

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання лабораторних робіт**  
**з дисципліни «Електричні машини»**  
**Силові трансформатори**  
**Асинхронні машини**  
для студентів спеціальності  
G3 «Електрична інженерія»  
(освітня програма «Електричні машини і апарати»)  
усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електричні машини» Силові трансформатори. Асинхронні машини для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія» усіх форм навчання/Укл.: Т.Є. Дівчук, Д.О. Літвінов, С.О. Лапкіна – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 48 с.

Укладачі:

Т.Є. Дівчук, доц., к.т.н.  
Д.О. Літвінов, ст. викладач  
С.О. Лапкіна, асист.

Відповідальний  
за випуск

С.О. Лапкіна, асист.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
«Електричних машин»  
Протокол №5  
від 07.11.2025 р.

Рекомендовано до видання  
НМК Електротехнічного  
факультету  
Протокол №4  
від 20.11.2025 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Лабораторна робота 1–Т.....	5
1.1 Мета роботи.....	5
1.2 Порядок виконання роботи.....	5
1.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи.....	11
2 Лабораторна робота 2–Т.....	13
2.1 Мета роботи.....	13
2.2 Порядок виконання роботи.....	13
2.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи.....	22
3 Лабораторна робота 3–Т.....	24
3.1 Мета роботи.....	24
3.2 Основні теоретичні положення.....	24
3.3 Порядок виконання роботи.....	25
3.4 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи.....	32
4 Лабораторна робота 1–А.....	34
4.1 Мета роботи.....	34
4.2 Порядок виконання роботи.....	34
4.3 Вказівки щодо звіту й підготовки до захисту лабораторної роботи.....	36
5 Лабораторна робота 2–А.....	37
5.1 Мета роботи.....	37
5.2 Порядок виконання роботи.....	37
5.3 Вказівки щодо звіту й підготовки до захисту лабораторної роботи.....	41
6 Лабораторна робота 3–А.....	43
6.1 Мета роботи.....	43
6.2 Порядок виконання роботи.....	43
6.3 Вказівки щодо звіту й підготовки до захисту лабораторної роботи.....	47
Перелік джерел посилань.....	48

## ВСТУП

Дисципліна «Електричні машини» у відповідності з навчальним планом вивчається студентами усіх спеціальностей і усіх форм навчання.

У дисципліні «Електричні машини» розглядаються питання призначення, конструкції та дії електричних машин і трансформаторів.

При роботі над матеріалом дисципліни необхідно користуватись конспектом лекцій, підручниками та методичними вказівками. Під час опрацювання та підготовки до лабораторних робіт обов'язково треба звернути увагу на питання для самоперевірки. Якщо відповіді на ці питання становлять труднощі, необхідно відповідну тему опрацювати по іншим підручникам або звернутися за консультацією до викладача. Відповіді на питання повинні бути математично обґрунтовані.

Під час установчої сесії студенти заочної форми навчання слухають лекції, виконують лабораторні роботи та вирішують задачі. Контрольну роботу виконують на протязі семестру. До екзаменаційної сесії студенти захищають лабораторні й контрольну роботи та отримують залік. Під час екзаменаційної сесії студенти здають іспит за розкладом.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1–Т

### ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ПАСПОРТНИХ ДАНИХ ТРЬОХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

#### 1.1 Мета роботи

Вивчити будову окремих елементів (вузлів) трансформатора і машини в цілому; визначити орієнтовані паспортні данні трансформатора за геометричними розмірами магнітного кола та обмоток трансформатора.

#### 1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Визначити і записати параметри трансформатора:

- а) кількість фаз трансформатора;
- б) кількість обмоток на стрижні;
- в) спосіб охолодження;
- г) тип трансформатора.

1.2.2 Накреслити ескіз магнітного кола трансформатора.

а) накреслити ескізи перерізу стрижня і ярма, вказати розміри, розрахувати їх площу з точністю до  $1\text{см}^2$  визначити співвідношення перерізу ярма і перерізу стержня Пс/Пя.

б) виміряти товщину листів трансформаторної сталі магнітопроводу, вказати спосіб шихтовки та опресовки магнітної системи.

1.2.3 Накреслити ескізи обмоток, розташованих на одному стрижні. На ескізі вказати основні розміри: висоту, діаметри, радіальні розміри обмоток і каналів. Вказати тип, марку і клас ізоляції проводу обмоток.

1.2.4 Визначити зажими фазних обмоток за допомогою мегометра.

1.2.5 Визначити однополярні зажими фазних обмоток індуктивним методом за допомогою джерела постійного струму та магнітоелектричного приладу.

При полярності, вказаній на схемі 1.1 і при включенні вмикача S стрілка гальванометра повинна відхилитись на право, в цьому випадку зажими А і а – однополярні.

1.2.6 Виміряти мегометром опір ізоляції обмоток стягуючих бо-

лтів ярмових балок. Данні вимірювань записати в табл. 1.1, при цьому опір ізоляції болтів заносити в останню графу, вибираючи болти в довільному порядку.

Таблиця 1.1 – Опір ізоляції обмоток і елементів конструкції і магнітної системи

Обмотка ВНЗ осереджена (земля)	Обмотка ННЗ осереджена (земля)	Між обмотками	Між фазними обмотками ВН	Між фазними обмотками НН	Стягувальний болт зосереджений
А – з	а – з	А – а	А – В	а – в	
В – з	д – з	В – в	В – С	б – с	
С – з	с – з	С – с	С – А	с – а	

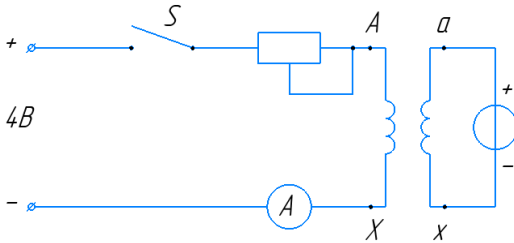


Рисунок 1.1 – Схема для знаходження однополярних зажимів обмоток трансформатора

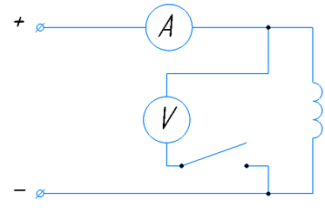


Рисунок 1.2 – Схема вимірювання омичного опору фазних обмоток

1.2.7 Виміряти омичний опір фазних обмоток трансформатору постійним струмом методом падіння напруги згідно схеми 1.2. Ввімкнути тумблер Т13 ( в положенні 1 вимірюється опір обмотки ВН , в положенні 2 – опір обмотки НН) та Т14.

Якщо розрахункове значення вимірюваного опору складає 0–5% і більше опору вольтметра, значення визначаємого опору:

$$R' = R \cdot \frac{1}{1 - \frac{R}{R_v}}, \quad (1.1)$$

де  $R$  – опір, розрахований згідно вимірянним значенням струму та напруги. Ом,

$R_v$ , – опір вольтметра, Ом.

При вимірюваннях вольтметр вмикають при встановившихся показниках амперметра.

При вимірюванні опору враховувати температуру обмоток, при якій проводиться вимірювання. Для сухих трансформаторів, які знаходяться в приміщенні з незмінною температурою повітря, за температуру обмотки взяти температуру зовнішнього повітря, виміреного при температурі зовнішнього середовища, до номінальної температури  $+75^\circ\text{C}$ .

Омічний опір повинен бути  $r_{0,AX} \approx r_{0,ВУ} \approx r_{0,СЗ}$  і не повинні відрізнятися по фазам більше, ніж на  $\pm 5\% \cdot r_{\text{сер}}$ .

Опір обмоток трансформатора приведений до температури  $+75^\circ\text{C}$  визначається за формулою:

$$r_{\text{сер.раб.}} = \frac{r_{\text{сер.окр.}} (\Theta + 75^\circ)}{\Theta + \Theta_{\text{окр.}}} \quad (1.2)$$

де  $r_{\text{сер.раб}}$  – середній опір фазної обмотки трифазного трансформатора при номінальній робочій температурі  $+75^\circ\text{C}$ ;

$r_{\text{сер.окр}}$  – теж при температурі навколишнього середовища, визначене як середнє арифметичне, наприклад для обмотки ВН ;

$\Theta$  – коефіцієнт, залежний від матеріалу обмоток.

$\Theta_{\text{окр.}}$  – температура навколишнього середовища,  $^\circ\text{C}$ .

Для міді  $\Theta=234,5^\circ\text{C}$ , для алюмінію  $\Theta=245^\circ\text{C}$ ;

Виміряні і розрахункові данні записати в табл. 1.2. В табл. 1.2  $r_{\text{окр}}$  – опір відповідної фазної обмотки при температурі навколишнього середовища.

1.2.8. Визначити число витків і ЕРС фазних обмоток. При визначенні числа витків на одному з стержнів на обмотку вищої

напруги намотана додаткова обмотка з числом витків  $W_{\text{дод.}} = 10$ . Зібрати схему (рис. 2.3) і провести вимірювання. Ввімкнути автомати А1, А2, А3, АП3, АП4, АП5.

Тумблери Т9, Т11 та Т15 ввімкнути в положення 1 (фазне). Після перевірки схеми викладачем ввімкнути автомат АП1. Виміряні та розрахункові данні записати в таблицю 1.3.



В табл. 1.3 прийняті наступні позначення:

-  $U_{1\phi}$ ,  $U_{2\phi}$ ,  $U_{\text{лод}}$  – відповідно напруги фаз первинної, вторинної та додаткової обмоток;

-  $W_1$  – число витків первинної обмотки;

-  $W_2$  – число витків вторинної обмотки;

-  $e_1, e_2$  – ЕРС одного витка первинної і вторинної обмоток;

-  $P_c$  – площа перерізу стрижня,  $\text{м}^2$ .

-  $B_c$  – рекомендована індукція в стрижні для трансформаторів потужністю 5..10 кВ·А, Тл,  $B_c = (0,9..1,4)$ . Прийняти  $B_c = 1,4$  Тл.

-  $E_{1\phi}, E_{2\phi}$  – ЕРС фаз відповідно первинної та вторинної обмоток.

