

**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
"Дніпровська політехніка"**



**Кафедра електротехніки**



Ципленков Д.В., Іванов О.Б.

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни «Основи вітроенергетики»  
для студентів спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро  
2024**



**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
"Дніпровська політехніка"**



**Кафедра електротехніки**



Ципленков Д.В., Іванов О.Б.

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни «Основи вітроенергетики»  
для студентів спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро  
2024**

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № від за поданням науково-методичною комісією зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 21/22-01 від 30.08.2024 р.)

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи вітроенергетики» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Д.В. Циценков, О.Б. Іванов; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка» – Д.: НТУ "ДП", 2024. – 48 с.

Автори:

Циценков Д.В., канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри Електротехніки  
Іванов О.Б., канд. техн. наук, професор, професор кафедри Електротехніки

Методичні рекомендації призначено для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи вітроенергетики» студентами спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

© Циценков Д.В., Іванов О.Б. 2024

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2024

## ВСТУП

**Вітроенергетика** – галузь відновлюваної енергетики, яка спеціалізується на використанні кінетичної енергії вітру. Використання енергії вітру є одним із найдавніших відомих способів використання енергії із навколишнього середовища. У рамках курсу викладено матеріали щодо природи та характеристик вітру, розвитку вітроенергетики у світі та в Україні, фізичних основ перетворення і використання енергії вітру. Розглянуто різні класи вітроенергетичних вітроустановок, їх структурні схеми, характеристики і конструкції, а також побудова основних конструктивних елементів. Значна увага приділена електрогенераторам як перетворювачам енергії вітру, режимам роботи та схемам з'єднань вітроелектричних установок, принципам управління і регулювання параметрів вітроелектричних установок. Висвітлені загальні питання екологічного впливу та економічної доцільності вітроенергетики.

**Мета дисципліни** – ознайомлення з природою та характеристиками вітру, фізичними основами перетворення і використання енергії вітру, особливостями конструкції вітроустановок різної потужності, режимами роботи та схемами з'єднань вітроелектричних установок, принципами управління і регулювання параметрів вітроелектричних установок та формування компетентностей щодо розрахунків вітроенергетичного потенціалу та вибору вітроустаткування для використання енергії вітру.

### **Завдання курсу:**

ознайомити здобувачів вищої освіти з розвитком вітроенергетики у світі та в Україні; природою та характеристиками вітру, фізичними основами перетворення і використання енергії вітру;

вивчити різні класи вітроенергетичних вітроустановок, їх структурні схеми, характеристики і конструкції, а також особливості побудови основних конструктивних елементів;

вивчити можливі схеми генерування потужності вітроелектричними установками при роботі їх як на автономне навантаження так і на мережу нескінченної потужності;

вивчити режими роботи та схеми з'єднань вітроелектричних установок, принципи управління і регулювання параметрів вітроелектричних установок;

навчити обирати вітроустановки відповідної потужності виходячі з потужності, яку необхідно покрити за рахунок ВЕУ та умов навколишнього середовища;

навчити здобувачів вищої освіти виконувати екологічний та економічний аналіз прийнятих рішень з питань вітроенергетики.

## Очікувані дисциплінарні результати навчання

Дисциплінарні результати навчання (ДРН) відповідно до робочої програми	
шифр ДРН	зміст
ДРН – 01	Розуміти природу та характеристиками вітру, а також фізичні принципи перетворення і використання енергії вітру.
ДРН – 02	Розрізняти структурні схеми, характеристики і конструкції вітроустановок різної потужності, а також особливості побудови систем управління і регулювання параметрів цих установок основних конструктивних елементів.
ДРН – 03	Знати режими роботи та схеми з'єднань вітроелектричних установок, принципи управління
ДРН – 04	Знати можливі схеми генерування потужності вітроелектричними установками при роботі їх як на автономне навантаження так і на мережу нескінченної потужності
ДРН – 05	Вміти обирати вітроустановки відповідної потужності виходячі з потужності, яку необхідно покрити за рахунок ВЕУ та умов навколишнього середовища та проводити екологічний і економічний аналіз прийнятих рішень з питань вітроенергетики.

### Базові дисципліни

Для спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка:

- Загальна фізика
- Вища математика
- Теоретичні основи електротехніки
- Електричні машини

Для спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

- Фізика
- Вища математика
- Теоретичні основи електротехніки та електромеханіки

Для спеціальності 175 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

- Фізика
- Вища математика
- Теоретичні основи електротехніки та електромеханіки

## ОСНОВНІ ПРАВИЛА БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЇ

При роботі в лабораторії необхідно дотримуватись наступних правил, що забезпечують безпеку від поразки електричним струмом:

- Працювати тільки на тому стенді, що зазначений викладачем і не торкатися схем, зібраних на інших стендах.
- Вмикати зібрану схему під напругу **тільки після перевірки схеми і з дозволу викладача**, що веде заняття в групі (підгрупі).
- Перед ввімкненням схеми під напругу переконатися в тому, що немає людей, які знаходяться в небезпечній близькості від схеми, що вмикається.
- Під час виконання досліду не торкатися відкритих струмоведучих частин схеми, що знаходиться під напругою.
- **Усі необхідні роз'єднання та наступні з'єднання робити тільки після вимкнення схеми від мережі (вимкнено автоматичний вимикач та знято запобіжники).**
- При виявленні будь-яких несправностей чи ненормальної роботи схеми (перегоряння запобіжників, поява іскор, спалахів і т.п.) негайно відімкнути схему від мережі і доповісти про це викладачу, що проводить заняття.

В лабораторних роботах та практичному завданні **розрахунок виконується наступним чином**: записується формула, потім виконується підстановка усіх значень та вказується результат рішення. Після нього вказуються одиниці виміру. Наприклад:

$$a = b + cd = 5 + 73 = 4H$$

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № ОВЕ-1

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Мета роботи:** Зняття експериментальним шляхом робочих характеристик синхронного генератора та визначення відношення короткого замикання

#### Програма роботи

1. Вивчення будови трифазних синхронних генераторів; сборка схеми для дослідження синхронного генератора та опробування лабораторної установки.
2. Експериментальне зняття характеристики неробочого ходу синхронного генератора.
3. Експериментальне зняття зовнішньої характеристики синхронного генератора.
4. Експериментальне зняття регульовальної характеристики синхронного генератора.
5. Експериментальне зняття характеристики трифазного короткого замикання синхронного генератора.

6. Визначення відношення короткого замикання (ВКЗ).
7. Складання звіту.

### Порядок виконання роботи

#### Етап 1. Вивчення будови трифазних синхронних генераторів; сборка схеми для дослідження синхронного генератора та опробування лабораторної установки

Користуючись літературою і наочними приладдям вивчити будову трифазних синхронних генераторів.

Ознайомитися з лабораторною установкою, призначеною для дослідження трифазного синхронного генератора. Ознайомитися з номінальними даними досліджуваного генератора і занести їх у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

*Номінальні дані трифазного синхронного генератора. Робоче місце № \_\_\_\_\_*

<i>Тип</i>	$P_{ном}$ <i>кВт</i>	$U_{ном}$ <i>В</i>	$I_{ном}$ <i>А</i>	$n_{ном}$ <i>об/хв</i>	$\eta_{ном}$ <i>%</i>	$\cos \varphi_{ном}$

Підібрати необхідну вимірювальну апаратуру і зібрати електричний коло за схемою згідно рис. 1.1 (для підключення вольтметра і частотоміра необхідно виводи синхроколони  $A_T$  та  $B_T$  під'єднати до однойменних виводів синхронного генератора).

Після перевірки керівником правильності зборки схеми перевести повзунк регульовального реостата  $R_{регз}$ , вмикненого в коло обмотки збудження (ОЗ) двигуна постійного струму (приводного двигуна) у положення "0". Подати напругу на двигун постійного струму (ввімкнути автоматичний вимикач  $P_3$ ) і натисканням на кнопку "Пуск" на пусковому апараті здійснити запуск приводного двигуна.

Подати напругу на обмотку збудження синхронного генератора (ввімкнути вимикач  $P_2$ ) та регулюючи швидкість обертання приводного двигуна за допомогою регульовального реостата  $R_{регз}$  в колі збудження, встановити номінальну частоту синхронного генератора, при якій швидкість обертання валу генератора дорівнює синхронній (частотомір, вмикнений в обмотку статора генератора повинен показувати 50 Гц).

#### Етап 2. Експериментальне зняття характеристики неробочого ходу синхронного генератора

Характеристика неробочого ходу синхронного генератора представляє собою залежність напруги на затискачах генератора від струму збудження:



$E_0 = f(I_{зб})$  і знімається при умовах  $I_1 = 0$ ,  $n = n_{ном}$ . Характеристику неробочого ходу знімають при зменшенні струму збудження  $I_{зб}$ , причому зміну струму збудження здійснюють плавно і тільки в одному напрямку.

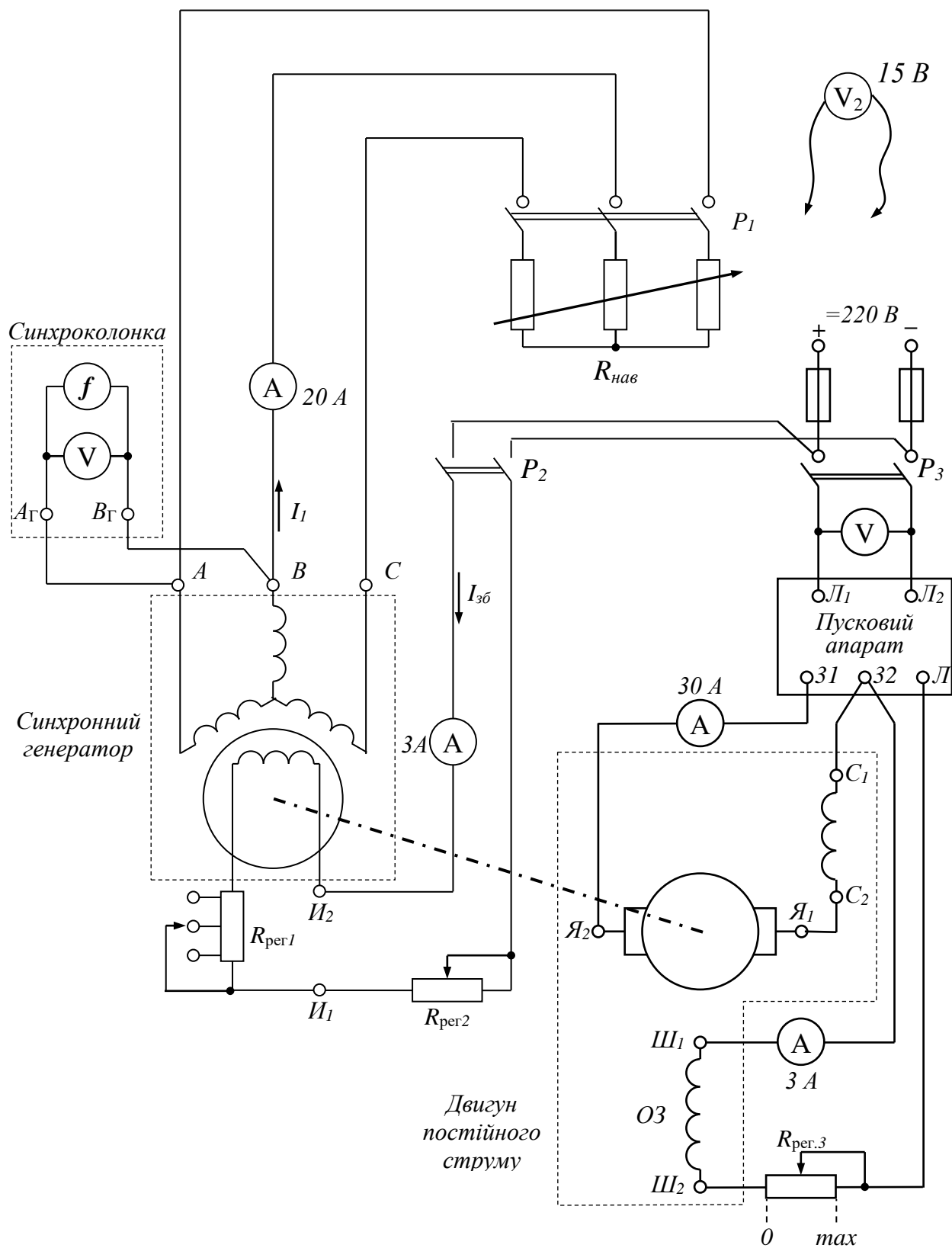


Рисунок 1.1 – Схема для дослідження трифазного синхронного генератора

Для зняття характеристики неробочого ходу, регулюючи струм збудження генератора за допомогою реостатів  $R_{\text{рег1}}$  і  $R_{\text{рег2}}$ , збільшити напругу генератора до  $E_0 = (1.2 \dots 1.3)U_{\text{ном}}$ .

Плавню зменшуючи струм збудження генератора, зняти 7-8 точок характеристики  $E_0 = f(I_{3\phi})$ , записуючи дані в табл. 1.2. Причому обов'язково зняти точку при  $E_0 = U_{\text{ном}}$ , при цьому  $I_{3\phi} = I_{3\phi.\text{ном.0}}$ . Останню точку характеристики зняти при відключеному рубильнику  $P_2$ , тобто при  $I_{3\phi} = 0$  (для визначення величини напруги скористатися вольтметром  $V_2$ ). При цьому напруга на затискачах обмотки якоря має місце за рахунок залишкового намагнічування генератора.

Таблиця 1.2.

Характеристика неробочого ходу синхронного генератора  
 $E_0 = f(I_{3\phi})$  при умовах  $I_1 = 0, n = n_{\text{ном}} = \text{const}$

Дослід	$I_{3\phi}, \text{ A}$								0
	$E_0, \text{ B}$								
Розрахунок	$I_{3\phi}^* = I_{3\phi} / I_{3\phi.\text{ном.0}}$								0
	$E_0^* = E_0 / U_{\text{ном}}$								

**Етап 3. Експериментальне зняття зовнішньої характеристики синхронного генератора**

Зовнішня характеристика синхронного генератора представляє залежність напруги на затискачах генератора від струму навантаження:  $U_1 = f(I_1)$  і знімається при умовах  $I_{3\phi} = \text{const}, \cos\phi = \text{const}, n = n_{\text{ном}}$ .

