслом до самої кришки з метою зменшення можливості забруднення та окислення масла був вибраний розширювач діаметром  $d_p = 470$  мм, довжиною  $l_p = 720$  мм та товщиною стінки  $t_c = 1.4$  мм.

Проведено техніко-економічний розрахунок.

Аналіз робочих характеристик та даних розрахунків показують, що трансформатор ТМ-400/35 відповідає стандартам, вказаним ПУЕ.

## Список використаної літератури

1. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Навч. Посібник – К.:НУХТ, 2010. – 366с.
2. Електронний посібник для дипломного проектування «Трансформатори». – К.:НУХТ, 2003.
3. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов. М.-Л.: Госэнергоиздат,1959. 360 с.
4. Метод. вказівки до вивчення дисципліни та виконання курсової роботи для студентів за напрямом підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” ден. та заоч. форм навчання / Уклад.: О.А. Мащенко, І.Є Ізволєнський. – К.: НУХТ, 2010. – 68 с.
5. Електронний каталог <http://www.relsis.ua/relsis/tree/main.htm>.
6. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособ. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.