Число витків первинної обмотки розраховується за формулою:

$$W_1 = W_{\text{дод}} \cdot \frac{U_{1\phi}}{U_{\text{дод}}} \quad (1.3)$$

Число витків вторинної обмотки розраховується за формулою:

$$W_2 = W_{\text{дод}} \cdot \frac{U_{2\phi}}{U_{\text{дод}}} \quad (1.4)$$

ЕРС витка розраховується за формулою, В:

$$e_1 = e_2 = 4,44 \cdot f \cdot P_c \cdot B_c, \text{ В} \quad (1.5)$$

де  $f$  – частота в мережі, Гц', ( $f = 50$ );

ЕРС фаз обмоток розраховується за формулою:

$$E_{1\phi} = e_1 \cdot W_1; E_{2\phi} = e_2 \cdot W_2 \quad (1.6)$$

Значення  $E_1 \approx U_1$ ;  $E_2 \approx U_2$ , прийняти рівними ближчим стандартним величинам (220 В та 127 В).

Коефіцієнт трансформації по фазній напрузі

$$K = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \quad (1.7)$$

Прийняті стандартні величини номінальних напруг  $U_{1\text{нф}}$  і  $U_{2\text{нф}}$  записати в табл. 1.4,

1.2.9 Визначити номінальний струм і потужність фаз первинної і вторинної обмоток. При визначенні номінальних фазних струмів щільність струму для трансформаторів з мідними обмотками та повітряним охолодженням може бути прийнята  $\Delta = (1,5 \div 2,5) \text{ А /мм}^2$ . Прийняти  $\Delta = 2,5 \text{ А /мм}^2$ . Розрахункові данні записати в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Розрахункові данні для визначення потужності

q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	I <sub>1НФ</sub>	I <sub>2НФ</sub>	U <sub>1НФ</sub>	U <sub>2НФ</sub>	S <sub>1НФ</sub>	S <sub>2НФ</sub>	S <sub>Н(3 фаз)</sub>
мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	А	А	В	В	В·А	В·А	В·А

В табл. 1.4 прийняті наступні позначення:

q<sub>1</sub>, q<sub>2</sub> – переріз проводів відповідно первинної і вторинної обмоток, мм<sup>2</sup>

I<sub>1НФ</sub> – номінальний фазний струм первинної обмотки, визначається за формулою (1.8);

I<sub>2НФ</sub> – номінальний фазний струм вторинної обмотки, визначається за формулою (1.9);

U<sub>1НФ</sub>, U<sub>2НФ</sub> – номінальні фазні напруги відповідно первинної і вторинної обмоток, обмотки, В.

S<sub>1НФ</sub>, S<sub>2НФ</sub> – номінальні потужності відповідно первинної і вторинної обмоток, обмотки, визначається за формулами (1.10) і (1.11);

S<sub>Н(3ФАЗ)</sub> – номінальна потужність трансформатора, обмотки, визначається за формулою (1.12).

$$I_{1НФ} = \Delta \cdot q_1, \text{ А.} \quad (1.8)$$

$$I_{2НФ} = \Delta \cdot q_2, \text{ А.} \quad (1.9)$$

$$S_{1НФ} = I_{1НФ} \cdot U_{1НФ}, \text{ В} \cdot \text{А.} \quad (1.10)$$

$$S_{2НФ} = I_{2НФ} \cdot U_{2НФ}, \text{ В} \cdot \text{А.} \quad (1.11)$$

$$S_{Н(3ФАЗ)} = 3 \cdot S_{1НФ} = 3 \cdot S_{2НФ}, \text{ В} \cdot \text{А.} \quad (1.12)$$

Номінальна потужність трансформатора визначається при його випробуванні на нагрівання по допустимій температурі ізоляції.

1.2.10 Орієнтовані паспортні данні трансформатора для схеми з'єднання обмоток У/У і У/Д записати в табл. 1.5.

За номінальну потужність трансформатора приймати меншу потужність обмоток. При цьому відповідно повинні бути змінений номінальний струм в табл. 1.5.

1.2.11 Визначити номінальний допустимий опір ізоляції обмоток

$$r_{із.м} = \frac{U_{1НЛ}}{S_H / 100 + 1000}, \text{ МОм.} \quad (1.13)$$

де U<sub>1НЛ</sub> – лінійна напруга обмотки вищої напруги, В;

S<sub>Н</sub> – номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

Порівняти вимірний опір ізоляції (див. табл. 1.1) з номінально допустимим і дати висновок про стан ізоляції випробуваного трансформатора.

Таблиця 1.5 – Орієнтовані паспортні данні

Номінальні дані	Одиниця	При з'єднанні обмоток по схемі	
		З'єднання У/У	З'єднання У/Д
$U_{1\text{НФ}}$	В		
$U_{1\text{НЛ}}$	В		
$U_{2\text{НФ}}$	В		
$U_{2\text{НЛ}}$	В		
$I_{1\text{НФ}}$	А		
$I_{1\text{НЛ}}$	А		
$I_{2\text{НФ}}$	А		
$I_{2\text{НЛ}}$	А		
$S_{\text{Н}}$	кВ·А		

### 1.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи

#### 1.3.1 Звіт повинен мати:

- короткий опис виконаної роботи;
- ескіз магнітного кола і обмоток;
- схеми, формули, таблиці з даними вимірювань і розрахунковими даними;
- орієнтовані паспортні данні трансформатора;
- висновки.

#### 1.3.2 Питання до самопідготовки:

1. Конструкція і призначення вузлів трансформатора.
2. Сформулювати принцип роботи трансформатора

3. Як по зовнішнім признакам відрізнити в трансформаторі обмотку вищої напруги від обмотки нижчої напруги?

4. Визначити співвідношення між ЕРС одного витка первинної і вторинної обмоток;

5. Від яких параметрів трансформатора залежить ЕРС первинної і вторинної обмоток?

6. Що таке коефіцієнт трансформації однофазного і трифазного трансформаторів?

7. Як визначити коефіцієнт трансформації?

8. Вказати різницю між номінальною і дійсною потужностями трансформатора.

Для відповіді на питання використовуйте літературу [1-11].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2–Т

### ТЕМА: ВИПРОБУВАННЯ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ДОСЛІДАХ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ТА КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

#### 2.1 Мета роботи

Вивчити фізичні процеси в трансформаторі при неробочому ході та короткому замиканні, згідно дослідів неробочого ходу та короткого замикання дати оцінку втрат та ККД трансформатора.

#### 2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Випробувати трансформатор в досліді неробочого ходу. Згідно паспортних даних з заводського щитка або з лабораторної роботи № І–Т підібрати вимірювальні прилади і скласти схему ( рис. 3.1) для зняття характеристик неробочого ходу:

$$I_X, P_X, \cos\varphi_x = f(U_1) \text{ при } f=50\text{Гц}, I_2 = 0.$$

Ввімкнути автомат АП5 та тумблери Т4, Т5, Т6, Т7, Т8. Тумблери Т9 та Т15 ввімкнути в положення 2 (лінійне). На ватметрах встановити межу вимірювання по напрузі – 300В, по струму – 2,5А. Після перевірки схеми викладачем ввімкнути автомат АП2.

Зовнішнє коло вторинної обмотки трансформатора розімкнене. Напругу, підведену до первинної обмотки, змінювати в межах  $(0.4 \div 1.2)U_{1н}$ . через  $0,2U_{1н}$ . Провести 5 – 7 вимірювань. Виміряні і розрахункові данні записати в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Виміряні та розрахункові данні характеристик неробочого ходу

Данні вимірювань								Розрахункові данні										
$U_1$	$U_2$	$I_1$	$I_1$	$I_{1с}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$U_X$	$I_X$	$I_X^*$	$S_X$	$P_X$	$P_X^*$	$x_X$	$r_X$	$\cos\varphi_x$	$z_X$	$k$	
В	В	А	А	А	діл	діл	в.о	А	в.о	ВА	В	во	Ом	Ом	–	Ом	–	

Розрахункові данні в табл. 2.1 визначити за формулами:

$$U_X^* = U_1/U_{1H}, \quad (2.1)$$

де  $U_{1H} = 380 \text{ В}$ ,

$$I_X = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3}, \text{ А}, \quad (2.2)$$

де  $I_X$  – середній струм неробочого ходу у відносних одиницях,

$$I_X^* = \frac{I_X}{I_{H\Phi}}, \quad (2.3)$$

де  $I_{H\Phi}$  – визначити з даних роботи №1–Т.

Потужність неробочого ходу

$$S_X = mU_{1\Phi}I_{CP}. \quad (2.4)$$

Втрати при неробочому ході

$$P_X = C_W \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

де  $C_W$  – постійна ватметрів;

$\alpha_1, \alpha_2$  – показання ватметрів, ділень.

Втрати при неробочому ході у відносних одиницях

$$P_X^* = \frac{P_X}{S}, \quad (2.6)$$

де  $S$  – потужність трансформатору, визначена у роботі №1–Т, Вт

Коефіцієнт потужності при неробочому ході

$$\cos \varphi_X = \frac{P_X}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_X}. \quad (2.7)$$

Активний опір фази намагнічуючого контура

$$r_X = P_X / (3I_X^2), \text{ Ом}. \quad (2.8)$$

Індуктивний опір фази намагнічуючого контура

$$x_X = \sqrt{z_X^2 - r_X^2}, \text{ Ом}. \quad (2.9)$$

Повний опір неробочого ходу

$$z_X = \frac{U_{X\Phi}}{I_X}, \text{ Ом}. \quad (2.10)$$

де  $U_{X\Phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$ .



Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.11)$$

Фазні опори  $r_{1,x1}$ ,  $z_1$  первинної обмотки складають 1–2% фазних опорів намагнічуючого контуру  $r_{12}$ ,  $x_{12}$ ,  $z_{12}$  тому можна прийняти  $r_x = r_{12}$ ,  $x_x = x_{12}$ ,  $z_x = z_{12}$ .

Використовуючи характеристику  $I_x^* = f(U_1^*)$  визначити коефіцієнт насичення сталі трансформатора.