Для зняття зовнішньої характеристики  $U_1 = f(I_1)$  при  $\cos\phi = 1$  при відключеному рубильнику  $P_1$ , регулюючи струм збудження генератора реостатами  $R_{\text{рег1}}$  і  $R_{\text{рег2}}$ , встановити номінальну напругу синхронного генератора. Це буде перша точка характеристики  $U_1 = f(I_1)$  при  $I_1 = 0$ .

Ввімкнути рубильник  $P_1$  і, поступово зменшуючи опір  $R_{\text{нав}}$  (опускаючи ножі трифазного водяного реостата), збільшувати навантаження генератора. Зняти 7-8 точок залежності  $U_1 = f(I_1)$  при  $\cos\phi = 1$ , записуючи дані в табл. 1.3. Струм в обмотці збудження підтримувати незмінним ( $I_{3\phi} = \text{const}$ ). Частоту струму якоря рівною 50 Гц підтримувати незмінною, регулюючи швидкість обертання приводного двигуна ( $f_1 = \text{const} = 50$  Гц).

Остання точка характеристики визначається номінальним струмом синхронного генератора.

**Увага!!!** Після зняття характеристики плавно зменшити навантаження, підтримуючи частоту напруги генератора 50 Гц.

Таблиця 1.3.

Зовнішня характеристика синхронного генератора  
 $U_1 = f(I_1)$  при  $I_{3\phi} = const$ ,  $\cos\varphi = const$ ,  $n = n_{ном}$ .

Дослід	$I_1, A$								
	$U_1, B$								
Розрахунок	$I_1^* = I_1 / I_{1ном}$								
	$U_1^* = U_1 / U_{1ном}$								

**Етап 4. Експериментальне зняття регулювальної характеристики синхронного генератора**

Регулювальна характеристика синхронного генератора являє собою залежність струму збудження від струму навантаження:  $I_{3\phi} = f(I_1)$ . Знімається при умовах:  $U = U_{ном} = const$ ,  $\cos\varphi = const$ ,  $n = n_{ном}$ .

Для зняття регулювальної характеристики  $I_{3\phi} = f(I_1)$  при  $\cos\varphi = 1$  регулюючи струм збудження реостатами  $R_{пер1}$  і  $R_{пер2}$ , встановити номінальну напругу синхронного генератора, що працює в режимі неробочого ходу. Записати в табл. 1.4 першу точку регулювальної характеристики при  $I_1 = 0$ .

Таблиця 1.4.

Регулювальна характеристика синхронного генератора  
 $I_{3\phi} = f(I_1)$  при  $U = U_{ном} = const$ ,  $\cos\varphi = const$ ,  $n = n_{ном}$ .

Дослід	$I_1, A$								
	$I_{3\phi}, A$								
Розрахунок	$I_1^* = I_1 / I_{1ном}$								
	$I_{3\phi}^* = I_{3\phi} / I_{3\phi.ном.0}$								

Ввімкнути рубильник  $P_1$  і, поступово зменшуючи опір  $R_{нав}$  (опускаючи ножі трифазного водяного реостата), збільшувати навантаження генератора. Зняти 7-8 точок залежності  $I_{3\phi} = f(I_1)$  при  $\cos\varphi = 1$ , записуючи дані в табл. 1.4. Напругу на затисках генератора підтримувати незмінною ( $U = U_{ном} = const$ ).

Частоту струму якоря рівною 50 Гц підтримувати незмінною, регулюючи швидкість обертання приводного двигуна ( $f_1 = const = 50$  Гц).

Остання точка характеристики визначається або припустимим струмом приводного двигуна (який не повинен перевищувати його номінальний струм) або номінальним струмом синхронного генератора.

**Увага!!!** Після зняття характеристики плавно зменшити навантаження, підтримуючи частоту струму на виході генератора 50 Гц.

**Етап 5. Зняття характеристики трифазного короткого замикання синхронного генератора.**

Характеристика трифазного короткого замикання  $I_k = f(I_{зб})$  являє собою окремий випадок регульовальної характеристики, що знімається при  $U_1 = 0, n = n_{ном}$ .

Зупинити приводний двигун (нажати на кнопку "Стоп" пускового апарату). Вимкнути всі вимикачі та зняти запобіжники. Виконати в схемі рис. 1.1 наступні зміни: обмотку якоря синхронного генератора замкнути накоротко у відповідності зі схемою рис. 1.2.

Після перевірки керівником правильності зборки схеми перевести повзунок регульовального реостата  $R_{рег3}$ , вмикненого в коло обмотки збудження двигуна постійного струму у положення "0". Подати напругу на двигун постійного струму (ввімкнути автоматичний вимикач  $P_3$ ) і натисканням на кнопку "Пуск" на пусковому апараті здійснити запуск приводного двигуна.

Подати напругу на обмотку збудження синхронного генератора (ввімкнути вимикач  $P_2$ ) та регулюючи швидкість обертання приводного двигуна за допомогою регульовального реостата  $R_{рег3}$  в колі збудження, встановити номінальну частоту синхронного генератора, при якій швидкість обертання валу генератора дорівнює синхронній (частотомір, вмикнений в обмотку статора генератора повинен показувати 50 Гц).

За допомогою реостатів  $R_{рег1}$  і  $R_{рег2}$  в колі збудження генератора встановити мінімальне значення напруги на зажимах синхронного генератора.

Ввімкнути рубильник  $P_1$  і, за допомогою регульовальних реостатів в обмотці збудження синхронного генератора, встановити струм короткого замикання  $I_k = I_{ном}$ . Записати першу точку характеристики короткого замикання. Далі поступово змінюючи опір  $R_{рег1}$  і  $R_{рег2}$ , зняти 3-4 точки залежності  $I_k = f(I_{зб})$  при  $U_1 = 0, n = n_{ном}$   $U = 0$ , записуючи дані в таблицю 1.5 (струм короткого замикання повинен зменшуватися). Остання точка характеристики повинна бути знята при відключеному рубильнику  $P_2$ .

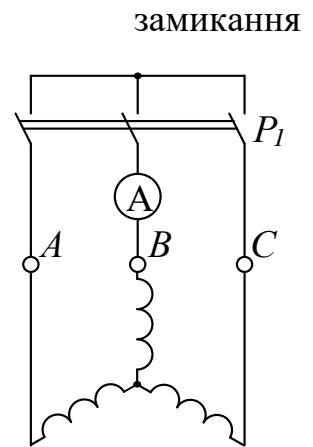


Рисунок 1.2 – Схема з'єднання обмоток синхронного генератора для досліду короткого замикання

Таблиця 1.5.

Характеристика короткого трифазного замикання синхронного генератора

$$I_K = f(I_{3\phi}) \text{ при } U_1 = 0, n = n_{\text{ном.}}$$

Дослід	$I_K, A$					
	$I_{3\phi}, A$					
Розрахунок	$I_K^* = I_K / I_{1\text{ном}}$					
	$I_{3\phi}^* = I_{3\phi} / I_{3\phi.\text{ном.0}}$					

### Етап 6. Визначення відношення короткого замикання (ВКЗ)

Користуючись методичними вказівками та рекомендованою літературою визначити відношення короткого замикання (ВКЗ).

### Етап 7. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані трифазного синхронного генератора.
3. Схему для дослідження трифазного синхронного генератора (рис. 1.1).
4. Данні для побудови дослідної (табл. 1.2) та нормальної (табл. 1.6) характеристики неробочого ходу та характеристика неробочого ходу синхронного генератора у відносних одиницях.
5. Данні для побудови зовнішньої характеристики (табл. 1.3) та зовнішня характеристика синхронного генератора у відносних одиницях.
6. Данні для побудови регульовальної характеристики (табл. 1.4) та регульовальна характеристика синхронного генератора у відносних одиницях.
7. Данні для побудови характеристики трифазного короткого замикання (табл. 1.5) та характеристика трифазного короткого замикання синхронного генератора у відносних одиницях.
8. Значення ВКЗ.

### **Методичні вказівки**

В теорії синхронних машин при аналізі робочих режимів широко використовується система відносних одиниць. У роботі отримані експериментально характеристики, що приведені в таблицях 1.2 – 1.5, необхідно побудувати у виді графіків, причому на осях повинні бути відкладені відносні одиниці. Базисними

(одичними) величинами є:

1. одиниця напруги – номінальна напруга  $U_{1\text{НОМ}}$  ;
2. одиниця струму – номінальний струм якоря  $I_{1\text{НОМ}}$  ;
3. одиниця струму збудження – струм збудження  $I_{\text{зб.НОМ.0}}$ , що відповідає номінальній напрузі при неробочому ході

Таким чином, напруга, струм якоря і струм збудження у відносних одиницях можуть бути записані в наступному виді:

$$U_1^* = U_1 / U_{1\text{НОМ}} ; \quad I_1^* = I_1 / I_{1\text{НОМ}} ; \quad I_{\text{зб}}^* = I_{\text{зб}} / I_{\text{зб.НОМ.0}} .$$

Особливе значення має вираження у відносних одиницях характеристик неробочого ходу і короткого замикання.

### До етапу 2

Характеристика неробочого ходу будується в такий спосіб:

I. за даними табл. 1.2 будується спадна вітка дослідної характеристики (крива 1) у відносних одиницях;

II. дослідну характеристику зміщують паралельно самої собі по осі абсцис вправо на величину  $\Delta I_{\text{зб}}^*$ , отриману графічною екстраполяцією дослідної характеристики до перетинання з віссю абсцис, як показано на рис. 1.3, а.

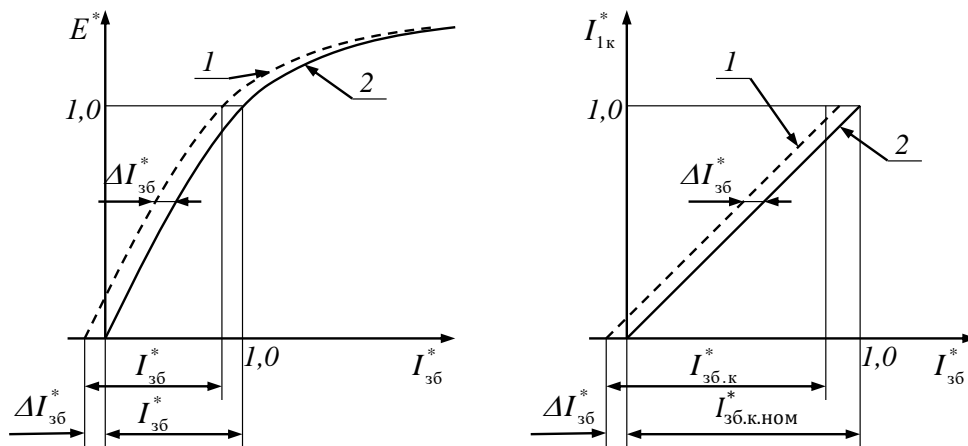


Рисунок 1.3 – Характеристики неробочого ходу (а) та короткого замикання (б):

1 – дослідна характеристика; 2 – характеристика, яка приведена до початку координат

Характеристики неробочого ходу сучасних синхронних машин, побудовані у відносних одиницях, так близькі одна до одної, що є можливість побудувати нормальну характеристику неробочого ходу, яка приведена в табл. 1.6.

У звіті необхідно привести табл. 1.6 та порівняти отриману експериментальну характеристику неробочого ходу синхронного генератора з нормальною характеристикою.

Таблиця 1.6.

Дані для побудови нормальної характеристики неробочого ходу

$I_{зб}^* = \frac{I_{зб}}{I_{зб.ном}}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$E_0^* = \frac{E_0}{U_{ном}}$	0	0.55	1.0	1.22	1.32	1.4

**До етапу 5**

Характеристика короткого замикання будується аналогічно попередній:

2. за даними табл. 1.5 будується дослідна характеристика трифазного короткого замикання у відносних одиницях (крива 1);

3. дослідну характеристику зміщують аналогічно характеристиці неробочого ходу, як показано на рис. 1.3, б.

**До етапу 6**

Характеристики неробочого ходу і короткого замикання, постійні у відносних одиницях, дозволяють визначити відношення короткого замикання генератора, тобто:

$$BKЗ = I_{зб.ном.0} / I_{зб.к.ном} = 1 / I_{зб.к.ном}^*$$

**Контрольні запитання**

1. В чому полягає відмінність конструкції явнополюсного генератора від неявнополюсного? Як це впливає на їх властивості?
2. У чому складається перевага побудови робочих характеристик синхронного генератора у відносних одиницях?
3. Поясніть вид знятих експериментально робочих характеристик. Чому вони мають таку форму?
4. Що називається відношенням короткого замикання генератора, як воно розраховується? Який його фізичний зміст?
5. Який вигляд буде мати зовнішня характеристика при ємнісному навантаженні? Чому?
6. Який вигляд буде мати зовнішня характеристика при індуктивному навантаженні? Чому?
7. Поясніть чому зовнішня характеристика при активному навантаженні має спадний характер?
8. Який вигляд буде мати регульовальна характеристика при ємнісному навантаженні? Чому?
9. Який вигляд буде мати регульовальна характеристика при індуктивному навантаженні? Чому?
10. Чому характеристика короткого замикання близька до прямої лінії?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № ОВЕ-2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Мета роботи:** Вивчити вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації і дослідити спільну роботу генератора з мережею.

#### Програма роботи

1. Вивчення методів вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею.
2. Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею методом точної синхронізації.
3. Зняття  $U$ -подібних характеристик  $I_1 = f(I_{зб})$ .
4. Складання звіту.

#### Порядок виконання роботи

##### Етап 1. Вивчення методів вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з потужною мережею

За допомогою методичних вказівок та рекомендованої літератури вивчити методи вмикання с синхронного генератора паралельно з мережею. Ознайомитися з лабораторним стендом та записати заводські дані синхронного генератора в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1.

Заводські дані синхронного генератора. Робоче місце № \_\_\_\_\_

$T_{уп}$	$U_{ном},$ $B$	$I_{ном},$ $A$	$P_{ном},$ $кВт$	$n_{ном},$ $об/хв$	$f_{ном},$ $Гц$	$\cos \varphi$ –

##### Етап 2. Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації

2. Підібрати необхідну вимірювальну апаратуру і зібрати схему для вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею методом точно синхронізації згідно рис. 2.1. Прилади синхронізаційної колонки (обведена на рис. 6 пунктиром) підключаються до схеми через клемник синхронізаційної колонки. Надати зібрану схему для перевірки викладачу.