Для номінальної напруги  $U_1^* = 1.0$  визначити  $I_{xH}\%$ ,  $P_{xH}\%$ ,  $\cos f_{xH}$  і порівняти їх з даними, рекомендованими держстандартами для  $S_H = 5 \div 75$  кВ·А;  $I_{xH}\% = 10 \div 7.5$  %;  $P_{xH}\% = 1.2 \div 1.0$  %;  $\cos f_{xH} = 0.1 \div 0.2$  %.

Накреслити схему заміщення трансформатора при неробочому ході, вказати її параметри.

2.2.2 Випробувати трансформатор в досліді короткого замикання. Згідно паспортним даним трансформатора з заводського щитка або лабораторної роботи №1–Т підібрати вимірювальні прилади і скласти схему (рис. 2.2) для зняття характеристик короткого замикання:  $I_1 = (U_k)$ ,  $P_k = f(U_k)$ ,  $\cos f_x = f(U_k)$ .

Ввімкнути автомати АП5, АП8, А1, А2, А3, АП3, АП4. Напруга короткого замикання встановлюється по вольтметру V3. Тумблер Т11 ввімкнути в положення 2. На ватметрах встановити межу вимірювання на напрузі – 150В, по струму – 5А. Після перевірки схеми викладачем ввімкнути автомат АП2.

Вторинна обмотка закорочена,  $U_2 = 0$ . Під час досліді слід намагатись того, щоб зміна активного опору обмоток, обумовлена їх нагріванням, була мінімальна. Тому не слід допускати збільшення струму короткого замикання більше ніж  $I_k = 1.5 \cdot I_H$  і трансформатор залишати під напругою лише мінімально необхідний для досліді час.

При проведенні досліді виміряти температуру обмоток, яка в охолодженому стані дорівнює температурі навколишнього середовища. При знятті характеристик КЗ до первинної обмотки трансформатора підводити знижену напругу від регулювача напруги таку щоб отримати наступні значення струму короткого замикання:

$$I_{1k} = (0.25; 0.5, 0.75, 1.0, 1.25) \cdot I_H$$

Провести 5 – 7 вимірювань. Виміряні і розрахункові данні записати в табл. 2.2.

Для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в зірку розрахункові данні в табл. 2.2 визначити за формулами:

$$I_1^* = \frac{I_1}{I_H}, \quad (2.12)$$

де  $I_H$  – взяти з роботи 1Т,

$$U_{K\Phi} = \frac{U_K}{\sqrt{3}}, \quad (2.13)$$

$$U_{K\Phi}^* = \frac{U_{K\Phi}}{U_{\Phi H}}, \quad (2.14)$$

де  $U_{\Phi H} = 220В$ .

Потужність короткого замикання:

$$S_K = mU_{K\Phi}I_1, \text{ ВА.} \quad (2.15)$$

Втрати при короткому замиканні

$$P_k = (\alpha_1 \pm \alpha_2) \cdot C_w \cdot C_{TT}, \text{ Вт,} \quad (2.16)$$

де  $\alpha$  – число ділень по шкалі ватметру;

$C_w$ , – постійна ватметру, Вт/діл;

$C_{TT}$ , – коефіцієнт трансформації ( $C_{TT} = 3$ );

$\alpha_1, \alpha_2$  – показання ватметрів, ділень.

Витрати при короткому замиканні у відносних одиницях

$$P_{K^*} = P_k/S. \quad (2.17)$$

де  $S$  – потужність трансформатору, визначена у роботі №1–Т, Вт.

Коефіцієнт потужності трансформатора при к.з.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_1}. \quad (2.18)$$

Активний опір короткого замикання

$$r_k \approx r_1 + r_2 \approx \frac{P_k}{3 \cdot I_1^2}, \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

Індуктивний опір короткого замикання

$$x_k \approx x_1 + x_2' \approx \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \text{ Ом.} \quad (2.20)$$

Повний опір короткого замикання

$$z_k \approx z_1 + z_2' \approx \frac{U_K}{I_1}, \text{ Ом.} \quad (2.21)$$

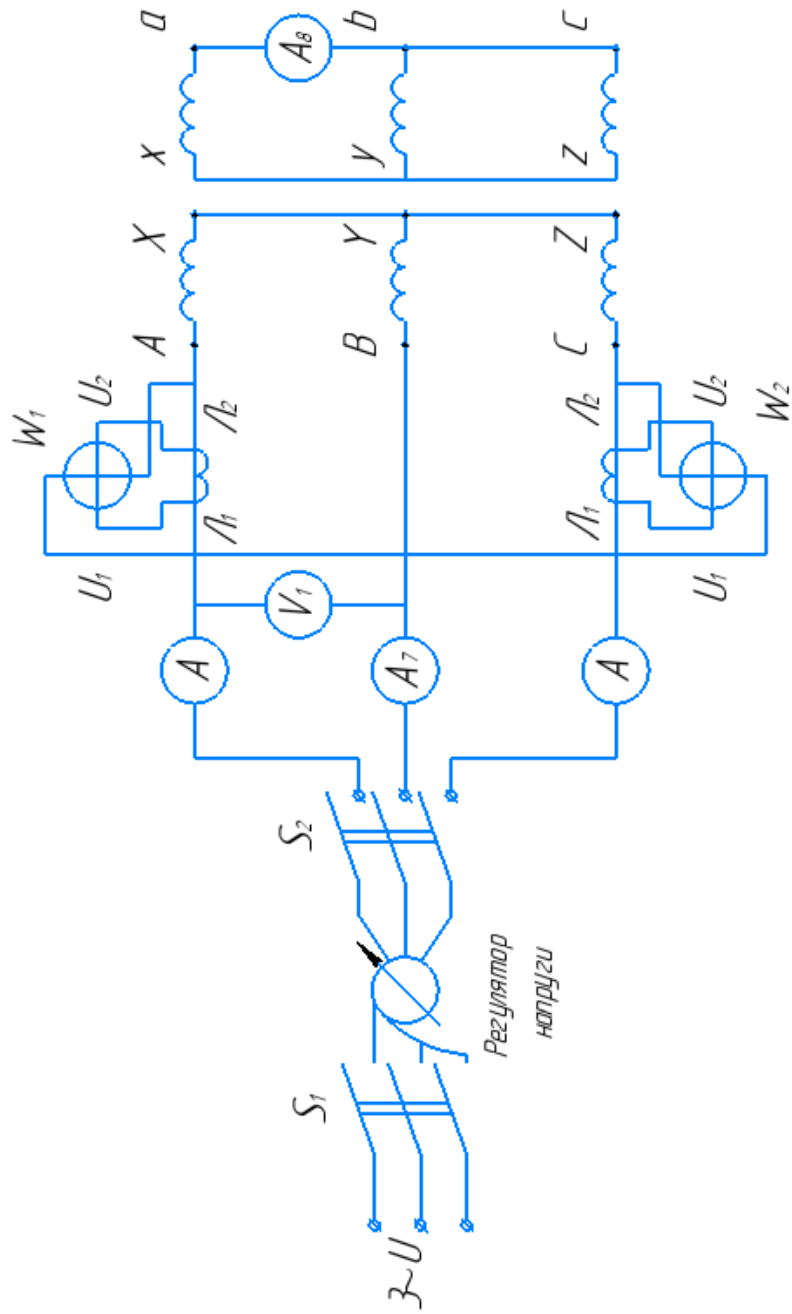


Рисунок 2.2 – Схема випробування трансформатора в режимі короткого замикання

Значення  $r_k$ ,  $z_k$ ,  $\cos\varphi_k$ , виміряні при температурі навколишнього середовища  $\theta_{\text{окр}}$  привести до номінальної робочої температури обмотки  $+75^\circ\text{C}$ ; вважати що  $x_k$ , не залежить від температури:

$$r_{k(75)} = r_{k.o} \cdot \frac{309.5}{234.5 + \theta_{\text{окр}}}, \quad (2.22)$$

$$z_{k(75)} = \sqrt{r_{k(75)}^2 - x_k^2}, \quad (2.23)$$

$$\cos\varphi_{k(75)} = \frac{r_{k(75)}}{z_{k(75)}}. \quad (2.24)$$

Таблиця 2.2 – Виміряні та розрахункові данні характеристик короткого замикання

Данні вимірювань					Розрахункові данні									
$I_1$	$I_2$	$U_k$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$I_1^*$	$U_{\text{кф}}$	$U_{\text{кф}}^*$	$P_k$	$P_k^*$	$S_k$	$\cos\varphi_k$	$r_k$	$x_k$	$z_k$
А	А	В	діл	діл	в.о.	В	в.о	Вт	во.	ВА	–	Ом	Ом	Ом

Втрати короткого замикання, знайдені в досліді, приводяться до температури  $+75^\circ\text{C}$

$$P_k = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_{k(75)}, \text{ Вт.} \quad (2.25)$$

Згідно з даними табл. 3.2 накреслити характеристики короткого замикання:  $I_1 = (U_k)$ ,  $P_k = f(U_k)$ ,  $\cos\varphi_k = f(U_k)$ .

Для номінального струму визначити напругу КЗ і порівняти її з рекомендованою в держстандартах.

Накреслити схему заміщення трансформатора при короткому замиканні, вказати її параметри.

2.2.3 По даним режимів неробочого ходу і короткого замикання визначити параметри схеми заміщення трансформатора. Накреслити схему заміщення навантаженого трансформатора, при цьому прийняти:

$$r_1 \approx r_2' \approx \frac{r_k}{2}, \quad (2.25)$$

$$x_1 \approx x_2' \approx \frac{x_k}{2}. \quad (2.26)$$

2.2.4 Побудувати векторну діаграму трансформатора для  $U_{2нф}$ ,  $I_{2нф}$ ,  $\cos\varphi_2 = 0.8$ . З векторної діаграми визначити  $U_{1н}$ ,  $I_{1н}$ ,  $\cos\varphi_{1н}$ .

2.2.5 Розрахувати і накреслити характеристику відсоткової зміни напруги  $\Delta U\% = f(S_*)$  та зовнішню характеристику трансформатора  $U_2\% = f(S_*)$  при  $U_{1н} = \text{const}$ ,  $\cos\varphi_2 = 0.8$ ,  $f = 50$  Гц.

Відсоткову зміну напруги і зовнішню характеристику рекомендується розраховувати у наступній послідовності:

а) задатись відносним навантаженням трансформатора:

$$S^* = \frac{S}{S_H} = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 1.25.$$

б) визначити зміну вторинної напруги трансформатора, %

$$\Delta U\% = S_* \cdot (U_{Kакм}\% \cdot \cos\varphi_2 + U_{KPH}\% \cdot \sin\varphi_2) \quad (2.27)$$

де  $U_{Kакм}\%$  – активна складова напруги короткого замикання при номінальному струмі, визначається за формулою (2.28), %

$U_{KPH}\%$  – реактивна складова на пруги КЗ, визначається за формулою (2.29), %.

$$U_{Kакм}\% = \frac{I_{1нф} \cdot r_{k(75)}}{U_{1нф}} \cdot 100 \quad (2.28)$$

$$U_{KPH}\% = \frac{I_{1нф} \cdot x_K}{U_{1нф}} \cdot 100 \quad (2.29)$$

г) розрахунки  $\Delta U\%$  і  $U_2\%$  звести в табл. 2.3., прийнявши  $\cos\varphi_2 = 0.8$ ,  $\sin\varphi_2 = 0.6$ .

2.2.6 Записати в табл 2.4 додаткові номінальні паспортні данні і порівняти їх з величинами, рекомендованими ДСТУ.

2.2.7 Розрахувати і накреслити характеристику коефіцієнта корисної дії (ККД) трансформатора в залежності від відносного навантаження  $\eta = f(S^*)$ . По даним дослідів неробочого ходу і короткого замикання визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора,

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_x + S^{*2} \cdot P_{кн}}{S_* \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + P_x + S^{*2} \cdot P_{кн}} \right), \% \quad (2.30)$$

де  $P_x$  – втрати неробочого ходу при номінальній напрузі, Вт,

$S^*$  – відносне навантаження трансформатора, в.о., визначається за формулою (2.31),

$P_{кн(75)}$  – втрати короткого замикання при номінальному струмі і температурі обмоток  $+75^{\circ}\text{C}$ , визначається за формулою (2.32), Вт,

$S_n$  – номінальна потужність трансформатора, ВА.

Таблиця 2.3 – Данні для характеристики процентної зміни напруги і зовнішньої характеристики

$S$ , %	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25
$U_{ка}\% = S^* \cdot U_{ка}\% \cdot \cos\varphi_2$ , %						
$U_{кр}\% = S^* \cdot U_{кр}\% \cdot \sin\varphi_2$ , %						
$\Delta U\%$						
$U_2\% = 100 - \Delta U\%$ , %						

$$S^* = \frac{S}{S_n} = \frac{I_2}{I_{2n}}. \quad (2.31)$$

$$P_{кн(75)} = m_1 \cdot I_{1n}^2 \cdot r_{к(75)}. \quad (2.32)$$

Розрахунок коефіцієнта корисної дії звести в табл. 2.5.

Таблиця 2.4 – Паспортні данні трансформатора, розраховані і рекомендовані державними стандартами

Номінальні величини	Одиниця	Данні з досліду	Рекомендовані держстандартами
$U_k$	В		–
$U_k\%$	%		3.8...10.05
$P_{кн}$	Вт		–
$P_{кн}$	%		3.0...3.7
$P_{хн}$	Вт		–
$P_{хн}$	%		1.0...1.2
$\cos\varphi_k$	–		0.4...0.6

Таблиця 2.5 – Данні для розрахунку коефіцієнта корисної дії

$S^*$ , в.о.	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25
$P_2 = S^* \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2$ , Вт.						
$P^*$ , відн.один.						
$S^{*2} \cdot P_{кн}$ , Вт.						
$S^* \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + P_x + S^* \cdot P_{кн}$ ,						
$\eta$ , %						

Визначити відносне навантаження трансформатора, при якому коефіцієнт корисної дії буде максимальним. Відомо, що максимальний ККД трансформатора буде при однаковості постійних втрат (втрат неробочого ходу) і змінних втрат (втрат короткого замикання)  $P^* = S^{*2} \cdot P_{кн}$ , звідки відносне навантаження трансформатора при якому коефіцієнт корисної дії буде максимальним, визначається

$$S^*(\eta_{\max}) = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}}. \quad (2.33)$$

2.2.8 Привести данні про відповідність випробуваного трансформатора вимогам держстандартів.

### 2.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи

#### 2.3.1 Звіт повинен мати:

- схеми, таблиці з даними вимірювань і розрахунковими величинами;
- графіки з поясненням змін кривих;
- схеми заміщення трансформатора;
- векторну діаграму трансформатора при активно-індуктивному навантаженні RL;
- характеристику відповідної зміни напруги і зовнішню характеристику;
- характеристику коефіцієнта корисної дії;
- висновки про відповідність випробуваного трансформатора вимогам державних стандартів.

#### 2.3.2 Питання до самопідготовки:

- 1 Як по характеристиці неробочого ходу визначити номінальну напругу ?
- 2 Від чого залежить сила струму неробочого ходу ?
- 3 На що витрачається підведена до трансформатора потужність при неробочому ході і при короткому замиканні ?
- 4 Від яких параметрів залежить коротке замикання ?
- 5 Як визначити параметри намагнічуючого контуру ?
- 6 Як визначити силу сталого струму короткого замикання ?
- 7 При яких умовах ККД трансформатора буде максимальним?
- 8 При якому навантаженні коефіцієнт корисної дії буде максимальним ?
- 9 Чи зміниться напруга короткого замикання у відсотках від номінального, якщо дослід провести з сторони низької чи вищої напруги?  
Для відповіді на питання використовуйте літературу [1-11].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3–Т

### ТЕМА: ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА ТРИХФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК

#### 3.1 Мета роботи

Вивчити умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу; перевірити вплив окремих факторів на режим паралельної роботи; вивчити групи з'єднань обмоток трансформатора.

#### 3.2 Основні теоретичні положення

Часто при експлуатації трансформаторів виникає необхідність в паралельному вмиканні двох або декількох з них. При цьому як первинні, так і вторинні обмотки трансформаторів з'єднуються з спільними збірними шинами. Для того, щоб робота паралельно ввімкнутих трансформаторів йшла нормально, необхідно виконання наступних умов.

Первинні і вторинні номінальні напруги трансформаторів повинні бути відповідно:

$$U_{11} = U_{12} = U_{13} = \dots = U_{1N},$$

$$U_{21} = U_{22} = U_{23} = \dots = U_{2N},$$

що при однаковій первинній напрузі вмикаємих трансформаторів зводиться до рівності коефіцієнтів трансформації. Згідно державних стандартів допускається різниця коефіцієнтів трансформації не більше ніж на  $\pm 0.5\%$

$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots = K_N.$$

Схеми і групи з'єднань обмоток трансформаторів, вмикаємих на паралельну роботу, повинні бути однаковими.

Напруги короткого замикання і складові трансформаторів (у відсотках) вмикаємих на паралельну роботу, повинні бути рівні між собою

$$U_{k1} = U_{k2} = U_{k3} = \dots = U_{kN}.$$

Згідно державних стандартів допускається відхилення не більше ніж на  $10\%$  від середньої величини.

Первинні і вторинні обмотки трансформаторів повинні бути сфазовані. Якщо при вмиканні на паралельну роботу не виконується перша і друга умови, в обмотках трансформаторів виникають вирівнювальні струми, які в окремих випадках, особливо при неоднаковості груп, можуть досягти струму повного короткого замикання.

Невиконання третьої умови приводить до того, що навантаження між паралельно ввімкненими трансформаторами розподіляється зворотньо пропорційно їх напругам короткого замикання:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_{k2}}{U_{k1}}.$$

Рекомендується, щоб відношення номінальних потужностей паралельно ввімкнених трансформаторів не перевищувало  $1 \div 3\%$ .

Група з'єднань обмоток трансформатора характеризується кутовим зміщенням лінійних напруг обмотки НН (в триобмоточних трансформаторах також і СН) по відношенню до векторів лінійних напруг обмотки ВН. При цьому відлік кута зміщення завжди ведеться від вектора лінійної напруги ВН по годинниковій стрілці до однойменного вектора напруги НН (або СН).

За одиницю кута зміщення приймається кут між двома сусідніми цифрами 12-годинного циферблату, рівний  $30^\circ$ .

Група позначається числом одиниць кута зміщення, яке слід помножити на  $30^\circ$ , щоб отримати кут зміщення в градусах.

### 3.3 Порядок виконання роботи

3.3.1 Записати в табл. 3.1 з заводських щитків або з лабораторних робіт №1–Т і №2–Т номінальні (паспортні) данні трансформаторів, вмикаємих на паралельну роботу при з'єднанні їх обмоток У/У – 0.

Схема і група з'єднання обмоток трансформатора записується в табл. 3.1. після експериментальної перевірки.

3.3.2 Визначити однополярні зажими фазних первинної і вторинної обмоток методом змінної напруги по схемі приведеній на мал. 3.1. Якщо вольтметр показує різницю напруг  $U_1 - U_2$ , то він приєднаний до зажимів однакової полярності. Якщо вольтметр показує суму напруг  $U_1 + U_2$ , то він приєднаний до зажимів різної полярності.

Провести маркування виводних зажимів, накреслити в звіт порядок їх розташування.

Таблиця 3.1 – Паспортні данні трансформаторів

Найменування величини	Позначення величини	Одиниця	Номер трансформатора		
			1	2	3
Номінальна потужність	$S_N$	кВ·А			
Номінальна лінійна первинна напруга	$U_{1N}$	В			
Номінальна лінійна вторинна напруга	$U_{2N}$	В			
Номінальний лінійний первинний струм	$I_{1N}$	А			
Номінальний лінійний вторинний струм	$I_{2N}$	А			
Напруга короткого замикання	$U_K$	%			
Номінальна частота	$f$	Гц			
Схема і група з'єднань обмоток	У/у-0				

3.3.3 Визначити групу з'єднань обмоток трансформатора методом фазометра або синхроскопа (прямий метод).