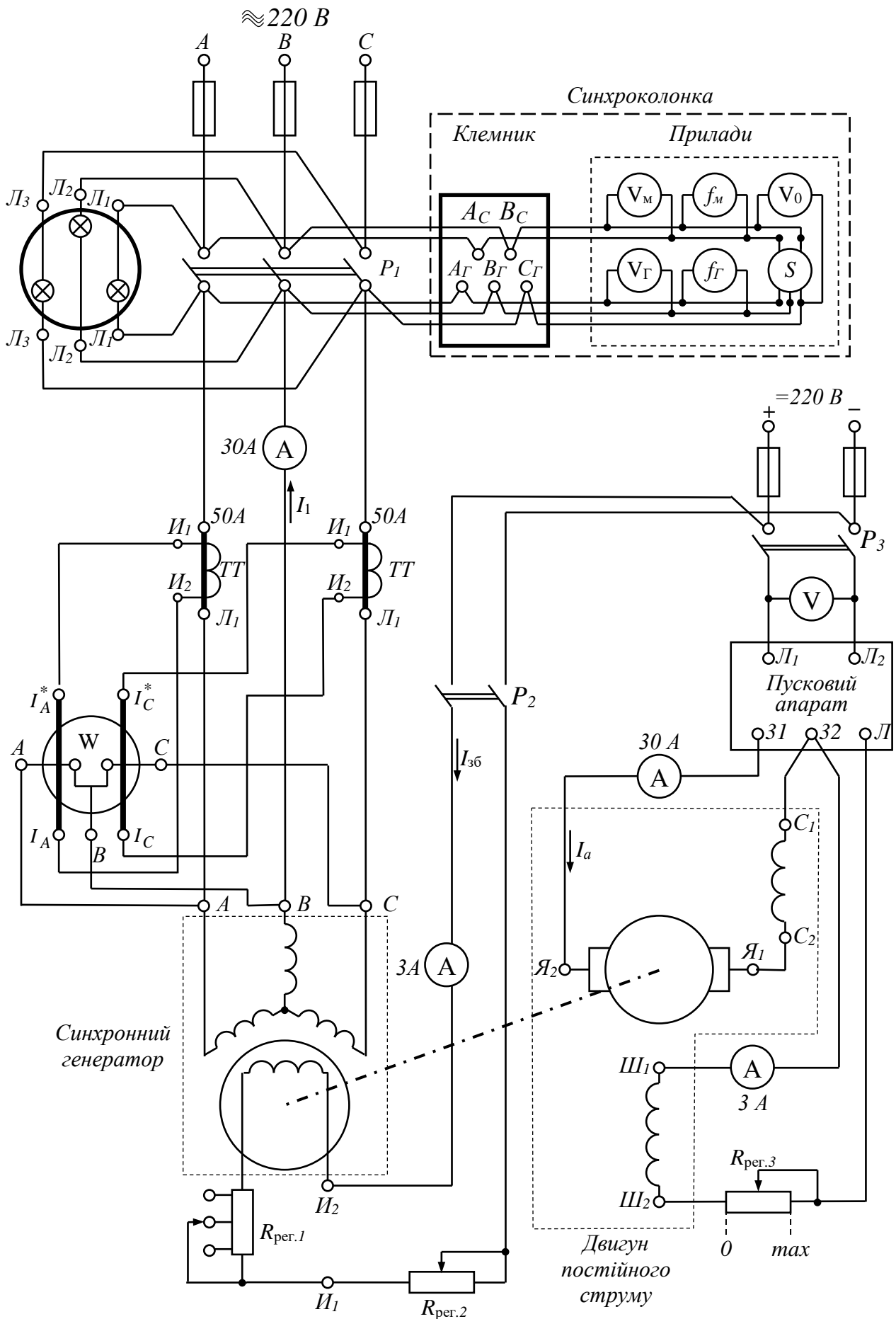


Рисунок 2.1 – Схема вмикання синхронного генератора на роботу паралельно з мережею

3. Перед пуском приводного двигуна (двигуна постійного струму) встановити реостат у колі обмотки збудження (ОЗ) двигуна в положення "0" ( $R_{\text{рег.3}} = 0$ ). Подати напругу на двигун постійного струму (ввімкнути автоматичний вимикач  $P_3$ ) і натисканням на кнопку "Пуск" на пусковому апараті здійснити запуск приводного двигуна.

4. Встановити реостати в колі збудження генератора в положення  $R_{\text{рег.1}} = \text{max}$ ,  $R_{\text{рег.2}} = \text{max}$ . Ввімкнути рубильник  $P_2$  в колі обмотки збудження синхронного генератора.

5. Здійснити синхронізацію генератора, для чого треба виконати наступні операції:

- Регулюючи швидкість обертання приводного двигуна за допомогою регульовального реостата  $R_{\text{рег.3}}$ , домогтися рівності частот мережі і генератора. Одночасно необхідно контролювати напругу генератора, щоб вона не перевищила напругу мережі. Величину напруги генератора регулювати, змінюючи струм збудження генератора за допомогою регульовальних реостатів  $R_{\text{рег.1}}$  та  $R_{\text{рег.2}}$ , прагнучи, щоб  $U_{\Gamma} = U_{\text{м}}$

- Синхронізація досягнута, коли напруга генератора дорівнює напрузі мережі  $U_{\Gamma} = U_{\text{м}}$ , частоти мережі і генератора рівні  $f_{\Gamma} = f_{\text{м}}$ , лампи синхроскопа погашені, стрілка приладу "синхроскоп" знаходиться на червоній рисці, стрілка нульового вольтметра – на нулі.

6. У момент досягнення синхронізації ввімкнути рубильник  $P_1$ .

### Етап 3. Зняття U-подібних характеристик

1. Залежність струму якоря від струму збудження  $I_1 = f(I_{\text{зб}})$  знімати, підтримуючи постійною активну потужність  $P_2$  синхронного генератора, що віддається в мережу, та контролюється ваттметром W, ввімкненим в коло якоря генератора.

2. При неробочому ході синхронного генератора  $P_2 = 0$  встановити нормальний струм збудження  $I_{\text{зб}} = I_{\text{зб(норм)}}$ , при якому показання амперметра в колі якоря буде близько до нуля. Значення  $I_{\text{зб(норм)}}$ ,  $I_1$  та  $P_2 = 0$  записати в табл. 2.2.

3. Регулюючи опір реостатів  $R_{\text{рег.1}}$  та  $R_{\text{рег.2}}$  у колі збудження генератора, встановити максимальне значення струму збудження  $I_{\text{збmax}}$ , при якому струм якоря близький до номінального значення. Поступово зменшуючи струм збудження від  $I_{\text{збmax}}$  до  $I_{\text{зб(норм)}}$  зняти залежність  $I_1 = f(I_{\text{зб}})$ , записуючи дані вимірів у графу "перезбудження" табл. 2.2. У зазначеному проміжку зміни струму збудження необхідно зняти 6-7 точок, причому при значеннях струму збудження, близьких до  $I_{\text{зб(норм)}}$ , значення струму якоря  $I_1$  знімати з невеликим інтервалом його зміни.

Зняти 6-7 точок при зміні струму збудження від  $I_{\text{зб(норм)}}$  до  $I_{\text{збmin}}$ , записуючи дані в графу "недозбудження" табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Дані для побудови U-подібних характеристик  $I_1 = f(I_{зб})$   
синхронного генератора при  $U_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{В}$ ,  $n = \underline{\hspace{2cm}} \text{об/хв}$

Навантаження та нормальний струм збудження	Недозбудження		Перезбудження	
	$I_{зб}, A$	$I_1, A$	$I_{зб}, A$	$I_1, A$
$I_{зб(\text{норм})} = \underline{\hspace{2cm}} A$ $I_{1\text{min}} = \underline{\hspace{2cm}} A$ $P_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{кВт}$				
$I_{зб(\text{норм})} = \underline{\hspace{2cm}} A$ $I_{1\text{min}} = \underline{\hspace{2cm}} A$ $P_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{кВт}$				
$I_{зб(\text{норм})} = \underline{\hspace{2cm}} A$ $I_{1\text{min}} = \underline{\hspace{2cm}} A$ $P_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{кВт}$				

4. Після того, як закінчено виміри при неробочому ході, встановити нормальний струм збудження.

5. Навантажити підключений до мережі генератор, шляхом збільшення прикладеного до його вала обертаючого моменту, що створюється двигуном постійного струму. Для цього за допомогою регульовального реостата в колі обмотки збудження приводного двигуна повільно зменшують струм збудження, що приводить до збільшення струму якоря двигуна та обертаючого моменту на валу двигуна. Збільшити струм якоря двигуна до значення  $I_a = 10 A$ .

6. Визначити нормальний струм збудження  $I_{зб(\text{норм})}$  при  $P_2 = \text{const}$ , що знаходиться по мінімуму струму якоря синхронного генератора при регулюванні струму збудження. Записати значення  $I_{зб(\text{норм})}$ ,  $I_1$  та  $P_2$  в табл. 2.2.

7. Зняти залежність  $I_1 = f(I_{зб})$  починаючи з максимального значення струму збудження  $I_{зб\text{max}}$  в тій само послідовності, що і в п. 3.

Щоб уникнути випадання генератора із синхронізму  $I_{зб\text{min}}$  повинен бути

не нижче  $0.25I_{3\phi(\text{норм})}$

8. Після того, як закінчені виміри при навантаженні ( $I_a = 10 A$ ), встановити при цьому навантаженні нормальний струм збудження.

9. Збільшити навантаження до значення  $I_a = 15 A$  та зняти залежність  $I_1 = f(I_{3\phi})$ , керуючись вказівками, приведеними в п. 5 і 6.

#### Етап 4. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

- Найменування роботи, її мету та програму.
- Номінальні дані трифазного синхронного генератора (табл. 2.1).
- Принципову схему вмикання генератора на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації (рис. 2.1).
- Експериментальні данні (табл. 2.2) та  $U$ -подібні характеристики синхронного генератора, побудовані у одній системі координат.

#### Методичні вказівки

##### До етапу 1

При ввімкненні синхронної машини на паралельну роботу необхідно забезпечити можливо менший кидок струму в момент приєднання генератора до мережі. У протилежному випадку можливе спрацювання захисту, поломка генератора чи первинного двигуна.

Струм у момент підключення генератора до мережі буде дорівнює нулю, якщо вдасться забезпечити рівність миттєвих значень напруг мережі  $u_m$  і генератора  $u_2 = u_1$  або

$$U_{mm} \sin(\omega_m t + \alpha_m) = U_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1). \quad (4.1)$$

Умова (4.1) зводиться до наступних трьох умов:

- рівність по величині напруг мережі і генератора  $U_{mm} = U_{1m}$  або  $U_m = U_1$ ;
- рівність їхніх частот  $\omega_m = \omega_1$  або  $f_m = f_1$ ;
- рівність їхніх початкових фаз  $\alpha_m = \alpha_1$ , тобто збіг по фазі векторів  $\underline{U}_m = \underline{U}_1$ .

Крім того, для трифазних генераторів необхідно погодити порядок чередування фаз.

Сукупність операцій, необхідних для підключення генератора до мережі, називається *синхронізацією*.

Паралельне ввімкнення трифазного синхронного генератора з трифазною чотирьохпровідною мережею, до якої приєднані один чи кілька працюючих трифазних синхронних генераторів виконують методом точної синхронізації або способом самосинхронізації.

**Метод точної синхронізації** передбачає наявність синхроскопа в схемі вмикання генератора. Найпростіший синхроскоп складається з трьох ламп розжарювання  $L_1, L_2, L_3$  (див. рис. 2.1). Синхроскоп дозволяє ввімкнути генератор на паралельну роботу з мережею в момент точної синхронізації.

При точній синхронізації послідовність операцій по синхронізації наступна:

1. спочатку ротор генератора розганяють первинним двигуном до номінальної синхронної частоти обертання ( $n = n_1 = \frac{60f_1}{p}$ ) в напрямку, що забезпечує необхідну послідовність фаз ЕРС обмоток, при цьому забезпечується рівність частот  $f_M = f_1$ ;
2. потім регулюємо струм у колі обмотки збудження ротора, домагаючись рівності напруг мережі і генератора ( $U_M = U_1$ );
3. по закінченні процесу синхронізації збіг по фазі напруг мережі і генератора ( $\alpha_M = \alpha_1$ ) контролюється спеціальними приладами – ламповими чи стрілочними синхроскопами.

Лампові синхроскопи застосовують для синхронізації генераторів малої потужності; звичайно їх використовують у лабораторній практиці. Цей прилад являє собою три лампочки, ввімкнені між фазами генератора і мережі. При ввімкненні їх за схемою, що зображена на рис. 2.1, на кожну лампу діє напруга  $\Delta u = u_M - u_T$  яка при  $f_M \neq f_T$  змінюється з частотою  $\Delta f = f_M - f_T$ , яка називається частотою биття (рис. 2.2). При цьому лампи будуть мигати.

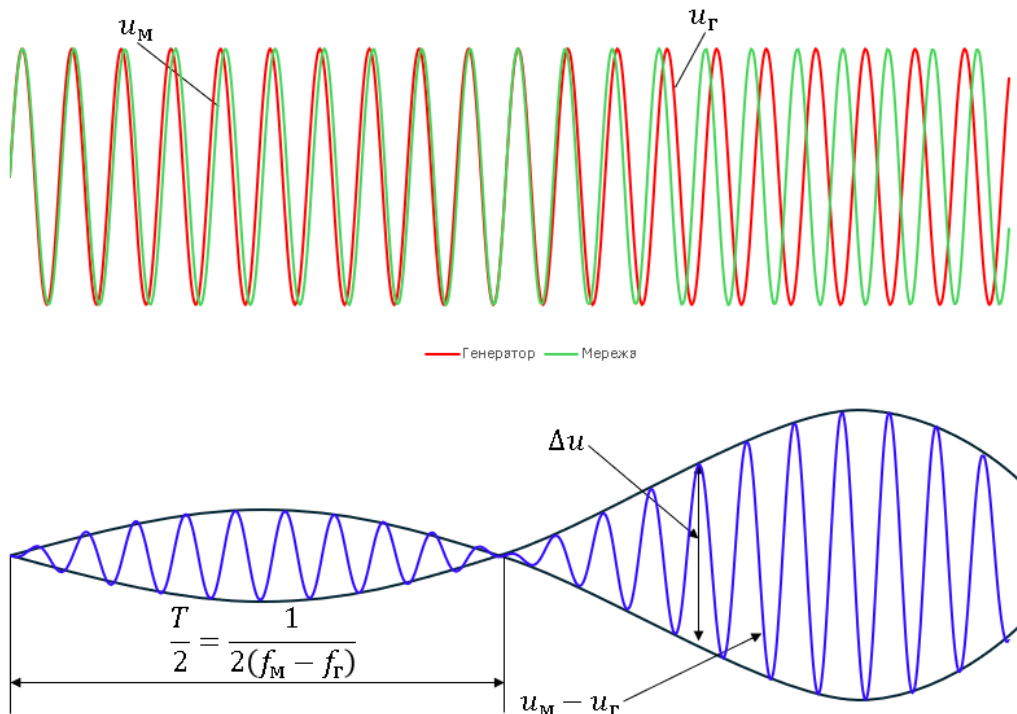


Рисунок 2.2. Криві зміни напруг мережі ( $u_M$ ) і генератора ( $u_T$ ) і зміни напруги на лампах ( $u_M - u_T$ ) синхроскопа при  $f_M \neq f_T$

При  $f_m \approx f_r$  різниця  $\Delta u$  буде змінюватися повільно, внаслідок чого лампи будуть поступово загорятися і погасати. Звичайно практично неможливо забезпечити строгу рівність частот  $f_m \approx f_r$ , тому генератор підключають до мережі в момент, коли різниця напруг  $\Delta u$  на короткий час стає близькою нулю, тобто в середині періоду загасання ламп. Для більш точного визначення цього моменту часто застосовують *нульовий вольтметр*, що має розтягнуту шкалу в області нуля. Після ввімкнення генератора в мережу подальша синхронізація частоти його обертання, тобто підтримка умов  $n = n_1$  як буде показано далі, відбувається автоматично.