За допомогою фазометра або синхроскопа безпосередньо виміряти кут між однойменними лінійними векторами ЕРС первинної і вторинної обмоток трансформатора. Круговий фазометр (рис. 3.2) або синхроскоп (рис. 3.3) приєднуються до випробуваного трансформатора. Шкала приладів змінюється циферблатом годинника. Якщо трансформатор ввімкнута в мережу, стрілка фазометра (синхроскопа) вкаже номер групи з'єднань обмоток трансформатора.

3.3.4 Визначити групу з'єднань обмоток трансформатора методом суміщення зажимів і двох вольтметрів.

При перевірці групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора з'єднати два однойменних зажима, наприклад, А і а (рис. 3.4а), підвести до одної з обмоток змінну напругу (не більше 250В) і виміряти напругу між залишаючимися первинними і вторинними зажимами обмоток, наприклад між зажимами В – а, В – с, С – с, С – в.

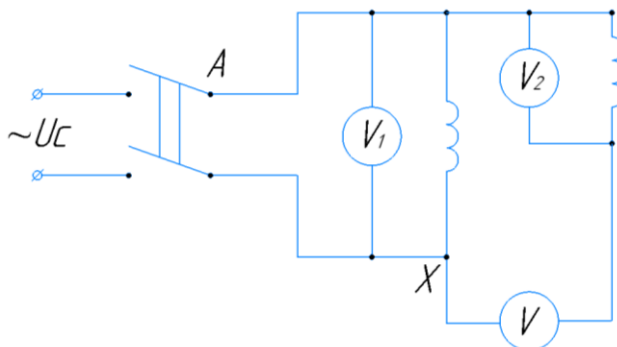


Рисунок 3.1 – Схема для визначення однополярних зажимів первинної і вторинної фазних обмоток методом змінної напруги

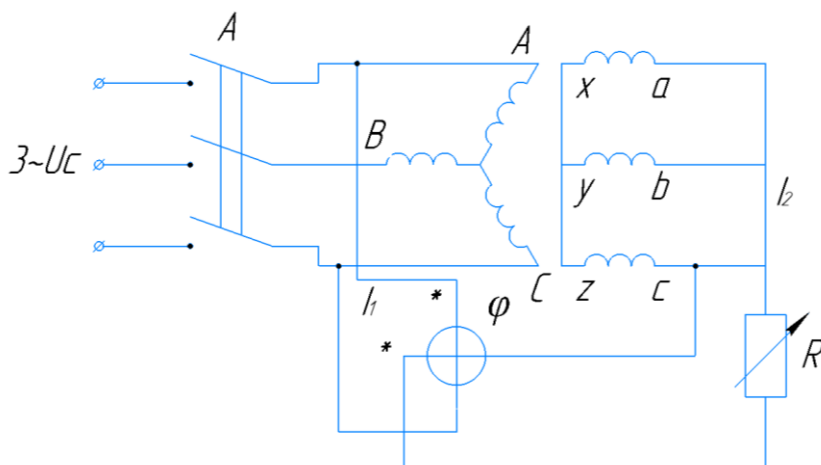


Рисунок 3.2 – Схема вмикання фазометра для визначення групи з'єднань обмоток трансформатора

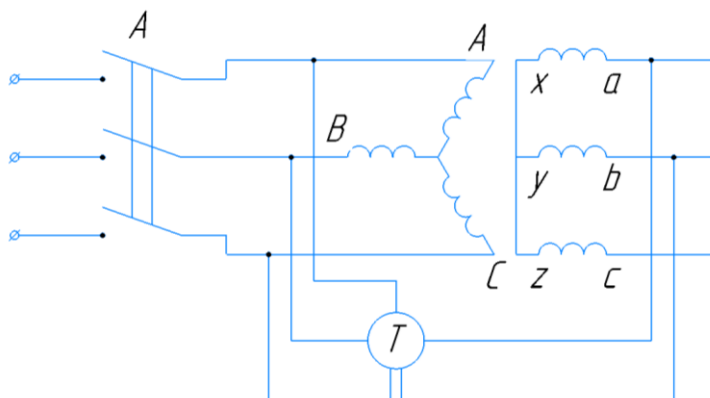


Рисунок 3.3 – Схема вмикання синхроскопа для визначення групи з'єднань обмоток трансформатора

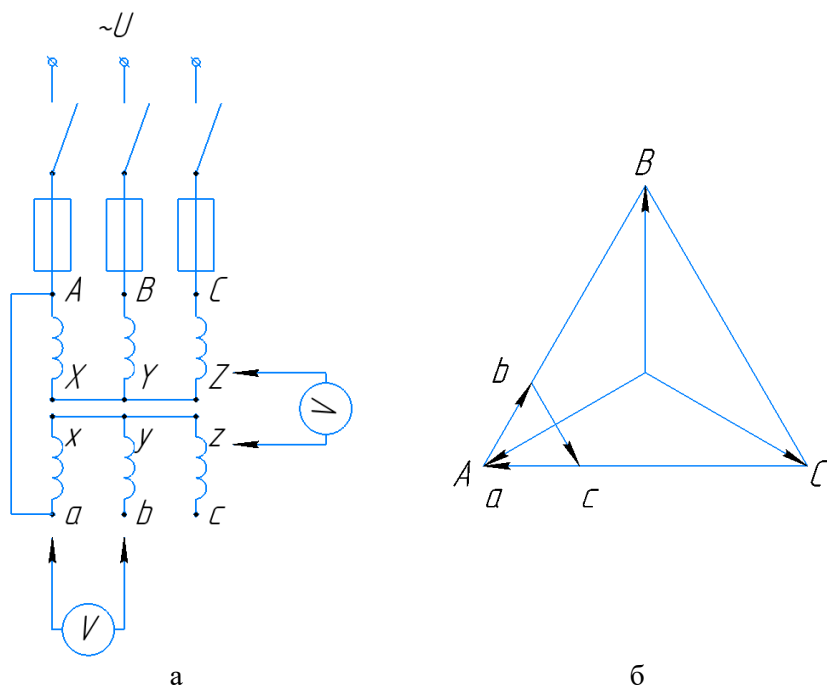


Рисунок 3.4 – Схема для визначення групи з'єднань обмоток трансформаторів методом однополярних зажимів

Порівняти виміряні напруги з відповідними, отриманими з розрахункових формул (табл. 3.2), встановити групу з'єднань двох однойменних виводів обмоток відповідає суміщенню однойменних крапок на потенціальній діаграмі лінійних напруг ВН і НН (рис 3.4, б), при цьому обмотки опиняються в загальній системі напруг.

При такій суміщеній діаграмі (рис. 3.4), якщо її побудувати в масштабі, напругу між кожними двома пунктами, наприклад В–в, В–с, С–в, можна визначити графічним або розрахунковим методом згідно формул, наведених в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахункові формули для визначення групи з'єднань обмоток трансформатора

Схема і група з'єднань	$U_{(в - в)}$	$U_{(в - с)}$	$U_{(с - в)}$	$U_{(С - с)}$
У/У – 0	$U(K-1)$	$U \cdot \sqrt{K^2 + K + 1}$	$U \cdot \sqrt{1 - K + K^2}$	$U(K-1)$
У/У – 6	$U(K+1)$	$U \cdot \sqrt{K^2 + K + 1}$	$U \cdot \sqrt{K^2 + K + 1}$	$U(K-1)$
У/Д – 11	$U \cdot \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K + K^2}$	$U \cdot \sqrt{1 + K^2}$	$U \cdot \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K + K^2}$	$\frac{1}{2} U \cdot \sqrt{1 + (2K + \sqrt{3})^2}$
У/Д – 5	$U \cdot \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K + K^2}$	$U \cdot \sqrt{1 - K^2}$	$U \cdot \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K + K^2}$	$\frac{1}{2} U \cdot \sqrt{1 + (2K + \sqrt{3})^2}$

Таблиця 3.3 – Розрахункові і виміряні значення лінійних напруг

Група	$U_A$	$U_{ab}$	$U_{вв}$		$U_{вс}$		$U_{св}$		$U_{сс}$	
			розрахунок	дослід	розрахунок	дослід	розрахунок	дослід	розрахунок	дослід

В табл. 3.2 прийняті наступні позначення:

- $U$  – напруга обмоток НН в досліді;
- $K$  – коефіцієнт трансформації по лінійним напругам.

Значення напруги  $U_{вв}$ ,  $U_{вс}$ ,  $U_{св}$ ,  $U_{сс}$  визначені розрахунковим та експериментальним методами записати в табл. 3.3.

Співвідношення розрахункових і виміряних значень свідчить про

вірність з'єднань обмоток трансформаторів заданої схеми і групи.

### 3.3.5 Визначити задані схеми і групи з'єднані:

а) побудувати потенціальну векторну діаграму лінійних ЕРС для з'єднань обмоток трансформатора по схемам У/У – 6, У/У – 0;

б) з'єднати обмотки по схемі У/У – 0 та перевірити це з'єднання експериментально;

в) побудувати потенціальну векторну діаграму для схем У/Д – 5, У/Д – 11;

г) з'єднати обмотки по схемі У/Д – 5 та перевірити це з'єднання експериментально;

д) з'єднати обмотки по схемі У/Д – 11 та перевірити це з'єднання експериментально.

Одну з вище вказаних схем з'єднання і груп (за вказівкою викладача) визначити прямим методом або обома методами (також за вказівкою викладача) і записати в табл. 3.1.

3.3.6 За даними табл. 3.1 дати висновок про можливість вмикання трансформаторів на паралельну роботу.

3.3.7 Визначити можливість вмикання трансформаторів на паралельну роботу, скласти схему (рис 3.5). Експериментально встановити можливість вмикання трансформаторів на паралельну роботу. Для цього на одній фазі вторинної сторони трансформатора замість рубильника встановити тимчасово перемичку, на інших однойменних фазах вольтметром виміряти напругу. Якщо вольтметр покаже «нуль», це означає, що з'єднувані рубильником S4 зажими рівнопотенціальні і умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу повністю виконані. Трансформатори №2 і №1 можуть вмикатись на паралельну роботу.

3.3.8 Ввімкнути трансформатори №1, №2, №3 на паралельну роботу. Ввімкнути автомати А1, А2, А3, АП3, АП4, АП5. Тумблери Т9 і Т15 ввімкнути в положення 2. Після перевірки схеми викладачем ввімкнути автомати АП1 і АП10. На ваттметрах встановити максимальні значення для вимірювання напруги та струму (300В, 5А).

Навантажити трансформатори навантажуючим реостатом, змінюючи струм у вторинній обмотці трансформатори в межах  $(0 \div 1.2) \cdot I_{2H}$  через  $0.25 \cdot I_{2H}$  при незмінному коефіцієнті потужності  $\cos \varphi_2$ . Провести 6 – 7 вимірювань. Виміряні та розрахункові данні записати в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Виміряні і розрахункові данні трансформаторів при паралельній роботі під навантаженням.

№	U <sub>1</sub> В	U <sub>2</sub> В	U <sub>2</sub> * в.о.	I на в А	I*на в в.о	Трансформатор								
						№1			№2			№3		
						I <sub>11</sub>	I <sub>21</sub>	I <sub>21</sub> •	I <sub>12</sub>	I <sub>22</sub>	I <sub>22</sub> •	I <sub>13</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>23</sub> •

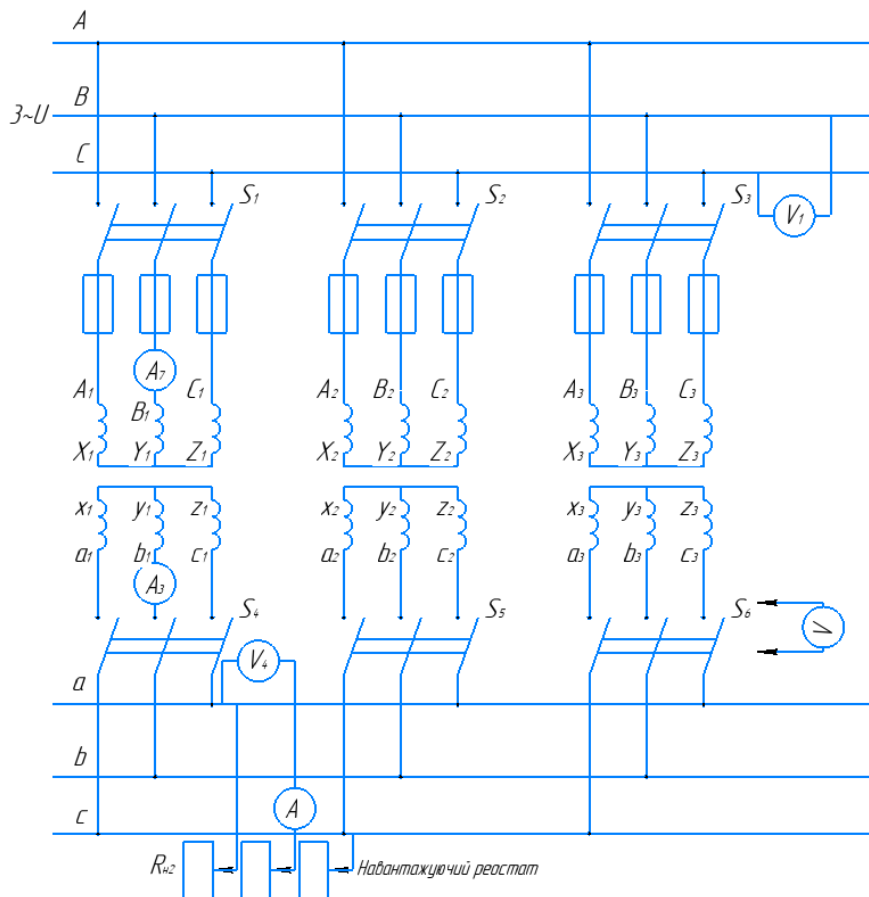


Рисунок 3.5 – Схема вмикання трансформаторів на паралельну роботу

В табл. 3.4 прийняті наступні позначення:

$$I_{HAB}^{\bullet} = \frac{I_{HAB}}{I_{2H}} \quad (3.1)$$

де  $I_{2H}$  взяти з табл.3.1.

Вторинна лінійна напруга, в.о.

$$U_2^{\bullet} = \frac{U_2}{220}, \text{ В} \quad (3.2)$$

Вторинний струм першого трансформатора, в. о.,

$$I_{21}^{\bullet} = \frac{I_{21}}{I_{1H1} + I_{2H2} + I_{2H3}} \quad (3.3)$$

де  $I_{22}^*$  – вторинний струм другого трансформатора, в.о.;

$I_{23}^*$  – вторинний струм третього трансформатора, в.о.;

3.3.9 Згідно даних табл. 4.4 на одному рисунку побудувати зовнішні характеристики паралельно ввімкнутих трансформаторів. Зовнішні характеристики:

$$U^*_2 = f(I^*_{21}); U^*_2 = f(I^*_{22}); U^*_2 = f(I^*_{23}).$$

А на другому рисунку побудувати характеристики:

$$I^*_{21} = f(I^*_{HAB}); I^*_{22} = f(I^*_{HAB}); I^*_{23} = f(I^*_{HAB}).$$

На першому рисунку відмітити розподіл навантаження між паралельно ввімкнутими трансформаторами при номінальній вторинній напрузі.

3.3.10 Дати висновки про можливість паралельної роботи трансформаторів під навантаженням. Визначити допустиме сумарне навантаження паралельно працюючих трансформаторів.

### **3.4 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи**

3.4.1 Звіт повинен мати:

- короткий опис виконаної роботи,
- схему, таблиці, графіки, основні розрахункові формули, пояснюючи закон зміни характеристик і позиції основних режимів;
- висновки.

3.4.2 Питання для самопідготовки:

1 Назвати умови, які повинні виконуватись при вмиканні трансформаторів на паралельну роботу.

2 Від яких параметрів залежить нахил зовнішньої характеристики трансформаторів ?

3 Як розподілиться навантаження між паралельно робочими трансформаторами при неоднакових напругах короткого замикання?

4 Як отримати при заданій схемі з'єднання обмоток групи, та навпаки?

5 Про що свідчить наявність урівнювального струму в обмотках паралельно ввімкнутих трансформаторів и режимі неробочого ходу ?

Для відповіді на питання використовуйте літературу [1-11].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1–А

### ТЕМА: ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ АСИНХРОННИХ МАШИН

#### 4.1 Мета роботи

Вивчення основних конструктивних елементів асинхронних машин.

#### 4.2 Порядок виконання роботи

4.2.1 Вивчити устрій та призначення окремих елементів конструкції асинхронних машин ( вивчити стенд асинхронних машин і продивитись слайди по асинхронним машинам ).

4.2.2 Записати номінальні данні машини, вказані на заводському щитку, з'єсувати їх сутність.

4.2.3 Вивчити конструкцію асинхронної машини: визначити число полюсів, тип виконання, спосіб охолодження, тип підшипників, форми пазів статора та ротору.

4.2.4 Ознайомитись з позначеннями виводів обмоток статора та ротора, мегометром перевірити цілістність фазних обмоток. Звірити позначення обмоток з стандартними, приведенними табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Позначення виводів обмоток трифазних асинхронних машин.

Обмотка	Умовне найменування фаз	Позначення виводів	
		Початок	Кінець
Статора	Перша	C1	C4
	Друга	C2	C5
	Третя	C3	C6
Ротора	Перша	P1	–
	Друга	P2	–
	Третя	P3	–

Опір ізоляції обмоток електричної машини між обмотками і обмоток відносно корпусу повинні бути не нижче значення, отриманого за формулою:

$$R_{13} = \frac{U_{1HL}}{S_H / 100 + 1000} \text{ МОм}, \quad (4.1)$$

де  $U_{1HL}$  – номінальна лінійна напруга обмотки статора, В,

$S_H$  – повна номінальна потужність, кВ·А.

Повна номінальна потужність генератора розраховується за формулою:

$$S_H = \frac{P_{2H}}{\eta \cdot \cos \varphi_H} \text{ кВ·А}. \quad (4.2)$$

Звірити допустимий опір ізоляції з фазним, виміряним за допомогою мегометра. Результати вимірювань записати в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Величина опору ізоляції обмоток асинхронної машини, МОм.

Позначення виводів	C <sub>1</sub> – C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> –C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> –C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> –К	C <sub>3</sub> –К	P <sub>1,2,3</sub> –К
Опір						

В табл. 4.2 символом К позначений корпус машини.

4.2.5 Виконати ескізи основних частин та елементів конструкції асинхронного двигуна:

- статор у зборі;
- ротор у зборі;
- штамповану пластину пакету статора;
- штамповану пластину пакету ротора;
- клемну коробку.

4.2.6 Ознайомитись з роботою асинхронної машини в режимі двигуна:

- пуском двигуна;
- реверсуванням двигуна;
- процесом навантаження двигуна до номінального струму статора;

- зміненою швидкості при неробочому ході та під навантаженням;
- зупинкою двигуна.

### **4.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи**

#### 4.3.1 Звіт повинен мати:

- данні з заводського щитка;
- ескізи основних вузлів та елементів асинхронних двигунів,
- схеми дослідів і таблиці вимірних даних;
- висновки.

#### 4.3.2 Питання для самопідготовки

1 Принцип роботи асинхронних машин у режимі двигуна, електромагнітного гальма, генератора.

2 Призначення статора та ротору.

3 Чому магнітопровід ротору шихтований?

4 Конструкція асинхронних двигунів з фазним та короткозамкненим ротором.

5 Від чого залежить частота обертання ротору?

6 Що таке проковзування?

7 Що вказано на заводському щитку асинхронного двигуна?

8 Які існують конструктивні виконання асинхронних двигунів?

Для відповіді на питання використовуйте літературу [1-11].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2–А

### ТЕМА: ВИПРОБУВАННЯ ТРЬОХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

#### 5.1 Мета роботи

Ознайомитись з методом проведення випробувань асинхронного двигуна методом безпосереднього навантаження, зняти і побудувати робочі характеристики асинхронного двигуна, визначити номінальні данні випробуваного двигуна.

#### 5.2 Порядок виконання роботи

5.2.1 Ознайомитись з конструкцією двигуна, типом його виконання способом охолодження. Визначити число полюсів .