Генератори великої потужності синхронізують за допомогою *стрілочних синхроскопів*, що працюють на принципі обертового магнітного поля. Стрілка синхроскопа при дотриманні умов синхронізації встановлюється на червоній рисі. При  $f_m \neq f_r$  стрілка обертається з частотою, пропорційної різниці частот  $f_m - f_r$  в одну чи іншу сторону в залежності від того, яка з цих частот більше. Якщо частоти  $f_m$  і  $f_r$  однакові, а початкові фази  $u_m$  і  $u_r$  не збігаються ( $a_m \neq a_r$ ), стрілка синхроскопа відхиляється від червоної риси на деякий кут і залишається нерухомою.

В обох випадках зміною режиму первинного двигуна домагаються повільного підходу стрілки до червоної риси і включають триполюсний автоматичний вимикач  $P$ , у результаті чого трифазний синхронний генератор виявляється ввімкненим на паралельну роботу з мережею. На електричних станціях використовують автоматичні прилади для синхронізації генераторів без участі обслуговуючого персоналу.

**Метод самосинхронізації** дозволяє ввімкнути синхронний генератор на паралельну роботу з мережею без синхроскопа. Цей метод дозволяє зробити вмикання генератора на паралельну роботу за дуже короткий час. Це особливо важливо при аваріях у мережах, коли потрібно можливо швидко вмикання на паралельну роботу резервного генератора для підтримки напруги і частоти мережі.

При самосинхронізації ротор незбудженого синхронного генератора розганяють первинним двигуном до частоти обертання, що відрізняється від синхронної не більше ніж на  $\pm 5\%$ . Потім обмотку статора приєднують до мережі працюючих генераторів, після чого в ланцюг обмотки збудження ротора подається постійний струм і цим забезпечують втягування ротора в синхронне обертання. Якщо синхронний генератор включають на паралельну роботу вперше, необхідно попередньо перевірити дотримання послідовності фаз. При самосинхронізації виникають короткочасне підвищення струму ("поштовх" струму не повинен перебільшувати 3,5 номінального значення) і відповідні йому електромагнітні моменти і сили з одночасним зниженням напруги в мережі, що швидко відновлюється до номінального значення.

При будь-якому способі синхронізації не дотримання умов (4.1) викликає аварійний режим, зв'язаний з виникненням великих струмів, не припустимих до якірних обмоток генератора і приєданого електроустаткування, а також до появи різких електромагнітних моментів і сил, небезпечних не тільки для синхронного генератора, але і для його первинного двигуна.

## Контрольні запитання

1. Що таке синхронізація генератора, що вмикається на паралельну роботу?
2. Які необхідно виконати умови для вмикання синхронного генератора на паралельну роботу?
3. Який порядок вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації?
4. Який порядок вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею методом самосинхронізації? Які переваги цього методу?
5. По яким схемах може бути виконаний ламповий синхроскоп?
6. Як характеризується струм якоря синхронного генератора при перезбудженні і недозбудженні?
7. Чим визначається границя стійкості синхронного генератора і яким образом вона проходить на  $U$ -подібних кривих?
8. Яким чином здійснюється регулювання активної та реактивної потужності, що віддається генератором до мережі?
9. Що таке синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент?
10. Що таке статична і динамічна стійкість синхронного генератора при паралельній роботі?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № ОВЕ-3

### ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З КОНДЕНСАТОРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

**Мета роботи:** Дослідити властивості трифазної асинхронної машини при роботі в автономному генераторному режимі з конденсаторним збудженням.

#### **Програма роботи**

1. Експериментальне визначення характеристики холостого ходу асинхронного генератора.
2. Визначення залежності напруги холостого ходу генератора від ємності конденсатора збудження.
3. Визначення зовнішніх характеристик генератора.
4. Визначення регулювальних характеристик генератора.
5. Аналіз властивостей автономного асинхронного генератора з конденсаторним збудженням на підставі результатів, що отримані під час лабораторного дослідження.

## Порядок виконання роботи

### Етап 1. Схема лабораторної установки

У роботі використовується трифазний асинхронний двигун з фазним ротором. Під час досліду з визначення характеристики намагнічування (дослід холодно-го ходу) виводи ротора повинні бути розімкнені, під час дослідів з визначення зовнішніх та регулювальних характеристик – замкнені.

Слід ознайомитись з паспортними даними, які наведено у таблиці закріпленій на корпусі досліджуваної асинхронної машини для режиму двигуна, та занести їх до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Паспортні дані досліджуваної асинхронної машини

З'єднання обмотки статора	Номінальна лінійна напруга	Номінальний лінійний струм	Номінальна частота	Номінальна потужність	Номінальна частота обертання	Напруга на розімкнених кільцях нерухомого ротора
–	В	А	Гц	кВт	об/хв	В

Для виконання роботи необхідно змонтувати установку відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.1. Обмотку статора асинхронної машини слід з'єднати за схемою  $\Delta$ , що відповідає номінальній лінійній напрузі 220 В.

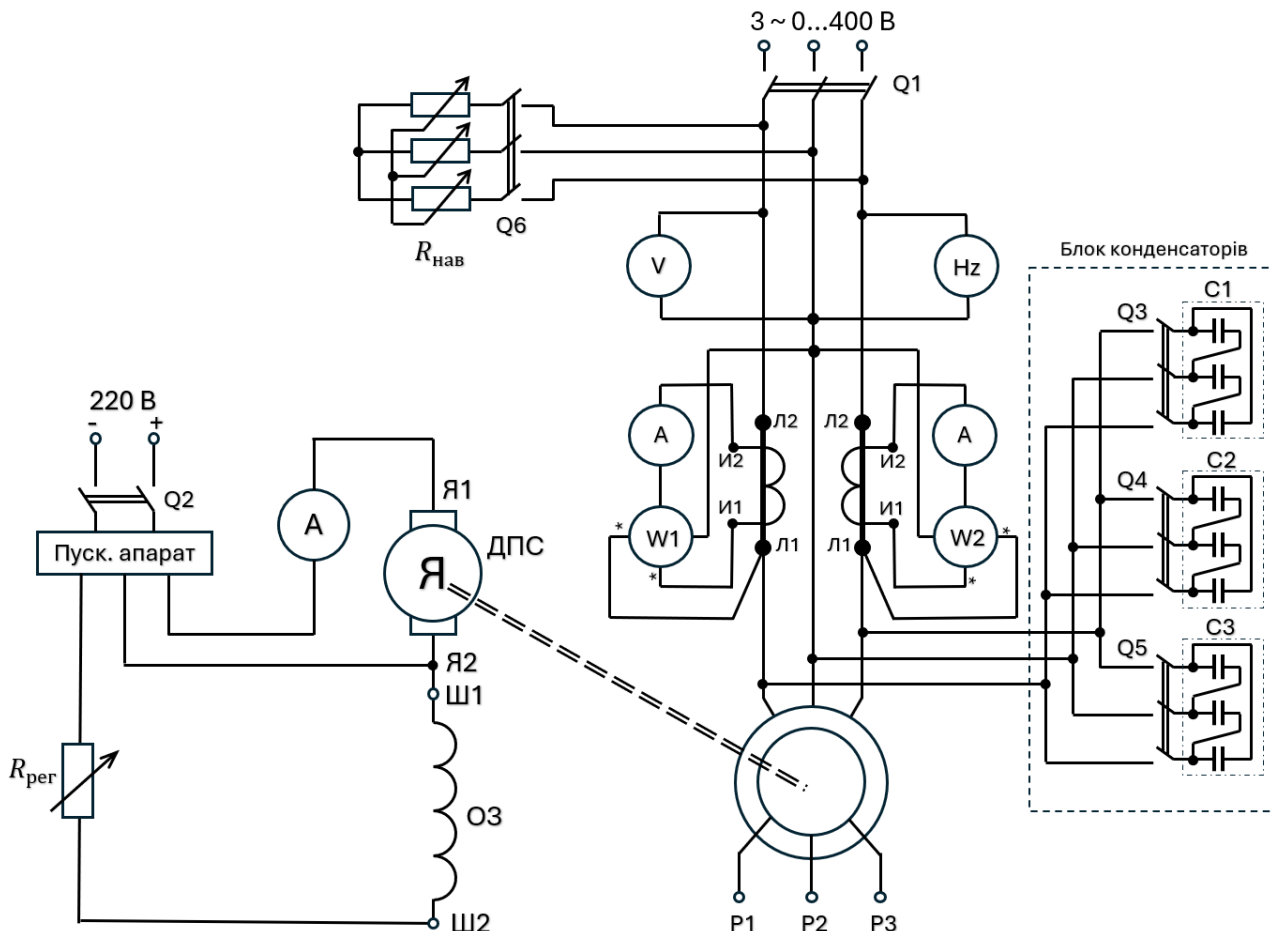


Рисунок 3.1 – Схема лабораторної установки з автономним асинхронним генератором



При експериментальному визначенні характеристики холостого ходу вимикачі  $Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$  під час цього досліді повинні бути вимкнені.

**Етап 2. Експериментальне визначення характеристики холостого ходу асинхронного генератора**

Експериментальне визначення характеристики холостого ходу  $U_0 = f(I_{\mu})$  рекомендується виконувати при живленні від джерела змінюваної змінної напруги при розімкнених виводах ротора  $P_1, P_2, P_3$ . Привідний двигун постійного струму ДПС під час цього досліді не вмикається до мережі постійного струму (вимикач  $Q_2$  – вимкнено). Напругу трифазного джерела змінної напруги слід змінювати ступенями в діапазоні  $(0.1 \dots 1.2)U_{ном}$ , враховуючи при виборі величини ступеню зміну нахилу характеристики внаслідок насичення магнітної системи машини. Отримані експериментальні значення  $U_0, I_{\mu л}, P_0$  занести у табл. 3.2. Підрахувати значення фазного струму намагнічування  $I_{\mu}$  і занести їх у відповідну колонку таблиці 3.2.

За отриманими даними побудувати графік характеристики холостого ходу  $U_0 = f(I_{\mu})$ . Графік відповідає синхронній частоті обертання машини

$$n = n_c = \frac{60f_1}{p}.$$

Таблиця 3.2

Дані досліді холостого ходу

Результати вимірювань				Розрахункові дані	
$f_1, \text{Гц}$	$U_0, \text{В}$	$P_0, \text{Вт}$	$I_{0л}, \text{А}$	$n_c, \text{об/хв}$	$I_{\mu ф}, \text{А}$
		-	0		0

Значення напруги холостого ходу при  $I_{\mu л} = 0$  слід визначити шляхом вимірювань при дослідженні зовнішньої характеристики за допомогою вольтметра з межею вимірювання 5 В при вимкнених вимикачах  $Q_3, Q_4, Q_5$ , після чого слід доповнити графік характеристики холостого ходу.

**Етап 3. Визначення напруги холостого ходу машини при конденсаторному збудженні**

У схемі установки наявні три конденсаторні батареї, з'єднані за схемою  $\Delta$  з ємностями у фазі  $C_1 = 60$  мкФ,  $C_2 = 5$  мкФ,  $C_3 = 5$  мкФ, відповідно. Використовуючи характеристику холостого ходу і вольтамперні характеристики конденсатора, визначити напругу холостого ходу автономного асинхронного генератора при ємності у фазах  $C_1 = 5; 10; 60; 65; \text{ та } 70$  мкФ. Отримані дані занести у табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Результати графоаналітичного визначення напруги холостого ходу в залежності від ємності конденсаторів

$f_1, \text{ Гц}$	Розрахункові значення $U_0, \text{ В}$ при значеннях ємності $C, \text{ мкФ}$				
	5	10	60	65	70

Побудувати графік залежності  $U_0 = f(C)$ . Визначити, за яких значень ємності машина збуджується і за яких не збуджується при частоті обертання, що дорівнює синхронній ( $n = n_{\text{с ном}}$ ) за номінальної частоти машини.

**Етап 4. Дослідження зовнішньої характеристики генератора**

Проводи, що з'єднують асинхронну машину з вимикачем  $Q_1$  повинні бути видалені, машину треба з'єднати з вимикачем  $Q_6$ .

Виконується експериментальне дослідження зовнішніх характеристик  $U = f(I)$  при  $\varphi_{\text{нав}} = \text{const}$  автономного асинхронного генератора з конденсаторним збудженням. Коло генератора відокремлене від зовнішнього джерела змінної напруги. Навантаження генератора здійснюється за допомогою рідинного релостата ( $\varphi_{\text{нав}} = 0$ ), який приєднується до кола статора за допомогою вимикача  $Q_6$ .

Дослід виконується при замкненому роторі генератора (виводи обмотки ротора  $P_1, P_2, P_3$  з'єднані перемичками), який обертається за допомогою двигуна постійного струму ДПС.

Дослідження зовнішньої характеристики генератора необхідно виконати за умов:

- 1) сталої частоти обертання ротора генератора  $n = n_{\text{с ном}} = \frac{60f_1}{p}$ ;
- 2) сталої частоти вихідної напруги  $f_{1\text{ном}} = 50$  Гц.

У першому випадку слід підтримувати сталу частоту обертання ротора  $n = n_{\text{с ном}}$ , у другому – частоту вихідної напруги  $f_1 = f_{1\text{ном}}$  на затискачах обмотки статора шляхом регулювання струму збудження привідного двигуна постійного струму ДПС. Збільшення струму навантаження генератора здійснюється шляхом

зменшення опору реостата  $R_{\text{нав}}$ . Досліди виконуються при значенні ємності конденсатора  $C$ , за якої напруга холостого ходу при номінальній частоті  $f_{1\text{НОМ}}$  є найближчою до номінальної напруги машини.

Отримані дані заносяться до табл.3.4.

За даними дослідів побудувати:

- графіки зовнішніх характеристик генератора:
  - $U = f(I_{\mu\phi})$  при  $\varphi_{\text{нав}} = \text{const}$  та  $n = n_{\text{сНОМ}} = \frac{60f_1}{p} = \text{const}$
  - $U = f(I_{\mu\phi})$  при  $\varphi_{\text{нав}} = \text{const}$  та  $f_1 = f_{1\text{НОМ}} = 50$  Гц.
- графік залежності  $f_1 = f(I_{\mu\phi})$  при  $n = n_{\text{сНОМ}} = \frac{60f_1}{p} = \text{const}$ .

Таблиця 3.4

Експериментальні дані дослідження зовнішніх характеристик автономного асинхронного генератора.

Навантаження чисто активне. Ємність конденсаторів на фазу  $C = \underline{\hspace{2cm}}$  мкФ.

$n$ , об/хв.	$f_1$ , Гц	$I_{\mu\phi}$ , А	$I_{\mu\phi}$ , А	$U$ , В
Зовнішня характеристика за умови $n = n_{\text{сНОМ}} = \text{const}$				
Зовнішня характеристика за умови $f_1 = f_{1\text{НОМ}} = \text{const}$				

### Етап 5. Дослідження регульовальної характеристики генератора

Виконується експериментальне дослідження регульовальних характеристик  $I_c = f(I_\phi)$  при  $U = \text{const}$  автономного асинхронного генератора з конденсаторним збудженням, де  $I_c$  – фазний струм конденсаторної батареї. Коло генератора відокремлено від зовнішнього джерела змінної напруги (вимикач  $Q_1$  – вимкнено). Навантаження генератора здійснюється за допомогою рідинного реостата ( $\varphi_{\text{нав}} = 0$ ), який приєднується до кола статора за допомогою вимикача  $Q_6$ .

Дослід виконується при замкненому роторі генератора (виводи обмотки ротора  $P_1, P_2, P_3$  з'єднані перемичками), який обертається за допомогою двигуна постійного струму ДПС.

Дослідження регульовальної характеристики генератора необхідно виконати за умов:

1)  $U = const$  та постійної частоти обертання ротора генератора  $n = n_{с ном} = \frac{60f_{1ном}}{p}$ ;

2)  $U = const$  та постійної частоти вихідної напруги  $f_{1ном} = 50$  Гц.

Регулювання струму конденсатора здійснюється шляхом зміни значення ємності конденсаторів батареї  $C$ . У першому випадку підтримується незмінною частота обертання ротора, у другому – частота вихідної напруги генератора.

Дані досліду занести до табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Експериментальні дані дослідження регулювальних характеристик  
Навантаження чисто активне.

U, В	n, об/хв.	f <sub>1</sub> , Гц	C, мкФ	Струм навантаження			I <sub>сл</sub> , А	I <sub>сф</sub> , А
				I <sub>нав А</sub> , А	I <sub>нав В</sub> , А	I <sub>φ</sub> = $\frac{I_{нав А} + I_{нав В}}{2\sqrt{3}}$ , А		
$U = const$ ; та $n = n_{с ном}$								
			60					
			65					
			70					
$U = const$ та $f_{1ном} = 50$ Гц.								
			60					
			65					
			70					

За даними досліду побудувати графіки регулювальних характеристик:

$$I_{сф} = f(I_{φ}) \text{ при } \varphi_{нав} = const, U = const \text{ та } n = n_{с ном} = \frac{60f_{1ном}}{p};$$

$$I_{сф} = f(I_{φ}) \text{ при } \varphi_{нав} = const, U = const \text{ та } f_1 = f_{1ном} = const.$$

### Етап 6. Аналіз властивостей автономного асинхронного генератора з конденсаторним збудженням

Проаналізувати отримані результати (відповіді надати в письмовій формі), звернувши увагу на наступне:

- Виконання умов збудження автономного асинхронного генератора;
- Вплив ємності конденсаторної батареї на збудження генератора;
- Вплив частоти обертання ротора на забезпечення умов збудження;
- Залежність вольт амперної характеристики конденсаторної батареї від частоти вихідної напруги генератора;
- Залежність значення критичної ємності конденсаторів від частоти обертання ротора;
- Причину залежності частоти напруги генератора від навантаження при незмінній частоті обертання ротора;

- Причини, що зумовлюють зміну напруги генератора при його навантаженні;
- Причини, що зумовлюють розбіжність зовнішніх характеристик генератора у випадках постійної частоти обертання ротора і постійної частоти вихідної напруги;
- Причини, що зумовлюють розбіжність регулювальних характеристик генератора у випадках постійної частоти обертання ротора і постійної частоти вихідної напруги;
- Якого вигляду зовнішні і регулювальні характеристики слід очікувати при навантаженні індуктивного та ємнісного характеру;
- Яким чином залежатиме потрібна ємність конденсатора при різному характері навантаження (активному, індуктивному або ємнісному).

### Етап 7. Складання звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані трифазної асинхронної машини яка підлягала дослідженню (табл. 3.1).
3. Схему лабораторної установки (рис. 3.1).
4. Експериментальні та розрахункові данні (табл. 3.2 – 3.5).
5. Графіки характеристик:
  - характеристика холостого ходу  $U_0 = f(I_\mu)$ ;
  - графік залежності  $U_0 = f(C)$ ;
  - графіки зовнішніх характеристик генератора:
    - $U = f(I_{\mu\phi})$  при  $\varphi_{\text{наб}} = \text{const}$  та  $n = n_{\text{с ном}} = \frac{60f_1}{p} = \text{const}$
    - $U = f(I_{\mu\phi})$  при  $\varphi_{\text{наб}} = \text{const}$  та  $f_1 = f_{1\text{ном}} = 50$  Гц.
  - графік залежності  $f_1 = f(I_{\mu\phi})$  при  $n = n_{\text{с ном}} = \frac{60f_1}{p} = \text{const}$ .
  - графіки регулювальних характеристик:
    - $I_{\text{сф}} = f(I_\phi)$  при  $\varphi_{\text{наб}} = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  та  $n = n_{\text{с ном}} = \frac{60f_{1\text{ном}}}{p}$ ;
    - $I_{\text{сф}} = f(I_\phi)$  при  $\varphi_{\text{наб}} = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  та  $f_1 = f_{1\text{ном}} = \text{const}$ .
6. Аналіз отриманих результатів у відповідності до етапу 6 (письмові відповіді на запитання).

## Методичні вказівки

### До етапу 2.

При з'єднанні обмотки статора трикутником фазний струм намагнічування може бути знайдено шляхом розрахунку за формулами:

$$I_0 = \frac{I_{0л}}{\sqrt{3}}, \quad I_{0a} = \frac{P_0}{3U_0}, \quad I_{\mu\phi} = \sqrt{I_0^2 - (I_{0a})^2}.$$

### До етапу 3.

Графік вольтамперної характеристики  $U_0 = f(C)$  конденсатора ємністю  $C$ , мкФ визначається рівнянням

$$U_c = \frac{10^6}{2\pi f_1 C} I_c.$$

Для визначення напруги холостого ходу генератора при обертанні ротора за допомогою двигуна ДПС зі швидкістю  $n = \frac{2\pi f_1}{p}$ , що відповідає частоті мережі  $f_1$ , за якої було здійснено дослід холостого ходу, при даному значенні  $C$ , необхідно до тієї ж системи координат, де побудований графік характеристики холостого ходу, додати графік вольтамперної характеристики  $U_0 = f(C)$  для заданого значення ємності і знайти напругу  $U_0$  збудженого автономного генератора, як ординату точки перетину названих характеристик.

### До етапів 4 та 5.

При експериментальному знятті зовнішньої і регульовальної характеристик асинхронного генератора треба прийняти до уваги, що швидкість обертання приводного двигуна постійного струму при навантаженні зменшується. Швидкість ДПС можна регулювати, змінюючи його струм збудження за допомогою регульовального реостату, що увімкнено до кола обмотки збудження: зменшення струму збудження ДПС викликає збільшення швидкості обертання установки, а збільшення струму збудження ДПС – навпаки її зменшення.

Зняття зовнішньої характеристики при постійній швидкості обертання ротора асинхронного генератора виконується при підтриманні швидкості у діапазоні зміни струму навантаження

$$n = n_{\text{ном}} = \frac{60f_1}{p} = \text{const},$$

що забезпечується шляхом регулювання струму збудження ДПС.

Зняття зовнішньої характеристики при постійній частоті потребує регулювання швидкості ДПС у діапазоні зміни струму навантаження, підтримуючи частоту струму генератора незмінною:

$$f_1 = f_{1\text{ном}} = \text{const.}$$

Зняття зовнішніх характеристик, як при постійній швидкості ротора, так і при постійній частоті проводиться з підтриманням постійної напруги генератора.

Першою є точка характеристики, отримана за мінімального значення ємності  $C = 60$  мкФ при холостому ході ( $I = 0$ ). Отримане в цьому режимі значення напруги генератора  $U$  слід підтримувати при подальшій зміні навантаження генератора.

Враховуючи незначну кількість ступенів зміни ємності конденсаторів, отримання потрібної напруги генератора при збільшенні струму  $I$  шляхом тільки підключення або відключення конденсаторів в даній лабораторній установці неможливо.

Рекомендується після зняття першої точки регульовальної характеристики перехід до наступної точки почати з переходу на наступну ступінь ємності конденсаторної батареї, далі збільшувати струм навантаження генератора, підтримуючи одночасно параметр, що стабілізується (швидкість ротора або частота генератора) до досягнення потрібного значення  $U$ .

### Контрольні запитання

1. Назвіть умови збудження автономного асинхронного генератора.
2. Як впливає ємність конденсаторної батареї на збудження асинхронного генератора?
3. Як впливає частота обертання ротора на забезпечення умов збудження?
4. Як впливає частота вихідної напруги генератора на вольт-амперну характеристику конденсаторної батареї?
5. Як впливає частота обертання ротора на значення критичної ємності конденсаторів?

6. Як залежить частота напруги генератора від навантаження при незмінній частоті обертання ротора?
7. Що зумовлює зміну напруги генератора при його навантаженні?
8. Вкажіть причини, що зумовлюють розбіжність зовнішніх характеристик генератора у випадках постійної частоти обертання ротора і постійної частоти вихідної напруги.
9. Чому виникає розбіжність регульовальних характеристик генератора у випадках постійної частоти обертання ротора і постійної частоти вихідної напруги?
10. Якого вигляду зовнішні і регульовальні характеристики слід очікувати при навантаженні індуктивного та ємнісного характеру?
11. Яким чином буде залежати потрібна ємність конденсатора при різному характері навантаження (активному, індуктивному або ємнісному)?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № ОВЕ-4**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З МЕРЕЖЕЮ**

**Мета роботи:** Дослідити властивості трифазної асинхронної машини при паралельній роботі з мережею.

#### **Програма роботи**

1. Проведення дослідження холостого ходу асинхронної машини з метою визначення складових втрат потужності.
2. Увімкнення трифазного асинхронного генератора на паралельну роботу з мережею.
3. Визначення робочих характеристик асинхронного генератора, що працює паралельно з мережею.
4. Аналіз властивостей асинхронного генератора при паралельній роботі з мережею на підставі результатів, що отримані під час лабораторного дослідження.



## Порядок виконання роботи

### Етап 1. Схема лабораторної установки

У роботі використовується трифазний асинхронний двигун з фазним ротором.

Слід ознайомитись з паспортними даними, які наведено у таблиці закріпленій на корпусі досліджуваної асинхронної машини для режиму двигуна, та занести їх до табл. 4.1. Значення активного опору фази статора машини, що досліджується повідомляє викладач, що проводить заняття.

Таблиця 4.1

Паспортні дані досліджуваної асинхронної машини

З'єднання обмотки статора	Номінальна лінійна напруга	Номінальний лінійний струм	Номінальна частота	Номінальна потужність	Номінальна частота обертання	Напруга на кільцях ротора під час пуску	Номінальний струм ротора	Активний опір фази статора
-	В	А	Гц	кВт	об/хв	В	А	Ом

Для виконання роботи необхідно змонтувати установку відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.1. Обмотку статора асинхронної машини слід з'єднати за схемою Δ, що відповідає номінальній лінійній напрузі 220 В.

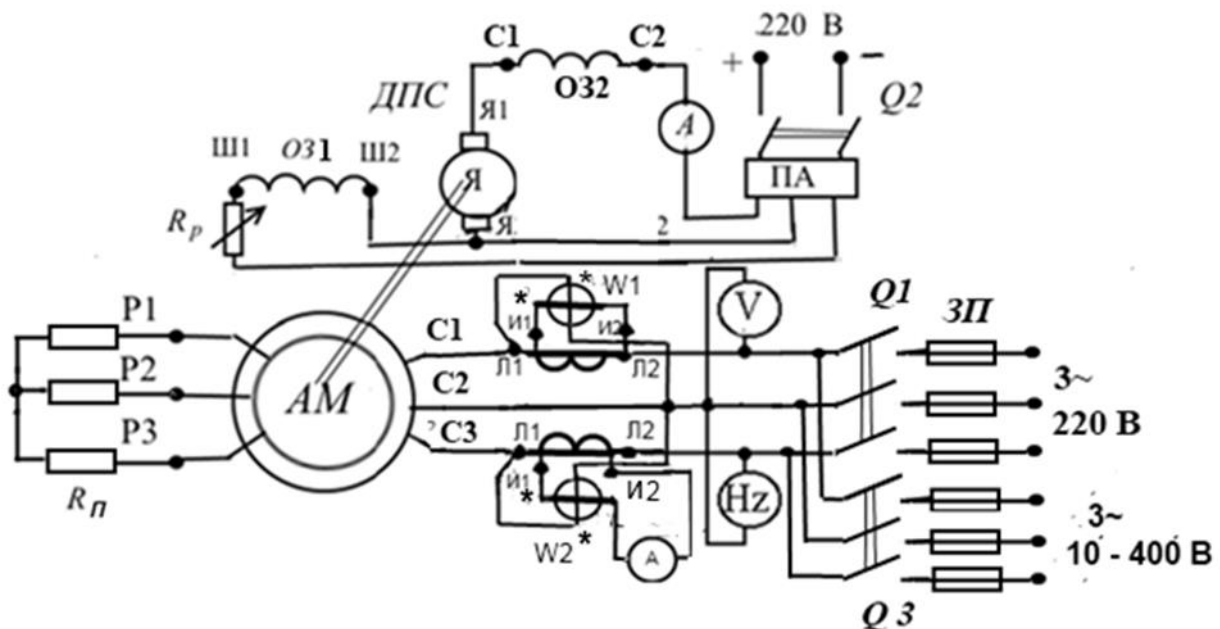


Рисунок 4.1 – Схема лабораторної установки для дослідження паралельної роботи асинхронного генератора з мережею

Перед пуском машини як асинхронного двигуна необхідно ввести пусковий реостат  $R_{\text{п}}$  у коло ротора. У процесі пуску реостат поступово виводиться до нульового значення опору. Усі виміри під час дослідів виконуються при повністю виведеному пусковому реостаті.