5.2.2 Записати паспортні данні заводського щитка.

5.2.3 Перевірити відповідність способу з'єднання фаз обмотки статора напрузі мережі, використавши данні щитка для вибору вимірювальних приладів.

5.2.4 Зібрати схему відповідно рис. 5.1 для зняття робочих характеристик двигуна  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $M_2$ ,  $n_2$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $\eta = f(P_2)$ , при  $U_1 = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$ .

Для складання схеми випробування необхідно:

- ввімкнути Т1, Т2, Т3, А1, А2, А3;
- ввімкнути ватметри W1 і W2 через трансформатори струму ТТ1 і ТТ2 за допомогою автоматів АП3 і АП4;
- ввімкнути обмотку статора випробуваного двигуна за допомогою автомата АП7 до кола стенду;
- з'єднати обмотку статора в «зірку», поставити поворотні вимикачі ПВ1, ПВ2 і ПВ3 вертикально;
- ввімкнути вольтметр V1 тумблером Т9 направо;
- перевмикачі зміни межі вимірювань по струму і напрузі на ватметрах W1 і W2 поставити на максимальні значення. Встановити постійну ватметрів  $C_w$ ;
- ввімкнути автомат живлення АП1.

5.2.5 Зняти робочі характеристики випробуваного асинхронного двигуна при напрузі  $U_1 = U_{\text{ном}}$ . При цьому струм статора змінювати в межах  $(0.2 \div 1.25) \cdot I_{\text{ном}}$ . Провести 5 – 7 вимірювань, одне з них повинно відповідати номінальному режиму  $I_1 = I_{\text{ном}}$ . Двигун навантажувати електромагнітним гальмом (моментоміром). Виміряні і розрахункові данні записати в табл. 5.1. Частоту обертання ротора виміряти за допомогою тахометра.

Таблиця 5.1 – Виміряні і розрахункові данні для визначення робочих характеристик асинхронного двигуна при  $U_1 = U_{\text{ном}}$ ,  $f_1 = f_{\text{ном}}$ .

Данні вимірювань								Розрахункові данні							
$U_1$	$I_{1A}$	$I_{1B}$	$I_{1C}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$M_2$	$n_2$	$I_{\text{іср}}$	$S_1$	$P_1$	$M_2^*$	$\cos\varphi$	$s$	$P_2$	$\eta$
В	А	А	А	ді л	ді л	кгм	об/х в	А	В· А	Вт	в.о.		в.о	Вт	%

В табл. 5.1 прийняті наступні позначення:

- $U_1$  – підведена лінійна напруга, В;
- $I_{\text{іср}}$  – фазний струм навантаження двигуна, А,
- $\alpha_1, \alpha_2$  – показання ватметрів,  $W_1$  і  $W_2$ , ділень;
- $M_2$  – момент на валу двигуна, кг·М;
- $n_2$  – частота обертів ротору двигуна, об/хв;
- $S_1$  – повна підведена потужність, В·А;
- $P_1$  – активна підведена потужність, Вт;
- $M_2^*$  – момент на валу двигуна, відн. Оддиниць;
- $\omega_2$  – кутова частота обертання ротору, рад /с;
- $n_2$  – частота обертання ротору (зі щитка), об/хв.;
- $P_2$  – потужність на валу двигуна, Вт;
- $n_1$  – синхронна частота обертання магнітного поля статора, об/хв.;
- $\eta$  – ККД двигуна, %.

Фазний струм навантаження двигуна розраховується за формулою:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3}. \quad (5.1)$$

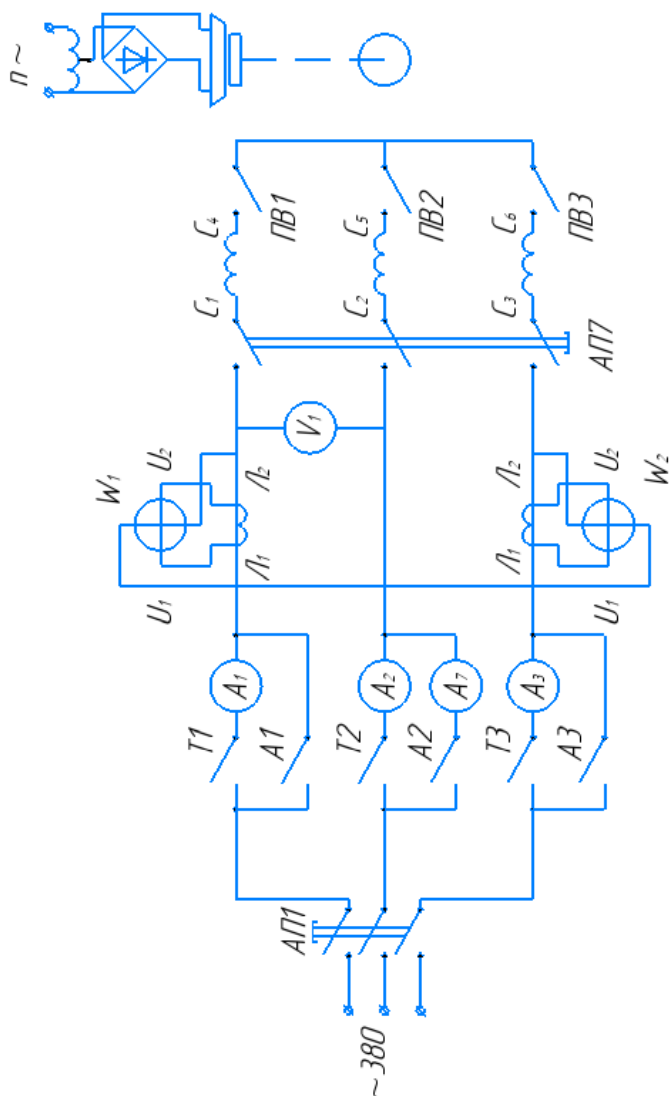


Рисунок 5.1 – Схема для випробувань трьохфазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором методом безпосереднього навантаження

Повна підведена потужність розраховується за формулою:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{1CP}. \quad (5.2)$$

Активна підведена потужність розраховується за формулою:

$$P_1 = C_w \cdot C_{TT} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2), \quad (5.3)$$

де  $C_w$  – постійна ватметра, Вт/діл. ;

$C_{TT}$  – коефіцієнт трансформації струму ( $C_{TT} = 3$ ).

Момент на валу двигуна розраховується за формулою:

$$M_2^* = \frac{M_2}{M_{2H}} \quad (5.4)$$

$$M_{2H} = \frac{P_{2H}}{\omega_2} \quad (5.5)$$

де  $P_{2H}$  – номінальна потужність зі щитка.

Кутова частота обертання ротору розраховується за формулою:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_2}{30}. \quad (5.6)$$

Потужність на валу двигуна розраховується за формулою:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot g. \quad (5.7)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ );

$s$  – проковзування, в.о.

Проковзування розраховується за формулою:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (5.8)$$

Синхронна частота обертання магнітного поля статора розраховується за формулою:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{P}. \quad (5.9)$$

Коефіцієнт корисної дії розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{S_1} \cdot 100\%. \quad (5.10)$$

5.2.6 За даними вимірювань і розрахунків табл. 5.1 побудувати робочі характеристики асинхронного двигуна:  $I_1$ ,  $P_1 = f(P_2)$ ;  $s$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ ;  $M_2$ ,  $n_2 = f(P_2)$  відповідно на трьох різних малюнках для номінальної напруги.

Таблиця 5.2 – Номінальні дані двигуна

Величина	Дані заводського щитка	Дані випробувань
Потужність на валу $P_{2H}$ , кВт		
Схема з'єднання обмотки статора		
Ном. підведена напруга $U_1$ , В		
Ном. лінійний струм статора $I_{1H}$ , А		
Ном. підведена потужність $P_{1H}$ , Вт		
Ном. частота обертання ротору об/хв		
Ном. проковзування, в.о.		
Номінальний момент на валу, Н·м		
ККД $\eta$ , %		

5.2.7 В табл. 5.2. записати номінальні данні, визначені з заводського щитка асинхронного двигуна, а також з його робочих характеристик, знятих при номінальній напрузі. Порівняти їх.

### 5.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи

5.3.1 Звіт повинен мати:

- схеми, таблиці, графіки робочих характеристик;
- порівняльний аналіз робочих характеристик;
- висновки про випробуваний двигун.

5.3.2 Питання для самопідготовки

1 Засоби визначення робочих характеристик асинхронних двигунів.

2 Переваги й недоліки засобу безпосереднього навантаження при випробуванні двигуна.

3 Пояснити графічну залежності  $n_2$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $M_2$ ,  $P_1$ ,  $I_1 = f(P_2)$ .

4 Пояснити графічну залежність  $\eta = f(P_2)$  і умови максимуму ККД.

5 Назвати пускові характеристики асинхронного двигуна.

6 Від чого залежить максимальний момент асинхронного двигуна?

7 Сутність процесів при запуску двигуна з поглибленим пазом на роторі та з двохклітинним ротором.

8 Основні переваги і недоліки асинхронних двигунів.

9 Чому знижується коефіцієнт асинхронного двигуна при зменшенні н навантаження менше номінального?

10 Чи підвищиться коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при зниженні напруги, підведеної до статора?

11 Залежність між моментом асинхронного двигуна і напругою.

Для відповіді на питання використовуйте літературу [1-11].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 – А

### ВИПРОБУВАННЯ ТРЬОХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ.

#### 6.1 Мета роботи

Ознайомитись з методом проведення випробувань асинхронного двигуна методом безпосереднього навантаження, зняти і побудувати робочі характеристики асинхронного двигуна, визначити номінальні данні випробуваного двигуна.

#### 6.2 Порядок виконання роботи

6.2.1 Ознайомитись з конструкцією двигуна, типом його виконання способом охолодження. Визначити число полюсів .

6.2.2 Записати паспортні данні заводського щитка.

6.2.3 Перевірити відповідність способу з'єднання фаз обмотки статора напрузі мережі, використавши данні щитка для вибору вимірювальних приладів.