Зверніть увагу на схему підключення ватметрів. Така схема є схемою двох ватметрів, що використовується для виміру активної потужності у трифазних мережах. Генераторні затискачі на рис. 4.1 розташовані зі сторони асинхронної машини. Тому вимірювана потужність, яка визначається як сума показань ватметрів (з урахуванням коефіцієнта трансформації трансформаторів стуму  $k = 10$ ) буде позитивною, коли активна потужність передається від асинхронної машини у напрямі зовнішньої мережі змінного струму, і від'ємною, коли активна потужність споживається цією машиною з мережі.

## Етап 2. Проведення дослідів холостого ходу асинхронної машини

Дослід виконується при декількох значеннях напруги у межах 100...230 В з метою визначення втрат холостого ходу  $P_0$  та їх складових – магнітних втрат  $\Delta p_{\text{мг}}$  та суми механічних і додаткових втрат  $\Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}}$ , які у подальшому використовуються при знаходженні механічної потужності машини у генераторному режимі.

Для проведення дослідів холостого ходу живлення машини здійснюється від джерела регульованої напруги, для чого при вимкнених вимикачах  $Q_1, Q_2, Q_3$ , у лінію зі змінною напругою 10...400 В, встановлюється мінімальне значення напруги живлення  $U_1$  близько 100 В. Реостат  $R_{\text{п}}$  встановлюється у пускове положення, вмикається вимикач  $Q_3$ , і здійснюється пуск машини як двигуна з виведенням пускового реостату до нульового значення опору (положення "повний хід").

Після цього вимірюються величини: напруга  $U_1$ , потужність холостого ходу двигуна  $P_0$ , частота обертання  $n_0$  і частота напруги живлення  $f_1$ . Такі ж виміри здійснюються за інших значень  $U_1$ . Результати вимірювань заносяться до табл. 4.2.

Після проведення дослідів холостого ходу вмикається вимикач  $Q_3$  та видаляються запобіжники у лінії живлення 10...400 В.

За даними вимірів (табл. 4.2) підраховуються значення  $U_1^2$ , які заносяться у частину розрахункових величин цієї ж таблиці.

Будується у масштабі графік залежності  $P_0 = f(U_1^2)$ , який у вибраному діапазоні значень напруги є прямою лінією. Ця пряма продовжується до перетинання з віссю  $P_0$ , ця точка визначає значення  $\Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}} = \text{const}$ , а різниця

$$P_0 - (\Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}}) = \Delta p_{\text{мг}}.$$

Дані дослідження холостого ходу

Результати вимірів				Обчислено	Визначено графічно	
$U_1$	$f_1$	$P_0$	$n_0$	$U_1^2$	$\Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}}$	$\Delta p_{\text{мг}}$
В	Гц	Вт	Об/хв.	В <sup>2</sup>	Вт	Вт
100						
230						

Отримані значення  $\Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}}$  і  $\Delta p_{\text{мг}}$  також заносяться до табл. 4.2. Вони використовуються у подальшому при визначенні коефіцієнта корисної дії (ККД) генератора.

### Етап 3. Увімкнення трифазного асинхронного генератора на паралельну роботу з мережею

Перед увімкненням асинхронного генератора на паралельну роботу з мережею необхідно упевнитись, що послідовність фаз збудженого від мережі асинхронного генератора співпадатиме з послідовністю фаз мережі, до якої він буде приєднаний. Для цього необхідно, щоб ротор асинхронної машини обертався в тому ж самому напрямі як при пуску її як двигуна при живленні від трифазної мережі, до якої він у подальшому буде приєднаний для паралельної роботи, при відключеному привідному двигуні, так і під дією привідного двигуна, будучи від'єднаний від мережі.

Якщо цю умову виконано, слід при вимкненому вимикачі  $Q_1$  і виведеному пусковому реостаті  $R_{\text{п}}$  запустити привідний двигун і довести частоту обертання асинхронної машини до значення, що не більш як на 3...4 % у ту чи іншу сторону відрізняється від синхронної частоти обертання, яка відповідає частоті трифазної мережі. Після цього асинхронну машину можна увімкнути на паралельну роботу з мережею за допомогою вимикача  $Q_1$ . Під час дослідження пусковий реостат повинен залишатись виведеним

Увімкнення асинхронної машини на паралельну роботу за швидкості обертання ротора, близької до синхронної, викликає значний кидок струму при увімкненні  $Q_1$ , що запобігає знешкодженню вимірювальних приладів.

Принципово увімкнення на паралельну роботу можливе за будь-якої швидкості обертання ротора, але за значної її відміни від синхронної увімкнення  $Q_1$

супроводжуватиметься кидком струму, величина якого залежить від вказаної відміни швидкостей. Так, якщо увімкнення  $Q_1$  здійснити за нерухомого стану ротора, кидок струму дорівнюватиме пусковому струму двигуна.

Після увімкнення асинхронної машини до мережі вона опиниться у режимі генератора або двигуна, залежно від того, більшою чи меншою є її швидкість відносно синхронної швидкості. Відповідно привідна машина постійного струму буде працювати у режимі двигуна або генератора.

Перед початком дослідження паралельної роботи асинхронного генератора з мережею слід перевести асинхронну машину до режиму ідеального (синхронного) холостого ходу, змінюючи момент привідного двигуна за допомогою реостату  $R_p$ . У цьому випадку машина постійного струму працюватиме у режимі двигуна, розвиваючи незначний момент, потрібний для компенсації втрат холостого ходу установки.

Збільшення моменту привідного двигуна шляхом збільшення опору реостата  $R_p$  призведе до переведення асинхронної машини у режим генератора і навантаження з віддачею електричної енергії до мережі змінного струму, машина постійного струму буде працювати у режимі двигуна, споживаючи електричну енергію з мережі постійного струму. При цьому швидкість обертання ротора асинхронної машини буде перевищувати синхронну. Сума показань ватметрів у колі статора асинхронного двигуна буде позитивною, струм у внутрішньому колі машини постійного струму матиме напрям від затискача "+" до затискача "-".

Якщо змінити напрям дії моменту машини постійного струму шляхом зменшення опору реостата  $R_p$ , асинхронна машина перейде у режим двигуна, а машина постійного струму – у режим генератора, напрям обертання ротора не зміниться, але його швидкість стане меншою за синхронну. Сума показань ватметрів у колі статора асинхронного двигуна стане негативною, а струм у внутрішньому колі машини постійного струму змінить напрям на протилежний.

Частота струму у колі статора асинхронної машини при паралельній роботі з мережею у будь-якому режимі залишається рівню частоті мережі:  $f_1 = f_m$ , а лінійна напруга  $U_{1л}$  – напрузі у мережі.

Частота струму ротора залежить від навантаження асинхронної машини:  $f_2 = f_1 s = f_m s$ . В режимі генератора ковзання має від'ємне значення. Від'ємне значення  $f_2$  свідчить про зміну фаз ЕРС і струму ротора на протилежні відносно їх фаз у режимі двигуна, у якому значення  $s$  позитивне.

Подальше дослідження виконується при роботі асинхронної машини у режимі генератора.

**Етап 4. Визначення робочих характеристик асинхронного генератора,  
що працює паралельно з мережею**

У якості робочих характеристик генератора, що працює паралельно з мережею, розглядаються залежності  $M$ ,  $P_2$ ,  $\eta$ ,  $n_2$ ,  $s$ ,  $f_2$  як функції  $P_1$ , де  $M$  і  $P_2$  – момент і потужність на валу генератора,  $\eta$  – ККД генератора,  $n_2$  – частота обертання ротора,  $s$  – ковзання,  $f_2$  – частота ЕРС і струму ротора,  $P_1$  – активна потужність, що віддається генератором у мережу.

Після увімкнення асинхронної машини на паралельну роботу і переведення її у режим ідеального (синхронного) холостого ходу необхідно здійснити і розрахунки виміри величин, необхідні для побудови графіків робочих характеристик асинхронного генератора, що працює паралельно з мережею. Навантаження асинхронного генератора здійснюється шляхом збільшення моменту утвореного на валу привідним двигуном, який діє у напрямку обертання ротора генератора. Дані вимірів та розрахунків слід внести до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Дані дослідження робочих характеристик

№	Дані вимірювань					Результати обчислювання					
	$f_1$ , Гц	$U_{1л}$ , В	$I_{1л}$ , А	$P_1$ , Вт	$n_2$ , об/хв.	$M$ , Н·м	$P_2$ , Вт	$I_1$ , А	$s$ , –	$f_2$ , Гц	$\eta$ , %
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

Перший рядок табл. 4.3 визначається для режиму синхронного холостого ходу.

Під час досліду слід контролювати значення струмів статора асинхронної машини і привідного двигуна постійного струму, не допускаючи їх перевантаження.

За даними табл. 4.3 побудувати графіки робочих характеристик, Щоб запобігти нагромадження кривих, рекомендується розподілити графіки робочих характеристик на дві координатні системи:  $n, s, f_2 = f(P_1)$  та  $I_1, M_2, P_2, \eta = f(P_1)$ .

## Етап 5. Аналіз властивостей асинхронного генератора при паралельній роботі з мережею

Проаналізувати отримані результати, звернувши увагу на наступне:

- Виконання умов увімкнення асинхронного генератора на паралельну роботу з мережею;
- Спосіб переведення асинхронної машини у різні режими – генератора або двигуна – після увімкнення на паралельну роботу;
- На змінення частоти обертання ротора генератора при його навантаженні;
- Різницю у значеннях ковзання при роботі у режимах генератора і двигуна;
- Різний напрямок передачі енергії у асинхронній машині у режимах генератора і двигуна;
- Яким чином можна під час досліду визначити режим роботи асинхронної машини при паралельній роботі з мережею;
- За яких умов не порушується стабільність роботи генератора.

### Етап 5. Складання звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані трифазної асинхронної машини яка підлягала дослідженню (табл. 4.1).
3. Схему лабораторної установки (рис. 4.1).
4. Експериментальні та розрахункові данні (табл. 4.2 та 4.3).
5. Графічне визначення втрат холостого ходу асинхронної машини.
6. Графіки робочих характеристик.
7. Аналіз отриманих результатів у відповідності до етапу 5 (письмові відповіді на запитання).

### **Методичні вказівки**

Енергетичну діаграму активної потужності асинхронного генератора, що працює паралельно з мережею, наведено на рис. 4.2.

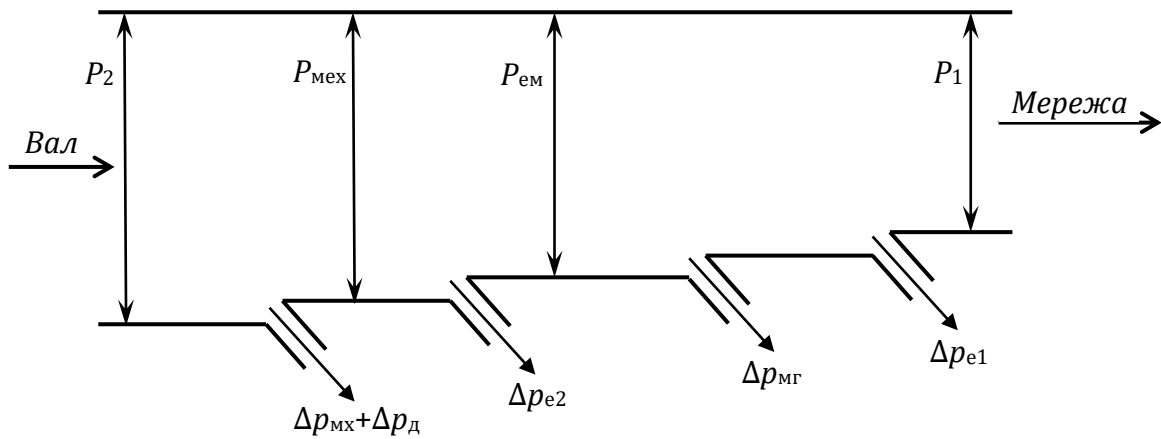


Рисунок 4.2 – Енергетична діаграма активної потужності асинхронного генератора

Враховуючи, що електричні втрати в обмотці статора можуть бути визначені за виразом

$$\Delta p_{e1} = 3I_1^2 R_1,$$

магнітні втрати  $\Delta p_{мг}$  та втрати  $\Delta p_{мех} + \Delta p_{д}$  визначено за даними досліду холостого ходу, а значення  $P_1$  і  $s$  - за результатами дослідження паралельної роботи асинхронного генератора з мережею, потужність на валу генератора  $P_2$  визначається за виразом:

$$P_2 = P_{ем}(1 - s) + (\Delta p_{мех} + \Delta p_{д}) = (P_1 + \Delta p_{e1} + \Delta p_{мг})(1 - s) + (\Delta p_{мех} + \Delta p_{д}) > P_1.$$

Слід прийняти до уваги, що ковзання у режимі генератора є від'ємна величина:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\frac{60f_1}{p} - n}{\frac{60f_1}{p}} = \left(1 - \frac{pn}{60f_1}\right) < 0.$$

Коефіцієнт корисної дії генератора визначається як:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100, \%$$

Момент на валу генератора

$$M_2 = \frac{P_2}{n}.$$

Співвідношення між фазним і лінійним струмом та між фазною і лінійною напругою статора трифазного генератора у разі симетрії залежить від способу з'єднання його обмоток:

- При з'єднанні за схемою **трикутника**  $U_1 = U_{1л}$ ,  $I_1 = \frac{I_{1л}}{\sqrt{3}}$ .
- При з'єднанні за схемою **зірки**  $U_1 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}}$ ,  $I_1 = I_{1л}$ .