6.2.4 Зібрати схему відповідно рис.6.1 для зняття робочих характеристик двигуна  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $M_2$ ,  $n_2$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $\eta = f(P_2)$ , при  $U_1 = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$ .

Для складання схеми випробування необхідно:

- ввімкнути Т1, Т2, Т3, А1, А2, А3;
- ввімкнути ватметри W1 і W2 через трансформатори струму ТТ1 і ТТ2 за допомогою автоматів АП3 і АП4;
- ввімкнути обмотку статора випробуваного двигуна за допомогою автомата АП7 до кола стенду;
- з'єднати обмотку статора в «зірку», поставити поворотні вимикачі ПВ1, ПВ2 і ПВ3 вертикально;
- ввімкнути вольтметр V1 тумблером Т9 направо;
- перемикачі зміни межі вимірювань по струму і напрузі на ватметрах W1 і W2 поставити на максимальні значення. Встановити постійну ватметрів Cw;
- ввімкнути автомат живлення АП1.

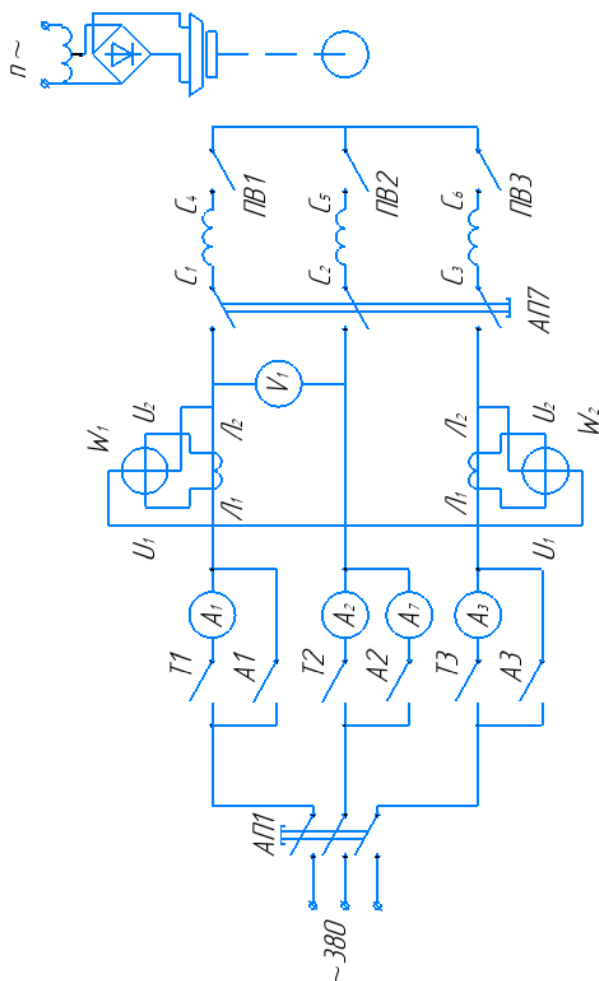


Рисунок 6.1 – Схема для випробувань трьохфазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором методом безпосереднього навантаження.

6.2.5 Зняти робочі характеристики випробуваного асинхронного двигуна при напрузі  $U_1 = U_{1\text{ном}}$ . При цьому струм статора змінювати в межах  $(0.2 \div 1.25) \cdot I_{1\text{ном}}$ . Провести 5 – 7 вимірювань, одне з них повинно відповідати номінальному режиму  $I_1 = I_{1\text{ном}}$ . Двигун наванта

жувати електромагнітним гальмом (моментоміром). Виміряні і розраховані данні записати в табл. 6.1 і 6.2. Частоту обертання ротора виміряти за допомогою тахометра.

Таблиця 6.1 – Виміряні данні для визначення ро бочих характеристик асинхронного двигуна при  $U_1 = U_{1\text{ном}}$ ,  $f_1 = f_{\text{ном}}$ .

Данні вимірювань							
$U_1$ В	$I_{1A}$ А	$I_{1B}$ А	$I_{1C}$ А	$\alpha_1$ діл	$\alpha_2$ діл	$M_2$ кгм	$n_2$ об/хв

Таблиця 6.2 – Розраховані данні для визначення ро бочих характеристик асинхронного двигуна при  $U_1 = U_{1\text{ном}}$ ,  $f_1 = f_{\text{ном}}$ .

Розраховані данні							
$I_{1cp}$ А	$S_1$ В·А	$P_1$ Вт	$M_2^*$ в.о.	$\cos\phi$	s в.о	$P_2$ Вт	$\eta$ , %

В табл. 6.1 і табл. 6.2 прийняті наступні позначення:

- $U_1$  – підведена лінійна напруга, В;
- $I_{1cp}$  – фазний струм навантаження двигуна, А,

$$I_{1cp} = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3}, \quad (6.1)$$

- $\alpha_1, \alpha_2$  – показання ватметрів,  $W_1$  і  $W_2$ , ділень;
- $M_2$  – момент на валу двигуна, кг·м ;
- $n_2$  – частота обертів ротору двигуна, об/хв;
- $S_1$  – повна підведена потужність, В·А;

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{1cp}, \quad (6.2)$$

- $P_1$  – активна підведена потужність, Вт;

$$P_1 = C_w \cdot C_{TT} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2), \quad (6.3)$$

де  $C_w$  – постійна ватметра, Вт/діл. ( $C_w = 5$ );

$C_{TT}$  – коефіцієнт трансформації струму ( $C_{TT} = 3$ );

- $M_2^*$  – момент на валу двигуна, відн. Одиниць;

$$M_2^* = \frac{M_2}{M_{2H}}, \quad (6.4)$$

$$M_{2H} = \frac{P_{2H}}{\omega_2}, \quad (6.5)$$

де  $P_{2H}$  – номінальна потужність зі щитка;

$\omega_2$  – кутова частота обертання ротору, рад/с;

- $n_2$  – частота обертання ротору (зі щитка);
- $P_2$  – потужність на валу двигуна, Вт;

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot g, \quad (6.6)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ );

- $s$  – проковзування, в.о.;

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (6.7)$$

де  $n_1$  – синхронна частота обертання магнітного поля статора, об/хв.

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (6.8)$$

- ККД двигуна, %

$$\eta = \frac{P_1}{S_1} \cdot 100\%. \quad (6.9)$$

6.2.6 За даними вимірювань і розрахунків табл. 6.1 побудувати робочі характеристики асинхронного двигуна:  $I_1$ ,  $P_1 = f(P_2)$ ;  $s$ ,  $\eta$ ,  $\cos\phi = f(P_2)$ ;  $M_2$ ,  $n_2 = f(P_2)$  відповідно на трьох різних малюнках для номінальної напруги.

6.2.7 В табл. 6.2. записати номінальні данні, визначені з заводського щитка асинхронного двигуна, а також з його робочих характеристик, знятих при номінальній напрузі. Порівняти їх.

Таблиця 6.2 – Номінальні данні двигуна

Величина	Данні заводського щитка	Данні випробувань
Потужність на валу P2H, кВт		
Схема з'єднання обмотки статора		
Ном. підведена напруга U1, В		
Ном. лінійний струм статора I1H, А		
Ном. підведена потужність P1H, Вт		
Ном. частота обертання ротору об/хв		
Ном. проковзування, в.о.		
Номінальний момент на валу, Н·м		
ККД $\eta$ , %		

### 6.3 Вказівки щодо звіту та підготовки до захисту лабораторної роботи

6.3.1 Звіт повинен мати:

- схеми, таблиці, графіки робочих характеристик;
- порівняльний аналіз робочих характеристик;
- висновки про випробуваний двигун.

6.3.2 Питання для самопідготовки:

1 Засоби визначення робочих характеристик асинхронних двигунів.

2 Переваги й недоліки засобу безпосереднього навантаження при випробуванні двигуна.

3 Пояснити графічну залежності  $n_2$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $M_2$ ,  $P_1$ ,  $I_1 = f(P_2)$ .

4 Пояснити графічну залежність  $\eta = f(P_2)$  і умови максимуму ККД, на?

5 Від чого залежить максимальний момент асинхронного двигуна

6 Назвати пускові характеристики асинхронного двигуна.

7 Сутність процесів при запуску двигуна з поглибленим пазом на роторі та з двохклітинним ротором.

8 Основні переваги і недоліки асинхронних двигунів.

9 Чому знижується коефіцієнт асинхронного двигуна при зменшенні навантаження менше номінального?

10 Чи підвищиться коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при зниженні напруги, підведеної до статора?

11 Залежність між моментом асинхронного двигуна і напругою.

Для відповіді на питання використовуйте літературу [1-11].

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1 Метельський В.П. Електричні машини і мікро машини : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / В.П.Метельський//Монографія, з грифом МОН України, Запоріжжя, ЗНТУ. –2010.– С.660.

2 Красніков В.М.Електричні машини. Електромеханічні перетворювачі енергії. / В.М.Красніков, В.М.Сулейманов, О.М. Давидов–К.: Норіта–плюс, 2007.

3 Електричні машини і трансформатори /підручник за заг. Ред. В. І. Мілих. – Х.: ХПІ, 2017. – 452 с.

4 КуценкоЮ.М. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.

5 Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.

6 Заблодський М.М. Електричні машини змінного струму: навчальний посібник / М.М. Заблодський, Р.М. Чуєнко, В.В. Васюк – К.: ЦП «Компрінт», 2018. – 514 с.

7 Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – К.: Знання, 2009. – 399 с

8 Белікова Л.Я. Електричні машини: навчальний посібник для студентів вищих навч. закладів / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012. – 480 с.

9 Чуєнко Р.М. Електричні машини: навчальний посібник / Р.М. Чуєнко. К.: Видавництво "Компрінт", 2017. – 462 с.

10 Чуєнко М.О. Практикум з електричних машин: навчальний посібник / М.О. Чуєнко, Р.М. Чуєнко, О.В. Санченко. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2014. – 320 с.

11 Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму : навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабенко І. В. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 86 с.

12 Машины постоянного тока. Синхронные машины. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине „Электрические машины”/ Сост. А.Н. Андриенко, В.П. Пьянков, К.А. Махачашвили, Д.А. Горбунцов. – Запорожье: ЗМИ, 1990. – 80 с.