Частота ЕРС і струму ротора асинхронного генератора, що обертається з ковзанням  $s$ :

$$f_2 = f_1[s], f_1 = f_m.$$

### Контрольні запитання

1. Умови ввімкнення асинхронного генератора на паралельну роботу з мережею;
2. Способи переведення асинхронної машини у різні режими – генератора або двигуна – після ввімкнення на паралельну роботу;
3. Як змінюється частота обертання ротора генератора при його навантаженні;
4. В чом полягає різниця у значеннях ковзання при роботі у режимах генератора і двигуна;
5. Який напрямок передачі енергії у асинхронній машині у режимах генератора і двигуна;
6. Яким чином можна під час досліду визначити режим роботи асинхронної машини при паралельній роботі з мережею;
7. За яких умов не порушується стабільність роботи генератора.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № ОВЕ-5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

**Мета роботи.** Вивчити конструкцію генератора постійного струму та одержати експериментальні дані для побудови його характеристик.



## Програма роботи

1. Вивчення конструкції генератора постійного струму.
2. Ознайомлення з експериментальною установкою, складання схеми та її випробування.
3. Експериментальне дослідження характеристики неробочого ходу генератора.
4. Експериментальне дослідження зовнішньої характеристики генератора.
5. Експериментальне дослідження регульовальної характеристики генератора.
6. Обробка даних.
7. Складання звіту.

## Послідовність виконання роботи

### Етап 1. Вивчення конструкції генератора постійного струму

1.1. Користуючись навчальною літературою та наочним приладдям, вивчити конструкцію генератора постійного струму, будову його елементів (статора, якоря, обмоток збудження, обмотки якоря, колектора, струмознімального пристрою та інших елементів машини постійного струму) і їх призначення.

1.2. Заводські дані генератора, що досліджується, та приводного двигуна записати у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Номінальні дані електричних машин. Робоче місце № \_\_\_\_\_

Генератор постійного струму						
Тип генератора	$P_{\text{ном.г.}}$ кВт	$U_{\text{ном.г.}}$ В	$I_{\text{ном.г.}}$ А	$n_{\text{ном.г.}}$ об/хв	$I_{\text{зб.ном.}}$ А	$\eta_{\text{ном.г.}}$ %
Асинхронний двигун						
Тип двигуна	$P_{\text{ном.д.}}$ кВт	$U_{\text{ном.д.}}$ В	$I_{\text{ном.д.}}$ А	$n_{\text{ном.д.}}$ об/хв	$\eta_{\text{ном.д.}}$ %	$\cos \varphi_{\text{ном.}}$ В.О.

### Етап 2. Ознайомлення з експериментальною установкою, складання схеми та її випробування

2.1. Експериментальне дослідження генератора постійного струму паралельного збудження виконують на стенді, схема якого наведена на рис. 5.1, де відповідною машиною для генератора Г є трифазний асинхронний двигун М з фазним ротором (схема вмикання обмотки статора вибирається відповідно до напруги живлення та номінальної напруги двигуна). Пуск асинхронного двигуна здійснюється за допомогою пускового реостата. На початку пуску рукоятка пускового

реостата розташовується в положенні "ПУСК", а після закінчення пуску реостат повинен бути повністю вимкнено і рукоятка переміститися у положення "ПОВНИЙ". У колах генератора встановлені прилади, за допомогою яких вимірюють напругу на затискачах генератора (вольтметр  $V_2$ ), струм навантаження (амперметр  $A_2$ ) і струм збудження (амперметр  $A_3$ ). Регулювальний реостат  $R_{\text{рег}}$  служить для зміни струму збудження, однополюсний вимикач  $B_2$  – для розриву кола обмотки збудження. Навантаження генератора здійснюється за допомогою реостата навантаження  $R_{\text{нав}}$ .

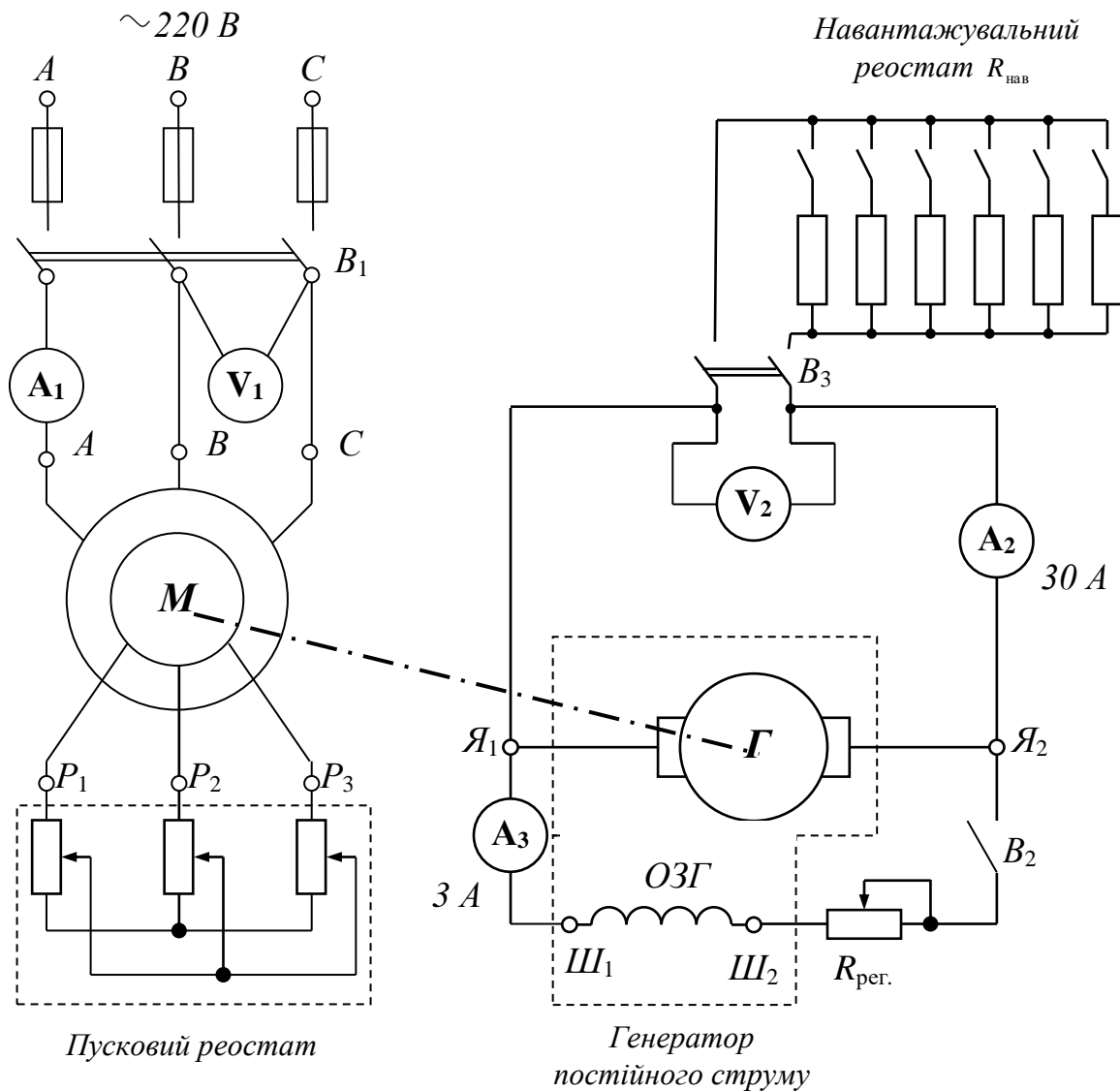


Рисунок 5.1 – Схема установки для дослідження генератора постійного струму

2.2. Зібрати схему згідно рис. з 5.1, де  $\Gamma$  – генератор, що досліджується;  $\text{Ш}_1$ ,  $\text{Ш}_2$  – виводи обмотки збудження генератора;  $\text{Я}_1$ ,  $\text{Я}_2$  – виводи обмотки якоря генератора;  $\text{M}$  – привідний асинхронний двигун;  $\text{A}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{C}$  – виводи асинхронного двигуна;  $\text{P}_1$ ,  $\text{P}_2$ ,  $\text{P}_3$  – виводи регулювального реостата. Вимкнути всі вимикачі.

2.3. Після перевірки схеми викладачем, виконати пробний пуск установки, увімкнувши вимикачі  $B_1$  і  $B_2$ . Перевірити відповідність напрямку обертання приводного двигуна і правильність приєднання вимірювальних приладів. Якщо збудження генератора не відбулося, то вжити відповідні заходи, згідно з рекомендаціями, поданими в методичних вказівках до етапу 1.

### Етап 3. Експериментальне дослідження характеристики неробочого ходу

Характеристика неробочого ходу генератора паралельного збудження – це залежність ЕРС якоря генератора від струму збудження при сталій частоті обертання та за відсутності навантаження:

$$E = U_0 = f(I_{зб}) \text{ при } n = const, I_{нав} = 0.$$

Дослідження характеристики неробочого ходу генератора паралельного збудження проводиться у такому порядку:

3.1. Встановити за допомогою реостата  $R_{рег}$  струм збудження в обмотці збудження генератора постійного струму мінімальним і вимкнути вимикач  $B_2$ . Зняти дані першої точки характеристики неробочого ходу та записати значення струму збудження ( $I_{зб} = 0$  А) і відповідне йому значення ЕРС, обумовлене залишковим намагніченням головних полюсів, у табл. 5.2.

3.2. Увімкнути вимикач  $B_2$  і, переміщуючи ручку регульовального реостата  $R_{рег}$  в одному напрямі (для збільшення струму збудження), довести напругу генератора до величини  $1,2U_{ном}$ , записуючи показання приладів – вольтметра і амперметра  $A_2$  – у табл. 5.2. Зняти дані 6 точок. Останню точку зняти при відключеному вимикачеві  $B_2$ :  $I_{зб} = 0$  А,  $U = E_{зал} = \dots$  В.

Таблиця 5.2

Характеристика неробочого ходу генератора постійного струму

$$U_0 = f(I_{зб}) \text{ при } n = const, I_a = 0$$

Характеристика неробочого ходу генератора							
$I_{зб}, \text{ А}$	0						
$U_0, \text{ В}$							

### Етап 4. Експериментальне дослідження зовнішньої характеристики

Зовнішня характеристика генератора – це залежність напруги на затискачах генератора від струму навантаження при сталій частоті обертання та незмінному опорі у колі збудження:

$$U = f(I_{нав}) \text{ при } n = const, R_{рег} = const.$$

Зовнішню характеристику генератора знімати при збільшеному навантаженні генератора (при зменшенні опорі навантаження (за законом Ома), струм навантаження зростає).

Увімкнути вимикач  $B_2$  та встановити напругу на затискачах генератора на рівні  $U = 1.2U_{\text{ном}}$ . Дані першої точки характеристики зняти при неробочому ході:  $U = 1.2U_{\text{ном}}$ ,  $I_{\text{наб}} = 0$  А. Надалі регульовальний реостат  $R_{\text{рег}}$  не використовувати. Подати напругу на вимикач  $B_3$  і поступово, увімкнувши ступені навантажувального реостата  $R_{\text{наб}}$ , збільшувати струм навантаження (не більше номінального струму якоря генератора  $I \leq I_{\text{наб.г}}$ ). Зняти дані 5 – 6 точок характеристики і записати у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Зовнішня характеристика генератора постійного струму  
 $U = f(I_{\text{наб}})$  при  $n = \text{const}$ ,  $R_{\text{рег}} = \text{const}$

$I, A$	0						
$U, B$							

Після закінчення вимірювань поступово зняти навантаження та вимкнути вимикачі  $B_3$  та  $B_1$ .

Етап 5. Експериментальне дослідження регульовальної характеристики

Регульовальна характеристика – це залежність струму збудження  $I_{36}$  від струму навантаження  $I_{\text{наб}}$  при сталих значеннях частоти обертання і напруги генератора, тобто

$$I_{36} = f(I_{\text{наб}}) \text{ при } U = \text{const}, n = \text{const}.$$

Установити напругу на затискачах генератора в режимі неробочого ходу (вимикач  $B_2$  – увімкнено,  $B_3$  – вимкнено) на рівні  $U = U_{\text{ном}}$ . При струмі навантаження  $I_{\text{наб}} = 0$  визначити струм збудження генератора.

Увімкнути навантаження (увімкнути вимикач  $B_3$ ) і поступово, увімкнути ступені реостата навантаження  $R_{\text{наб}}$  збільшувати струм (не більше номінального струму якоря генератора  $I \leq I_{\text{наб.г}}$ ). При цьому за допомогою регульовального реостата  $R_{\text{рег}}$  підтримувати напругу на затискачах генератора на рівні номінальної. Зняти дані 5 – 6 точок характеристики і записати в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Регульовальна характеристика генератора постійного струму  
 $I_{36} = f(I_{\text{наб}})$  при  $n = \text{const}$ ,  $U = \text{const} = \text{---} B$

$I_{36}, A$							
$I_{\text{наб}}, A$	0						

Після закінчення вимірювань поступово зняти навантаження, при цьому необхідно стежити, щоб напруга на затискачах генератора не перевищувала значення  $U = 1.2U_{\text{ном}}$ .

Після дослідження характеристик вимкнути всі вимикачі, ознайомити викладача з результатами вимірювань, зняти запобіжники і дочекатись повної зупинки вала машини, розібрати схему.

### Етап 6. Обробка даних

За даними вимірювань (табл. 5.2 - 5.4) побудувати характеристики неробочого ходу  $U_0 = f(I_{зб})$ , зовнішню  $U = f(I_{нав})$  і регульовальну  $I_{зб} = f(I_{нав})$ .

Визначити за графіком значення номінального струму збудження, при якому в неробочому режимі напруга на затискачах генератора дорівнює номінальній (характеристика неробочого ходу).

### Етап 7. Складання звіту

Звіт з даної лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву роботи, її мету та програму.
1. Номінальні дані генератора постійного струму та привідного двигуна (заповнена табл. 5.1).
2. Схему установки для дослідження генератора постійного струму (рис. 5.1).
3. Дані для побудови характеристики неробочого ходу (табл. 5.2).
4. Дані для побудови зовнішньої характеристики (табл. 5.3).
5. Дані для побудови регульовальної характеристики (табл. 5.4).
6. Графіки характеристики неробочого ходу  $U_0 = f(I_{зб})$  – за табл. 5.2, зовнішньої характеристики  $U = f(I_{нав})$  – за табл. 5.3, регульовальної характеристики  $I_{зб} = f(I_{нав})$  – за табл. 5.4.

## **Методичні вказівки**

### До етапу 1

Генератор постійного струму складається з нерухомої частини – *статора (індуктора)* і частини, що обертається – *якоря*.

Статор має станину у вигляді сталюого циліндра, на внутрішній поверхні якого укріплено парне число головних полюсів. Головний полюс складається з осердя, що набирається з ізольованих листів електротехнічної сталі, і полюсної котушки. Котушки з'єднуються між собою так, щоб полярність полюсів чергувалася. Вони утворюють обмотку збудження. Якщо обмотка збудження живиться від стороннього джерела постійного струму, генератор називають *генератором незалежного збудження*. Якщо обмотка збудження живиться від якоря цього ж генератора, він називається *генератором із самозбудженням*.

Якір складається з магнітопроводу, що набирається з листів електротехнічної сталі, з пазами на зовнішній поверхні. У пази магнітопроводу якоря укладається обмотка, що складається з секцій, приєднаних до пластин колекторів, з

якими контактує система струмопровідних щіток. Щітки з'єднуються із затискачами якоря  $Я_1$  і  $Я_2$ . Більшість машин постійного струму має дві обмотки збудження – паралельну і послідовну. Перша з'єднується паралельно з колом якоря та має велике число витків. Її виводи позначаються  $Ш_1$  і  $Ш_2$ . Обмотка збудження з малою кількістю витків з'єднується послідовно з колом якоря. Її виводи позначаються  $С_1$  і  $С_2$ . Генератори з обмоткою збудження першого типу називають *генераторами паралельного збудження*, а з обмоткою збудження другого типу – *генераторами послідовного збудження*. Генератори змішаного збудження мають дві обмотки: паралельну і послідовну, які використовуються одночасно.

Для компенсації поперечної реакції якоря і поліпшення умов комутації в машинах постійного струму між головними полюсами розміщують додаткові полюси. Число цих полюсів дорівнює числу головних полюсів, і лише в двополюсних машинах малої потужності є один додатковий полюс. Обмотки додаткових полюсів мають невелике число витків, малий опір, виводи їх позначають  $Д_1$  і  $Д_2$ .

При обертанні якоря в нерухомому магнітному полі машини в обмотках якоря наводиться змінна ЕРС, яка за допомогою колектора і системи струмопровідних щіток перетворюється в ЕРС постійної напруги:

$$E = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi,$$

де  $p$  – число пар головних полюсів машини;  $n$  – частота обертання якоря, об/хв.;  $N$  – число активних провідників якоря;  $a$  – число паралельних гілок обмотки якоря;  $\Phi$  – магнітний потік одного головного полюса, Вб.

Для певного генератора формулу ЕРС можна записати так:

$$E = C_e n \Phi,$$

де  $C_e = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a}$  – для даної машини є деякою постійною величиною.

Генератор постійного струму з паралельним збудженням відноситься до машин, в яких використовується явище самозбудження.

При пуску генератора спочатку струм в якорі, а отже і в обмотці збудження відсутній, а в осерді головних полюсів завжди зберігається невеликий потік залишкового магнетизму ( $\Phi_{зал}$ ), який складає 1-3 % номінального потоку машини. Він залишається як наслідок намагнічування машини, що мало місце раніше при її роботі.

При обертанні якоря генератора в його обмотці потоком  $\Phi_{зал}$  індукується спочатку невелика ЕРС –  $E_{зал}$ . Ця ЕРС створює деякий струм в обмотці збудження  $I_{зб}$ . По відношенню до  $\Phi_{зал}$  він може бути направлений згідно або зустрічно, тобто підмагнічувати або розмагнічувати машину. Для самозбудження необхідна погоджена дія обмотки збудження із залишковим потоком  $\Phi_{зал}$ , при цьому МРС обмотки збудження, підсилює магнітне поле машини, а останнє, в свою чергу індукує більшу ЕРС в обмотці якоря тощо. При цьому процес самозбудження протікатиме доти, доки падіння напруги в обмотці збудження ( $U_{зб} = I_{зб} R_{зб}$ ) не зрівняється з ЕРС генератора.

При збільшенні опору кола обмотки збудження напруга генератора змен-

шується. При деякому великому опорі кола збудження, що називається критичним, машина не збуджується.

Через похибки вимірювання може мати місце розкидання точок експериментальних спостережень. Невірно є побудова характеристики шляхом з'єднання точок ломаною лінією.

На рис. 5.2 як приклад показана побудова регулювальної характеристики генератора.

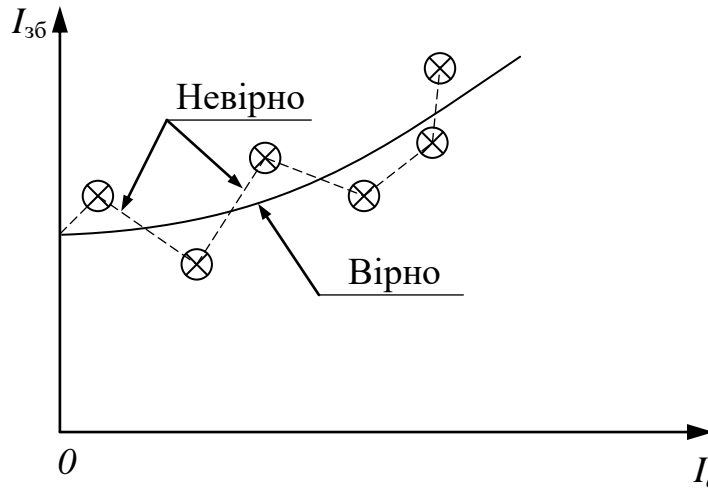


Рис. 5.2. Побудова регулювальної характеристики генератора

### До етапу 3

Характеристика неробочого ходу генератора паралельного збудження – це залежність ЕРС якоря генератора від струму збудження при сталій частоті обертання та за відсутності навантаження:

$$E = U_0 = f(I_{зб}) \text{ при } n = const, I_{нав} = 0.$$

При сталій частоті обертання величина ЕРС якоря генератора ( $E = C_e \Phi n$ ) пропорційна магнітному потоку, тому характеристика неробочого ходу генератора є характеристикою намагнічування машини (рис. 5.3).

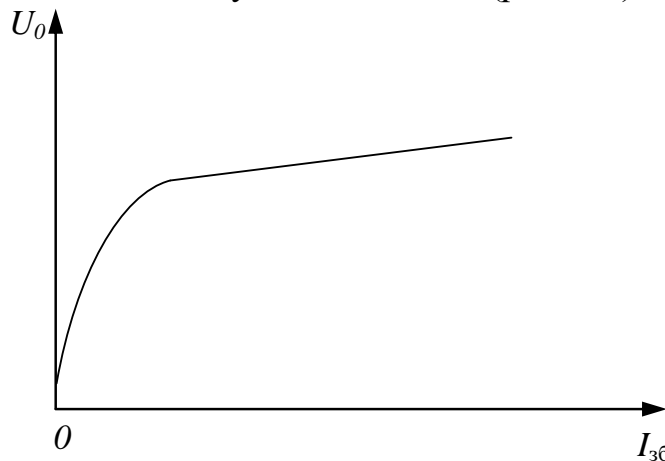


Рис. 5.3. Характеристика неробочого ходу генератора паралельного збудження

#### До етапу 4

Зовнішня характеристика генератора – це залежність напруги на затискачах генератора від струму навантаження при сталій частоті обертання та незмінному опорі у колі збудження:

$$U = f(I_{\text{нав}}) \text{ при } n = \text{const}, R_{\text{пер}} = \text{const}.$$

Зменшення напруги в генераторі паралельного збудження при знятті зовнішньої характеристики викликано трьома причинами:

1. Падінням напруги в колі якоря.
2. Зменшенням магнітного потоку через розмагнічувальну дію поперечної реакції якоря.
3. Зменшенням струму збудження через зниження напруги на затискачах обмотки збудження генератора:

$$I_{\text{зб}} \downarrow = \frac{U \downarrow}{R_{\text{зб}} + R_{\text{пер}}}, R_{\text{зб}} + R_{\text{пер}} = \text{const}.$$

При поступовому зменшенні опору зовнішнього кола струм навантаження збільшується тільки до деякого значення, що називається критичним струмом  $I_{\text{кр}}$  (рис. 5.4).

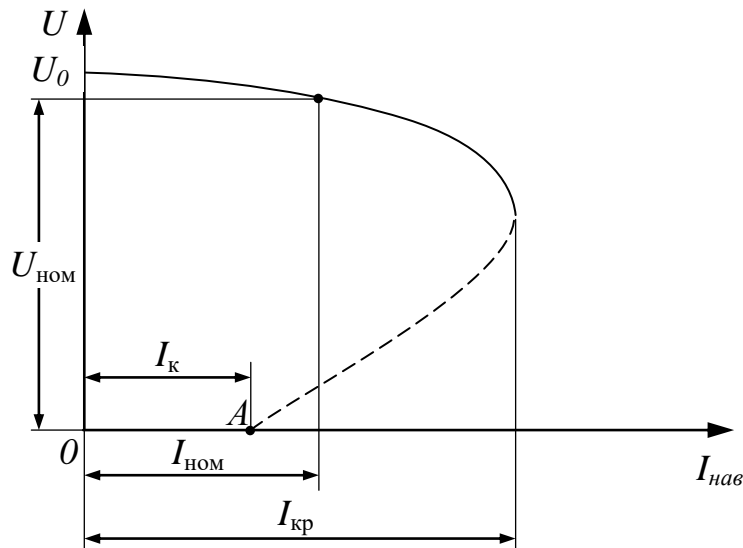


Рис. 5.4. Зовнішня характеристика генератора постійного струму

Цей струм звичайно не перевищує номінальний струм більш ніж у 2...2,5 рази. Подальше зменшення опору навантаження виводить генератор із стійкого режиму роботи. Він розмагнічується і напруга знижується до нуля. Коли опір зовнішнього кола дорівнює нулю, це означає, що генератор замкнутий накоротко (точка A).

#### До етапу 5

Регульовальна характеристика (рис. 5.2) – це залежність струму збудження  $I_{\text{зб}}$  від струму навантаження  $I_{\text{нав}}$  при сталих значеннях частоти обертання і напруги генератора:

$$I_{\text{зб}} = f(I_{\text{нав}}) \text{ при } U = \text{const}, n = \text{const}.$$



Регулювальна характеристика показує, як потрібно регулювати струм збудження, щоб при зміні струму навантаження підтримувати постійну напругу на затискачах генератора.

Для підтримки напруги постійною при зростанні навантаження, струм збудження необхідно збільшувати, з тим щоб компенсувати падіння напруги і розмагнічувальну дію поперечної реакції якоря, яка збільшується із зростанням навантаження.

### **Контрольні питання**

4. Які існують способи збудження генераторів постійного струму? Наведіть схеми вмикання.

5. Яку будову має генератор постійного струму паралельного збудження? Призначення та конструкція його головних елементів (якоря, ярма, колектора, головних та додаткових полюсів, обмоток якоря та збудження).

6. Яку найменшу та найбільшу кількість затискачів може мати генератор постійного струму? Як вони маркуються?

7. Від чого залежить ЕРС генератора постійного струму?

8. Умови самозбудження генератора постійного струму?

9. Як протікає процес самозбудження генератора постійного струму?

10. Чому не може з'явитися режим самозбудження генератора постійного струму?

11. Від чого залежить напруга на затискачах генератора постійного струму?

12. Що називається характеристикою неробочого ходу генератора і як її отримати?

13. Що називається зовнішньою характеристикою генератора і як її отримати?

14. Які причини викликають зниження напруги на затискачах генератора при збільшенні навантаження?

15. Що називається регулювальною характеристикою генератора і як її отримати?

### **Лабораторна робота ОВЕ-6**

#### **РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА**

**Мета роботи:** Обрати вітроустановки відповідної потужності виходячі з потужності, яку необхідно покрити за рахунок ВЕУ та умов навколишнього середовища

#### **Програма роботи**

1. Для будь якого тримісячного діапазону для обраного міста розрахувати та побудувати:

- Визначити ймовірність швидкостей вітру для висоти флюгера 10 м та для висоти  $h_1 = N \cdot 3 + 15$  м;
- Побудувати графіки ймовірності швидкостей вітру для вказаних висот;
- Побудувати розу вітрів для 8-ми румбового діапазону зміни напрямів вітру;
- Обрати пріоритетний напрям орієнтації вітрогенератора.

2. Розрахувати потужність навантаження, яке буде покрито вітрогенераторною установкою.

- Задатися кількістю побутових приладів встановлених у Вас вдома;
- Визначити час роботи цих приладів (шаг дискретизації 30 хв/добу);
- Побудувати навантажувальну діаграму за добу;
- Визначити максимальну встановлену потужність у будівлі для часу, коли споживається найбільша енергія;

3. Розрахувати можливість використання обраного вітрогенератора для покриття навантаження:

- Вибрати вітрогенератор, який можливо встановити в даній місцевості;
- Розрахувати потужність, що буде вироблятися цим генератором та побудувати графік вироблення енергії генератором для будь якої доби з періоду, що раніше використовувався для розрахунків.
- Порівняти потужність що виробляється генератором для обраної доби з навантаженням, яке змінюється протегом цього періоду.

### **Порядок виконання завдання**

#### **Список літератури**

1. Півняк Г., Нойбергер Н., Шкрабець Ф., Циценков Д. Основи вітроенергетики. Підручник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2015. – 336 с.

2. Ivanov, O.B., Shkrabets, F.P., Zawilak, Jan. Electrical generators driven by renewable energy systems. Wroclaw University of Technology, Wroclaw, 2011 – 169 p.

## З М І С Т

<b>Основні правила безпечної роботи в лабораторії</b>	3
Лабораторна робота ОВЕ-1 <b>Дослідження трифазного синхронного генератора</b>	3
Лабораторна робота ОВЕ-2 <b>Дослідження паралельної роботи синхронного генератора</b>	12
Лабораторна робота ОВЕ-3 <b>Дослідження автономного асинхронного генератора з конденсаторним збудженням</b>	20
Лабораторна робота ОВЕ-4 <b>Дослідження паралельної роботи асинхронного генератора з мережею</b>	29
Лабораторна робота ОВЕ-5 <b>Дослідження генератора постійного струму паралельного збудження</b>	37
Лабораторна робота ОВЕ-5 <b>Розрахунок та вибір потужності вітрогенератора</b>	47
<b>Список літератури</b>	46

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
**до виконання лабораторних робіт**  
**з дисципліни «Основи вітроенергетики»**  
**для студентів спеціальності**  
**141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Автори:  
Цицленков Дмитро Володимирович  
Іванов Олексій Борисович

Підготовлено до виходу в світ  
у Національному технічному університеті  
«Дніпровська політехніка».  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842  
4960050, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19